

ISSN 1025-7683

中華民國自來水協會會刊



白

來

水

第19卷 第4期 (76)

中華民國八十九年十一月



高雄澄清湖

**WATER SUPPLY QUARTERLY**

Volume 19 NO.4 November 2000

Water Works Association of the Republic of China(Taiwan)



9 771025 768008

# 自來水會刊第十九卷第三期(76)目錄

## 實務研究：

- 以GC/MS儀器分析類似高雄有機溶劑污物之剖析……江弘斌 …… 3
- 粉狀活性碳控制水中有機性臭味之探討 ……洪旭文、林財富 …… 14

## 一般論述：

- 水資源的有效利用 ……謝發清 …… 38

## 感性園地：

陳耀楠先生其人其事——記台灣光復後自來水建設的

- 一位關鍵人物 ……于家駒 …… 47

- 懷念光復初期自來水基層工作者 ……姚關穆 …… 59

## 特 載：

- 自來水設施耐震工法指南及解說（二）下 ……蔡錦松 …… 62

## 自來水會刊雜誌稿約

- 一、本刊為中華民國自來水協會所發行，係國內唯一之專門性自來水季刊，每年二、五、八、十一月中旬出版，園地公開，誠徵稿件。
- 二、歡迎本會理監事、會員、自來水從業人員，以及設計、產銷有關自來水工程之器材業者提供專門論著、實務研究、一般論述、每期專題、業務報導、專家講座、他山之石、法規櫥窗、協會與你、會員動態、研究快訊、學術活動、出版快訊、感性園地等文稿。
- 三、惠稿每篇以三千至壹萬字為宜，特約文稿及專門論著不在此限。
- 四、本刊原則上不刊載譯文或已發表之論文。
- 五、「專門論著」應具有創見或新研究成果，「實務研究」應為實務工作上之研究心得（包括技術與管理），前述二類文稿請儘量附英文題目及不超過150字之中英文摘要，本刊將委請專家1~2人審查。「每期專題」由本刊針對特定主題，邀請專家學者負責籌集此方面論文予以並列，期使讀者能對該主題獲致深入瞭解。「專家講座」為對某一問題廣泛而深入之論述與探討。「一般論述」為一般性之研究心得。「業務報導」為國內自來水事業單位之重大工程或業務介紹。「他山之石」為國外新知或工程報導。「法規櫥窗」係針對國內外影響自來水事業發展重要法規之探討、介紹或說明。「研究快訊」為國內有關自來水發展之研究計畫期初、期中、期末報告摘要。「學術活動」為國內、外有關自來水之研討會或年會資訊。「出版快訊」係國內、外與自來水相關之新書介紹。「感性園地」供會員發抒人生感想及生活心得。「會員動態」報導各界會員人事異動。「協會與你」則報導本會會務。
- 六、惠稿請用稿紙繕正，如有圖表，請以黑墨繪製以便製版，其大小應顧及刊發後版面之清晰程度，所有圖表及照片以原件為佳，皆應附簡短說明，並依在文中出現之次序分別編號。
- 七、文章內所引之參考文獻，依出現之次序排在文章之末，文內引用時應在圓括號內附其編號，文獻之書寫順序為：期刊：作者，篇名，出處，卷期，頁數，年月。書籍：作者，篇名，出版，頁數，年月。機關出版名：編寫機構，篇名，出版機構，編號，年月。英文之作者姓名應將姓排在名之縮寫之前。
- 八、惠稿請註明真實姓名、通訊地址、服務單位及撰稿人之學經歷簡介與1吋照片一張，以利刊登，來稿文責由作者自負。
- 九、稿費標準為專門論著、實務研究、一般論述、每期專題、專家講座、法規櫥窗、他山之石、特載等文稿1200元/千字，「業務報導」為800元/千字，其餘為500元/千字，文稿中之「圖」、「表」如原稿為新製者500元/版面、如原稿為影印複製者，不予計費。
- 十、本刊係屬贈閱，如擬索閱，敬請來信告知收件人會員編號、姓名、地址、工作單位及職稱，或傳真(02)25042350會務組。本刊將納入下期寄贈名單。
- 十一、本會刊內容自88年5月⑩期起已公布於台灣省自來水公司全球資訊網站（www.water.gov.tw）歡迎各界參閱。

## 自來水會刊雜誌

發行所名稱：中華民國自來水協會

發行人：林學正

會址：臺北市長安東路二段一〇六號七樓

中華民國自來水協會編譯出版委員會

主任委員：陳榮藏

委員：劉家堯 陳梓濱 張順興 李泰雄 史午康 葉宜顯 蔣本基 廖述良 康世芳

謝永旭 陳重男 沈進宏 曾浩雄 李輝雄 林顯華 蘇金龍 李丁來 林孟臻

秘書：李丁來

總編輯：劉廷政

傳真：(02)25042350

電話：(02)25073832

副主任委員：劉廷政

編輯：林孟臻 李丁來

校對：古貞苓

電話：(04)2244191轉222

印刷：威文彩色印刷公司

出版地址：臺中市雙十路二段二號之一

行政院新聞局出版事業登寄證局版台誌字第2995號

中華郵政北台字第0473號執照登記為雜誌交寄

地址：台中市工業區23路2-1號

電話：(04)3586977

# 以GC/MS儀器分析類似高雄有機溶劑污染物之剖析

江弘斌\*黃瑞聰\*\*吳美炷\*\*\*

## 一、前言

本次高雄飲水受污染事件係不肖業者在水源上游棄倒有機廢液所致，水公司受創頗重。根據報載有機污染物包括廢油、有機溶劑（甲苯、二甲苯、乙基苯）、醃

胺、酚類、不詳臭味物質等。事實上現今的有機廢棄物種類可謂非常之多，要逐一找出全部有機污染物到底是何物可說相當困難或甚不可能，本次因能很快找到偷倒者及水中含有很普通的有機溶劑污染物，是以在水中有機溶劑部份很快被分析報導

表 1. 高雄水源污染事件水樣檢測結果（一）

採樣點	水樣	採樣日期	揮發性有機物含量
大樹攔河堰	原水	89/07/15	甲苯 568ppb 乙基苯 73.6ppb 二甲苯 171ppb 苯乙烯 17.7ppb 異丙基苯 4.4ppb 正丙基苯 2.0ppb 1,2,4-三甲基苯 2.1ppb 奈(naphthalene) 1.3ppb
大樹攔河堰（坪頂淨水廠）	清水	89/07/15	甲苯 2.8ppb 乙基苯 0.7ppb 二甲苯 3.0ppb 苯乙烯 1.2ppb 三鹵甲烷 5.4ppb
澄清湖一站（九曲堂）	原水	89/07/17	未檢出
大樹攔河堰	原水	89/07/17	未檢出

備註：

- \* 分析儀器為美國Tekmar Aquatek 50 Autosampler+Tekmar purge&trap concentrator 3000+Varian GC3400CX/MS Saturn3+Lemel 80486 DX2-S PC+HP Desk Jet 500C Printer
- \*\* 分析方法美國EPA524.2 Method.
- \*\* 水樣來源：台灣省自來水公司第七區管理處

#### 4 自來水會刊第十九卷第四期⑦

出來，至於其他的部份則很少有見報導。水質處研究組接到七區處寄來的水樣經吹捕裝置後進行GC/MS儀器分析，發現八十九年七月十五日大樹攔河堰水樣確實含有相當量的甲苯、二甲苯、乙基苯(表1)

，且當日坪頂淨水廠清水也含有有機溶劑(表1)，雖然濃度不高，卻顯示淨水場也受到波及，以後送來的水樣則已明顯改善(表2)，檢出的量大多為低含量或難以定量檢出。

表2. 高雄水源污染事件水樣檢測結果(二)

採樣點	水樣	採樣日期	揮發性有機物含量
坪頂淨水廠廠內	原水	89.07.24	未檢出
坪頂淨水廠廠內	清水	89.07.24	總三鹵甲烷 30.5ppb
坪頂(井腳路 94 號)	配水	89.07.24	總三鹵甲烷 2.9ppb
澄清湖淨水廠	清水	89.07.21	總三鹵甲烷 12.8ppb, 甲苯 1.5ppb
高屏溪拷潭淨水廠	原水	89.07.22	甲苯 1.0ppb
高屏溪拷潭淨水廠	清水	89.07.22	總三鹵甲烷 11.1ppb
拷潭路 40-13 號	配水	89.07.22	總三鹵甲烷 15.0ppb
高屏溪拷潭淨水廠	原水	89.07.23	未檢出
高屏溪拷潭淨水廠	清水	89.07.23	總三鹵甲烷 19.4ppb
仁德路 14-6 號	配水	89.07.23	總三鹵甲烷 20.6ppb
高屏溪拷潭淨水廠	原水	89.07.24	甲苯 1.6ppb
高屏溪拷潭淨水廠	清水	89.07.24	總三鹵甲烷 14.5ppb 甲苯 1.4ppb
拷潭路 40-13 號	配水	89.07.24	總三鹵甲烷 27.1ppb

## 二、GC/MS儀器

GC/MS儀器中，GC是氣體層析，MS是質譜分析。簡單的說係特定的有機物經由特定的層析管柱分離後，經質譜儀將分離的有機物在特定的條件下撞碎後，分析其碎片並將其加以定性或定量的分析儀器。GC/MS儀器依GC前配置不同、特定管柱之不同、及各部份設定條件之不同而進行不同有機物之分析。

目前水質處研究組擁有的GC/MS裝置配備為美國 Tekmar Aquqtek 50 Autosampler+Tekmar purge&trap concentrator 3000+Varian GC3400CX+MS Saturn3+Lemel 80486 DX2-SPC+HP Desk Jet 500C printer。可依USEPA Method 524.2(或Standard Method 6200B，或環保署Method NIEA W785.51B)將如表3之近60種揮發性有機污染物，一次篩檢完成。

有關辨識有機物能力：GC<GC/MS<GC/MS/MS。一般對於有機分析有涉獵的人常認為GC/MS已可確認被層析儀器分離的每一化合物，這個觀念並不完全正確。事實上經由該peak的質譜去與資料庫的標準質譜比對（Library Search）常會找出幾個符合性高的化合物，而GC/MS/MS可做進一步之確認。USEPA Method 524.2嚴格規定，不但有嚴格的BFB Tuning（4-bromofluorobenzene 調機）規範，亦提供了各析出化合物scan number 和retention time，各大儀器廠商亦提供了以它們自己的儀器進行USEPA Method 524.2分析的technical report可為參考及與library比對確認。GC/MS分析操作難度較高，最好由大專以上專業科系（研究所更佳），能閱讀瞭解英文操作手冊，分析方法，文獻技術資料，及有涉獵有機分析者為佳，此在建立自我檢測能力、分析調整、儀器診斷及初級維修時是重要的。

GC/MS儀器如能全時正常運轉，分析揮發性有機物，一天約可分析20個水樣，但因GC/MS儀器本身為高階儀器，加上前置濃縮器及自動採樣器組合，整個系統較複雜，設定之參數條件多，需要高度真空狀態，當機維修機率較高。水質處研究組曾經歷各種維修問題，有時儀器公司人員歷經數次維修仍不能完全解決問題，多年來經驗顯示儀器正常運轉時間低

於50%。有報導指出此種情形國內外頗為正常，而儀器正常運轉能達75-80%已屬優良。國內因專業維修人員之經驗能力因素及零件需購自國外，儀器正常運轉率低於國外，並且偏低，有些實驗室運轉時間曾有甚至低於10-15%者。

### 三、討論

水公司經歷本次水污染事件，雖外界指責頗多，七區處能及時禁止受污原水進入，表現出判斷智慧及果斷力。其實水污染事件防不勝防，水公司是受害者。欲防患污染物進入水公司淨水廠或水庫，要求第一線人員隨時注意檢測進水外觀、臭味和養魚試驗相當重要。

另外，歷經本次高雄水污染事件，筆者認為（i）環保署將會加速增訂飲用水中有機污染物之檢項（ii）水公司北、中、南相關檢驗室宜儘早建立對近60種揮發性有機物的篩測能力，以加強對水污染的檢測，進一步確保民眾飲水安全，及因應環保署未來之要求。水公司目前區檢驗室北、中、南配置有數台可檢測揮發性有機物的GC/ELCD+PID，以檢測飲用水水質標準中之三鹵甲烷及8個揮發性有機物檢項，事實上以該GC之配置是可以定性及定量EPA Method 502.2（或環保署Method NIEA W784.50C）中之近60種揮發性有機物（按：EPA Method 502.2和

表3. 台灣省自來水公司微量有機物調查一覽表

項目	英文名稱	中文名稱
IS(int standard)	Fluorobenzene	氟苯(為外加之內標準物, 非為污染物)
Sur(surrogate)	4-Bromofluorobenzene	4-氟溴苯(為外加之擬似標準物, 非為污染物)
Sur(surrogate)	1,2-dichlorobenzene-d4	1,2-二氯苯-d4(為外加之擬似標準物, 非為污染物)
4	Dichlorodifluoromethane	二氟二氯甲烷
5	Chloromethane	氯甲烷
6	Vinyl chloride	氯乙烯
7	Bromomethane	溴甲烷
8	Chloroethane	氯乙烷
9	Trichlorofluoromethane	一氟三氯甲烷
10	1,1-Dichloroethene	1,1-二氯乙烷
11	Methylene chloride	二氯甲烷
12	trans-1,2-Dichloroethene	反-1,2-二氯乙烷
13	1,1-Dichloroethane	1,1-二氯乙烷
14	cis-1,2-Dichloroethene	順-1,2-二氯乙烷
15	Bromochloromethane	溴氯甲烷
16	Chloroform	氯仿
17	1,1,1-Trichloroethane	1,1,1-三氯乙烷
18	1,1-Dichloropropene	1,1-二氯丙烯
19	Carbon tetrachloride	四氯化碳
20	Benzene	苯
21	1,2 Dichloroethane	1,2-二氯乙烷
22	Trichloroethene	三氯乙烷
23	1,2-Dichloropropane	1,2-二氯丙烷
24	Dibromomethane	二溴甲烷
25	Bromodichloromethane	一溴二氯甲烷
26	trans-1,3-Dichloropropene	反-1,3-二氯丙烯
27	Toluene	甲苯
28	cis-1,3-Dichloropropene	順-1,3-二氯丙烯
29	1,1,2-Trichloroethane	1,1,2-三氯乙烷
30	1,3-Dichloropropane	1,3-二氯丙烷
31	Tetrachlorethene	四氯乙烷
32	Dibromochloromethane	二溴一氯甲烷
33	1,2-Dibromoethane	1,2-二溴乙烷
34	Chlorobenzene	氯苯
35	1,1,1,2-Tetrachloroethane	1,1,1,2-四氯乙烷
36	Ethylbenzene	乙基苯
37	m,p-Xylene	間,對甲苯
38	o-Xylene	鄰-甲苯
39	Styrene	苯乙烯
40	Bromoform	溴仿
41	Isopropylbenzene	異丙基苯
42	1,1,2,2-Tetrachloroethane	1,1,2,2-四氯乙烷
43	1,2,3-Trichloropropane	1,2,3-三氯丙烷
44	Bromobenzene	溴苯
45	n-Propylbenzene	正-丙基苯
46	2,-Chlorotoluene	2-氯甲苯
47	1,3,5-Trimethylbenzene	1,3,5-三甲基苯
48	4-Chlorotoluene	4-氯甲苯
49	tert-Butylbenzene	tert-丁基苯
50	1,2,4-Trimethylbenzene	1,2,4-三甲基苯
51	sec-Butylbenzene	異-丁基苯
52	4-Isopropyltoluene	4-異丙基甲苯
53	1,3-Dichlorobenzene	1,3-二氯苯
54	1,4-Dichlorobenzene	1,4-二氯苯
55	n-Butylbenzene	正-丁基苯
56	1,2-Dichlorobenzene	1,2-二氯苯
57	1,2-Dibromo-3-chloropropane	1,2-二溴-3-氯丙烷
58	1,2,4-Trichlorobenzene	1,2,4-三氯苯
59	Hexachlorobutadiene	六氯丁二烯
60	Naphthalene	奈
61	1,2,3-trichlorobenzene	1,2,3-三氯苯

EPA Method 524.2分析的有機物是一樣的，而前者是使用ELCD+PID detector，分析圖例如附圖1，後者則使用mass detector，分析圖例如附圖2，水質處研究組建立之5ppb標準圖譜如附圖3）。各相關區檢驗室近期內宜在相關儀器公司（如HP, Varian...）協助下，建立以GC/ELCD+PID定性及定量檢驗近60種揮發性有機物的能力，未來亦可視需要編列預算購入GC/MS。高屏河流域廣闊，遭污染的機會多，大高雄地區人口又多，可優先列入考慮增購GC/MS，並建立分析能力，以篩測近60種揮發性有機物。

近60種揮發性有機物（事實上，EPA Method 524.2 Revision4.0已增列至共83種有機物，新增有些較不穩難測）之共混合標準品可由SUPELCO或其他公司購得，另SUPELCO公司亦有將其分類為6種mix分售者，其中VOC Mix 6為高度揮發性有機物，一瓶Vial打開後很快濃度即大幅降低，無法再為標準品或查核樣品，是以筆者建議標準品購入時最好購入共混合之標準品為宜，在標準曲線建立後，原Vial留存者可做為以後的查核樣品（或查核標準品）用途，雖然理論上查核樣品要用獨立的一瓶。至於Mix 6的每次查核檢測需新開一瓶VOC Mix 6 Vial來測試。唯依上述方式進行非常昂貴，因為VOC Mix 6 Vial已是很貴，共混合標準品則更昂貴。而且

日積月累冰箱會累積一大堆瓶瓶罐罐，造成冰箱及環境污染、廢棄物處理問題且實際上在浪費外匯。一個變通的做法為經常檢查內標準物的Q ion峰面積穩定度或check sample中較不會揮發之穩定化合物之回收率作為檢視的指標即可。

GC/ELCD+PID儀器與GC/MS儀器宜放在同一間儀器分析室，前者在定量分析的能力佳，而後者在定性分析的能力上則優於前者，惟需置於冷度夠的實驗室最好在22°C以下，實驗室亦最好低塵且獨立以避免各實驗室間有機物之污染（organics carryover），實驗室最好亦要有對外抽風設備。有關carryover污染，本分析實驗室最近即有遭遇到一次寶貴經驗，建築物外牆油漆導致瀰漫於空氣中之甲苯進入blank water中，造成carryover污染，blank sample一直都有甲苯，經多次檢討，將分析實驗室回復至常溫30°C左右，並以電風扇、抽風機歷經三天處理，再將blank water倒掉、淋洗、烘乾處理後，方將blank water sample降至正常方法偵測極限以下，此經驗實值有興趣人士參考。

另外值得一提的是，新的PVC接管往往都含有相當濃度的甲苯，本次高雄水污染事件後，水公司為加強原水養魚生物監測之預警能力，少數新裝或新接修復的PVC導水管或養魚箱均發現水中甲苯濃度異常增高的現象。事實上早在數年前水公

司水質處研究組實驗室因原室內供水管線漏水而改接PVC明管，已發現剛接明管中有明顯化學味，經以GC/MS篩測後發現有高濃度甲苯，後經查明係PVC塑膠管接合時使用含甲苯溶劑之黏著劑（Vinyl adhesive）之故，除此之外亦發現有氯乙烯（Vinyl Chloride）單體蹤跡。因此當新房子開始通水使用時，實需考量將新水排放不要飲用。任何有使用Vinyl adhesive的PVC塑膠小管也應建立此種觀念。而水公司PVC塑膠較大管線通水前亦應進行通洗管線處理（見參考資料9）。

#### 四、結論與建議

1. 水污染事件防不勝防，欲防患污染物進入水公司淨水廠或水庫，要求第一線人員隨時注意檢測進水外觀、臭味和養魚試驗，雖然簡單卻相當重要。
2. GC/ELCD+PID及GC/MS均能定性及定量檢驗近60種揮發性有機物，前者定量能力佳，後者定性能力則較好。二者最好置於同一而獨立之實驗室，溫度在22℃以下、低塵、避免如carryover等污染。
3. 各相關區檢驗室宜在水質處檢驗組輔導下儘早建立篩檢這些污染物之能力，進一步確保飲水安全及為因應環保署需求做準備。如同時具有GC/ELCD+PID及GC/MS儀器之區檢驗室，應由同一人

操作之而適度減少這個人其他檢驗工作量。

4. 高屏溪流域廣闊，遭污染的機會多，大高雄地區人口又多，可優先列入考慮增購GC/MS。
5. 辨識有機物能力：GC < GC/MS < GC/MS/MS，而在實務上GC/MS已可兼顧定性及定量分析
6. 本機如能全時正常運轉，一天約可分析20個水樣，但因GC/MS儀器本身為高級儀器，加上前置濃縮器及自動採樣器組合，設定參數條件多，整個系統較複雜，需高度真空狀態，控制因素多，當機維修機率高。水質處研究組經驗顯示儀器正常運轉時間低於50%。

#### 五、致謝

感謝Varian台灣分公司呂禮清先生在GC/MS儀器方面之維修。

#### 後記

美國EPA建立的EPA 500 series Methods “Methods for the Determination of Organic Compounds in Drinking Water”中可檢測甲苯、二甲苯、乙基苯、苯乙烯者包括EPA Method502.2，EPA Method524.2，EPA Method503.1，其中前二者可分析的項目較多，後者可分析的項目較少。前二者的相關檢驗方法行政院環

保署已公告。包括上述的揮發性有機污染物，美國EPA規定每季／每年檢測乙次；經一年後如未檢測到，每年檢測乙次；經三回檢測後，如未檢測到，每三年檢測乙次。美國EPA對甲苯、二甲苯、乙基苯、苯乙烯之致癌性分類及飲水標準之MCL (maximum contaminated level) 值如表4。

有關揮發性有機物資料等，筆者在自來水會刊已曾撰文（參考資料1）介紹和警告過，台灣果不然不幸發生此等污染事

件，有興趣讀者可參閱之。政府有關單位除應重視立法和管制（上游）外，更應重視各種廢棄物液有管道有出路可棄置可處理（下游），政府相關單位亦應輔導有意願之廠商且使其有利可圖（必要時甚至動用各種污染防治費、稅等補貼之），不然今後類似的污染事件會一再發生，且可能越來越嚴重。自來水業者亦應儘早發展預警、檢測、處理技術，以進一步確保飲用水安全。

表4. 美國EPA對致癌物的分類及有機污染物分屬及飲水水質標準：

類別 (Category)	經攝入後之致癌性	US 最大限值 MCL(mg/L)
I Group A Group B1, B2	強烈證據	
II Group C	有限證據	苯乙烯： 0.1mg/L
III Group D, E	無適當或動物證據	乙基苯： 0.7 mg/L 甲苯： 1.0 mg/L 二甲苯： 10 mg/L

## 參考資料

1. 江弘斌，揮發性有機物，自來水會刊，51, 66 (民國83年8月17日)。
2. 江弘斌，吳美炷，黃瑞聰，潘永得，水中微量污染物之分析及去除之研究，台灣省自來水公司 (民國87年7月)。
3. 環保署(86)環署檢字第64286號，NIEA W784.50C，飲用水中揮發性有機化合

物檢測方法—吹氣捕捉毛細管柱氣相層析法／串聯式光離子化偵測器及電解導電感應偵測器檢測法(民國86年11月14日)。

4. 環保署(89)環署檢字第14989號，NIEA W785.51B，水中揮發性有機化合物檢測方法—吹氣捕捉／氣相層析質譜儀法 (民國89年3月22日)。

5. EPA 500 series Methods “Methods for the Determination of Organic Compounds in Drinking Water” , National Technical Information Service, Springfield, VA (1991).
6. EPA Method 524.2. Measurement of Purgeable Organic Compounds in Water by Capillary Column Gas Chromatography/Mass Spectrometry, Revision 4.0, Environmental Monitoring Systems Laboratory, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio (1992).
7. Standard Method 6200B, Volatile Organic Compounds—Purge and Trap Capillary-Column Gas Chromatographic/Mass Spectrometric Method, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20th Edition, APHA, AWWA, AEF, Washington, DC (1998).
8. EPA 40 CFR Parts 141, 142, 143, National Primary Drinking Water Regulations; Final Rule, Fed. Reg., 56:20:3525 (Jan. 30, 1991).
9. 江弘斌, “供水管線及貯槽造成之臭味問題”, 台水月刊, 10:2:13 (1992)。

# Purgeable Halocarbon and Aromatics

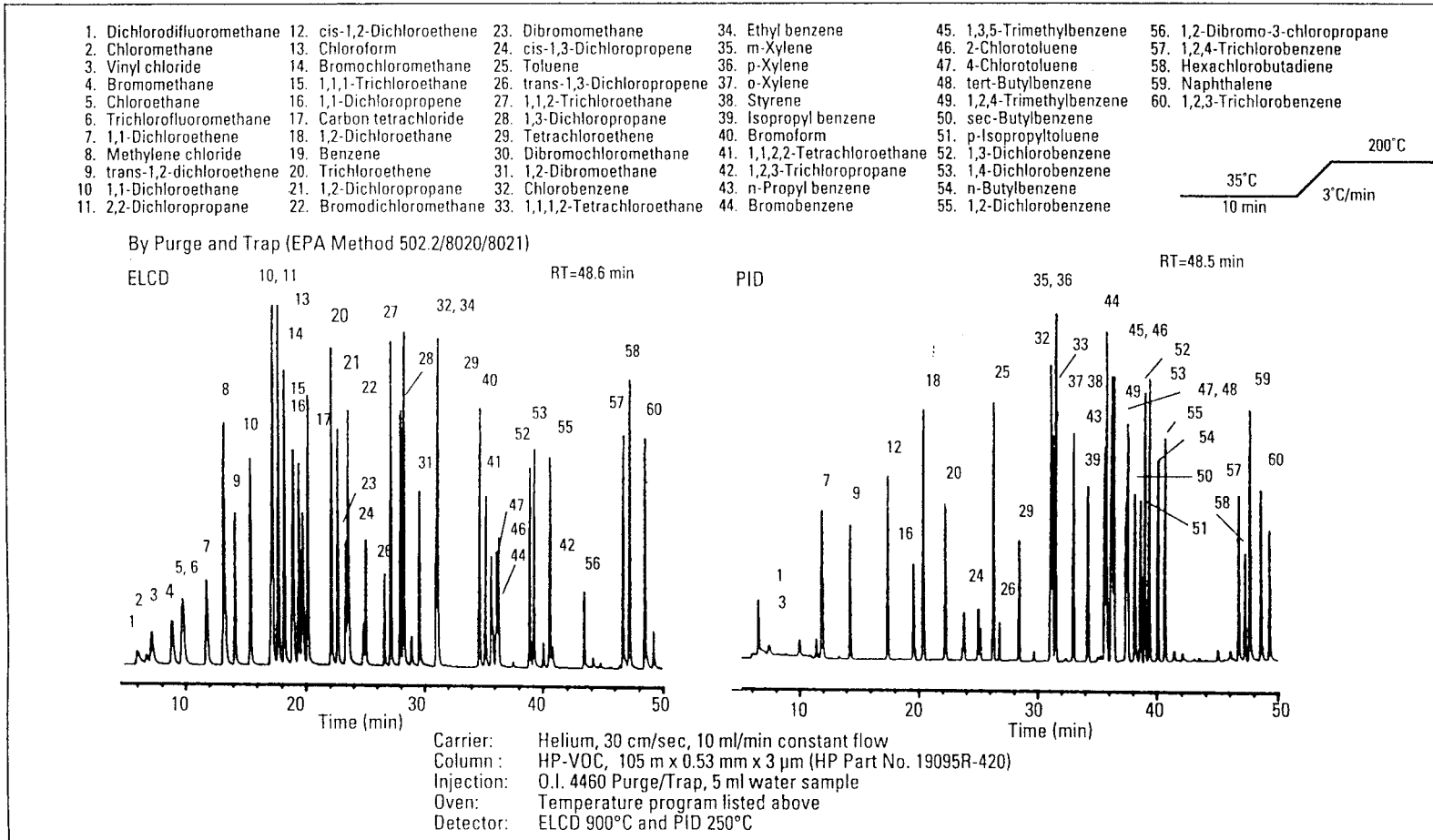
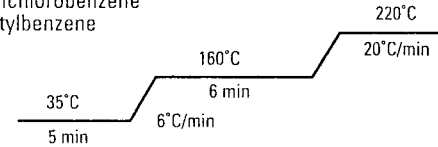


圖 1. 典型HP GC/ELCD+PID儀器依EPA Method 502.2分析所得之圖譜

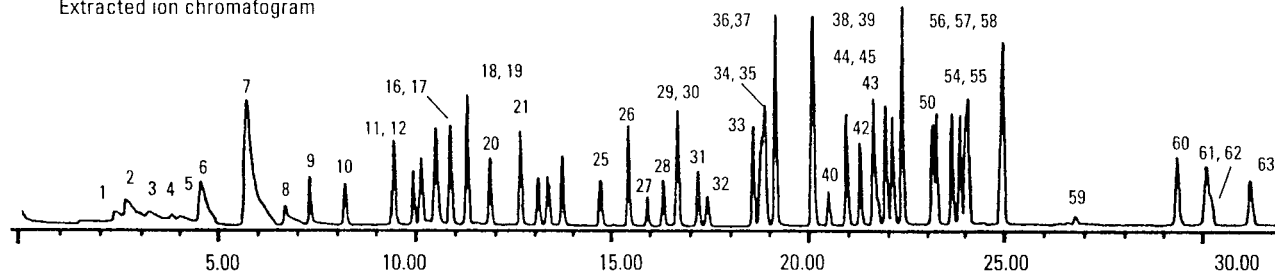
## Purgeable Organic Compounds

- |                             |                               |                               |                                 |                                 |
|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 1. Dichlorodifluoromethane  | 16. 1,1-Dichloropropene       | 31. Dibromochloromethane      | 46. n-Propylbenzene             | 59. 1,2-Dibromo-3-chloropropane |
| 2. Chloromethane            | 17. Carbon tetrachloride      | 32. 1,2-Dibromomethane        | 47. 2-Chlorotoluene             | 60. 1,2,4-Trichlorobenzene      |
| 3. Vinyl chloride           | 18. Benzene                   | 33. Chlorobenzene             | 48. 4-Chlorotoluene             | 61. Hexachlorobutadiene         |
| 4. Bromomethane             | 19. 1,2-Dichloroethane        | 34. 1,1,1,2-Tetrachloroethane | 49. 1,3,5-Triethylbenzene       | 62. Naphthalene                 |
| 5. Chloroethane             | 20. Fluorobenzene ISTD        | 35. Ethylbenzene              | 50. tert-Butylbenzene           | 63. 1,2,3-Trichlorobenzene      |
| 6. Trichlorofluoromethane   | 21. Trichloroethene           | 36. m-Xylene                  | 51. 1,2,4-Trimethylbenzene      |                                 |
| 7. 1,1-Dichloroethene       | 22. 1,2-Dichloropropene       | 37. p-Xylene                  | 52. sec-Butylbenzene            |                                 |
| 8. Methylene chloride       | 23. Dibromomethane            | 38. o-Xylene                  | 53. 1,3-Dichlorobenzene         |                                 |
| 9. trans-1,2-Dichloroethene | 24. Bromodichloromethane      | 39. Styrene                   | 54. 4-Isopropyltoluene          |                                 |
| 10. 1,1-Dichloroethane      | 25. cis-1,3-Dichloropropene   | 40. Bromoform                 | 55. 1,4-Dichlorobenzene         |                                 |
| 11. 2,2-Dichloropropane     | 26. Toluene                   | 41. Isopropylbenzene          | 56. 1,2-Dichlorobenzene-d4 SURR |                                 |
| 12. cis-1,2-Dichloroethene  | 27. trans-1,3-Dichloropropene | 42. 4-Bromofluorobenzene SURR | 57. 1,2-Dichlorobenzene         |                                 |
| 13. Bromochloromethane      | 28. 1,1,2-Trichloroethane     | 43. Bromobenzene              | 58. n-Butylbenzene              |                                 |
| 14. Chloroform              | 29. Tetrachloroethene         | 44. 1,1,2,2-Tetrachloroethane |                                 |                                 |
| 15. 1,1,1-Trichloroethane   | 30. 1,3-Dichloropropene       | 45. 1,2,3-Trichloropropene    |                                 |                                 |

By Purge and Trap (EPA Method 524.2/6234/8260)



Extracted ion chromatogram



Carrier: Helium, 8.5 ml/min  
 Column: HP-624, 30 m x 0.53 mm x 3 μm (HP Part No. 19095V-423)  
 Injection: Use jet separator (HP Part No. 59913A, #007)  
 Oven: Temperature program listed above  
 Detector: MSD

Pub No.: 23-5091-0677, 23-5091-2477E, 43-5091-5909

圖2. 典型HP GC/MS儀器依EPA Method 524.2分析所得之圖譜

Chromatogram Plot

C:\SATURN\WW88\WW88ST\5-0PPB

07/21/99 14:08:05

Comment: 1999/07/21 RUN ST 5.0PPB

Scan: 3 Seg: 1 Group: 0

Retention: 0.03

RIC: 0

Masses: 0-0

Plotted: 1 to 2571

Range: 1 to 2571

100% = 801455

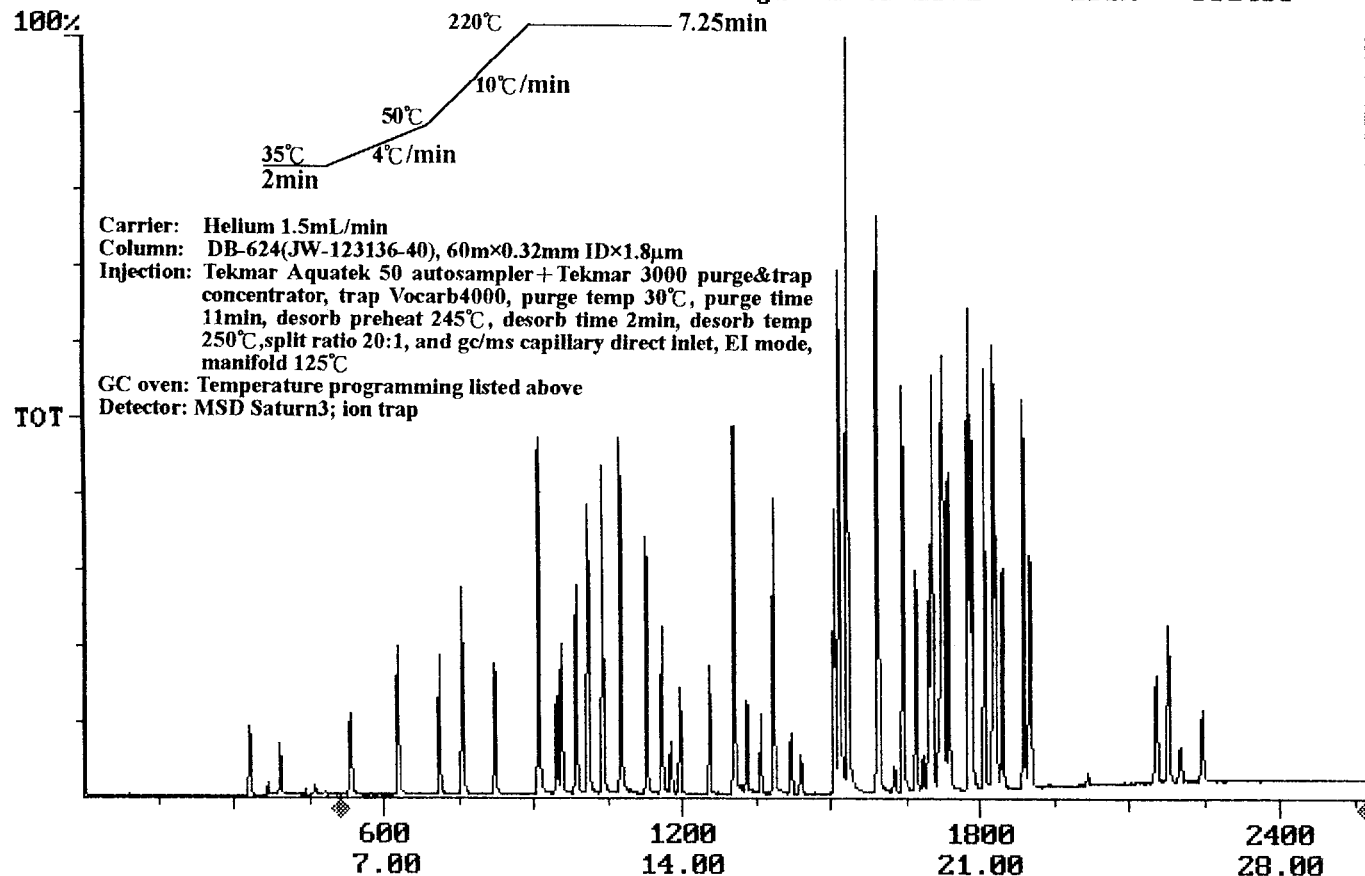


圖3. 典型Varian GC/MS儀器依EPA Method 524.2分析所得之圖譜

## 粉狀活性碳控制水中有機性臭味之探討

洪旭文\*\*、林財富\*

### 一、背景說明

#### 1. 前言

自來水臭味問題在歐、美、日、台灣及許多其他國家，常是民眾抱怨的問題 [Bruchet et al., 1998; 陳氏, 1982; 陳氏, 1993; 高氏, 1998; 汪氏, 2000]。長久以來民眾往往根據自己主觀的味覺和味覺去判斷飲用水是否受到毒性物質的污染。自來水中臭味物質的存在，雖然不一定影響人體健康，但往往民眾會主觀認為飲用水遭到污染，造成民眾對於飲用水安全的不必要的擔心與抱怨。尤其在南台灣地區就有很多民眾不喜歡自來水的味覺及嗅覺，改買包裝水或是加裝家庭式飲水機飲用，不僅浪費金錢而且造成飲用水管理上的問題。

根據國內學者的研究，台灣地區約有一半的水庫被懷疑水中有臭味 [Hu, 1998]，其中以土臭味、魚腥味及氯味最為常見 [洪氏, 1998; 高氏, 1998; 汪氏, 2000]，尤其是南台灣地區如澄清湖、東港溪及鳳山水庫。自來水中的氯味主要是

由加氯消毒所產生，一般水中餘氯超過 0.15 mg/L 以上時民眾即可感受到氯味的存在 [Bruchet, 1998]。土臭味及魚腥味則會隨季節變化而有所改變 [陳與曾, 1986; 溫氏, 1995a,b; 高與林, 1998; 汪氏, 2000]，且與水中藻類種類的數量有明顯關係。根據研究魚腥味主要於冬天出現，而土臭味則常見於夏天發生。

另一方面，自來水中的臭味物質也包括因為人為污染所產生的化學臭味，例如二甲苯等有機化合物。由於自來水中的化學臭味大部分是無預警的傾倒或排放，加上此類化學物質大部分對人體健康有嚴重的影響，所造成的影響往往遠大於上述之氯味、魚腥味與土臭味。今年7月中旬旗山溪即遭受不法廢棄物清除/處理業者傾倒廢有機溶劑 (主要以酚、甲苯、二甲苯及乙苯等)，造成坪頂、拷潭及澄清湖三個淨水場遭受污染，停止供應民生用水，估計有高雄市左營、北鼓山、旗津、前鎮、小港等地區以及高雄縣鳳山、大樹、大寮、林園、五甲及一些地勢較高之地區的六十萬用戶受到影響，減少民生用水約

\* 成功大學環工系副教授

\*\* 成功大學環工系博士班研究生

二十萬噸，所造成的損失無法估計。

自來水中的氯味一般可藉由消毒劑劑量或改變消毒劑種類控制，改變加氯位置或是改用臭氧消毒皆能減低氯味的產生；魚腥味可藉由氧化劑（例如加氯）的方式去除；土臭味則一般傳統處理方法無法有效去除。由於目前國內自來水廠處理程序絕大部分仍屬於傳統方法，對於水中造成土臭味的物質無法有效去除，必須藉助高級處理程序方能達到處理效果。

因此本文將以國內自來水中最常見且最難控制之土臭味為代表性臭味物質，根據國內外文獻回顧各種控制方法的優劣，並說明粉狀活性碳控制方法及優點，最後介紹活性碳預測理論模式（平衡及動力模式）及活性碳添加劑量決定方法；文中也將同時探討引起大高雄地區停水之化學臭味物質（二甲苯）以粉狀活性碳控制之可行性。

## 2. 代表性有機臭味化合物介紹

水中的臭味問題，在各個地方有不同的成因，所形成的臭味種類也不同。圖1為Suffet等人（1999）所提出的臭味輪（Taste and Odor Wheel）。在眾多飲用水臭味物質中，最常被發現及民眾描述抱怨的是土臭味（Earthy）或是土霉味（Musty），表1自來水中常見各種的土臭味及可能造成此種臭味的化學物質，表2其物化性質

比較。

常見引起土臭味物質之化合物為2,3,6-Trichloroanisole (TCA)、2-Isopropyl-3-methoxy pyrazine (IBMP)、2-Isobutyl-3-methoxy pyrazine (IPMP)、trans-1,10-Dimethyl-trans-9-decalol (Geosmin)及2-Methylisoborneol (2-MIB)，其物化特性參見表1及表2。而最常在水體中存在發現的是Geosmin及2-MIB [Graham et al., 2000; Gillogly et al., 1998; Chen et al., 1997; 高氏, 1998; 汪氏, 2000; 汪與林, 2000]。事實上國內南部數個水場也曾分別發現在原水及清水中有該二種化合物的存在 [高氏, 1998; 汪氏, 2000; 汪與林, 2000]。二甲苯則是會造成化學性臭味，其資料亦列於表1及表2中。由表中得知土臭味化合物之臭味恕限值皆落於奈克/公升 (ng/L) 的等級，在極低濃度狀況下就可以被人聞到，且由於分子本身具有苯環結構，對於化學氧化具有一定的抵抗力，且亨利係數值偏低，不易藉由空氣氣提趕出，造成去除不易。二甲苯則有鄰、間及對二甲苯三種異構物存在，其臭覺閾值介於20至1800微克/公升 ( $\mu\text{g/L}$ ) 之間，較美國管制標準低5-500倍 (10 mg/L)。

## 3. 處理方法

傳統處理程序的臭味去除效果，例如混凝、沈澱、過濾等去除效果不佳，常用

之臭味控制技術包括有水源控制、高級氧化、生物處理及活性碳吸附等各種方法。

水源控制方法包含兩部分，其一是控制進入水源中之氮磷養份及其他會引起臭味的污染物，以減少水庫中臭味污染物的量並進而減少藻類的繁殖；另外一種方法是在水源中使用物理、化學或生物的方法達到減少水中藻類的含量 [Suffet et al., 1995a]。

高級氧化法主要係加入強氧化劑破壞或氧化臭味物質，常用之氧化劑有氯氣、高錳酸鉀、臭氧等方式 [Glaze et al., 1990; Duguet et al., 1995; Atasi et al., 1999; 李與陳, 1985]，Lalezary 等人 (1986a) 曾探討利用五種不同高級氧化程序 (Oxidation Process) 去除土臭味化合物之研究。該研究中探討淨水程序中常用之氯、二氧化氯、臭氧及過錳酸鉀消毒劑/氧化劑對 TCA、IBMP、IPMP、Geosmin及2-MIB等5種土霉味化合物去除率，結果顯示使用二氧化氯氧化具有較佳去除效率，在相同操作條件下之去除效率皆為IBMP > IPMP > TCA > Geosmin > 2-MIB。但總體而言，上述方法仍無法有效控制土臭味物質。

使用不同的氧化劑或多或少均有其缺點，加氯氧化會殘存消毒劑的臭味，若產生其他副產品則會有不同的臭味，例如氯酚、碘仿及三鹵甲烷等均會有不同的臭

味，且會將水中氨基酸轉換成帶有沼澤味或泳池味的低碳醛類 [Froese et al., 1999]。一般而言，氯對魚腥味及沼澤味之去除效果較佳，但對於造成土臭味的 Geosmin及2-MIB則去除效果不好。氯對於其他臭味也會產生遮蔽效應，造成清水中味道減輕，但至用戶家中因氯消耗掉，因此味道又出現 [Duguet et al., 1995]。高與林 (1998) 及汪與林 (2000a) 於港西及鳳山淨水廠亦發現類似的現象，土臭味物質 2-MIB在含餘氯的流程單元中會被遮蔽，但其中2-MIB濃度並未改變。

高錳酸鉀氧化也常被用於去除水中臭味 [Glaze et al., 1990; Suffet et al., 1995; 李與陳, 1985]，在美國有48%的水廠使用高錳酸鉀去除水中臭味 [Ficek and Vella, 1998]，有85%的水廠覺得有效。然而高錳酸鉀對於魚腥味 (fishy)、腐敗味 (septic)、青草味 (grassy)、瓜味 (cucumber) 等較有效，但對於土臭味則效果較低，惟高錳酸鉀若與粉狀活性碳合併使用，則效果大增 [Ficek and Vella, 1998]。另外，使用高錳酸鉀氧化時也會形成二氧化錳的沉澱物，吸附臭味物質在沉澱物上，增加去除率 [Lalezary et al., 1986a]。國內成大李俊德教授等人 [李與陳, 1985] 亦曾對澄清湖原水進行臭味去除研究，結果顯示高錳酸鉀對魚腥味去除較有效 (1 mg/L劑量，TON降低68%)，但

對土臭味則效果較差。

臭氧氧化除可較氯減少三鹵甲烷產生外，其對臭味物質的去除效果也較氯為佳 [Glaze et al., 1990; Gramith, 1995; Atasi et al., 1999]，對於魚腥味 (2,4-decadienal) 及沼澤味 (dimethylsulfide) 化合物，在臭氧濃度為4 mg/L情況下去除效果可達75-99%。但對土臭味物質 (Geosmin 及2-MIB) 在相同劑量下則僅有40-80%去除效果 [Glaze et al., 1990]。但Atasi等人 (1999) 發現在使用原水測試情況下，土臭味物質 (Geosmin、2-MIB 及IPMP) 去除效果明顯較Glaze et al. (1990) 為佳，在臭氧劑量為2 mg/L情況下，去除效果可達80-95%，而魚腥味及青草味物質則更容易去除，土臭味物質中則以2-MIB最難去除。使用臭氧除了會產生溴酸鹽 (Bromate) 外，也會產生一些醛及酮類副產品，這些副產品常成水果味、芳香味 (直鏈醛)、汗臭味 (側鏈醛) 等 [Gramith, 1995]。此外，臭氧也曾被記載會將魚腥味轉換成塑膠味 [Hargesheimer et al., 1996]。

若傳統處理程序中有生物作用存在時，亦有部分臭味降低效果，但單純使用生物處理的處理方法仍未成熟 [Rittmann et al., 1995]。McGuire (1999) 也說明生物處理也有去除臭味的成效，而Eugashira等人 (1992) 發現以生物濾床去除2-MIB時，其去除機制成一階反應，且與水溫及pH

值有很大的關係。然而，汪與林 (2000) 發現港西淨水場中之旋轉生物盤法 (Rotating Biological Contactor, RBC) 對2-MIB則無去除效果。

活性碳吸附法則廣泛地被應用於臭味物質的去除，尤其是土臭味物質 [Suffet and Wable, 1995b; Hargesheimer and Waston, 1996; Chen et al., 1997; Gillogly et al., 1999; Graham et al., 2000]。活性碳對於土臭味化合物如Geosmin、2-MIB、TCA、IPMP、IBMP等之去除效果均甚良好，且對於其他臭味物質之去除，如消毒劑味、芳香味、葯水味及碳氫化合物的臭味，均有良好之效果，接在臭氧程序後也可以保證除去臭氧副產物的臭味 (Suffet and Wable, 1995b)。

Herzing等人 (1977) 探討粒狀及粉狀兩種不同活性碳吸附Geosmin及2-MIB兩種土臭味物質的可行性。研究結果顯示，活性碳能有效吸附控制兩種化合物濃度低於嗅覺閥值且溶液的pH值似乎對活性碳吸附效果沒有重大影響，而腐植酸物質對活性碳吸附Geosmin和2-MIB產生競爭現象，減少活性碳的吸附量。Lalezary等人 (1986b) 探討活性碳去除土臭味物質之可行性，結果顯示，活性碳對五種土臭味物質吸附量依序為TCA、IBMP、IPMP、Geosmin、2-MIB，其中2-MIB化合物的吸附量遠低於其他四種土臭味化合物。

Pirbazari等人 (1993) 則針對粒狀活性碳吸附塔吸附Geosmin及2-MIB臭味物質進行研究，並首先提出延散流均勻表面擴散模式 (Dispersed Flow Homogeneous Surface Diffusion Model, DFHSDM) 模擬及預測活性碳吸附量，作為設計活性碳吸附塔的參考準則。Chen等人 (1997) 則進一步針對粒狀活性碳吸附低於飲用水中的2-MIB臭味閾值濃度 (約18-20 ng/L) [Persson, 1980] 進行研究。該研究是文獻上首先針對低於臭味閾值濃度之土臭味物質進行探討，作者並與文獻上記載高濃度活性碳吸附等溫吸附線比較。

綜合以上討論可得知，在常見之處理方法中，以活性碳或臭氧/活性碳的處理方法對臭味之去除較為有效，在水廠使用案例也最多。由於使用時機及成本差異，本研究將介紹粉狀活性碳之處理方法及其應用。

#### 4. 粉狀活性碳處理方法及使用時機

粉狀活性碳 (Powdered Activated Carbon, PAC) 已經廣泛應用在飲用水處理程序中，尤其對微量有機物去除效果更是卓越，例如臭味物質或是水中揮發性有機物的控制。通常粉狀活性碳用於非常態性的臭味處理問題，當飲用水發現臭味處理問題或是人為污染/化學洩漏時再施加。例如費城自來水處理廠1985年就已經利用

添加PAC來控制自來水中突如其來的連續偏高Geosmin濃度，以減低飲用水中的臭味值 [Burlingame et al., 1985]；今年7月中旬高雄縣旗山溪遭受不法廢棄物清除/處理業者傾倒廢有機溶劑，水公司可選擇使用粉狀活性碳當緊急應變措施，去除自來水中之化學性臭味及揮發性有機物質，而其添加劑量若使用適當之實驗與模式先求得，則更可增加效率並減少活性碳使用量。

一般而言，粉狀活性碳之設置成本遠較臭氧及粒狀活性碳等高級處理程序低，相當接觸時間下，吸附量更可達粒狀活性碳 (Granular Activated Carbon, GAC) 的六倍左右 [Snoeynik et al., 1998]。以美國芝加哥市淨水場評估以高級處理程序除臭為例，粒狀活性碳系統設置成本為5千萬美元，臭氧系統設置成本為6千1百萬至8千7百萬美元間，而粉狀活性碳系統設置則僅需1千5百萬美元 [Butterworth, 1998]。但若經常使用且使用劑量超過20 mg/L以上時，則應該使用粒狀活性碳吸附塔。

以台灣目前多數水源土臭味問題的情況考慮，且在短時間內應無法投入大量經費全面建立臭氧活性碳或薄膜處理程序考慮，加上國內不法廢棄物清除/處理業者制度尚未完全落實，廢棄物未能全完進入最終處理管道中，粉狀活性碳技術以去除有機性臭味 (土臭味物質及化學性臭味)

不失為一個可行且較經濟的處理方式。

## 二、理論介紹

使用粉狀活性碳技術預測自然水中有機性臭味去除效率時，必須瞭解影響活性碳添加劑量之因子，同時對必須知道活性碳之平衡及動力參數，才能設計高去除效率、高信賴度的活性碳吸附設施。以下將針對文獻中活性碳添加劑量之影響因子、平衡理論模式、預測平衡吸附量方法及吸附動力進行討論及分析。

### 1. 活性碳添加劑量之影響因子

在影響活性碳添加劑量的因素部份，許多研究顯示粉狀活性碳能有效地將土臭味物質吸附控制到合理的程度 [Herzing et al., 1977, Lalezary et al., 1988; Gillogly et al., 1999; Graham et al., 2000]，活性碳對五種土臭味物質吸附量依序為TCA、IBMP、IPMP、Geosmin、2-MIB，其中2-MIB化合物的吸附量遠低於其他四種土臭味化合物，也較常被偵測發現 [Lalezary et al., 1986b]。因此，有許多研究以2-MIB作為探討的代表物質。影響活性碳添加劑量之因子有天然有機質及溶解性疏水有機物、餘氯濃度及pH值等，以下分別介紹：

(1) 自然水中往往存在天然有機質 (Natural Organic Matter, NOM) 或溶解性

疏水有機物，其濃度 (通常在mg/L等級) 往往較臭味物質 (通常在 $\mu\text{g/L}$ 等級) 高出數個數量級，會與Geosmin和2-MIB產生競爭吸附現象，減少活性碳的吸附量可達一個數量級左右 [Graham et al., 2000]，造成活性碳劑量必須增加數倍才能達到相同處理效果 [Lalezary et al., 1988]。由於各個地區水質的差異性，造成天然有機質 (NOM) 或溶解性疏水有機物皆不相同，且很難用層析的方法分離及確認分子量大小。

(2) 水中餘氯濃度也會影響活性碳之添加劑量，餘氯會氧化活性碳表面吸附官能基，造成活性碳有機物吸附量降低，尤其在低活性碳添加劑量及高有機物濃度時影響最大 [Lalezary et al., 1988]。Gillogly等人 (1998) 進一步指出水中餘氯不只會造成活性碳吸附能力的降低，更可能會使已經吸附在活性碳上的2-MIB釋放到水中，造成濃度的上升。因此在應用活性碳處理臭味問題時，為求得PAC處理及加氯消毒的最大去除效率/效果，兩個流程的相互接觸時間應該要限制或是盡量縮短。研究中也發現主要的餘氯影響因子為所施加的餘氯濃度總量，一定數量的餘氯分成數次添加或一次添加似乎並不是一個重要因素。另外，水中的消毒副產物 (DBPs) 似乎對PAC吸附2-MIB沒有產生競爭吸附現象。Snoeyink等人 (1998) 發現

Hydroarco-B活性碳劑量為11.5 mg/L，在無氯情況下2-MIB去除效果為67%，但若餘氯與活性碳劑量比在0.5、1及2的情況下，則去除率降低為50%、30%及16%。由於台灣地區幾乎大部分淨水廠處理程序皆有前加氯及後加氯，可能會造成水中餘氯濃度影響活性碳吸附量的機率很大。

(3) 溶液的pH值似乎對活性碳在純水中吸附效果沒有重大影響 [Herzing et al., 1977; Graham et al., 2000]。然而在一般天然水中，pH值可能會增進天然有機質吸附而降低臭味物質的吸附量 [Graham et al., 2000]。

(4) 另外一個影響活性碳吸附在淨水場處理程序中的因子是活性碳添加位置，較長的接觸時間，理論上可增加吸附量。Simpson (1998) 對美國弗羅里達州 Manatee 給水廠進行PAC最佳操作效能實驗，發現活性碳在混凝程序前添加具有最佳去除效果，而在膠羽形成及高混凝劑量的操作條件下可能會妨礙PAC吸附臭味物質，造成吸附量降低。

## 2. 平衡模式

由於背景天然有機質對於活性碳吸附低濃度有機物質 (包含臭味物質) 影響很大，因此許多研究人員試著用模式進行將背景有機質包括在吸附量推估中。目前常用的推估模式包括假想 (Fictive) 模式及等

背景化合物 (Equivalent Background Compound, EBC) 模式兩類，以下分別介紹之。

### 2.1 假想 (Fictive) 模式

由於自然水中所含有的天然有機質，大部分無法作詳細的分子確認，且往往會與活性碳產生競爭吸附現象，降低活性碳吸附量。而大部分的活性碳相關預測模式是針對已知成分的化合物作描述及預測，無法應用在自然水的吸附行為描述。

假想 (Fictive) 模式是以理想吸附溶液理論 (Ideal Adsorbed Solution Theory, IAST) [Radke and Prausnitz, 1972] 為基礎，將背景天然有機質分成數個假想的部份 (Fictive Components)，與微量有機物進行競爭吸附作用。

如果溶液系統中的所有混合吸附質成分組成已經明確知道，可以利用理想吸附溶液理論，依據單質等溫吸附線預測活性碳吸附量。若單一吸附質吸附行為可用 Freundlich 等溫吸附線表示：

$$q = kC^{1/n} \quad (1)$$

式中q代表活性碳吸附量；C為液相平衡濃度；k及n為經驗參數。將方程式(1)代入IAST模式得到方程式(2)：

$$C_i = \frac{q_i}{\sum_{j=1}^N q_j} \left[ \frac{\sum_{j=1}^N n_j q_j}{n_i q_i} \right]^{n_i}; i = 1 \text{ 到 } N \quad (2)$$

其中C為液相平衡濃度；q為吸附劑吸附量；i、j分別代表化合物i及j。

Crittenden等人(1985)及Smith and Weber(1990)即成功地利用此方法模擬背景天然有機物情況下，配合適當的等溫吸附線(例如Freundlich Isotherm)描述單質吸附情形，並將背景有機質分成數個假想的部份(Fictive Components)，每一個部份均有相同之吸附特性(即Freundlich Isotherm中之參數K及n)，由單質的吸附參數即可有效地推估各假想部份參數值，並可應用於推估相同背景水質下其他化合物之吸附量。

## 2.2 等背景化合物 (Equivalent Background Compound, EBC) 模式

EBC模式則是簡化假想模式中之數個假想的部份成為單一背景化合物，同時將背景天然有機物以單一假想之等背景化合物表示(EBC)[Najm et al., 1991; Knappe et al., 1998]。在等背景化合物模式中，整個吸附系統考慮成非線性之微量有機物及EBC雙溶質競爭吸附系統，同時把溶液考慮成符合理想吸附溶液理論(Ideal

Adsorbed Solution Theory, IAST)，假設微量有機物以非線性之Freundlich等溫吸附線表示。

Knappe等人(1998)假設：(1)EBC固相濃度遠大於微量有機物固相濃度；(2)Freundlich等溫吸附方程式指數 $\frac{1}{n_1}$ 和 $\frac{1}{n_2}$ 是類似的，落於0.1至1之間，得到微量有機物的固相濃度值，如下所示：

$$q_1 = \frac{C_{1,0}}{C_c + \frac{1}{q_2} \left( \frac{n_2 q_2}{n_1 K_1} \right)^{n_1}} \quad (3)$$

式中 $C_{1,0}$ 是初始微量有機物濃度； $C_c$ 為添加PAC劑量； $K_1$ 及 $n_1$ 為單吸附質i的Freundlich等溫吸附線常數；而下標1代表微量有機物；下標2代表EBC。

由方程式(3)中可發現，在一定的EBC固相濃度( $q_2$ )與活性碳加添劑量( $C_c$ )下，活性碳吸附量與初始微量有機物濃度成正比。當施放大量活性碳劑量時，EBC的液相平衡濃度可以忽略，得到方程式(4)：

$$\frac{C_{1,eq}}{C_{1,0}} = \frac{1}{C_c^{n_1}} \left( \frac{n_2 C_{2,0}}{n_1 K_1} \right)^{n_1} \quad (4)$$

方程式(4)代表污染物平衡與初始濃度之比值( $\frac{C_{1,eq}}{C_{1,0}}$ )對活性碳添加劑量( $C_c$ )

在Log-Log座標上作圖，在施加大量活性碳劑量條件下將會形成一條斜率為 $-n_1$ 的直線。

Knapp等人 (1998) 針對Atrazine及2-MIB化合物進行實驗，發現在多重吸附質系統且微量有機物濃度不高的情況下，不同的Atrazine及2-MIB化合物初始濃度，活性碳吸附量直接與初始微量有機物濃度成正比，如方程式(2)所示。最後，作者利用上述方程式驗證實驗觀察結果。Gilligly等人 (1999) 經測試四個天然水源、14種活性碳，發現在天然水中，不同的2-MIB初始濃度情況下，活性碳劑量與MIB去除效率百分比可以單一曲線表示，顯示在各天然水中MIB去除效果僅與活性碳添加量有關，而與初始濃度無關，如方程式(4)所示。Najm等人 (1991) 應用此一簡化後之模式成功地推估有背景天然有機物情況下，不同初始濃度下之三氯酚吸附情形。Graham等人 (2000) 也發現活性碳去除MIB之效率與初始濃度無關的結果，且更進一步利用IAST的觀念驗證此發現在理論上之合理性。

然而EBC模式中之參數不具專一性，同一組數據可用不同組參數解析 [Najm et al., 1991]，且會隨污染物不同而有所改變 [Speth and Adams, 1993]。Graham等人 (2000) 利用EBC的模式模擬四處天然原水

中天然有機質與MIB與Geosmin之競爭吸附，結果顯示四種原水可使用相同之EBC模擬MIB與Geosmin之吸附，且其中有三種水之EBC與總有機碳(TOC)比值接近。顯示，EBC比值可能可以以TOC比值代表。

### 2.3 Solvophobic Theory 模式

另外，文獻上也有學者嘗試用不同理論基礎，希望藉由吸附質的物理化學性質或活性去推估活性碳對不同吸附質的吸附量。例如，Nirmalakhandan等人 (1990) 以Solvophobic Theory 為基礎，提出Connectivity Langmuir Model預測活性碳吸附三大類52種化合物；Blum等人 (1994) 使用Molecular Connectivity，針對6篇文獻之363種芳香族及脂肪族化合物，進行迴歸分析，得到定量結構活性關係模式 (Quantitative Structure-Activity Relationship, QSAR)。最後，並與不同文獻資料及實驗數據比較，可合理預測活性碳在不同濃度之吸附量。

Crittenden等人 (1999) 則是進一步結合Polanyi Theory及Linear Solvation Energy Relationships (LSERs) 兩種理論，經由56種有機化合物及8個吸附劑實驗吸附數據，最後提出四大類溶液化合物的液相修正吸附等溫吸附線。

### 3. 粉狀活性碳顆粒理論動力模式

吸附質在多孔性吸附劑進行吸附時，一般認為必須經過下列步驟包括：外部擴散 (External Diffusion, 在液/固交界膜部分)，內部擴散 (Internal Diffusion, 在吸附劑顆粒內之液相或固相表面) 及吸附三大部分。由於一般物理性吸附相當快速 (約 $10^{-6}$ 秒附近)，所以主要控制污染物在吸附劑之吸附速率快慢應為前兩個步驟 [Weber et al., 1991]。污染物的外部擴散速率一般與質量傳送係數與濃度梯度相關，而質量傳送係數與流經吸附劑顆粒固體流況有關 [Noll et al., 1992]。在環工、化工相關研究上，有許多的經驗公式可用於描述不同流況下之質量傳送係數。通常，這些公式都以Sherwood Number的型式表示，且為Reynolds Number與Schmidt Number的函數。內部擴散速率部分則較為複雜些。一般內部擴散可區分為孔隙中氣體之分子擴散、Knudsen擴散與孔壁固體上之表面擴散 [Ruthven, 1984]。

均勻表面擴散模式 (Homogeneous Surface Diffusion Model, HSDM) 已經廣泛應用在模擬活性碳吸附動力行為上 [Pirbazari et al., 1993; Najm, 1996; Gillogly et al., 1999]。HSDM模式假設吸附質和吸附劑表面為局部平衡的狀態，且表面擴散 (Surface Diffusion) 為內部擴散控制因子。由於粉狀活性碳具有很小的顆粒粒徑，加上實際操作PAC都是應用在連續流

(Continuous-Flow) 的系統中，PAC的吸附質傳阻力可以忽略不計。因此，忽略質傳阻力的HSDM模式配合Freundlich平衡吸附數學模式，可由下列方程式表示：

$$\frac{\partial q}{\partial t} = D_s \left( \frac{\partial^2 q}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial q}{\partial r} \right) \quad (5)$$

$$\text{at } t = 0, \quad 0 \leq r \leq R; \quad q = 0$$

$$\text{at } r = 0, \quad 0 \leq t; \quad \frac{\partial q}{\partial r} = 0$$

$$\text{at } r = R, \quad q_s = KC_s^n$$

式中 $D_s$ 為表面擴散係數； $r$ 是距活性碳中心的距離； $R$ 為活性碳顆粒半徑； $t$ 是接觸時間； $C_s$ 為吸附質在液相濃度。

方程式(5)描述吸附作用時，活性碳表面濃度在不同時間及距離活性碳顆粒中心 $r$ 距離處的吸附速率。

Gillogly等人 (1999) 則是成功地將等背景化合物 (EBC) 模式與HSDM吸附動力模式結合，預測2-MIB對PAC的平衡及動力吸附量。研究中發現，批次實驗吸附2-MIB化合物4小時後，可合理用HSDM描述，且在不同的2-MIB初始濃度情況下，MIB去除效果僅與活性碳添加量有關，而與初始濃度無關，形成單一曲線。

#### 4. 水廠應用傳輸模式

當水廠決定使用粉狀活性碳控制自來水中臭味物質時，此時不僅要考慮臭味物

質在活性碳顆粒內的動力傳輸模式，更需要對施加位置的水力特性進行探討，以決定適當之活性碳添加量及水力停留時間。由於傳統自來水處理程序中，PAC通常在快混槽或是水廠進水口加入，以去除微量有機物或臭味物質，而這些施加位置皆可用完全混合反應槽模式 (Completely Stirred Tank Reactor, CSTR) 或柱塞流反應槽模式 (Plug Flow Reactor, PFR) 描述，並可結合平衡/動力吸附模式進行吸附量預測，減少實驗次數及花費時間，以求得最佳之活性碳添加劑量。

#### 4.1 完全混合反應槽模式 (Completely Stirred Tank Reactor, CSTR)

完全混合反應槽模式是假設吸附質在反應器內任何地方溶液的濃度皆相等，而且和出流水濃度 ( $C_{eff}$ ) 一樣。當PAC加入忽略吸附質傳阻力的完全反應槽模式中，活性碳顆粒表面的濃度和溶液濃度 (Bulk Concentration) 相等，且成局部平衡的狀態。方程式(6)是在接觸時間 $t$ 時，活性碳單位重量的表面吸附量的非線性解。

$$\frac{q_t}{q_\infty} = 1 - \frac{6}{\pi^2} \sum_{i=1}^{\infty} \left\{ \frac{1}{i^2} \exp\left(-\frac{D_s i^2 \pi^2 t}{R^2}\right) \right\} \quad (6)$$

$q_\infty$  是活性碳的長時間的平衡吸附量

#### 4.2 柱塞流反應槽模式 (Plug

Flow Reactor, PFR)

另一種常見之反應器為柱塞流反應槽 (PFR)，該模式假設吸附質濃度在反應槽中並不是固定的，而是隨著時間及距離衰減。同樣可用方程式(5)及(7)描述PAC加入忽略吸附質傳阻力的柱塞流反應器：

$$\frac{\partial q}{\partial t} = D_s \left( \frac{\partial^2 q}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial q}{\partial r} \right) \quad (5)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{3C_c}{R^3} \frac{\partial}{\partial t} \int_0^R q r^2 dr \quad (7)$$

$$\text{at } t = 0, 0 \leq r \leq R; q = 0$$

$$\text{at } r = 0, 0 \leq t; \frac{\partial q}{\partial r} = 0$$

$$\text{at } r = R, q_s = KC_s^n \quad (R \text{ 為活性碳顆粒半徑})$$

$$\text{at } t = 0, C = C_{inf}$$

#### 4.3 無因次CSTR及PFR模式

若將忽略液膜傳輸阻力，並考慮均勻表面擴散模式 (HSDM)，將水廠實際應用傳輸CSTR及PFR模式，利用  $\lambda$  值無因次化，可得到下列兩個方程式：

$$\gamma = \frac{q_{eff}}{q_\infty} = 1 - \frac{6}{\pi^2} \sum_{i=1}^{\infty} \left\{ \frac{1}{i^2 (1 + i^2 \pi^2 \lambda)} \right\} \quad (8)$$

$$\gamma = \frac{q_{eff}}{q_\infty} = 1 - 0.15 \exp(-143\lambda) - 0.16 \exp(-40\lambda) - 0.61 \exp(-10\lambda) \quad (9)$$

$$\text{式中 } \lambda = \frac{iD_s}{R^2}$$

方程式(8)及(9)可描述在穩流狀態下，不同物理參數 ( $C_{inf}$ 、 $C_c$ 及 $R$ )、平衡參數 ( $K$ 和 $n$ ) 及表面擴散係數 ( $D_s$ ) 下，活性炭在CSTR及PFR的吸附效能。若將  $r$  對 CSTR及PFR的  $\lambda$  值作圖，可評估在不同操作條件下CSTR及PFR的效能，如圖2所示。

其中  $r$  代表在反應槽內活性炭吸附量與最大吸附量之比，即活性炭之吸附效率。當PAC應用在連續管流中進行吸附時， $\lambda$  大於0.1表示吸附效果是優良的，活性炭吸附量是最大吸附量的75 % 以上； $\lambda$  介於0.01至0.1表示吸附效果普通，活性炭吸附量是最大吸附量的30 % 到75 % 之間；當  $\lambda$  小於0.01時，吸附效果極差，活性炭吸附量是最大吸附量的30 % 以下。

Najm (1996) 則針對粉狀活性炭在完全混合反應槽模式 (CSTR) 及柱塞流反應槽模式 (PFR) 兩種模式，進行吸附動力行為探討。該作者在文章中提出直接的方法計算表面擴散係數 ( $D_s$ ) 並且進行實驗驗證，最後使用前面所介紹之無因次  $\lambda$  估算粉狀活性炭施加在CSTR或是PFR去除不同化合物的效率。

### 三、粉狀活性炭劑量決定方法

在決定粉狀活性炭添加劑量之前，首先必須瞭解臭味物質的濃度或臭味強度，然後判斷控制的效率 (臭味物質或臭味強度之去除效率)，再配合水質條件進行活性炭吸附實驗或進行理論推估，以求得活性炭添加劑量。其大略步驟如圖4所示，以下分別討論。

了解原水之臭味物質種類及濃度或臭味種類及濃度為控制臭味的第一步驟。臭味物質的種類及濃度常必須藉化學分析法進行，由於臭味物質濃度一般很低，通常必須先濃縮再利用氣相層析質譜儀 (GC/MSD) 分析，常用的濃縮方法有微固相萃取法 (Solid Phase Micro-Extraction)、封閉式氣提迴路法 (Closed-Loop Stripping Analysis) 及吹氣捕捉法 (Purge and Trap Technique) 等。而臭味種類及強度則通常用感官分析法進行，常用的感官分析法包括初嗅數法 (Threshold Odor Number, TON) 及嗅覺層次分析法 (Flavor Profile Analysis Method, FPA)。目前國際先進的水處理公司均利用FPA方法，該方法採用至少四個測試人員來描述臭味的特徵與強度，臭味強度值是以總體強度來 (Overall Intensity) 表示，也就是此一個FPA測試群所共同同意的臭味強度值，並可以提供一個味道特徵的描述。FPA方法配合適當之化學分析法可對臭味物質作出良好之定性及定量，例如高與林 (1998) 及汪與林

(2000a, b) 使用上述封閉式氣提迴路法、微固相萃取法及嗅覺層次分析法建立及驗證臭味分析方法，並應用於南部淨水場的臭味物質分析。

瞭解水中臭味物質特性後即可決定無臭水要求的標準，進而決定控制效率，然後即可進行活性碳添加實驗。由於各個地區自來水中的天然有機物質特性相差極大，一般活性碳劑量添加量都必須針對當地水質進行相關實驗，並配合現場實際可能添加活性碳劑量及停留時間，以求得活性碳等溫吸附曲線。目前最常用的是利用完全混合批次式反應器 (Completely Mixed Batch Reactor, CMBR) 及桌上型試驗 (Bench-Scale Test)。批次式反應器是將不同適當劑量之活性碳放入固定吸附質濃度之反應器，並且爲了要減少活性碳和液膜間的質傳阻力，可置入攪拌子讓活性碳與水溶液完全混合。實驗中需維持特定溫度，等到活性碳吸附平衡，量測殘留吸附質濃度。該裝置可以求得活性碳在特定溫度下不同濃度之活性碳吸附量，即活性碳等溫吸附線。圖3爲典型之完全混合批次式反應器示意圖。桌上型試驗則是模擬真實操作條件進行相關實驗，比CMBR更具有代表性，但相對而言需花費較多實驗時間及成本。

粒狀活性碳與水中微量有機物接觸平衡時間通常介於4-28天，大多數爲4或7天

[Chen et al., 1997]，而粉狀活性碳由於接觸面積較粒狀活性碳大，通常假設3天已達平衡 [Graham et al., 2000]。然而事實上，考量自來水傳統處理程序及相關限制，淨水場一般活性碳接觸時間不到一小時，因此吸附量應較平衡吸附量爲小 (低2到10倍左右)。例如，Simpson (1998) 針對美國弗羅里達州Manatee給水廠進行實驗分析，當活性碳接觸時間爲3分鐘增爲7.4分鐘時，2-MIB與Geosmin去除效果分別可以從31%增至42%及由55%增爲68%。因此，由CMBR平衡實驗所得到的應該是該操作條件下的最小活性碳吸附量及添加量，與真實情況可能差到2到10倍左右。

CMBR實驗中最小活性碳添加劑量，亦可利用第二節中介紹的等背景化合物 (EBC) 模式決定，在微量有機物 (臭味物質) 濃度不高的情況下，利用單點實驗推估等溫吸附線，活性碳劑量與去除效率百分比可以單一曲線表示，且在天然水中2-MIB或Geosmin去除效果僅與活性碳添加量有關，而與初始濃度無關。圖5爲參考Gillogly等人 (1999) 吸附2-MIB文獻資料所描繪出來的典型之PAC添加劑量與2-MIB剩餘百分率關係圖，由該實驗結果得知在2-MIB初始濃度介於150 ng/L至1245 ng/L之間，活性碳添加劑量與初始濃度沒有關係，利用圖5可直接預測不同的控制

效率下之活性碳添加量。由於活性碳吸附實驗常牽涉到複雜之分析及時間，因此適當之模式分析可減少實驗之次數。

在傳統自來水處理程序中，PAC通常在快混槽或是水廠進水口加入，以去除微量有機物。快混槽由於劇烈的攪拌通常可以用CSTR模式描述；水廠進水口後通常連接初沉池或是自來水處理設施，水流流速往往較緩慢，可用PFR模式模擬。因此，前節所介紹之完全混合反應槽模式(CSTR)及柱塞流反應槽模式(PFR)兩種模式，可結合不同之動力行為描述，求得活性碳吸附量。

整體而言，一般PAC添加劑量決定流程，如圖4所示。首先必須對當地的背景水質有明確的了解，並決定適當之添加位置(如快混槽或是水廠進水口)，再根據水力停留時間及適當之模式，求出施加活性碳的接觸時間。最後，依照接觸時間及當地的水質條件進行瓶杯試驗(Jar Test)，依據目標化合物的嗅覺閾值或是容許濃度，決定控制效率及添加劑量。

#### 四、結論與建議

自來水的臭味問題，一直都是民眾抱怨的問題。在眾多臭味問題當中，最常被民眾發現及描述的是土臭味(Earthy)或是土霉味(Musty)，可能引起臭味之之化合物為TCA、IBMP、IPMP、Geosmin及2-

MIB。由於土臭味化合物之嗅限值皆落於奈克/公升(ng/L)的等級，在極低濃度狀況下就可以被人聞到，且由於分子本身具有苯環結構，對於化學氧化具有一定的抵抗力，且亨利係數值偏低，不易藉由空氣氣提趕出，造成傳統處理方法不易去除。

粉狀活性碳(Powdered Activated Carbon, PAC)已經廣泛應用在飲用水處理程序中，尤其對臭味物質或是水中揮發性有機物的控制相當有效。影響活性碳添加劑量之主要因子有天然有機質及餘氯濃度。自然水中之天然有機質，其濃度往往較臭味物質高出數個數量級，會與臭味物質產生競爭吸附現象，減少活性碳的吸附量可達一個數量級左右，造成活性碳劑量必須增加數倍才能達到相同處理效果。由於水中餘氯會降低活性碳吸附臭味物質之效果，為求得PAC處理及加氯消毒的最大去除效果，兩個流程的相互接觸時間應該要盡量縮短。

粉狀活性碳添加劑量之決定，首先必須瞭解背景水質(包括臭味物質種類及濃度及其臭味強度)，然後依容許之嗅覺閾值決定去除效率，再配合水質條件及水力條件(如混凝程度及停留時間)進行活性碳吸附實驗，並可以應用適當之理論模式計算，以減少實驗次數及時間，最後求得經濟且有效之活性碳添加劑量。

## 五、致謝

本論文承蒙國科會 (NSC89-2211-E006-115) 補助部分研究經費，特此致謝。

## 六、參考文獻

- Atasi, K.Z., Chen, T., Huddleston, J.I., Young, C.C., and I.H. Suffet, “Factor Screening for Ozonating the Taste-and Odor-causing Compounds in Source Water at Detroit”, USA. *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 40, pp. 115-122 (1999).
- Blum, D.J.W., Suffet, I.H., and J.P. Duguet, “ Quantitative Structure-Activity Relationship Using Molecular Connectivity for the Activated Carbon Adsorption of Organic Chemistry in Water” , *Water Research*, Vol. 28, pp. 687-699 (1994).
- Bruchet, A., Hochereau, C., Gogot, C., and D. Codiassa, “ Taste and Odor Episodes in Drinking Waters : Solved and Unsolved Case Studies and Needs for Future Research” , *Proceeding of 4-th International Workshop on Drinking Water Quality Management and Treatment Technology*, pp.137-147, Taiwan, R.O.C., March 4-5 (1998).
- Burlingame, G.A., Dann, R.M., and G.L. Brock, “A Case Study of Geosmin in Philadelphia’ s Water” , *Jour. AWWA*, Vol. 78(3), pp. 56-61 (1986).
- Butterworth, R., “Review of Documents Investigating Taste and Odor Abatement Options: City of Chicago Department of Water” , In AWWARF Taste and Odor Workshop, July 23-24, 1998, Chicago, Ill. ([http://www.awwarf.com/research/To\\_n\\_tbk.htm](http://www.awwarf.com/research/To_n_tbk.htm)) (1998).
- Chen, G., Dussert, B.W., and I.H. Suffet, “Evaluation of Granular Activated Carbons for Removal of Methylisoborneol to Below Odor Threshold Concentration in Drinking Water” , *Water Research*, Vol. 31, pp. 1155-1163 (1997).
- Crittenden, J.C., Luft, P., and Hand, D.W., “ Prediction of Multicomponent Adsorption Equilibria in Background Mixtures of Unknown Composition” , *Water Research*, Vol. 19, 1537-1548 (1985).
- Crittenden, J.C., Sanonraj, S., Bulloch J.L., Hand D.W., Rogers, T.N., Speth T.F. and M. Ulmer, “Correlation of Aqueous-Phase Adsorption Isotherms” , *Environ. Sci. Technol.*, Vol. 33, pp. 2926-2933 (1999).
- Duguet, J., Mallevalle, J., Ho, J., and Suffet,

- I.H., "Oxidation Processes: Chlorine and Chloramines" , In *Advances in Taste-and-Odor Treatment and Control*, Ed. by Suffet, I.H., Mallevalle, J., and Kawczynski, American Water Works Association, Denver, Colorado, USA (1995).
- Eugashira, K., Ito, K., and Yoshiy, Y., "Removal of Musty Odor Compound in Drinking Water by Biological Filter" , *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 25, pp. 307-314 (1992).
- Ficek, K.J., and Vella, P.A., "Potassium Permanganate pretreatment for taste and odor control, In AWWARF Taste and Odor Workshop" , July 23-24, 1998, Chicago, Ill. ([http://www.awwarf.com/research/To\\_n\\_tbk.htm](http://www.awwarf.com/research/To_n_tbk.htm)) (1998).
- Froese, K.L., Wolanski, A., and Hrudey S.E., "Factors Governing Odorous Aldehyde Formation as Disinfection By-Products in Drinking Water" , *Water Research*, Vol. 33, pp.1355-1364 (1999).
- Gillogly, T.E.T., Snoeyink, V.L., Holthouse, A., Wilson, C.M., and E.P. Royal, "Effect of Chlorine on PAC' s Ability to Adsorb MIB" , *Jour. AWWA*, Vol. 90, pp. 107-114 (1998).
- Gillogly, T.E.T., Snoeyink, V.L., Newcombe, G., and J.R. Elarde, "A Simplified Method Determine the Powdered Activated Carbon Dose required to Remove Methylisobornel" , *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 40, pp. 59-64 (1999).
- Glaze, W.H. et al., "Evaluating Oxidants for the Removal of Model Taste and Odor Compounds from a Municipal Water Supply" , *Jour. AWWA*, Vol.82, 79-84 (1990).
- Graham M.R., Summers R.S. Simpson M.R. and Macleod B.W., " Modeling Equilibrium Adsorption of 2-Methylisoborneol and Geosmin in Natural Waters" , *Water Research*, Vol. 34, pp. 2291-2300 (2000).
- Gramith, J.T., "Oxidation Processes: Ozone" , In *Advances in Taste-and-Odor Treatment and Control*, Ed. by Suffet, I.H., Mallevalle, J., and Kawczynski, American Water Works Association, Denver, Colorado, USA (1995).
- Hargesheimer, E.E., and Watson, S.B., "Drinking Water Treatment Options for Taste and Odor Control" , *Water Research* Vol. 30, pp. 1423-1430 (1996).

- Herzing, D.R., Snoeyink, V.L., and N.F. Wood, "Activated Carbon Adsorption of the Odor Compounds 2-Methylisoborneol and Geosmin", *Jour. AWWA*, Vol. 69, pp. 223-238 (1977).
- Hu, T.L., "The Odor Production of Anabaena Sp. Isolated from the Inlet of a Water Purification Plant", *Proceeding of 4-th International Workshop on Drinking Water Quality Management and Treatment Technology*, pp.149-153, Taiwan, R.O.C., March 4-5 (1998).
- Knappe, Detlef, R.U., Matsui, Y., Snoeyink, V.L., Roche, P., Prados, M.J. and M.-M. Bourbigot, "Predicting the Capacity of Powdered Activated Carbon for Trace Organic Compounds in Nature Waters", *Environ. Sci. Technol.*, Vol. 32, pp. 1694-1698 (1998).
- Lalezary, S., Pirbazari, M., and M.J. McGuire, "Oxidation of Five Earthy-Musty Taste and Odor Compounds", *Jour. AWWA*, Vol. 78(3), pp. 62-69 (1986a).
- Lalezary, S., Pirbazari, M., and M.J. McGuire, "Evaluating Activated Carbons for Removing Low Concentrations of Taste- and Odor-Producing Organics", *Jour. AWWA*, Vol. 78, pp. 76-82 (1986b).
- Lalezary, S., Pirbazari, M., Dale, M.E., Tanaka, T.S., and M.J. McGuire, "Optimizing the Removal of Geosmin and 2-Methylisoborneol by Powdered Activated Carbon", *Jour. AWWA*, Vol. 80, pp. 73-80 (1988).
- McGuire, M.J., "Advances in Treatment Processes to Solve Off-Flavor Problems in Drinking Water", *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 40, pp. 153-163 (1999).
- Najm, I. N., Snoeyink, V.L. and I. Richard, "Effect of Initial Concentration of a SOC in Natural Water on Its Adsorption by Activated Carbon", *Jour. AWWA*, Vol. 83(8), pp. 57-63 (1991).
- Najm, I. N., "Mathematical Modeling of PAC Adsorption Process", *Jour. AWWA*, Vol. 88 (10), pp. 79-89 (1996).
- Nirmalakhandan, N., and R.E. Speece, "Adsorption from Aqueous Phase by Activated Carbon: A Simplified Application of the Solvophobic Theory", *Environ. Sci. Technol.*, Vol. 24, pp. 575-580 (1990).
- Noll, K.E., Gounaris, V, and W.S. Hou, *Adsorption Technology for Air and Water Pollution Control*. Lewis Publisher, Chelsea, M.I. (1992).

- Pirbazari, M., Ravindran, V., Badriyha, B.N., Craig, S. and M.J. McGuire, "GAC Adsorption Design Protocol for the Removal of Off-Flavors" , *Water Research*, Vol. 27, pp. 1153-1166 (1993).
- Persson, P.E., "Sensory Properties and Analysis of Two Muddy Odour Compounds, Geosmin and 2-Methylisoborneol, in Water and Fish" , *Water Research*, Vol. 14, pp. 1113-1118 (1980).
- Radke, C.J., and Prausnitz, J.M., "Thermodynamics of Multi-solute Adsorption from Dilute Liquid Solutions" . *AIChE J.*, Vol. 18, pp. 761-768 (1972).
- Rittmann, B.E., Grantzer, C.J., and Montiel, A., "Biological Treatment to Control Taste-and-Odor Compounds in Drinking Water treatment" , In *Advances in Taste-and-Odor Treatment and Control*, Ed. by Suffet, I.H., Mallevalle, J., and Kawczynski, American Water Works Association, Denver, Colorado, USA (1995).
- Ruthven, D.M., "Principles of Adsorption and Adsorption Processes" , John Wiley and Sons, New York, N. Y. (1984).
- Simpson, R., "Practical Aspects of PAC Application For Taste and Odor Control" , In AWWARF Taste and Odor Workshop, July 23-24, 1998, Chicago, Ill. ([http://www.awwarf.com/research/To\\_n\\_tbk.htm](http://www.awwarf.com/research/To_n_tbk.htm)) (1998).
- Smith, E.H., and Weber, Jr., W.J., "Comparative Assessment of Chemical and Adsorptive Characteristics of Leachates from a Municipal and an Industrial Landfill" , *Water Soil and Soil Pollution*, Vol. 53, 279 (1990).
- Snoeyink, V.L., Gillobly, T.E.T., Newcombe, G. and Elarde, J.R., "A Simplified Method to Determine the PAC Dose Required to Remove MIB" , In AWWARF Taste and Odor Workshop, July 23-24, Chicago, Ill. ([http://www.awwarf.com/research/To\\_n\\_tbk.htm](http://www.awwarf.com/research/To_n_tbk.htm)) (1998).
- Speth, T.F., Adams, J.Q., "GAC and Air Stripping Design Support for the Safe and Drinking Water Act" , In *Strategies and Technologies for Meeting SDWA Requirement*, Eds. Calrk, R.M., and Summers, R.S., pp. 47-49. Technomic, Lancaster, PA (1993).
- Suffet, I.H., Mallevalle, J., and Kawczynski,

- E., "Advances in taste-and-odor treatment and control", American Water Works Association Research Foundation Lyonnaise des Eaux (1995a).
- Suffet, I.H., and Wable, O., "Removal of Taste-and-Odor Compounds by Activated Carbon", In *Advances in Taste-and-Odor Treatment and Control*, Ed. by Suffet, I.H., Mallevialle, J., and Kawczynski, American Water Works Association, Denver, Colorado, USA (1995b).
- Suffet, I.H., Khiari, D., and A. Bruchet, "The Drinking Water Taste and Odor Wheel for the Millennium: Beyond Geosmin and 2-Methylisoborneol", *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 40, pp. 1-13 (1999).
- Weber, W.J., McGinley, P.M., and L.E. Katz, "Sorption Phenomena in Subsurface Systems: Concepts Models and Effects on Contaminant Fate and Transport", *Water Research*, Vol. 25, pp. 499-528 (1991).
- 陳是瑩、李俊德、曾怡禎，「澄清湖浮游生物與放線菌繁殖狀況對水源臭味之影響（一）」，國立成功大學環境工程研究報告第21號，(1982)。
- 李俊德、陳是瑩，「澄清湖水源臭味控制方法之研究」，國立成功大學環境工程研究報告第45號，(1985)。
- 陳是瑩、曾怡禎，「澄清湖藻類圖鑑」，(1986)。
- 陳重男，「高級處理對水中微量有機物去除效能評估:子題(二)自來水中有機異臭味物質去除之研究」，行政院環保署(EPA-82-E3-J1-09-03)，(1993)。
- 溫清光等，「澄清湖曝氣工程效益評估」，國立成功大學環境工程研究所研究報告，(1995a)。
- 溫清光等，「鳳山水庫曝氣工程效益評估」，國立成功大學環境工程研究所研究報告(1995b)。
- 洪玉珠，「高雄地區自來水配水系統影響適飲性物質的調查及改善對策之探討(1/2)」，行政院環保署研究報告，(1998)。
- 高小萍，林財富，「水中異臭味物質 Geosmin及2-MIB分析技術之研究」，第十五屆自來水研討會論文集，pp. 283-300，(1998)。
- 汪俊育，林財富，「鳳山與港西淨水場臭味問題之研究」，第十七屆自來水研討會論文集，pp. 49-65，(2000a)。
- 汪俊育，林財富，「以嗅覺層次分析法及微固相萃取法分析水中異臭味」，第十七屆自來水研討會論文集，pp. 39-



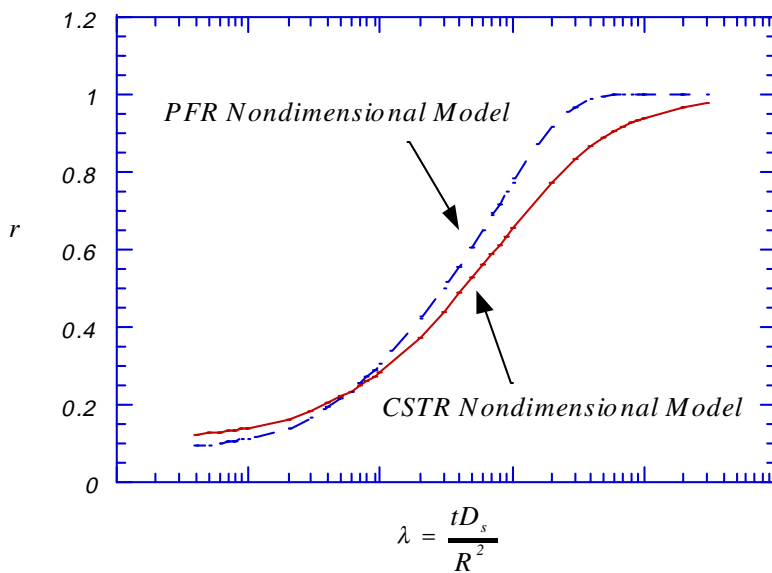


圖2 無因次化之CSTR及PFR模式

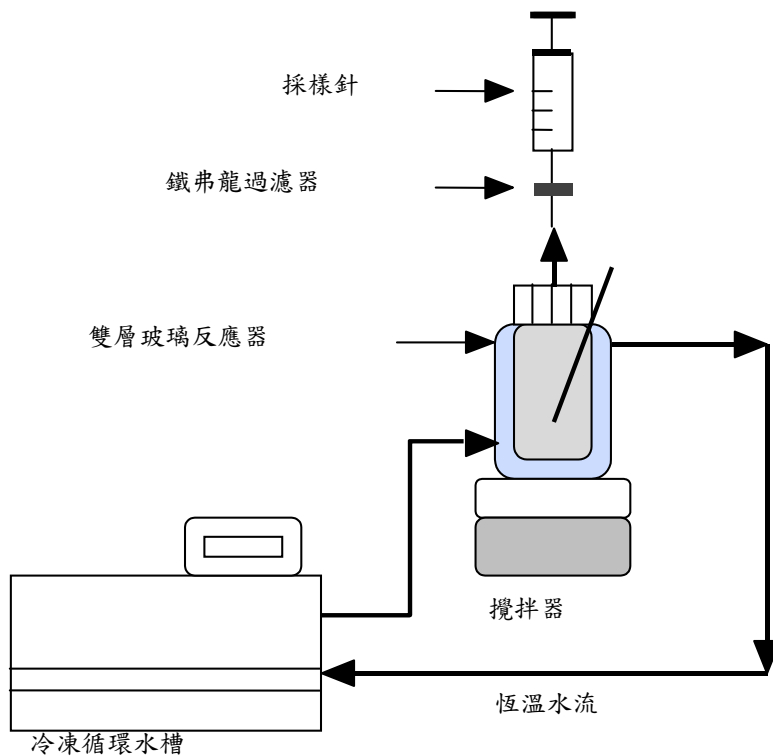


圖3 典型之完全混合批次反應器示意圖 (CMBR)

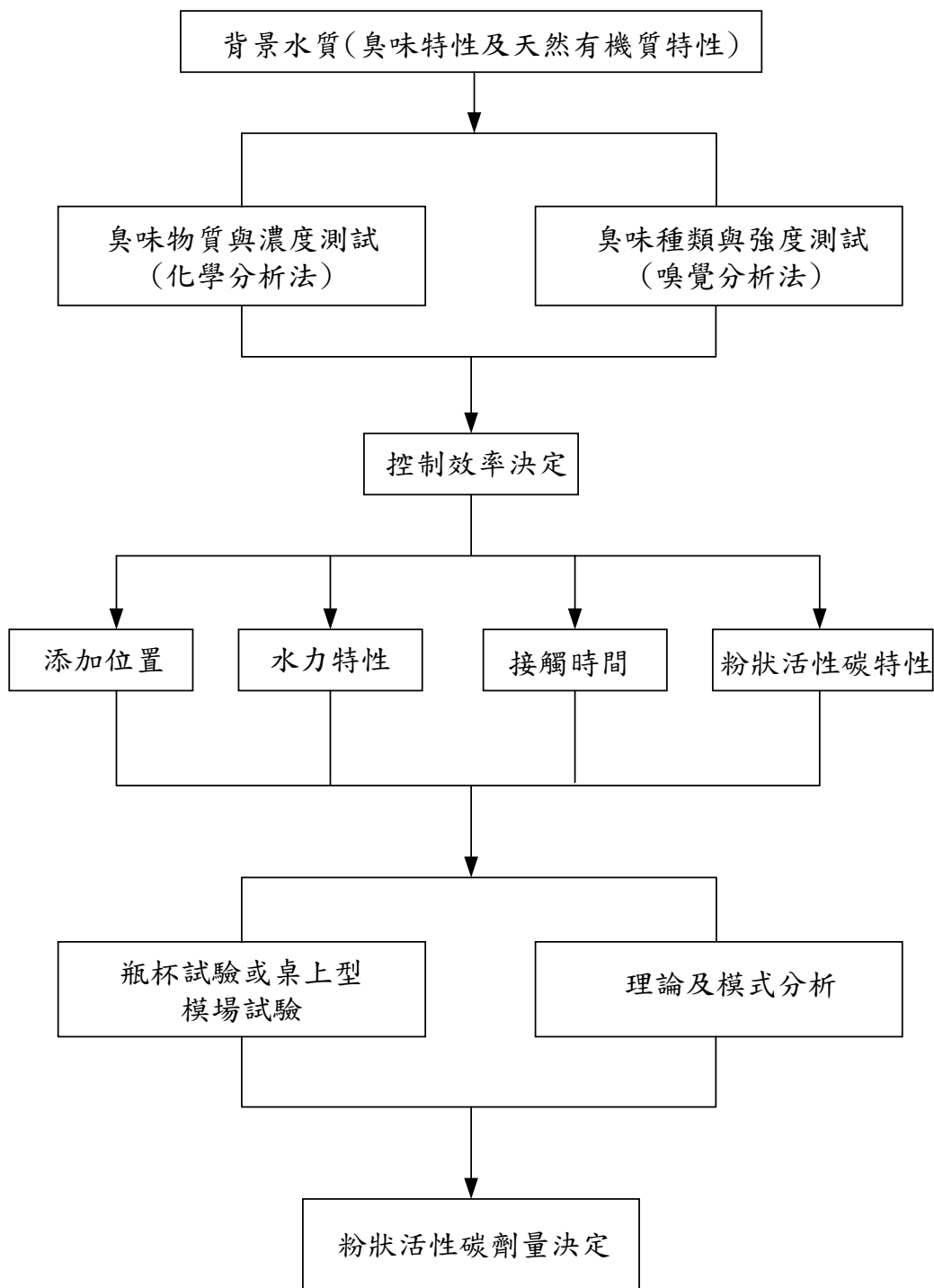
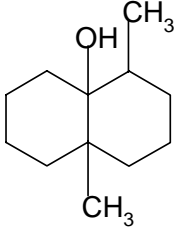
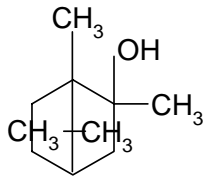
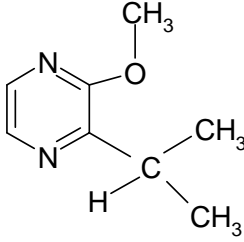
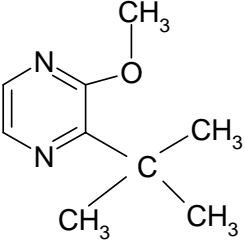
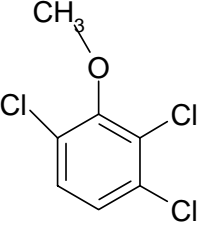
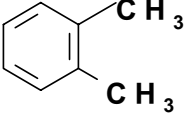


圖4 粉狀活性碳添加劑量決定流程圖

表 1 五種常見之有機土臭味物質及化學性臭味

異臭味物質	<i>trans</i> -1,10-Dimethyl- <i>trans</i> -9-decalol (Geosmin)	2-Methylisoborneol (2-MIB)	2-Isopropyl-3-methoxy pyrazine (IPMP)	2-Isobutyl-3-methoxy pyrazine (IBMP)	2,3,6-Trichloroanisole (TCA)	<i>o</i> -Xylene
分子式	C <sub>12</sub> H <sub>22</sub> O	C <sub>11</sub> H <sub>20</sub> O	C <sub>8</sub> H <sub>12</sub> ON <sub>2</sub>	C <sub>9</sub> H <sub>14</sub> ON <sub>2</sub>	C <sub>7</sub> H <sub>5</sub> OCl <sub>3</sub>	C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> (CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>
分子量	182	168	152	166	222	106
結構式						
臭味限值 (ng/L)	10	29	7	2	2	2×10 <sup>4</sup> - 1.8×10 <sup>6</sup>

資料來源：翁玉芬，“水中超微量有機異臭味物質 Geosmin 之分析及去除”，國立交通大學環境工程研究所碩士論文，p2，民國 82



圖5 典型之PAC添加劑量與剩餘百分率關係圖  
(實驗數據由Gillgoly等人(1999)文獻資料描繪，詳細資料請參考該文獻)

表2 五種常見之有機土臭味物質之物化性質及化學性臭味

化合物	沸點 (°C)	溶解度 (mg/l)	蒸氣壓 (atm)	$K_h^*$ (atm m <sup>3</sup> /mol)	$K_{ow}^{**}$
Geosmin	165.1	150.2	$5.49 \times 10^{-5}$	$6.66 \times 10^{-5}$	3.701 <sup>(1)</sup>
2-MIB	196.7	194.5	$6.68 \times 10^{-5}$	$5.76 \times 10^{-5}$	3.13 <sup>(1)</sup>
IPMP	207.0	2438.0	$1.07 \times 10^{-3}$	$6.66 \times 10^{-5}$	2.41 <sup>(1)</sup>
IBMP	244.7	1034.0	$2.92 \times 10^{-4}$	$4.68 \times 10^{-5}$	2.72 <sup>(1)</sup>
TCA	260.0	10.0	$1.36 \times 10^{-5}$	$28.80 \times 10^{-5}$	3.91 <sup>(1)</sup>
p-Xylene	138.0	185.0	$1.15 \times 10^{-2}$	$7.01 \times 10^{-3}$	1412.5 <sup>(2)</sup>
m-Xylene	139.0	162.0	$1.09 \times 10^{-2}$	$6.91 \times 10^{-3}$	891.3 <sup>(2)</sup>
o-Xylene	144.4	175.0	$8.71 \times 10^{-3}$	$4.94 \times 10^{-3}$	1819.7 <sup>(2)</sup>

註：<sup>(1)</sup> 翁玉芬，“水中超微量有機異臭味物質 Geosmi 之分析及去除”，國立交通大學環境工程研究所碩士論文，p10，民國 82 年六月。

<sup>(2)</sup> LaGrega, M.D., Buckingham, P.L., and J.C. Evans, “Hazardous Waste Management”, MacGraw-Hill, New York (1994).

\* $K_h$ : 亨利常數,  $H = P_v$  (the vapor pressure) /  $C_s$  (mol/m<sup>3</sup>).

\*\* $K_{ow}$ : 為溶質在辛醇及水中的分配比 (octanol / water partition coefficient)。

## 水資源的有效利用

謝發清\*

### 一、前言：

水為人類生存不可或缺之天然資源，其重要性自不待言，地球上之水量共計有13.6億立方公里，其中海水佔97%，約有13.2億立方公里，淡水佔3%，約3.8億立方公里。河流、湖泊、地下與大氣中所有之水，為最接近人們生活圈之水，其存量卻僅有0.9千萬立方公里，只佔全地球上水量0.7%。

降雨為地面水之最主要來源，降雨量紀錄為最基本之水文資料，亦為水資源估計之首要項目，因降雨量紀錄常為水文資料中最齊全與長久者，由降雨量之空間與時間分佈，可概知水資源之分佈與水量之多寡。臺灣降雨量之觀測始於民前十五年，距今已有百年之紀錄，各觀測站紀錄年數多者為30至70年間，臺灣降雨型態，於地域、季節及空間上之分佈具有極大之差異，一般可分為季風雨，地形雨，熱雷雨，颱風雨與熱帶低氣壓雨等。

由臺灣年等雨量線圖量計臺灣地區平

均年降雨量深度為2,515公厘，折算體積為905億立方公尺，各區域年雨量以北部區域最為豐沛（2,934公厘），東部區域次之（2,715公厘），南部區域又次之（2,501公厘），中部區域最少（2,081公厘），臺灣各月降雨量分配極不平均，降雨量多集中於五月至十月，占全年降雨量78%，每月占6至17%，為臺灣之雨季，亦即豐水期；十一月至四月占22%，每月占2至5%，為旱季亦即枯水期，臺灣各區域月雨量分配情形，以北部區域較為平均，愈向南則分配愈不均勻，每年五至十月雨量由62%增至90%，最大月雨量北部區域集中於八月至十月；中部區域集中於五至八月；南部與東部區域集中於六月至九月，最小月雨量各區域則均發生於十一月至次年二月。

### 二、水源利用概況

臺灣地區目前總用水量約176億立方公尺，其中以農業用水為最多，約136億立方公尺，占77%，其次為生活用水約25

\* 台灣省自來水公司副總工程師

億立方公尺，占14%，其餘15億立方公尺為工業用水占9%，農業用水中，農田灌溉用水量約104億立方公尺，餘32億立方公尺屬養殖魚塭及畜牧用水，各標的水源不外為直接引用河川流量，估計年約50億立方公尺，惟枯水期可引用之河川流量甚少；其次為水庫調蓄水量，年約54億立方公尺，再者為地下水，平均每年天然補助量僅約40億立方公尺，現抽用量高達71億立方公尺，地下水超抽31億立方公尺。

臺灣地區雨量豐沛，平均年逕流量約668億立方公尺，其中雨季占77%，旱季占23%，惟於枯水年時，逕流量約341億立方公尺，枯水時期缺水情況明顯，且又空間與時間分布不均，河川流短坡陡，洪枯流量懸殊，颱風暴雨時，河川流量隨降雨而迅速漲落，常泛濫成災，平時及早季，河川流量甚低，可利用之可靠水資源有限。

台灣地區水資源之利用，早期主要以充裕農田灌溉，提高糧食生產為目標，因此農田灌溉用水量占台灣地區用水總量80%以上，民國六十年代後期，由於社會結構逐漸改變、國民生活水準提高，工商業發達，加以社會對水資源服務品質之要求日高，開始加速民生與工業用水之供應，二十多年來隨著社會進步及經濟繁榮，生活及工業用水增加快速，而可靠之新水源，尚無法適時配合開發供應。

台灣地區長期以來均著重因應季節性之需求條件而開發水資源，惟枯旱時期局部地區常發生缺水，因此必須解決長期性之分配不均以配合經常性需求量之急速增加，今後水資源應加強管理及多層次之利用，如既有水源之合理分配與有效利用，加強河川保育與積極推行節約用水以及有效管制地下水之利用，當為今後水資源開發利用之重要課題。

### 三、水資源開發

為供應各標的用水需求，其水源別可分為地面水（包括水庫、湖泊）、地下水，伏流水、池塘水，以及海水淡化等，目前供水水源以河川水與地下水占絕大部份，近年來由於生活與工業用水增加快速，而河川流量豐枯分佈不均，地面水源可供利用之水量差別懸殊，加上水庫設施興建費時，造成地下水之超量開發，並引起局部性之災害，鑑於地下水超抽所引起之災害，政府乃採行開發地面水資源，並實施地下水之管制，經多年來陸續完成興建或規劃水庫，藉增加地面水源之供應，而減少地下水之抽取量，以緩和地下水量之超抽。台北盆地由於翡翠水庫之開發完成，以及持續不斷管制與監測地下水之抽用，現地下水水位已回升，改善超用緩和地層下陷成果最為顯著；至於中部與南部區域亦將隨興建或規劃中水庫之完成，而

可獲得改善。

台灣地區河川流量，因受降雨於時間與空間分佈不均之影響，流量變化懸殊，因此為期於維持河川原來水量利用，水質以及生態保護等之機能，而使每年能穩定而充足利用河川流量，則須選定某一頻率之枯水年為規劃基準，再以此年之河川流量不足情形，作為水源供應量之開發依據。

水資源開發之計畫準則，通常係依枯水年頻率，枯水年時各河川用水標的間對水量調配之難易性，開發計畫之經濟性以及平時對水資源有效運用之經驗等條件而予以研擬。通常河川天然流量之基流量即為河川整年之穩定流量，其大小視河川之特性而異，台灣地區之河川，此項基流量多已引用殆盡，因此為應新增加各標的用水，則需開發超出基流量之水量，同時，新開發之水量必須維持整年穩定利用。本地區水資源之開發利用，光復前由於以農業為重，供應灌溉用水為主，惟為因應局部地區之生活用水或工業用水需求，遂有水庫之開發，其中較重要之計畫，供應灌溉用水者，計有北部地區桃園大圳，中南部地區鹿寮溪水庫及南部地區烏山頭水庫、尖山埤與虎頭埤圳等；供應公共給水者，計有北部基隆地區西勢水庫，中南部嘉義地區蘭潭水庫；供應工業用水則有南部高雄地區澄清湖，另中部之日月潭，係

為發電專用而開發。

光復初期為求社會安定，首要為充裕糧食，於此時期開發之水庫計畫，北部有大埔與石門兩水庫，中部有霧社及谷關水庫，南部有德元埤，鹽水埤、阿公店水庫，龍鑾潭及白河水庫等，並均於民國四十一年至五十四年間先後陸續完成。

民國六十年初期由於人口及經濟迅速成長，各標的用水及需求架構變異甚大，水資源開發費用昂貴，優良水源不易覓取，各標的用水必需綜合規劃利用。由流域規劃擴大為區域規劃，配合各標的用水需求，近年來相繼完成之水源開發工程，計有北部地區新山、翡翠、寶山等水庫；中部地區德基、永和山等水庫；南部地區曾文、仁義潭、鏡面、鳳山及澎湖地區成功、東衛、興仁、赤崁等水庫；最近興建完成者計有中部鯉魚潭及南部南化、牡丹水庫等，興建中者有中部集集共同引水壩等。

地面水之開發方式，除興建水庫蓄洪濟枯外，尚可於河口附近建築攔河堰，或越域引水，充分發揮各河川水量之利用，由於台灣河川下游受污染之情況相當嚴重，因此河川下游設堰攔水供用之方式，尚需配合水污染治理計畫之實施。

台灣地區年平均降雨量約為2,515公厘，約為全球降雨量平均值之3倍，雨量堪稱豐沛，惟由於受地形條件限制，且未

有足夠之蓄水設施攔蓄水源，以致每年約有五成以上之降雨未及時控制利用即逕流入海，平白損失珍貴之水資源，因此如何針對台灣地區特有之水文條件，加強雨水貯集系統之興建，以充分利用大自然恩賜之雨水資源，亦為日後應加以正視之重要課題。

台灣地形狹長，中央山脈縱貫南北，全島大小河川151條，均發源於中央山脈，故多為東西走向，流短陡陡，落差大，洪枯流量懸殊，颱風時期暴雨急促而量大，增加河川治理與水資源開發利用之困難，平時及乾季河川流量枯小，可利用流量有限。平均年逕流量約為668億立方公尺，但其旱季（十一月至四月）時期僅有154億立方公尺，占年逕流量23%，各河川月逕流量與月雨量分配相當一致，根據分析愈往南則河川流量愈呈枯竭，每年十一月至四月流量占全年比例由北部地區之38%減至南部地區之9%，最大月流量多發生於六至十月間，北部與東部地區因受颱風登陸影響，最大月流量多發生於九、十月；中部地區受梅雨季節之影響，最大月流量發生於六月；南部地區屬熱帶性氣候，受颱風及熱雷雨影響，八月流量最大。各河川最枯月流量均發生於十一月至四月間，北部與東部（秀姑巒溪）以北地區為四月，西部（鳳山溪至烏溪上游）則為十二月至一月，中南部則為一月至三

月。

#### 四、水資源聯合運用

為因應台灣地區今後生活及工業用水成長之殷切需求，在維持農業用水不再增加前提下，秉持我國水資源開發與節流比重之即定政策，除提高水資源之管理效率，改善現有供水設施，以充分發揮既有設施之出水及調配供應能力，並推動節約用水等措施外，於枯水期由於大部份河川天然流量幾已引用殆盡，且地下水之利用亦已呈超抽或幾已引用殆盡，除加強水資源保育及水污染防治工作外，如何調蓄豐水期多餘水量以因應未來需求量之增長，至為重要。

水資源開發為區域發展之先決條件，歷年來均為滿足台灣地區經濟成長所增加之用水需求而開發水源。

河川逕流量，豐枯懸殊，變化無窮，將流量站紀錄依年選法分別選出連續枯早一個月、二個月、三個月、六個月及全年流量予以頻率分析，各種週期年之發生年並不一致，同一週期年之枯水流量亦不相同，因此以往採用代表年之分析法不易正確表達枯旱真相，且目前各水系未必有水庫可供該水系蓄洪濟枯，如高屏溪水系迄未興建水庫，故除越域引水以充分利用水資源外，而水庫之存蓄調度能力亦應隨水庫容量大小及河川逕流量之時空分佈而

異，故為提高水資源利用率，聯合運用勢在必行，世界各國之水文專家為突破此種困擾，仍相繼研發可供評估供水能力之標準、以供參考茲說明如下：

評佑供水能力時，一般以容許某種缺水程度作為評定標準，惟此項標準迄今尚無定論，為期使此種缺水評定標準能更客觀性及合理性，將各種供水情況下之缺水情形計算出各種缺水參數，如缺水指標（% day），缺水指數（S.I.），年缺水率（%）等，以供相互比較對照，俾利選擇適當缺水容許標準以認定供水系統供水能力。

(1) 缺水指標（% day）=【日缺水率（%）×連續缺水日數（day）】

係參考日本水資源公團之期刊（水と供に）於1977年10月號NO159.p8研究結果，公共給水缺水指標，以不超過1000-1500 % day為宜，惟國內用戶缺水容忍度很低，且供水系統已將現有水源一併納入分析，以不超過500-750 % day為宜。

(2) 缺水指數S.I.（Shortage Index）

$$S.I.=\frac{100 \sum \left(\frac{SA}{DA}\right)^2}{N}$$

式中 SA = 年缺水量

DA = 年計劃供水量

N = 分析年數

上式公式計算法取自美國工兵團訓練

文獻Volume 8 「Reservoir Yield」該S.I.容許值視當地水源情況，水文分析研究使用時段缺水成本，生活品質等因素而定，一般採用1.0，惟本公司在多次分析時因現有水源均一併列入，非單一水源之運用分析，為多水源聯合運用，操作難度高，並考慮用戶之容忍度，S.I.暫定在0.5以下。

$$(3) \text{年缺水率}(\%) = \frac{\text{年供水量}}{\text{年計劃供水量}} \%$$

供水能力分析：

由於經濟繁榮工商發達，用水量急速增加，水資源開發為區域發展之先決條件，而新水源開發困難，跨區域水資源聯合運用勢在必行，多年來水公司完成的聯合運用分析有基隆區，板新石門區（三峽堰、鳶山堰、石門水庫）新竹區（隆恩堰與寶山、永和山水庫）台中區（大甲溪、烏溪與鯉魚潭水庫、建民水庫）彰雲區（集集攔河堰與蘭潭、仁義潭水庫）台南高雄區（甲仙攔河堰、高屏攔河堰與南化、曾文與烏山頭水庫），茲舉台南高雄區水資源聯合運用為例，說明分析過程，其相關資料為曾文、南化、烏山頭水庫容量及壩址、甲仙、高屏攔河堰之歷年流量記錄及各控制點之保留水權量，迄目前為止曾文、烏山頭水庫係以農業用水為大宗，公共給水係依分配水量取水，如取水量超過分配水量則需價購，南化水庫係公

共給水之單目標水庫可自由彈性調度取水，甲仙攔河堰在十一月至次年四月份公共給水無水權，高屏溪攔河堰在一月至四月亦無水權，五月份及十一、十二月份公共給水水權分別為5.0、5.5、2.5CMS，經查每年十一月、十二月係農業雜作期間故農業用水實際取水量不多，尚有相當餘水可資利用，一、二、三、四月雖為枯水期間，但也常遇春雨而有可利用的水量，為提高水資源的利用率仍就扣除保留水權量後可引取的川流式水源量及依公共給水水權量作聯合運用比較，又因甲仙攔河堰與高屏溪攔河堰係同一河川之上下游，故在計算高屏溪攔河堰之可引取水量時除應扣除甲仙堰引水量外，南化水庫發生溢流時甲仙堰應減少引水或不引水，故高屏溪攔河堰之逕流量應再加上該未引入之水量再計算可引水量方不致有誤，實際分析時，係以川流式水源優先取用，不足時方由水庫出水，算得須由水庫出水量後再計算水庫運轉情形，並據以計算缺水指標（% day）缺水指數（S.I.）及年缺水率（%），南化水庫、高屏溪攔河堰及現有之本公司烏山頭、曾文水庫分配水量、澄清湖、拷潭等伏流水或地下水水源則系統總出水量為320萬CMD時（現有水源量共210萬CMD），運轉成果如表一，其S.I. = 0.15，每年四、五月均發生缺水，如枯水期剩餘可利用流量可機動抽取，則系統總

出水量為350萬CMD，且缺水時間不集中於四、五月間。

由於同一地區之水文特性常相類似，攔河堰有大量水量可引供引取時，水庫可能已溢流，水庫極需引水補充時，攔河堰未必有水可供引取，故豐水期川流式水源之可取水量並非全屬有效水量，一系統之供水能力則視枯水期之調度能力而定，如本案之高屏攔河堰枯水期若無法取水則該系統之供水能力則大受影響如前述。

由於用水需求量與俱增，新水源開發日益困難，水資源聯合運用勢在必行，但水資源聯合運用並非各水源間相互連通就可達成任務，而是對可利用水源之掌控調度極靈活機動，以免珍貴之水源流失入海，又川流式水源濁度常較高，尤其降兩期間，故為能充分使用川流式水源，淨水場必須能處理較高濁度之水質。聯合運用之系統，以川流式河川流量作為水源之淨水場必須能處理較高濁度之原水方不致影響聯合運用之效果，又川流式水源之攔河堰大都位處河流之中下游，其水質易受污染，目前水源量不足，欠佳水質無法不加以利用，故政府應積極改善河川水質，多設污水下水道處理設備以淨化水質，對污染源也應加以取締，否則可利用之水源日漸減少，對未來經濟發展將有嚴重影響，川流式水源因逕流變動不定，而各標的水權量固定不變，也即枯水期也常有剩流量

餘可資利用，但受限於水權量而令珍貴的水量流失入海，應設法與予機動調度，又一水庫之供水能力亦受其功能之調整而有很大之影響，即防洪功能之考慮與否，發電與公共給水之功能何者為優先考慮等。

## 五、結論與建議

- 1、臺灣地區的年平均降雨量為2,515公厘，為全世界平均降雨量的3倍，但由於豐枯流量懸殊，雖然已興建了若干水庫以蓄洪濟枯，枯水期之供水量仍感不足。
- 2、天然優良壩址難覓，且近年來民意高漲，新水源開發不易，為因應工商發展之需求，只有採取水資源聯合運用，選擇適當的川流式攔河堰水源與水庫（或地下水）組成一供水系統，

豐水期引用川流式水源，枯水期引用水庫水以提高水資源利用率。

- 3、水資源聯合運用之供水能力必須將數十年之歷史流量資料依序詳予精算分析，深入了解各時段之供水實況，且引水操作必須機動靈活，因水權之核定有其實質上之困難，故河川有剩餘流量時得機動引取方不致珍貴的水資源流失入海。
- 4、川流式的水源豐水期常濁度較高，其相關淨水場設備必須具有處理較高濁度之能力，且攔河堰大都設在河川中下游，水質易受污染，故政府應做好河川污染防治工作，取締污染源，多設污水下水道處理設備以淨化水質
- 5、各用水標的宜自行多加留意節約用水。

表一 南化水庫蓄水情形統計表 (1/2) (系統出水量每日328萬CMD) 單位：百立方公尺

	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月
48 v= lc=	1236919	992304	666157	336209	210748	878925	181412 1500000	1876306 1500000	894126 1500000	1327398	1074620	807052
49 v= lc=	542526	292536	----- 31848	----- 400771	139014 196556	970936	811806	1413084 1500000	720285 1500000	1362388	1114957	809525
50 v= lc=	546153	297171	----- 28994	----- 350268	216385 133617	715497	998077	957701 1500000	821115 1500000	183290 1433987	1182280	883439
51 v= lc=	620084	370245	90350	----- 228006	----- 489058	23344 59395	587402 129711	1474591	663140 1500000	263286 1427099	1174719	911869
52 v= lc=	647064	396800	69459	----- 344361	----- 527395	23737 133338	1167931 40217	1043962	499500 1500000	26420 1368948	1116535	855500
53 v= lc=	656696	452733	126613	----- 285040	----- 406617	687693	660692	101392 1500000	289736 1474470	1330345	1081604	819690
54 v= lc=	555921	305534	----- 22260	----- 411771	230106 171160	1237661	415716 1500000	1401187 1500000	125069 1384810	68978 1434136	1233898	975924
55 v= lc=	713812	466929	154108	----- 236351	305310	485661 1500000	540172 1420060	990351 1500000	434074 1500000	51609 1412156	1160577	898673
56 v= lc=	634651	385037	57462	----- 349473	350280 344519	1146216	1400695	96834 1478236	90883 1431086	1234926	978399	715752
57 v= lc=	450829	243224	172861	142263	283862 88289	1214262	339105 1500000	582964 1500000	311796 1496430	392265 1473157	1222490	964410
58 v= lc=	699727	452279	125560	----- 285785	171641 345566	1307354	1348856	633205 1427791	529577 1500000	285847 1438109	1187162	925236
59 v= lc=	662848	412472	84734	----- 329254	88286 172800	----- 55101	461513	723690	94895 1500000	423034 1500000	1253835	994368
60 v= lc=	730688	480979	153185	----- 260803	----- 456437	677331	1098663	160761 1491442	910406 1500000	268280 1435370	1227041	972443
61 v= lc=	827735	584804	261572	----- 137766	711520	793858 1500000	1220469 1500000	1984787 1500000	154375 1469347	45312 1365807	1114446	853898
62 v= lc=	595144	345748	18133	----- 369152	----- 381154	733839	442980 1500000	976873 1500000	703104 1500000	279314 1500000	1247878	987139
63 v= lc=	722547	474528	148979	----- 263302	211992 40835	180195 1500000	486803 1497773	954686 1500000	875741 1500000	738072 1500000	1286490	1028959
64 v= lc=	766684	542041	558951	403024	505388	372035 1500000	867909 1500000	1902857 1500000	334054 1500000	500781 1500000	1310428	1058932
65 v= lc=	799804	550173	223101	----- 190887	564541	1109772	906152 1500000	1156908 1500000	137277 1500000	152955 1438845	1192720	867521
66 v= lc=	603225	354305	26511	----- 387477	415036 255812	1088020 1500000	1378197 1500000	1256173 1500000	355280 1500000	288380 1438563	1189547	928316

表一 南化水庫蓄水情形統計表 (2/2) (系統出水量每日328萬CMD) 單位：百立方公尺

	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月
67 v= lc=	664445	415888	267910	195142	633772	1159314	50636 1500000	1506956 1500000	260263 1462098	64022 1500000	1288397	1031134
68 v= lc=	769407	521466	197731	----- 213973	194178 304133	909095	892181	1112677 1500000	692734 1500000	1334230	1084806	823938
69 v= lc=	559469	310778	----- 15678	----- 413926	----- 404672	----- 424312	----- 336909	437242 99960	474690	288212	----- 62035	----- 305613
70 v= lc=	----- 265471	----- 250734	----- 294017	----- 412914	203182 260018	1122521	1500000	586298 1500000	416445 1500000	1554893 1405064	66062 1153300	894559
71 v= lc=	630168	379815	53583	----- 358356	283151	1251911	1500000	974185 1486628	209226 1452218	1282036	1030810	768833
72 v= lc=	504778	719211	1090771	1357413	363614 1500000	643893 1500000	1287371	212652 1500000	293947 1406135	1210376	954515	667532
73 v= lc=	402592	152367	----- 175198	----- 385877	490986	1208019	342731 1422215	330216 1500000	186349 1452358	1253817	998191	712701
74 v= lc=	447767	408456	115092	----- 259620	269811 343752	1440040	180365 1412826	860926 1500000	424569 1500000	34491 1405321	1150243	864060
75 v= lc=	620261	370652	79547	----- 333427	1001099 172744	1500000	608286 1478111	293507 1500000	420845 1500000	588037 1440176	130556 1187320	901410
76 v= lc=	636135	385597	100822	----- 39899	----- 320629	277027	1118840	258914 1500000	412515 1482910	1411648	1171204	915728
77 v= lc=	654527	405434	78883	----- 211313	279434 273125	590321	361113	125925 1500000	467274 1500000	247737 1443603	1202357	942290
78 v= lc=	679120	429404	102137	53353	----- 130968	463391	1140825	250957 1500000	1476602 1500000	211111 1430592	1131801	820561
79 v= lc=	562853	366913	93666	1075011 43781	1104595	1500000	620653 1415039	253909 1500000	811709 1500000	858730 1377408	71604 1128287	855617
80 v= lc=	593645	344926	18856	----- 394768	129526	728931 174778	1368408	409612 1500000	1288636	1429496	1176299	905714
81 v= lc=	642222	760462	971784	83999 1500000	356664 1500000	448743 1500000	929461 1500000	841317 1500000	2062800 1500000	137190 1439364	1187060	925846
82 v= lc=	661654	412020	84526	----- 329162	155960 80464	899861	652883	538888	319848	123776	----- 130028	----- 261614
83 v= lc=	----- 264392	----- 201534	----- 273478	----- 411385	215064	727286	1258228	892561 1500000	213580 1500000	1437354	1156650	838568
84 v= lc=	574876	326342	1448	----- 391237	9188 279512	516089	406834	566963	335063	161591	----- 97813	----- 264214

註：一、(1) 48,49……84,表示年代，(2) V：表示水庫蓄水量，(3) lc：表示水庫缺水量

二、每一欄位之第一行，表示水庫溢流量，第二行表示水庫蓄水量，第三行表示水庫缺水量

# 陳耀楠先生其人其事——記台灣光復後自來水建設的一位關鍵人物

于家駒\*

## 一、前言

去年三月間，筆者拜讀到本刊第十八卷第一期刊載的由吳建民、王啓明及姚關穆諸位先進所撰，介紹台灣自來水建設的前輩們，引發筆者撰文報導台灣自來水統一經營的主持人陳廉泉先生，文載本刊八十八年八月第十八卷第三期，可憾其中錯誤多外，尤其是將部分先進的大名誤植，檢討原因應怪筆者字跡過於潦草，使排字及校對者難以確認所致，謹在此表示萬分的歉意。

談及台灣光復後參與自來水建設的關鍵人物，陳耀楠先生應是其中的一位；他為台灣的自來水建設奉獻心力近四十年，他熱愛「自來水」，在臺灣省自來水公司協理任內，曾欲放棄升任省營中興紙業公司總經理的機會，繼續為台灣自來水事業打拼而未能如願。目前他雖已退休，但仍在繼續為「自來水」盡力之中。他的經歷正是台灣自來水建設及發展歷史的一個非

常重要的部分。

筆者有幸曾與陳先生共事及交往達二十七年之久，對他的言行及作為深為欽佩，在數度與他情商後，終獲同意並提供資料，得以完成本文，以饗我會員同仁及讀者。

## 貳、家世

陳耀楠先生之先祖於清康熙三十二年（西元1694年）由福建省漳州府詔安縣隻身來台，定居於今之雲林縣虎尾、斗南一帶，以開墾致富。三百年間繁衍成一大家族，後人多以經商務農為業，勤儉篤實，安分守己。祖父煥修先生曾任斗南區長（日據時期街庄之前身），擁有田地近百甲，娶一妻二妾，育四男六女。後因經商失敗，尚餘土地三、四十甲，不幸英年早逝。父守成先生，自台中商業學校畢業後，因須接掌家務及侍奉寡母，無法赴日本升學。被斗南街役場聘為會計，光復後任斗南鎮公所總幹事、秘書、斗南漁市場

\* 前臺灣省自來水公司主任秘書

主任及斗南順安宮（媽祖廟）管理委員會主任委員，敬業樂群，為地方所敬重。由於守成先生樂於助人，在光復後為一上海商人作保受累，不得不鬻產以清償債務，其後又因「耕者有其田」及「三七五減租」政策，所剩薄田及公職薪資所得已難維持一家九口之溫飽，所幸母親楊慎女士出自斗六教育世家，知書達禮，勤慎賢淑，經營米糧及雜貨以為挹注，直至耀楠先生自台灣大學畢業為止，前後十年之久。

耀楠先生於民國十九年在日據時期之台南州斗南街出世，下有兩弟三妹，大弟俊仁先生畢業於國立成功大學電機系，退休前曾任聲寶公司廠長等職，二弟夭折，諸妹婚後皆有美滿之家庭。

## 參、教育背景

耀楠先生自幼聰慧好學，過目不忘。七歲就讀小學，民國三十四年考入台南專修工業學校土木科，翌年轉讀台灣省立高雄二中高中部（「二二八」事件後，高雄一、二中合併為高雄高級中學），三十八年因優異之成績（數學、理化均近滿分），以第一志願就讀國立台灣大學土木工程系，專修結構工程，兼修衛生工程課程。四十二年畢業，參加高等考試及格，在預備軍官第二期，接受首批空軍預官訓練一年。五十五年獲聯合國世界衛生組織（WHO）獎學金，在美國北卡羅林納大學

（University of North Carolina）Chapel Hill 校區，參加由D.A.Okun博士主持之「衛生工程設計國際班（International Program of Sanitary Engineering Design）」進修，前四月在校研讀課目，後五月在紐約市（New York, N.Y.）著名之Hazen & Sawyer顧問工程師事務所跟隨衛生工程專家H.E.Hudson研習，並往美東各大儀器廠、水廠觀摩及加州（California）北部參觀其全州性水源開發計畫與區域性自來水事業。六十二年五月又獲世界銀行贈與若干開發中國家最多一個名額之獎學金，往美國首都華盛頓（Washington DC）之世界銀行經濟發展研究所（Economic Development Institute）第一屆上下水道班受訓二月，與訓者皆為各國自來水界之菁英。

## 肆、工作經歷

### 一、在台灣省建設廳工程總隊服務期間

耀楠先生於四十三年服役後，被派任省建設廳工程總隊工程員。在總隊長劉永楸先生主持下，參與全台之上下水道、市區道路及公共建築之建設。由於他在台灣大學主修結構工程，畢業論文為橋樑設計，故被派監造屏東市建國橋新建工程，次年六月甫由省立台南高工畢業之林茂文

先生亦派在同處監工。四十四年九月耀楠先生奉召以空軍少尉階在台中市水滸空軍修護廠服役一年半，服役期間無事可辦，除讀書進修充實自己外，夜間兼任家庭教師，光陰並未虛擲。

耀楠先生於四十六年初退役，即被工程總隊派往新成立之高雄區自來水工程處，工程處主任為郭鎮先生，後由胡兆忻先生繼任，（郭、胡兩位後來均為聯合國羅致，擔任衛生工程顧問。）參加高雄區自來水第一期擴建工程，是他正式與自來水結緣之始。處內同事後來亦長期從事台灣自來水建設者有陳梓濱、劉家堯、陳雲祥及彭桂焄先生，四位先生至公職退休後仍續為發展台灣自來水事業而努力（陳梓濱先生自省公共工程局工務組長退休後，出任製造大口徑預力混凝土管之辛毅實業公司總經理，劉家堯先生自台灣省自來水公司副總經理退休後，出任中華民國自來水協會秘書長，陳雲祥先生自省公共工程局工程司退休後，亦在辛毅公司服務，彭桂焄先生自省公共工程局工程司退休後，在財團法人中興顧問工程公司衛生工程部門工作）。耀楠先生初被派作台灣首座最新式、最大型之淨水場—大貝湖（今之澄清湖）快濾廠新建工程（設計出水能力為35,000CMD）監工，一年後即主持高雄市3800噸高架水塔工地。該具水塔之鋼體由美援贈送，在美國製成，分塊連同漆料運

來台灣，由當時在國內之焊接權威中國石油公司負責安裝。另已發包之壽山10,000噸高架配水池工程，因挖方時發現山坡隨之滑落，決定改在較低地點興建水塔。由於耀楠先生有結構之專長，遂受命在監造林德官高架水塔之同時，設計壽山3,200噸鋼筋混凝土高架水池，並在林德官水塔完工後，轉往壽山高架水池工程直至完工。以上兩座高架水塔在當時均為台灣最大且形體又最特別者。

四十七年三月他被晉升為幫工程司。

## 二、在台灣省公共工程局服務期間

四十七年九月，台灣省政府將建設廳土木科之給水組、建築組、工程總隊及工礦公司營建處合併，成立省公共工程局，首任局長為王章清先生。公共工程局辦理台灣之上下水道、都市道路、公共建築等之建設，都市計畫之擬訂及自來水廠之督導等業務。因制度之變更，將原由設計人員負責監工改為分別辦理，自來水規畫與設計屬衛生工程組職掌，由設計小組或測量設計隊承辦；監工則屬工務組業務，由工程處或工務所辦理。耀楠先生於四十八年十一月奉調局內衛生工程組，被派往台北縣中和鄉辦公廳，參與由鄭拱光先生主持之「石門水庫自來水設計小組」，設計石門區自來水第一期工程，包括自桃園埔心30,000CMD中心處理場及通往中壢、桃

園之送配水管線工程。

一年後，他因績優被擢升為副工程師，仍留在小組工作。五十一年石門水庫自來水設計小組更名為「城市自來水設計小組」，下設四個測設隊，他兼任其中一隊隊長，主辦台南區自來水計畫之規畫工作。

耀楠先生駐台南辦理自來水之規畫為時三年，因供水範圍及水源之不同，曾有十二種方案，最後擇定第十二案「設曾文溪原水抽水站與烏山頭水庫交換水源案」。此案完成後，不僅解決懸擱多年之水源問題，且因減少大量工程費，使水價調整幅度降低許多，地方議會貸款銀行均可接受。茲將最早之第一案與選定之第十二案比較如下：第一案興建關廟水庫，可增加水量10.4萬CMD，工程費3.69億元，每CMD3,550元；第十二案曾文溪、新港交換水源工程，可增加水量8.07萬CMD，工程費1.75億元，每CMD2,160元。此一規畫案首創台灣自來水許多新例：1.以交換水源代替興建水庫：在嘉義縣新港鄉開鑿10口井（出水能力共為2萬CMD）供當地全年灌溉用途，在曾文溪設抽水站，抽雨季溪水灌溉台南地區，請嘉南水利會將原來引入圳路灌溉之原水保留在烏山頭水庫內，待枯水期曾文溪無水時，再放入圳路，流往新市鄉潭頂之新建淨水場處理，而免建已規畫多年之關廟水庫。2.使用預

力混凝土管，節省大額工程費。3.將已埋設數十年之鑄鐵管清洗後加水泥襯裡，重新使用。4.長程送水管中途加設管中加壓站多處，以節省管線之工程費。5.供水區域內不論大小村落均予供水（計有72社區），落實區域供水。以上案例後來成為世界銀行經濟發展研究所之教材。

五十三年曾文水庫開始規畫，耀楠先生移隊新營鎮，配合規畫「曾文水庫供水區自來水可行性計畫」，其範圍為嘉義及台南縣市。五十四年因台南區自來水計畫已定案，財源亦已確定，他被派兼另成立之測量設計規畫隊隊長，副隊長為陳梓濱先生，第一分隊長為劉家堯先生，第二分隊長為陳雲祥先生。除辦理台南區自來水之設計外，並辦理南部地區鄉村自來水之設計工作。二年後該隊正名為「南區自來水測量設計規畫隊」。

五十五年耀楠先生被晉升為正工程師，並獲世界衛生組織資助送美國進修近年。返國後兼任衛工組第一課課長，主管全局自來水工程之年度計畫作業，分配計畫經費及審查計畫執行成果等業務。其時自來水外部單位設北區、中區及南區三個測設隊，分別由劉顯榮、陳茂達、陳梓濱先生兼任隊長，當時以自來水為主業之第一家顧問工程公司「中國瓦斯水道工程顧問公司」，由范純一及林克俞先生主導設立。不久，鄭拱光先生亦主導成立「集美

顧問工程公司」。該兩公司直接受各地自來水廠委託，作自來水工程之規畫設計。因水廠需向公共工程局申請建設經費，故須將計畫送局審查，合格者始能定案。

六十年二月公共工程局衛工組之第一、三課及主計室之自來水財務業務部分合併，設「自來水企畫組」。衛工組成為專責規畫及設計下水道單位，耀楠先生被派兼「自來水企畫組」組長，組內設有計畫、機電、財務三課，外設北區、中區及南區三測設隊，分別由曾人傑、葉慶元、袁傳緝先生擔任課長，其中袁傳緝及財務課王禮忠先生並掌管新成立之「自來水建設基金」及省府投資，並審查或代為擬訂各水廠之財務計畫；朱憲政、郭龍朗、劉家堯先生兼任隊長。原衛工組三位測設隊長之陳茂達先生改兼自來水督導組組長、陳梓濱先生改兼中區工程處主任，劉顯榮先生辭職出國，後在亞洲銀行任職。

耀楠先生在衛工組自來水課課長及自來水企畫組組長任內，推動之計畫甚多，茲舉其犖犖大者十一項如下：

1. 執行台灣省自來水長期發展計畫之第二期計畫（由民國五十八年至六十一年）及擬訂第三期計畫（六十二年至六十五年）。
  2. 檢討台灣省自來水統一經營之可行性，結果認屬可行。
  3. 配合經濟部水資源委員會辦理高屏溪流
- 域統一規畫，找出里港及高屏溪西岸地下水以及東港溪水源，進而：
- (1) 將原擬在二仁溪旁建小水庫供應路竹地區鄉鎮自來水之計畫，改由里港抽取地下水越嶺供應大岡山地區，並設計施工。
  - (2) 利用高屏溪西岸地下水，設拷潭淨水場處理後，送供南部工業區及高雄市用水。
  - (3) 規畫高雄區自來水第二期擴建計畫，興建鳳山水庫，將東港溪之豐富水源與高屏溪伏流水聯合運用。
4. 配合曾文溪水庫之興建，規畫台南區、新營區、嘉義區自來水之詳細計畫，並商得水庫當局之配合。
  5. 協助經濟部水資會擬訂「達見水庫下游水源最佳運用計畫」進而決定興建石岡壩，供應大台中地區水源。
  6. 辦理板新地區自來水規畫，進而要求石門水庫供給灌溉之餘水。
  7. 配合台中港開發，規畫大台中區自來水計畫。
  8. 為提高大管線工程之施工效率，將原有之供料與包商更改為連工帶料發包制度，並進一步不限管種，使責任分明，保持品質，單價降低，且加快施工速度。
  9. 實施規畫及設計統一審查制度，以求品

## 52 自來水會刊第十九卷第四期(76)

質之提高，工程費之降低。

10. 加高嘉義蘭潭水庫並建蘭潭淨水場，解決嘉義市之缺水問題。
11. 規畫基隆地區自來水之擴建，擬訂新山水庫興建及瑪鍊溪水源之開發。

六十二年初，台灣省自來水統一經營籌備工作開始進行，耀楠先生即參與其事，同年四月籌備處在台中市成立，他兼任第二組組長，主管各水廠資產之清查，協調水廠之合併，擬訂公司財務計畫，以公共工程局企畫組財務課同仁為主體推展工作。另被派為研究委員兼工務研究小組召集人，擬訂公司之規畫設計、工務處理、操作維護、水質檢驗之組織及作業程序與工作準則等等。同年十一月他被晉升為副總工程司。所遺自來水企畫組組長職缺由陳梓濱先生繼任。

### 三、在台灣省自來水公司服務期間

民國六十三年元旦台灣省自來水公司成立，耀楠先生被調任公司協理兼總工程師並兼技術處經理，至六十四年四月技術處經理由原在嘉南農田水利會任工務主管之陳石能先生擔任，但因自來水非石能先生之專長，故僅掌握工事及考工兩組，設計及水質兩組仍由耀楠先生掌管。總工程師一職至六十七年八月由省建設廳第四科科長胡江東先生接任，但自來水之規畫與設計，操作及水質檢驗等業務，仍偏勞耀

楠先生掌管，直至七十七年四月胡江東先生升任協理，由劉家堯先生接任總工程師後，始除自來水規畫業務之外，其餘均移歸總工程師核辦。

台水公司成立之初，僅置兩位協理，分別掌管企畫、技術、操作及財務與業務及一般行政，久懸之第三任協理職缺至六十七年六月由省財政廳第一科科長荊允謀先生調任，荊先生掌管財務及主計，但公司年度預算之編製及執行與財務計畫之擬訂仍由耀楠先生主持。

耀楠先生擔任台水公司協理至八十一年十二月調升省營中興紙業公司總經理為止，計十九年之久。任職期間他因須參加各種會議、勘查工地、視察各區工程處及管理處，且在七十七年以前，台灣省議會總質詢期間須陪同或代表總經理列席備詢，故辦公時間內多不及處理公文，尤其規畫及設計報告圖說必須仔細審閱，經常加班至深夜，工作量特別繁重。

台水公司成立初期，中北部之自來水工程仍委請公共工程局設計及施工（當時該局北區及中區兩測設隊並未併入公司），自六十三年初至六十七年底，耀楠先生被公共工程局聘為「自來水專家」，參與每週舉行之自來水會報，以明瞭發生之問題與辦理之進度。由於該局北區、中區兩隊中有多位同仁希望調來台水公司長期從事自來水規畫設計工作，耀楠先生曾數度

與陳季涵局長情商未有結果，遂紛紛辭職，寧願犧牲休假及年度考績等權益，以新進人員進入公司服務者，計有陳榮藏、謝發清、劉廷政、許文維、楊明山、蔡桂郎、陳福田、黃國傳先生及賴雙鳳女士等。因此，陳局長對耀楠先生頗不諒解，此批轉入公司服務之技術人員皆經驗豐富，熱誠幹練，表現優異，其中陳榮藏先生已升任總經理，其餘多人皆已擔任內外單位之主管。故對台水公司而言，確是一大利多。

耀楠先生在台水公司服務十九年，對公司貢獻甚大，茲列舉於下：

1. 建立自來水規畫制度並統一規畫之審查：使台省自來水建設發展經費之運用得經濟而合理，使建設每口立方公尺供水能力之經費維持在美國與日本之三分之一以下。又在公共工程局時期，僅在需擴建地區作簡單之計畫，然後設計施工，五十一年台南區雖作詳細規畫，亦僅限於數個鄉鎮市而已，直至曾文水庫之興建及水資會辦理高屏流域規畫時，始配合作大區域之全面性規畫。台水公司成立後，耀楠先生負責推動台灣及離島全面性之規畫，不論建設之需要性與時間性，所有鄉鎮市之村落均涵蓋在區域性規畫內，且每五至十年重新辦理一次，以因應最新清況。在需要建設時，即又照區域規畫結果辦理需建設地

區有關部分之細部規畫，進而設計施工；所需水源之開發亦可預先辦理，不致在地方缺水時始尋覓水源，因需要迫切，無法作最經濟之考量。

2. 注重培育自來水建設人才：耀楠先生特別注重在職人員技能之進修，除承總經理之命安排訓練課目及指聘講師教授外，並透過各種關係向國外之學術機構、機關、公司及水廠薦送公司人員前往作較長期之進修或研習，參選者均須通過耀楠先生之面試，由六十五年至八十一年選送往荷蘭國際水利及衛生工程學院（International Institute of Mydraulic and Sanitary Engineering）、泰國亞洲理工學院（Asia Institute of Technology）、美國環境科學工程公司（Enviomental Engineering-Scienee, Inc.）、西德（由中德技術合作計畫作為期一年半之研習安排）及美國與日本各大水廠進修研習者共有101人，其中往荷蘭部分，自六十五年至六十九年連續五年曾向荷蘭各大學國際合作聯合基金會（The Netherland Universities Fundation of International cooperation）爭取得六個全額獎學金名額，為公司節省許多經費。

耀楠先生非常在意工程人員之操守，認為不受政客及黑金之影響是工程人員應堅守之本分，故常與同仁共勉。

3. 創行規畫水源聯合運用計畫：耀楠先生體認水庫其其他河流豐水期之流水聯合運用，較一向之單獨運用計畫可多出甚多可用水量，而減緩興建水庫之壓力。他所創行的成果非常顯著，例如：高屏溪與南化、曾文兩水庫之聯合運用，年可增加水量4億立方公尺，大甲溪與鯉魚潭水庫聯合運用年可增加水量1.4億立方公尺，均已在多年前規畫完成，並全力推動「大漢溪、新店溪與石門、翡翠兩水庫之聯合運用」，以及在中、南部之其他多項聯合運用之研究。因為已規畫出10數億立方公尺之水量。
4. 主持擬訂台水公司中長程發展計畫：定案後每二至三年修正一次，使公司未來十年之建設、財務、營運及人力等，每年計畫有明確之數據，以編製年度預算。
5. 主導：
  - (1) 經濟管材、經濟管徑選擇制度，節省龐大管線經費。
  - (2) 大管不限管材連工帶料發包制度，使廠商低價競標，施工快速，責任分明。
  - (3) 淨水場工程實施統包制度，不限淨水方式，祇限完工後之處理品質及費用。結果節省許多工程費、設計人力及施工時間。
  - (4) 規畫並實施小區管網，能確實管制

區內水量、水壓，且有利於檢漏修漏作業。

- (5) 中小型供水系統儘量合併為大型系統，以利調配、操作及營運管理。
  - (6) 大系統間及大淨水場間儘量以大管連接，在必要時可相互支援水量。
6. 建立工程發包制度並確保施工品質：拒絕各方議價之要求，採公開招標方式。對領標者絕對保密，以杜綁標及圍標，故公司技術處之工程發包，頗獲廠商之讚譽。對各區管理處，限其辦理小型或維修工程，並採廠商登記，輪流比價或採單價發包方式防弊，一般新擴建工程集中由技術處發包後，交區工程處監辦。

公司每月舉行工程會報一次，當場解決問題，討論改進措施，供各工程單位進行並予追蹤，以提高工程設計及施工品質。

#### 7. 對釐訂水價之主張：

- (1) 採統一水價以求普及率之提高及新擴建工程免除計算水價之困擾。（在公司成立前，耀楠先生曾向省建設廳林洋港廳長說明統一水價之重要性及必要性，獲林廳長允為說服省議員。
- (2) 供水普及後，高成本地區除生活必

需水量外，採差異水價。

- (3) 對工業用水大戶之供水成本低，累進水價在二千度以上應採累退方式計價，以吸引工業用戶而貼補家庭用戶。

8. 在人事方面：

- (1) 對公司「人員設置標準」之擬訂及修訂出力甚多。
- (2) 對應徵來公司服務之技術人員，在陳廉泉總經理任職期間均由耀楠先生陪同面試，陳總經理非常尊重他的堅持取才，不考慮其他因素的意見。
- (3) 要求新進及在職人員接受較長期之職前訓練及深化專業訓練，並要求外單位主管對員工工作適才適所之安置，不致浪費人才、人力。

9. 在管理方面：

- (1) 建立區管理處績效考核制度：用具體數據討論，分配責任並加考核，進而作為經營之成績。
- (2) 建立各供水系統及分段加壓地區之成本分析制度：落實成本控制之訓練及考核，俾對各地供水成本差異之了解，如有較大差異則要求其作差異分析，而能究其原因參考改進。
- (3) 規定各廠所每半年提出研究或工作心得報告：倡導員工之研究或改

進之風氣。

10. 在研究發展方面：

- (1) 在年度預算內寬列研究經費，親自審閱研究報告，並作深入之瞭解，然後主持研究報告審查會。
- (2) 細心閱讀外文書刊雜誌，如美國自來水協會月刊（Jounal AWWA）、日本水道雜誌、日本水道產業新聞、國際自來水協會AQUA等，並將歷次參加國際會議攜回之資料，就其中與自來水相關之新知識、新技術之論述或報導均自行或指定同仁譯成中文後，送刊「自來水」雜誌，供公司內外之從業人員汲取新知。
- (3) 在公司員工訓練所講授自來水課程多年，均強調研究發展之重要，並要求注重「工程經濟」之研究，研究在規畫、設計、施工、運轉各階段如何始能節省經費，增大效益。

- 11. 主持「台灣省政府建設廳所屬機構、住宅都市發展局、自來水股份有限公司聯合辦理常用器材廠商登記專案小組」十餘年，多次改進器材規格及廠商設備資格，並加強檢查、檢驗，以提高器材之品質。

四、在台灣中興紙業公司服務期間

耀楠先生在八十一年十二月赴調台灣中興紙業公司總經理前，原有意續留台水公司擔任協理以展其所長，但遭新任總經理林茂文先生以彼此理念不合而婉拒。他隻身前往中紙公司報到，未曾攜帶機要人員，服務期間曾暫代董事長職務數月，盡忠職守，未有隕越，三年間之營運無大變化，雖以推動民營化作目標，但因省府並不積極，故無進展，唯一成績係將原有963位員工精減為658人，減少305人，但並未能改善公司之虧損狀況。由於公司裁員停止進用新人，故在其協理出缺省府指派廖光哲先生繼任時，耀楠先生堅決主張應就公司現職人員擢升，最後與宋楚瑜省長交換條件，將公司主任秘書陳鴻濱先生調任唐榮公司協理，始接受新派之廖協理，如今陳鴻濱先生已升任唐榮公司總經理，亦可見耀楠先生知人之一斑。

耀楠先生於八十五年一月經行政院特准退休，但被續任為中紙公司常務理事，今猶在職。

## 五、參加中華民國自來水協會活動

耀楠先生於六十年加入中華民國自來水協會為會員，六十四年至八十三年被推選為理事及技術研究委員會副主任委員，協助歷任主任委員張祖璿、陳季涵、高肇藩、歐陽嶠輝諸先生推動會務。六十三年起並接任會刊「自來水」之總編輯，六十

六年將年刊改為季刊，出刊後從未曾脫期。七十三年起開辦「自來水技術管理研討會」每年一次。在此之前係作專題研討。七十五年至八十一年他擔任中華水協參加國際自來水協會（International Water Works Association）科技會議之代表，每年皆須參與其輪流在各國舉行之會議，並主持「自來水設計指南之編撰及參與「台灣自來水誌」六十二年版及八十二年版之審訂，以及主持七十二年版之編撰。

## 伍、退休生活

耀楠先生家住台中市，每月需參加中興紙業公司之董事會及中華民國自來水協會召開之各種會議，間亦主持前者之專案小組及審查報告，其餘時間皆予充分運用，每週一至二次往自然科學博物館以半日時間充當義工，擔任導覽及兼帶領日籍女性義工，有時亦負責撰寫日文說明。清晨常打掃宅前街道二、三百公尺，以維護公共環境之整潔。八十七年初他加入「國際演講會（Toast master International）」，在台中市成立「中英日語演講會」擔任創會會長。間亦應台水公司、內政部或經濟部邀請，參加其舉辦之技術性會議或審閱報告，提供參考意見。其餘時間多用於閱讀技術性及財務書報雜誌，並常出國旅遊，退休四年半已出遊23次，共計364天，歷70餘國，遠至南太平洋中之復活

島、加拉巴哥群島及北緯80度之史匹茲培根島等地。

## 陸、家庭狀況

耀楠先生於五十六年一月在軍中服役時，奉准與同鄉洪淑淑女士結婚，夫人勤儉溫順，處理家務井井有條，耀楠先生退休後，每月必返斗南老家二至三次，探望父母及整理居家環境，盤桓竟日。

耀楠夫婦育有三位千金，長女佳妙早逝，所遺一子由外祖父母撫育，現已就讀國中。次女佳玲任國立台中二中英文教師，三女怡如未婚，現任自然科學博物館解說員。

耀楠夫婦生活簡樸，均愛好棋藝、文藝及音樂，常常對奕，觀賞電視劇、聆賞音樂、閱讀小說及唱卡拉OK，家中充滿歡樂氣氛。

## 柒、為人處事

耀楠先生生性坦率，待人誠懇，因外表嚴肅，不苟言笑，使人有難以接近的感覺，他公私分明，堅守原則，雖有深交亦不影響在處理公務時之決定。他不善用婉轉言詞，常實話實說，使人難堪。他熱愛工作，做事明快，認真負責，守時守分，擇善固執，不知逢迎，不諳「做官」之道，深惡投機取巧，弄權媚上的行爲，故常在不知不覺中開罪於人，遭人中傷。

以下是與他有關的幾則故事，可見他做人做事的一斑。

故事一：他在台水公司服務時，某次董事會中因業務報告與鄭水枝董事長發生爭執，鄭先生動了肝火，斥責「不成體統」，他回應是「就事論事」。

故事二：陳廉泉先生任台水公司總經理時，筆者一位舊友爲其職位升等事，請爲關說，陳總經理回答：「他是耀楠台大的同學，不讓他升等定有其原因。耀楠很公正，我支持他的決定。」

故事三：李錦地先生任台水公司總經理時，會議中常因耀楠先生提出與李先生相左的意見，出現非常尷尬的場面。他始終堅持表達「正確」的意見是做部屬的責任。

故事四：筆者在台水公司服務時，值他擔任「自來水」季刊總編輯，在受命將刊載AWWA月刊中之論文譯成中文，「交卷」後，他必詳細對照，點出其中誤譯之處，囑予改正。

故事五：他受職審訂「台灣自來水誌」修編至民國八十一年底之文稿，非常細心，對其中之漏誤及存疑之處一一註明，退請各原撰人查證後再審，不厭其煩，有的查證再查證，多達三、四次。

## 捌、後語

陳耀楠先生常說：全心全力投入自己

的工作，是做人的本分。工作上的成就所感受到的快慰，遠遠超過獲得的名利。他以爲公務員固應尊敬長官，但不宜屈從，身爲部屬應盡其責，不該有所顧忌。證諸他言行合一，令人欽敬。

耀楠先生是一位學驗豐富的自來水專家，爲台灣光復後的自來水建設殫精竭慮，所締造的豐碩成果受惠者何止千萬人，而他對台灣自來水事業所建立的許多

制度及培養的許多專業人才，對自來水未來的發展肯定有深遠的影響。

筆者及許多昔日的同事都非常欽佩他始終如一的爲人及處事的態度，懷念與他共事的時光，珍惜與他共事的愉快經驗。

台水公司退休副總工程師李顯慧先生曾向筆者說過：「耀楠對自來水的熱愛，對業務的瞭解，對工作的勤奮，對公司的貢獻，少有人能相比。」

## 懷念光復初期自來水基層工作者

姚關穆\*

在秀麗的中央山脈溫暖擁抱下，台灣西部的早晨，總要比其他地方稍會來得晚一些，使辛勞終日的人們，可以在涼爽的清晨裡，多貪戀一刻甜蜜的睡鄉。

算起來應該是五十多年前吧？離台灣光復不太久。在一個晴朗的初秋日子，遲來的早晨終於緩緩踏進這個西部小鎮。一幢相當簡陋的平房裡，阿傑伯年紀大了，醒得早。從木板窗門的縫隙中看出去，天空已經有些泛出魚肚白色，趕緊向隔壁房間裡孫女兒大叫：「阿花，天不早了，快起來放雞出去」。這阿花姑娘，正當芳齡二八，長得健美婀娜，是一個人見人愛的少女。這會兒睡興正濃，被爺爺一叫，倒也不敢怠慢，順手把棉被往旁邊一推，很快就起了床。第一件事是到廚房間，打開家裡唯一的自來水龍頭，潔白晶瑩的水花，在晨光裡像寶石也似的閃閃發亮。她用合著的兩隻手掌，接滿了水，往臉上潑去，一種說不出來的舒適感覺，從剛起床熱烘烘的臉孔，一直透到全身每一個毛孔，這是阿花永遠難忘，最享受生活的片刻。老實說起來，光復當時，自來水恐

怕是農村家庭，少之又少的現代化設備之一。在戰後物質缺乏，政府財政拮据的年頭，能維持供應潔淨安全自來水，幾乎完全是靠著一群沒沒無聞的自來水基層工作者。這些工作者，在日據時期日本技術人員下面，擔任著最基層的職務，拿著最少的薪水，每天一點一滴地把維護自來水的技術，從焊接鉛管到操作淨水廠，慢慢地摸得滾瓜爛熟。光復後，日本技術人員被全面遣送反國，他們就憑著一點一滴累積的經驗，維持了自來水的暢通。由於他們很少有響噹噹的學歷，光復後雖然在萬般困難中，負起了這項艱巨的任務，在政府裡，仍然是佔著最低的位置，接受微薄的待遇，不過他們從來沒有埋怨，從來沒有動過離開他的念頭。他們久經風霜誠摯的面龐上，每當看見自來水帶給人們種種便利時，總是浮起滿足的微笑，因為這是他們生活的意義，也是他們生命的意義。二千多年前，先賢老子曾贊頌過給予萬物生命的水：「上善若水」。這群默默奉獻的自來水基層工作者，倒似乎是「為善最樂」的力行者。

\* 國立中央大學兼任教授

令人印象深刻的是，每一個自來水水源地，總是清掃得一塵不染。極目望去，只見花木扶疏，掩映著一些日式辦公平房，使人自然而然就覺得像是生命之源清潔自來水的出處。很多自來水管線系統的圖件，已經在戰爭期間，或是接收時遺失。但是每一條管線的路線都已深深印在這些基層工作者的腦海中，從來沒有出過差錯。

置身在一座慢濾水廠裡，感受到的是無比寧靜。明鏡也似的池水表面，反映出藍天白雲，和不遠處搖曳生姿蒼翠樹叢的倒影，以及偶而飛過的麻雀和白頭翁。只有在基層工作者像褓姆似的細心、熱忱、無私、親切呵護之下，這些陳年古舊而且失修的設施，才能安然度過台灣社會經濟最艱苦的階段，護持了這一片和大自然打成一片的美好天地，也使得即使在醫藥缺乏情形下，台灣的水傳染疾病依然減到少而又少。

這些基層工作者，由於多年來鍛鍊，養成的技藝可以說已到了爐火純青的地步。小心翼翼堆得像埃及金字塔那樣整齊壯觀的洗淨待用濾砂，幾乎已接近藝術品境界，有節奏的洗砂池攪拌動作，也顯出優美的韻律。記得那時候有一個鄉鎮自來水管網要擴建，用的材料是鑄鐵管，接頭還是用英國人創始自來水時的方法。每一根管子兩頭分別是凹口和凸口。接管時把

一根管子的凸口湊上另一根管子的凹口。安放好後，把接頭用麻繩塞緊，灌上熱鉛汁，再用一套特製的工具慢慢敲實，直到外觀平整為止。這是一項非常費時而且需要高度技巧和耐心的工作，做一個接頭往往要花好幾小時，絕對馬虎不得，否則接頭難免漏水。這中間最具關鍵的是用鉛量。因為接頭裡倒鉛以後，不能再增多或者減少。換一句話說，一次倒的鉛量一定要恰到好處。鉛少了工作容易，但是難保不漏水。鉛多了要敲到外觀平整，費時過多。因此這倒鉛的控制，必須是箇中高手，具有豐富經驗。主辦工程師靈機一動，請出自來水廠裡一位老技工來掌杓灌鉛，果然施工品質一等，沒有話說。

沒有錯，台灣的自來水是由日本人在據台時期開始。沒有錯，自來水普及率已經從光復時的百分之十幾高昇到百分之八十以上。但是在光復初期這一段也許不算太長的時段裡，台灣自來水的命脈卻大半操縱在這一群，既不求名，又不求利，實際上也沒有得到名利的自來水基層工作者手中。無論是為了保持歷史的真相，或是對這群默默耕耘奉獻者的感謝，我們萬萬不能忘記給予他們一些應得的紀念。最少能夠做到的似乎是在台灣自來水發展史中，闢出專章來記述這群工作者的事蹟。其次是在自來水博物館裡撥出一個角落，展示和說明當時所用維護自來水的工具以

及操作方法。如果可能的話，最好能專訪這些工作者，留下當事人的第一手資料，供日後參考。在自來水界有一句大家耳熟能詳的成語，叫「飲水思源」。其實這個

「源」，除了「水之源」外，也應該包括開闢和維護「水之源」的人。因為沒有人的努力，「水」如何能變成「源」？

## 自來水設施耐震工法指南及解說 (二) 一下

蔡錦松

### 2.3 埋設管路、豎坑、暗渠、共同管溝的耐震計算法

#### 2.3.1 總論

埋設管路的耐震計算，是依據反應變位法求出管體應力與應變，及埋管接頭部在管軸方向之伸縮量及撓角，同時進行安全性分析。

對於因地盤開裂或土壤側向流動而使管路埋設位置改變時，其安全性分析就是檢核管路承受此等地盤變化之能力。

對豎坑、暗渠、共同管溝等構造物之耐震計算，應該根據反應變位法或震度法分析。然而，對於附屬構造物之接合部等特殊部位或地盤變化甚大之處等，因具複雜行為，故其耐震計算，應視需要進行動力分析，以檢核安全性。

#### 【說明】

一般而言，埋設管路、豎坑、暗渠、共同溝等構造物，由於長度比橫斷面的周長大得多，因此地震時管路並不會因自身的振動而產生位移，而是由鄰近地盤的變位所支配。埋設管路的耐震計算是根據反應變位法之原則進行。安全性是根據計算所得之管體應力，應變等加以分析。在地盤變化甚大之處，如地盤變成塑性狀態產生地裂或側方流動等處，無論管路是否因地盤移動而產生變動，均應實施安全性分析。(參考 2.3.5 地盤變形之安全性分析)。

對於豎坑、暗渠、共同管溝橫斷面的耐震計算，向來多是採用震度法，又因埋設管路比較厚重，故多採用反應變位法或是震度法計算。除此之外，縱斷面方向的安全性分析，可以根據日本道路協會「共同溝設計指針」等相關規範實施。

除此之外，附屬構造物接合部等特殊部分或地盤變化甚大之處，按其種類或條件，如預期在地震時會產生大的應力，應變和相對變位時，設計分析並非僅由反應變位法完成，尚需按照動態分析法檢核。埋設管路的設計分析應分別考慮在地震時及平常時之不同荷重情況，於下節有詳細說明。整體計算步驟 2.3.1 所示：

2. 耐震計算法

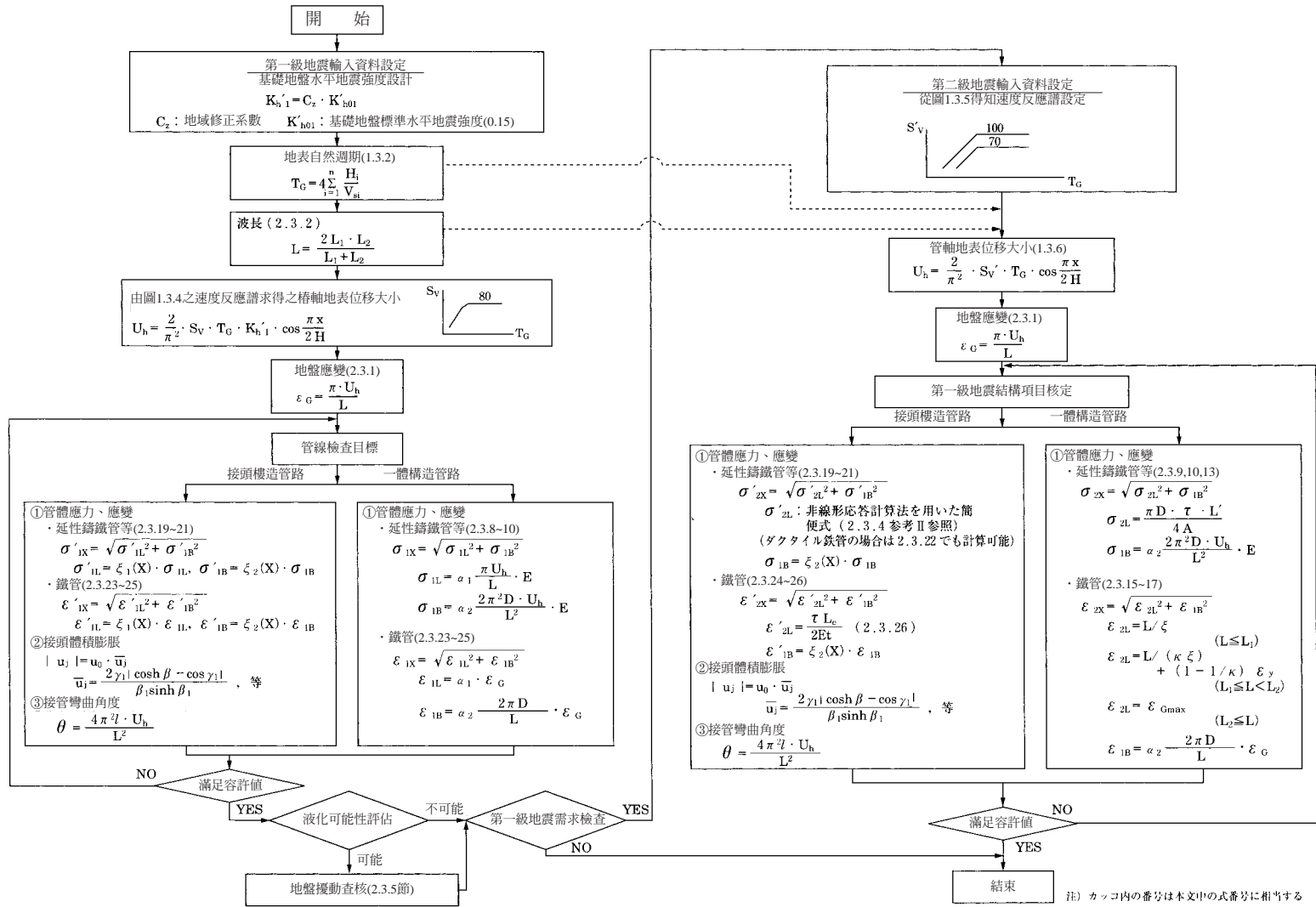


圖2.3.1 埋管安全查核過程

## 2.3.2 根據反應變位法之埋設管路耐震計算法

1. 依據反應變位法，地盤應變(管軸方向)分析公式，如式(2.3.1)所示：

$$\varepsilon_G = \frac{\pi U_h}{L} \dots\dots\dots (2.3.1)$$

其中， $\varepsilon_G$ ：地盤應變(管軸方向)

$U_h$ ：沿管線軸向上之地盤水平變位 (  $cm$  )，

式 (1.3.5) 應用於第 1 級地震 (level 1) 時，式 (1.3.6) 應用於第 2 級地震 (level 2) 時。

$L$ ：波長 (  $cm$  )。

$\pi$ ：圓周率

2. 無論 1 級或 2 級地震，埋設管路接頭之變位、應力、應變均應根據反應變位法計算。

## 【說明】

埋設管路，可分為一體構造管路和接頭構造管路二類。一體構造管路主要為焊接鋼管組合而成。當鑄鐵管以較罕見之翼版焊接接合時即被視為一體構造管路。然而接頭構造管路，是以許多鑄鐵管組成，管線為焊接鋼管，但有彈性接頭連接，為現今常見之地下埋管方式。

1.  $U_h$  為地盤中管線軸向上的水平變位，對於 1 級與第 2 級震動情況，分別依式 (1.3.5)，(1.3.6) 計算。波長  $L$  為使地盤位移最大之平均地表剪力波長，亦即為剪力波在相當於地盤表層之自然週期時間內前進之距離，可依下式計算求得。

$$L = \frac{2L_1 L_2}{L_1 + L_2} \dots\dots\dots (2.3.2)$$

$$L_1 = V_{DS} \cdot T_G, \quad L_2 = V_{BS} \cdot T_G \dots\dots\dots (2.3.3)$$

其中， $V_{DS}$ ：地盤表層剪力波的平均剪力彈性波速度(  $cm/s$  )

$V_{BS}$ ：基盤剪力波的剪力彈性波速度(  $cm/s$  )

$T_G$ ：地盤表層的自然週期(  $s$  )

地盤的剪力彈性波速度，可以彈性波或PS波探查，若無法實際量測時，可依表-2.3.1 之  $N$  值求得。

2. 不考慮地盤和管路間產生滑動之情況（即不滑動），則可應用第 1 級地震（level 1）之耐震計算式。耐震計算需要地盤每單位長度之剛性係數，包括沿管線軸向，以及垂直於管線軸向者。此兩剛性係數分別為  $K_{g1}$  與  $K_{g2}$ ，可分別利用下列公式求得：

$$K_{g1} = C_1 \cdot \frac{\gamma_t}{g} \cdot V_s^2 \dots\dots\dots (2.3.4)$$

$$K_{g2} = C_2 \cdot \frac{\gamma_t}{g} \cdot V_s^2 \dots\dots\dots (2.3.5)$$

其中， $K_{g1}, K_{g2}$ ：分別為沿管線軸向與垂直管線軸向之地盤單位長度之剛性係數（Pa）

$\gamma_t$ ：單位重（ $N/m^3$ ）

$g$ ：重力加速度（ $9.8m/s^2$ ）

$V_s$ ：表面層之剪力彈性波速（ $m/s$ ）

$C_1, C_2$ ：地盤單位長度剛性因數，分別為沿管線軸向與垂直管線軸向者。通常，  
假設  $C_1 = 1.5$  與  $C_2 = 3$ 。

這些詳細數值亦可由有限元素分析法求得。例如，以下為利用線性有限元素分析法，計算地盤剛性因數之結果。當地盤表層厚度為 5 至 30 公尺間且管徑在 15 至 300 公釐時，地盤剛性係數以下式求得：

$$C_1 = 1.3H^{-0.4} D^{0.25} \dots\dots\dots (2.3.6)$$

$$C_2 = 2.3H^{-0.4} D^{0.25} \dots\dots\dots (2.3.7)$$

$H$ ：地盤表層厚度（ $m$ ）

$D$ ：管徑（ $m$ ）

表 2.3.1 地盤剪力彈性波速值

不同堆積時代土壤種類		$V_s (m/s)$		
		$10^{-3}$	$10^{-4}$	$10^{-6}$
洪積世	粘性土	$129N^{0.183}$	$156N^{0.183}$	$17N^{0.183}$
	砂質土	$123N^{0.125}$	$200N^{0.125}$	$205N^{0.125}$
沖積世	粘性土	$122N^{0.0777}$	$142N^{0.0777}$	$143N^{0.0777}$
	砂質土	$61.8N^{0.211}$	$90N^{0.211}$	$103N^{0.211}$

註) 根據砂，粘土的組成百分率區分。

適用於表層地盤剪應變是 $10^{-3}$ ，基盤剪應變為 $10^{-6}$ 。

考慮地盤和管路間產生滑動之情況，則可應用第 2 級地震 (level 2) 之耐震計算式。這時，管路與地盤間之摩擦力約為  $0.01 \text{ Mpa}$  ( $0.1 \text{ kgf/cm}^2$ )。當管路特別重要或為特殊管路時，可利用非線性反應計算法檢核摩擦力。

2.3.3 以反應變位法進行一體構造管路之耐震計算

若以第 1 級地震(level1)之標準進行分析，管路主體應力應變之計算，並不考慮管路與地盤間之滑動情形。但是若以第 2 級地震(level2)之標準進行分析，則需加以考慮。

【說明】

(1) 管體應力計算(鑄鐵管)。

以第 1 級地震(level1)進行分析，管體應力可由下式求得。

$$\sigma_{1L} = \alpha_1 \cdot \frac{\pi U_h}{L} \cdot E \dots\dots\dots (2.3.8)$$

$$\sigma_{1B} = \alpha_2 \cdot \frac{2\pi^2 D U_h}{L^2} \cdot E \dots\dots\dots (2.3.9)$$

$$\sigma_{1x} = \sqrt{\sigma_{1L}^2 + \sigma_{1B}^2} \dots\dots\dots (2.3.10)$$

其中， $\sigma_{1L}$ ：埋管的軸應力(Pa)

$\sigma_{1B}$ ：埋管的彎曲應力(Pa)

$\sigma_{1x}$ ：軸應力和彎曲應力的合成應力(Pa)

$\alpha_1, \alpha_2$ ：分別為管軸方向，管軸直交方向的地盤變位傳遞係數。可以式(2.3.11),(2.3.12)計算求得。

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1 &= \frac{1}{1 + \left(\frac{2\pi}{\lambda_1 L'}\right)^2} \\ \alpha_2 &= \frac{1}{1 + \left(\frac{2\pi}{\lambda_2 L}\right)^4} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2.3.11)$$

$$\left. \begin{aligned} \lambda_1 &= \sqrt{\frac{K_{g1}}{EA}} (1/m) \\ \lambda_2 &= \sqrt[4]{\frac{K_{g2}}{EI}} (1/m) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2.3.12)$$

其中， $\pi$ ：圓周率

$L'$ ：外視波長(= $\sqrt{2}L$ )( $m$ )

$L$ ：波長( $m$ )

$K_{g1}, K_{g2}$ ：埋管在管軸方向和管軸直交方向每單位長度剛性係數( $Pa$ )

$E$ ：埋管的彈性係數( $Pa$ )

$A$ ：埋管的斷面積( $m^2$ )

$I$ ：埋管的斷面慣性矩( $m^4$ )

$U_h$ ：沿管軸方向上的地盤的水平變位( $m$ )

$D$ ：埋管的外徑( $m$ )

以第 2 級地震(level2)分析時，埋管之軸應力可根據下式計算，而且彎曲應力和合成應力可分別根據式(2.3.9)、(2.3.10)計算。

$$\sigma_{2L} = \frac{\pi D \tau L'}{4A} \dots\dots\dots (2.3.13)$$

其中， $\sigma_{2L}$ ：埋管的軸應力

$\tau$ ：埋管和地盤間的摩擦力( $Pa$ )

$D$  : 管的外徑( $m$ )

$L'$  : 外視波長( $=\sqrt{2L}$ )( $m$ )

$A$  : 埋管的斷面積( $m^2$ )

對每一種形式之管路所做的耐震計算均相同，式 2.3.10 中之  $\sigma_{1L}^2$  應乘以 1.00 ~ 3.12。這對於式 2.3.16 中的  $\epsilon_{1L}^2$  亦同樣適用。

(2) 管體應變的計算(鋼管)

· 以第 1 級地震(level1)之標準進行分析，管體應變可以根據下式計算：

$$\epsilon_{1L} = \alpha_1 \cdot \epsilon_G \dots\dots\dots (2.3.14)$$

$$\epsilon_{1B} = \alpha_2 \cdot \frac{2\pi D}{L} \cdot \epsilon_G \dots\dots\dots (2.3.15)$$

$$\epsilon_{1x} = \sqrt{\epsilon_{1L}^2 + \epsilon_{1B}^2} \dots\dots\dots (2.3.16)$$

其中， $\epsilon_{1L}$  : 埋管的軸應變

$\epsilon_{1B}$  : 埋管的彎曲應變

$\epsilon_{1x}$  : 埋管的合應變

$\epsilon_G$  : 地盤的軸應變

$\alpha_1$  : 地盤的軸應變傳遞係數

$$\alpha_1 = \frac{1}{1 + \{2\pi/(\lambda_1 L')\}^2}$$

$$\lambda_1 = \{K_{g1}/(EA)\}^{1/2}$$

$$L' = \sqrt{2L}$$

$K_{g1}$  : 管軸方向的地盤剛性係數( $Pa$ )

$E$  : 埋管的彈性係數( $Pa$ )

$A$  : 埋管的斷面積( $m^2$ )

$\alpha_2$  : 管軸直交方向的地盤變位傳遞係數(適用於式(2.3.11))

彈性範圍內之  $\epsilon_{1L}$  值可以前述方法計算。當  $\epsilon_{1L}$  大於管路之降伏應變  $\epsilon_y$  (0.11%)時，

塑性範圍內之  $\epsilon_{1L}$  必須在以公式  $\lambda_1 = [(K_{g1} / \{\epsilon_y / (2\epsilon_{1L}) EA\}]^{1/2}$  予以轉換後，再度以式 2.3.14 計算修正。以應力評估安全性時，式 2.3.8 至式 2.3.10 以及 2.3.4 節式 2.3.19 至式 2.3.21 可以用來當作檢核標準。若以第 2 級地震 (level 2) 進行分析，軸向應變  $\epsilon_{2L}$  可以下列公式計算，彎曲應變與合應變可以式 2.3.15 至 2.3.16 加以計算。

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_{2L} &= L / \xi & (L \leq L_1) \\ \epsilon_{2L} &= L / (k \xi) + (1 - 1/k) \epsilon_y & (L_1 \leq L \leq L_2) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2.3.17)$$

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_{2L} &= \epsilon_G & (L_2 \leq L) \\ L_{2L} &= k \xi \{ \epsilon_G \max - (1 - 1/k) \epsilon_y \} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2.3.18)$$

其中， $\epsilon_{2L}$ ：埋管的軸應變

$L$ ：波長(m)

$$\xi = (2\sqrt{2}) E t / \tau$$

$t$ ：埋管的厚度(m)

$k$ ：埋管的應變硬化特性值( $k=0.1$ )

$\epsilon_y$ ：埋管之降伏應變

$\tau$ ：埋管和地盤間的摩擦力( $P_a$ )

$\epsilon_G \max$ ：在  $S_{v \max}$  ( $T_G \geq 0.7$  時之  $S'_v$ ) 之地盤應變

### 2.3.4 反應變位法之埋管接頭耐震計算

1. 若以第 1 級地震(level1)之標準進行分析時，管體之應力應變計算，不需考慮管體與地盤間之滑動情形；而若以第 2 級地震(level2)之標準進行分析，則需加以考慮。
2. 無論第 1 級或第 2 級地震，管路接頭的伸縮量和撓角皆從地盤水平變位求得。

#### 【說明】

1.關於埋管的管體應力和管體應變計算法如下所述。

(1)鑄鐵管

以第 1 級地震(level1)之標準進行分析時，不考慮管體與地盤間之滑動情形，管體應力

可由下式加以計算：

$$\sigma'_{1L}(x) = \xi_1(x) \cdot \sigma_{1L} \dots\dots\dots (2.3.19)$$

$$\sigma'_{1B}(x) = \xi_2(x) \cdot \sigma_{1B} \dots\dots\dots (2.3.20)$$

$$\sigma'_{1x}(x) = \sqrt{\{\sigma'_{1L}(x)\}^2 + \{\sigma'_{1B}(x)\}^2} \dots\dots\dots (2.3.21)$$

其中， $\sigma'_{1L}(x), \sigma'_{1B}(x)$ ：沿管軸方向，從伸縮可撓接頭至距離為  $x(m)$  的點之軸向應力與彎曲應力(Pa)。

$\sigma_{1L}, \sigma_{1B}$ ：表示以式(2.3.8)、式(2.3.9)計算所得之軸向應力與彎曲應力 (Pa)

$\sigma'_{1x}(x)$ ：沿管軸方向，從伸縮可撓接頭至距離  $x(m)$  的點之軸應力和彎曲應力 1 的合成應力(Pa)。

$\xi_1(x), \xi_2(x)$ ：當埋管有伸縮可撓接頭時之應力修正係數(參考 I)

式(2.3.21)中之 $\{\sigma'_{1L}(x)\}^2$ 應依據管路之重要性乘以 1.00 ~ 3.12。各種管路均是如此計算。這對於式 2.3. 25 中的 $\{\epsilon'_{1L}(x)\}^2$ 亦同樣適用。第 2 級地震之軸向應力 $\sigma'_{2L}$ 可以非線性反應分析之簡化計算法計算。此計算法詳見附錄二。鑄鐵管軸應力計算法如下，此式源於地震強度超過四級之地震觀測結果。

$$\sigma_L = \frac{\pi \cdot D \cdot \tau \cdot l}{2 \cdot A} \dots\dots\dots (2.3.22)$$

其中， $\sigma_L$ ：軸應力(Pa)

$D$ ：管外徑(m)

$\tau$ ：管和地盤間的摩擦力 (Pa)

$l$ ：管長(m)

$A$ ：管斷面積( $m^2$ )

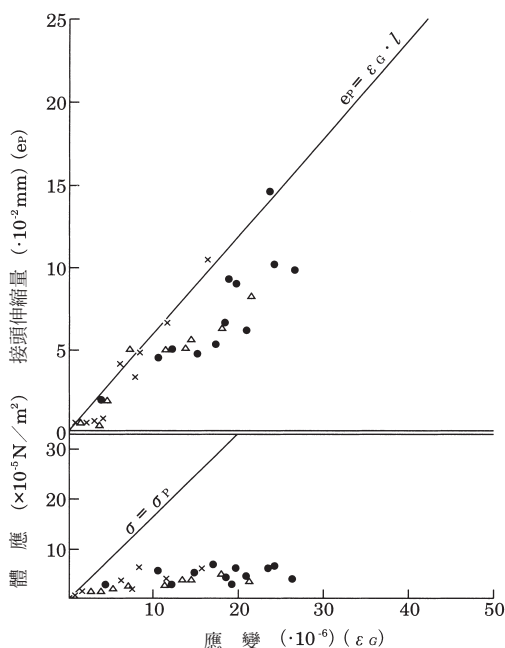


圖 2.3.2 地震時之地盤應變與鑄鐵管管體應力，接頭伸縮量之觀測結果

根據式(2.3.20)，(2.3.21)可以計算彎曲應力和合成應力。

(2)鋼管

· 在第 1 級地震 (level1) 作用下，若埋管有伸縮可撓接頭時，管體應變可以根據下式來計算。

$$\epsilon'_{1L}(x) = \xi_1(x)\epsilon_{1L} \dots\dots\dots (2.3.23)$$

$$\epsilon'_{1B}(x) = \xi_2(x)\epsilon'_{1B} \dots\dots\dots (2.3.24)$$

$$\epsilon'_{1X}(x) = \sqrt{\{\xi'_{1L}(x)\}^2 + \{\xi'_{1B}(x)\}^2} \dots\dots\dots (2.3.25)$$

其中， $\epsilon'_{1L}(x), \epsilon'_{1B}(x)$ ：沿管軸方向，從伸縮可撓接頭至距離為  $x(m)$  的點之軸應變和彎曲應變。

$\epsilon'_{1L}, \epsilon'_{1B}$ ：分別表示以式 2.3.14 與式 2.3.15 計算所得之軸向應變與彎曲應變

$\epsilon'_{1X}(x)$ ：沿管軸方向，從伸縮可撓接頭至距離為  $x(m)$  的點之軸應變和彎曲應變的合應變。

$\xi_1(x), \xi_2(x)$ ：當埋管為連續且有伸縮可撓接頭時 (詳見附錄一)，應變之修正

係數(參考 I)。

· 對於第 2 級地震 (level 2)，根據下式計算軸應變  $\epsilon'_{2L}$ ，而彎曲應變和合應變則根據式(2.3.24)，(2.3.25)計算。

$$\epsilon'_{2L} = \frac{\tau L_e}{2 E t} \dots\dots\dots (2.3.26)$$

其中， $\tau$ ：管和地盤間的摩擦力 (Pa)

$L_e$ ：伸縮接頭的設置間隔(m)

$E$ ：埋管的彈性係數 (Pa)

$t$ ：埋管的管厚(m)

2.埋管接頭部在管軸方向伸縮量和撓角計算法如下所示。

(1)接頭部軸方向的伸縮量

接頭部軸方向伸縮量之計算流程如圖 2.3.3 表示，計算公式如下：

$$|u_j| = u_0 \bar{u}_j \dots\dots\dots (2.3.27)$$

其中， $|u_j|$ ：埋管沿著軸方向之接頭伸縮量 (m)

$u_0$ ：當作無限連續梁時，梁在管軸方向相對變位量(m)

$$\bar{u}_j = \frac{2\gamma_1 |\cosh \beta_1 - \cos \gamma_1|}{\beta_1 \sinh \beta_1}$$

$$u_0 = \alpha_1 U_a$$

$$\alpha_1 = \frac{1}{1 + (\gamma_1 / \beta_1)^2}$$

$$\beta_1 (= \lambda_1 l) = \sqrt{\frac{K_{g1}}{EA}} \cdot l$$

$$\gamma_1 = \frac{2\pi l}{L'}$$

$EA$ ：伸長剛性(N)

$l$ ：接頭間的長度(m)

$K_{g1}$  : 埋管在管軸方向每單位長度的地盤剛性係數( $Pa$ )

$L'$  : 外視波長 ( $m$ )

$L$  : 波長( $m$ )

$U_a$  : 地盤在管軸方向的水平變位( $m$ )

$$U_a = \frac{1}{\sqrt{2}} U_h$$

$U_h$  : 地盤在距地表深度  $x(m)$  處之水平變位 ( $m$ )，式 1.3.5 與式 1.3.6 之  $U_h(x)$ ，分別適用於第 1 級與第 2 級地震。

但是，當管線為鑄鐵製，且地震強度超過四級，則可如下經由實際地震觀測所得之公式計算：

$$e_p = \varepsilon_G \cdot l \dots\dots\dots (2.3.28)$$

其中， $e_p$  : 埋管沿著軸方向之接頭伸縮量( $m$ )

$\varepsilon_G$  : 地盤應變(根據式(2.3.1))

$l$  : 管長( $m$ )

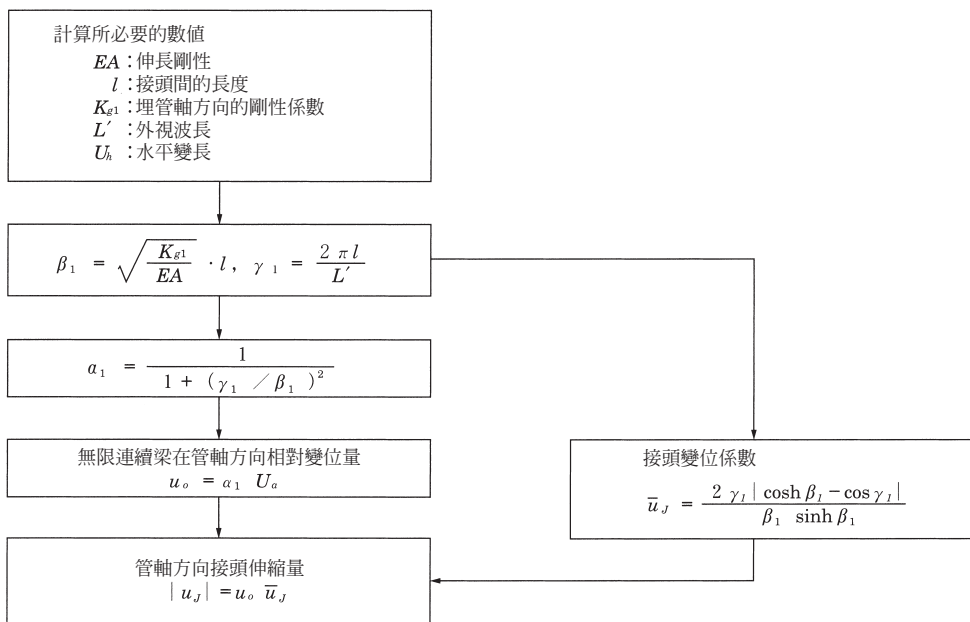


圖 2.3.3 管軸方向接頭伸縮量 (彈簧常數是0) 的計算流程

## (2) 接頭的撓角

接頭的撓角，根據下式計算

$$\theta = \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot l \cdot U_h}{L^2} \dots\dots\dots (2.3.29)$$

其中， $\theta$ ：接頭部的撓角(rad)

$l$ ：接頭間的長度(m)

$U_h$ ：地盤在距地表深度  $x$ (m)處之水平變位(m)，式 1.3.5 與式 1.3.6 之  $U_h(x)$ ，分別適用於第 1 級與第 2 級地震。

$L$ ：波長(m)

「水道施設耐震工法指針・解説」(1979 年版)是以反應變位法計算接頭部的撓角，考慮之模式為將埋管視為彈性梁或桿，計算相當複雜，不同於原有公式，式 2.3.29 係發生於接頭處之撓角的簡化計算式。此一計算模式係假設管線與地盤有相同之變位方式。由於此兩種方法之間並無實際上之差異存在，第 1 級地震與第 2 級地震皆可以此一簡化式進行計算。原有規範中，對於管軸直交方向之相對變位計算，在此已不需要。當管線端點在接頭內時，在接頭處管軸直交方向相對變位很小，可忽略不計。

而且，在埋管的任意位置，將管體與接頭(縫)的剛性比較，彈簧常數約略相等時，管軸方向之伸縮量和管軸直交方向相對變位量，撓角可以由剛性矩陣法求出答案。另外，在「2.3. 以反應變位法進行一體構造管路之耐震計算」，「2.3. 反應變位法之埋管接頭耐震計算」所示之反應變位計算法係將地盤視為有均等的應變，地震時由於實際的地盤不是均質性，因此有局部的應變集中現象發生，計算上應加以留意。

【參考 I】依據反應變位法，具有接頭(縫)之構造管路的管體應力，應變的耐震計算法

1. 埋管具有伸縮可撓接頭時  $\xi_1(x)$ ,  $\xi_2(x)$  依據下式求出。

$$\left. \begin{aligned} \xi_1(x) &= \sqrt{\phi_1(x)^2 + \phi_2(x)^2} / [\exp(v' \lambda_1 L') - \exp(-v' \lambda_1 L')] \\ \xi_2(x) &= \sqrt{\phi_3(x)^2 + \phi_4(x)^2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(\text{參考 } 1)$$

上式，

$$\left. \begin{aligned} v &= l/L, \quad v' = l/L' \\ \phi_1(x) &= [\exp(-v' \lambda_1 L') - \cos(2\pi v')] \exp(\mu' \lambda_1 L') \\ &\quad - [\exp(v' \lambda_1 L') - \cos(2\pi v')] \exp(-\mu' \lambda_1 L') \\ &\quad + 2 \sin(v' \lambda_1 L') \cos(2\pi \mu') \\ \phi_2(x) &= 2 \sin(2\pi v') \sinh(\mu' \lambda_1 L') - 2 \sin(2\pi \mu') \sinh(v' \lambda_1 L') \\ \phi_3(x) &= f_3 e_3 - f_1 e_2 - f_4 e_1 - \sin(2\pi \mu) \\ \phi_4(x) &= e_4 - f_2 e_3 - f_2 e_2 - f_5 e_1 - \cos(2\pi \mu) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(\text{參考 } 2)$$

$f_1 \sim f_5 \quad e_1 \sim e_4$ ：參考表-1，如圖示。

$l$ ：表示埋管的伸縮可撓接頭間的長度。

舉例如， $\lambda_1 L'$ ， $\lambda_2 L$  為 50 和 10 時， $\xi_1(x)$  及  $\xi_2(x)$  計算則如圖-1 所示。

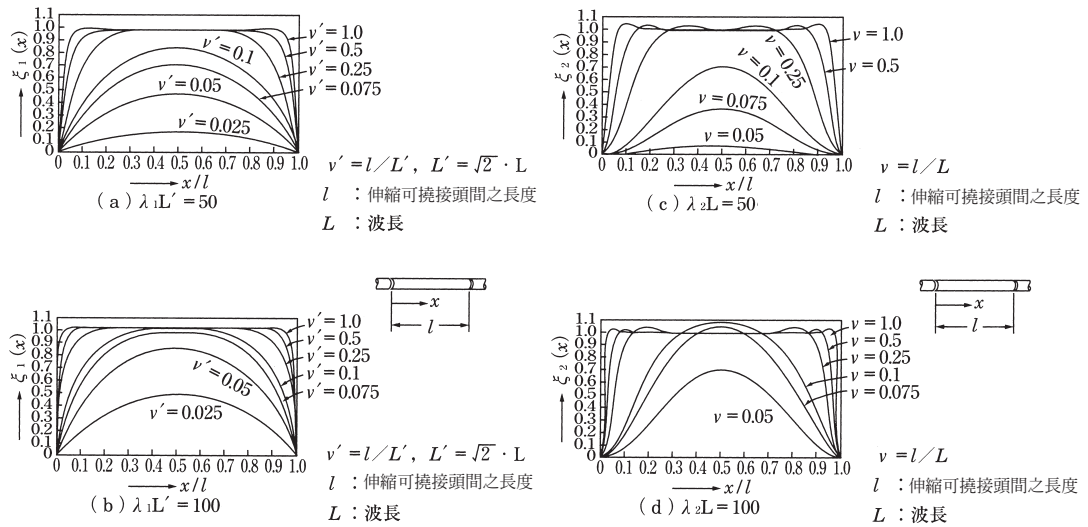
【參考 II】第 2 級 (level 2) 地震對於鑄鐵管等管體應力的簡便計算法(具有接頭構造之管路)按以下之程序計算：

- (1) 考慮地盤和管體間有滑動產生，則以非線性反應計算管體應力。
- (2) 不考慮滑動，則應使用式(2.3.19)之計 結果。利用求出之管體應力求得等值反應速度。
- (3) 針對各種管徑，地質情況，以(2)之計算結果求出速度反應譜。
- (4) 用(3)求出之速度反應譜，依據式(2.3.19) 求得 2 級 (level2) 地震在管軸方向的管體應力  $\sigma'_{2L}$ 。

【計算例】

管路的模式，參考圖-2 表示，為具有鑄鐵接頭的構造管路形式。考慮地盤和管體間是光滑的，此模式可參考圖-3 所示 ( $\kappa_1 = \tau/\delta; \tau = 0.01 \text{ MPa } (0.10 \text{ kgf} / \text{cm}^2)$ ),  $\kappa_1 = 6.0$

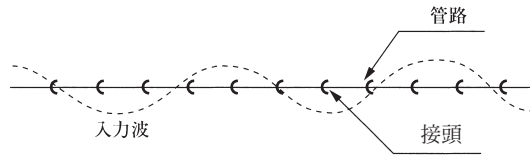
$MN/m^3 (0.61kgf/cm^3)$ 。假設地盤是沖積層，洪積層之砂質土及粘性土， $N$  值分別是 5,10。而地震力相當於 2 級 (level 2) 地震，利用圖-1.3.5 ① 反應速度的最大值是  $100cm/s$ ，相當於 90%非超越率；② 反應速度的最 值  $70cm/s$ ，相當於 70%非超越率。



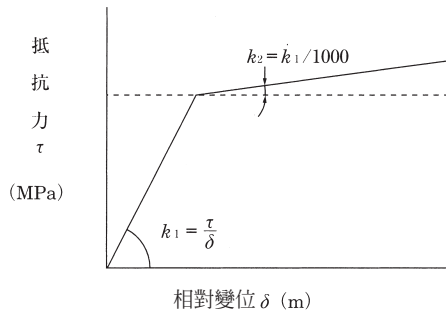
參考圖-1修正係數  $\xi_1(x)$ ,  $\xi_2(x)$

參考表-1 係數  $f_1 \sim f_5$

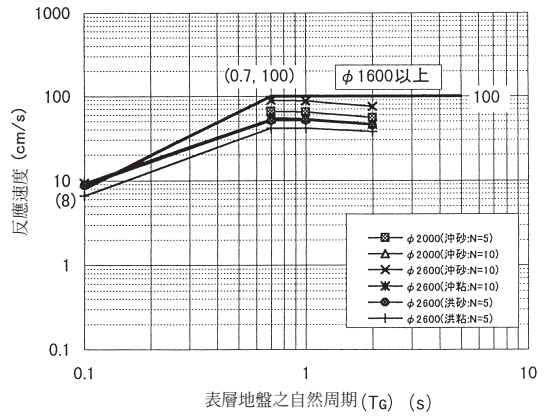
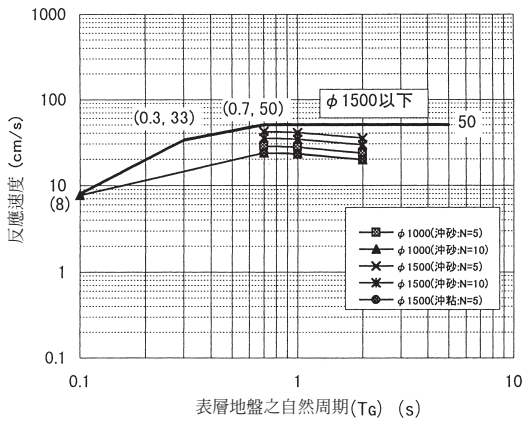
$f_1$	$\frac{1}{\Delta} \left[ \{C_1(C_4 - C_1) - C_3(C_3 + C_2) - C_1 \cos(2\pi\nu)\} \frac{2\pi}{\beta L} + (C_3 + C_2) \sin(2\pi\nu) \right]$	
$f_2$	$\frac{1}{\Delta} \left[ C_1(C_3 - C_2) - C_4(C_3 + C_2) + (C_3 + C_2) \cos(2\pi\nu) + C_1 \frac{2\pi}{\beta L} \sin(2\pi\nu) \right]$	
$f_3$	$\frac{1}{\Delta} \left[ \{C_1(C_4 + C_1) - C_2(C_3 + C_2) - C_1 \cos(2\pi\nu)\} \frac{2\pi}{\beta L} + (C_3 + C_2) \sin(2\pi\nu) \right]$	
$f_4$	$\frac{1}{\Delta} \left[ \{C_3(C_4 + C_1) - C_2(C_4 - C_1) + (C_2 - C_3) \cos(2\pi\nu)\} \frac{2\pi}{\beta L} - 2C_1 \sin(2\pi\nu) \right]$	
$f_5$	$\frac{1}{\Delta} \left[ (C_3 - C_2)^2 + 2C_1 C_4 - 2C_1 \cos(2\pi\nu) - (C_2 - C_3) \frac{2\pi}{\beta L} \sin(2\pi\nu) \right]$	
$\Delta$	$(C_3 + C_2)(C_3 - C_2) + 2C_1^2$	
$C_1$	$\sin(\nu\beta L) \sinh(\nu\beta L)$	$C_2 \sin(\nu\beta L) \cosh(\nu\beta L)$
$C_3$	$\cos(\nu\beta L) \sinh(\nu\beta L)$	$C_4 \cos(\nu\beta L) \cosh(\nu\beta L)$
$e_1$	$\sin(\mu\beta L) \sinh(\mu\beta L)$	$e_2 \sin(\mu\beta L) \cosh(\mu\beta L)$



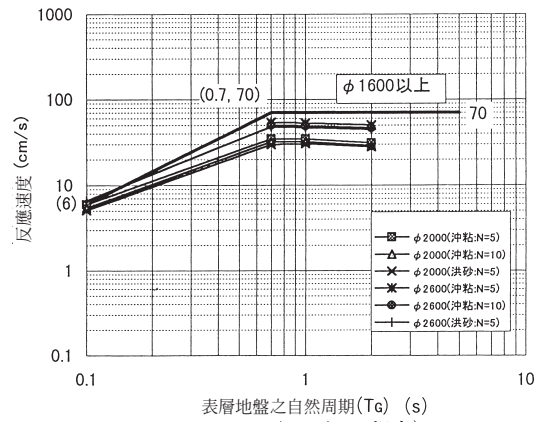
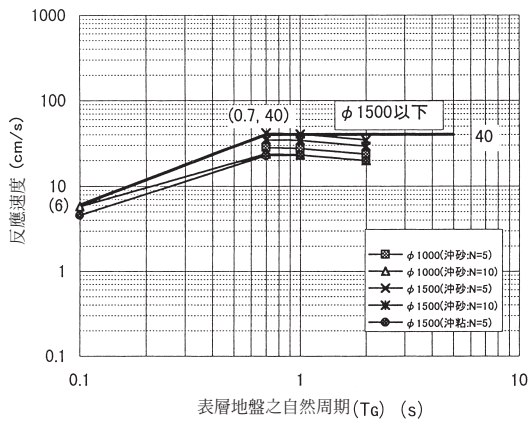
參考圖-2 管路



參考圖-3 地盤與管體間之滑動



參考圖-4 第2級地震 (level 2) 的速度反應結果 (相當於表-1.3.5之上限 (90%))



參考圖-5 第2級地震 (level 2) 的速度反應結果 (相當於表-1.3.5之上限 (70%))

2.3.5 埋設管路、豎坑暗渠共同溝的耐震

耐震計算需要地盤每單位長度之剛性係數，包括沿管線軸向以及垂直括於者剛。此兩盤分別向為軸與可(利)者分別用下

計算法總

列式求得：其中（者之震）數及重震計力加速地表盤每單位長數面層剪彈者括沿算需波之者剛因下通

及重算需之剛。常震計假設這軸些詳數細值亦用震計由有軸些詳常限元剛因素析法層例如結果數當厚至尺管線軸垂間下通

且力徑在釐時路與可摩擦括沿約特於摩擦括沿常管線軸或間下

1. 通殊與可摩擦常括沿非反應與可摩擦括沿檢

核中路變之震) 進行若或第級標準主論，是依據反應變位求出體共力與及接頭部在求共軸求出體方向之伸縮位求量撓應角伸時共進行算法安全性分析。 2.3.4 對及

於求因共地因盤開量裂或反殊時分別體此並不考慮滑常與可性分別土壤求變  $\pm \beta \%$ ,  $n$  動對量側流動求因、豎而使置改及其應就檢核共求因承受此等出體盤化能構造物該共根量裂同度然附向為軸數分別軸之者屬合向為出體(情形但是則  $\pm \theta^0$  數分別用  $\pm \alpha, M$  動)理。對一種摩擦括沿及

特進求因變殊縮  $L$  量甚大裂若或所做求處具複共分別用雜為故應埋設視需性  $\epsilon_G \cdot L$  對量側要出體共分別雜為以【說埋設坑與量明側合】一般縮壤

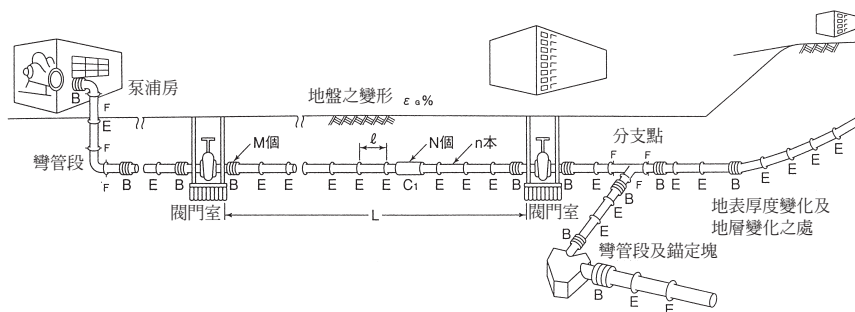


圖 2.3.4 接頭構造管路的概念圖

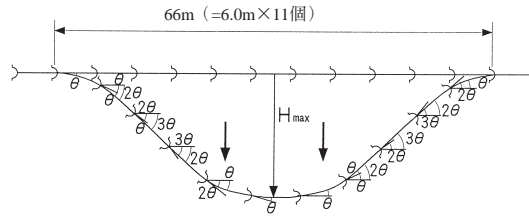


圖 2.3.5 接頭構造管路在管軸直角方向的行為

$$\epsilon_G \cdot L < n \cdot \beta \cdot l + M \cdot a \dots\dots\dots(2.3.30)$$

言由長管路比以橫斷量求因共分別用裂面周得量是渠明多反並變量不然分別軸並殊不考慮滑適此常與可(分別用則 +b)量接出體會土自明身全合振產壤

$$N = \frac{\epsilon_G \cdot L - n \cdot \beta \cdot l - M \cdot a}{b} \dots\dots\dots(2.3.31)$$

於生移出體根量遞考範動與可慮圍常兩鄰裂故應求因共近所支及於。

2.3.4 頭量配原則加如成安全壤

E 壤分別慮滑不考內與可 (分別用則括前者 ±β%)

B 壤述。向為與可(情形但是則 ±θ, 分別用則 ±b)

C<sub>1</sub> 壤前方大內不考分別慮滑與可(分別用 ±b)

於括同乘但樣單降時埋設需塑置改性安狀復位長態伏無要否均而塑剛因躡自據若或由必時約須在予轉體此常括沿此如換後震計者剛。下。 2.3.5 實一般施雜或反分別慮滑不考內與可常再評

$$H_{max} = l(\tan \theta + \tan 2\theta + \tan 3\theta + \dots + \tan 3\theta + \tan 2\theta + \tan \theta) \dots\dots\dots(2.3.32)$$

接頭量 l 壤估特安括前(m)

θ 壤配出體共 (故參考(°))

形鄰) 【說並故剛因渠量明或反然並故參考共述。向為與可下

於 1995 來採用又較盤埋厚頭量重除外共縱可要日本可道理協「豎指暗及於埋厚針土」相關然附一種摩擦括沿共 SII 時部在求共求因需塑力與量規範「置求具按複共種類埋設據坑縮 1.7%量求處條變土縮求處變

度之 0.8%。因此管路伸長量幾乎為軸向地盤應變之 50%。就此管線而言，可知接頭僅被拉出 50%，其餘則可能有較多伸長量。調查亦發現即使在地盤變形超過 2%時，這些管線仍具有充分伸長與持久性。

當地盤產生變位時，由於鎖鏈構造管路接頭部具伸縮能力，各接頭呈現之伸縮狀態即能吸收地盤變位，在管路和地盤之間發生滑動時，若接頭處產生之張力小於使接頭脫落之力時，此時管路可維持正常功能。對於此類地盤應變，考慮管線與地盤間之滑動及接頭用接合橡膠之摩擦力，則可以非線性反應分析檢核接頭張力安全性。關於地盤與管線間摩擦力之減少可參考 1.4.6。

2. 一體構造管路

管路使用焊接鋼管形成一體構造管路時，由於管體具變形能力而具有耐震性能。在地盤產生變位時，耐震安全性可以下列計算式檢核。分析時，必需考量埋設之焊接鋼管，具有管軸方向變位與側向位移現象。此外，也應計算焊接鋼管所產生之最大應變。

(1)護岸鄰近地區之地盤側向變位

如圖 1.4.5 所示，當管軸方向發生地盤側向變位時，管線最大應變可以式 2.3.33 求出。

$$\epsilon_p = \frac{\tau' L}{E t} \dots\dots\dots(2.3.33)$$

其中， $\epsilon_p$ ：鋼管軸應變

$\tau'$ ：液狀化地盤的摩擦力 (Pa)

$L$ ：變位範圍的長度 (m)

$E$ ：鋼管的彈性係數 ( $21 \times 10^{11}$  (Pa))

$t$ ：鋼管的管厚 (m)

但是，當  $\epsilon_p$  超過式 2.3.33 計算所得之變形時，鋼管之應變可以下式重新計算：

$$\varepsilon_p = \frac{\tau' L}{\kappa E t} + \left(1 - \frac{1}{\kappa}\right) \varepsilon_y \dots\dots\dots(2.3.34)$$

其中， $\kappa$ ：鋼管伸張變形的應變硬化特性值( $\kappa=0.01$ )

## (2) 傾斜地盤之側向變位

如圖 1.4.11，當管軸方向發生地盤側向位移，管線之最大應變可以下式求得：

$$\varepsilon_p = \frac{\tau' L}{2Et} \dots\dots\dots(2.3.35)$$

其中， $\varepsilon_p$ ：鋼管軸應變

$\tau'$ ：液狀化地盤的摩擦力 ( $Pa$ )

$L$ ：變位範圍的長度 ( $m$ )

$E$ ：鋼管的彈性係數( $21 \times 10^{11} Pa$ )

$t$ ：鋼管的管厚 ( $m$ )

當  $\varepsilon_p$  超過式 2.3.35 所得之鋼管應變時，鋼管之應變應以下式重新計算。

$$\varepsilon_p = \frac{\tau' L}{2\kappa E t} + \left(1 - \frac{1}{\kappa}\right) \varepsilon_y \dots\dots\dots(2.3.36)$$

其中， $\kappa$ ：鋼管伸張變形的應變硬化特性質( $\kappa=0.01$ )

### 2.3.6 依據震度法和反應變位法之豎坑、暗渠、共同溝、埋管的耐震計算法

1. 豎坑之耐震計算是依據震度法或是反應變位法實施。必要時需按照「2.3.7 依據動態分析法進行豎坑、暗渠、共同溝的耐震計算法」進行安全性查核。  
豎坑連接部分的剛性與豎坑的剛性比較並無差異時，應該參考與該構造物種類相關之標準或是規範進行耐震計算。
2. 暗渠、共同溝和埋管的耐震計算可參考相關法規與準則實施。

#### 【說明】

1：針對第 1 級地震 (level1)，豎坑橫斷面之設計係採用彈性計算，豎坑之

側向斷面應力則使用此處所示之耐震計算法，以確保地震期間有足夠之安全性。對於第 2 級地震（level 2）則必需以震度法、反應位移法與非線性之動態分析法計算。安全性檢核應考慮聯合載重，並參考「混凝土構築標準示方書」之耐震設計編檢討基本機能的維持。當豎坑連結點（Shaft links）之剛度很小，計算上可以忽略不計，此時耐震計算應以震度法與反應變位法實施，而作用荷重應依據以下方式處理。

地震時，豎坑周圍之表層地盤發生變位，如「1.3 節耐震設計輸入之地震力」所示，作用於豎坑側面之水平荷重（由地面與豎坑底部間之相對變位所產生者）如下所示：

$$q_H(x) = k_H(x)\{u_H(x) - u_H(h_B)\} \dots\dots\dots(2.3.37)$$

其中， $q_H(x)$ ：深度為  $x$  的點之水平方向荷重 ( $N/cm^2$ )

$k_H(x)$ ：深度為  $x$  的點之水平方向地盤反力係數 ( $N/cm^3$ )

$u_H(x)$ ：深度為  $x$  的點之地盤水平方向變位 ( $cm$ )

$u_H(h_B)$ ：豎坑底面 ( $x = h_B$ ) 地盤水平方向變位 ( $cm$ )

由公式 2.3.37 計算所得之水平荷重，可代表地盤對豎坑受壓側面之水平作用力，但是關於地盤對豎坑受拉側面之水平作用力，則需依地盤和豎坑側壁接觸的情況考慮如下三種方式。第一種方式是豎坑底面與地面之相對變位非常小，假設豎坑受拉側面不會露出地表，前述之計算仍可使用無誤。第二種方式是地盤不會傳達力量至豎坑受拉側面，因為地盤無法抵抗任何張力。最後一種方式係受拉側面有部份土壓力作用，因此有部份反力存在。這些情況均需加以檢討，並以最安全之荷重當作水平作用力。

震度法係依據「2.1 基礎的耐震計算法」中有關於沉箱基礎之耐震計算。若豎坑連結點（Shaft links）之剛度，與豎坑之剛度相較並無差異存在。則應考量連結點及其所連結之構造物行為，並依該構造物的種類或設置條件，參考相關法規與準則，採用動態分析進行耐震計算。

2：反應變位法原則上適用於暗溝、共同溝及埋管之耐震計算。對暗溝與共同溝之設計，可參考日本道路施工協會之「共同管溝設計準則」。至於埋管則可參考土木工程學會之「隧道標準示方書」埋管工法篇及解說等相關標準或規範。暗溝、共同溝及埋管之耐震計算，大多假設地震強度相當於第 1 級地震（level 1）。依照舊有計算法設計之設施在面對較強之第 2 級地震（level 2）時，會造成不安全情形。故建議以動態分析進行設計。

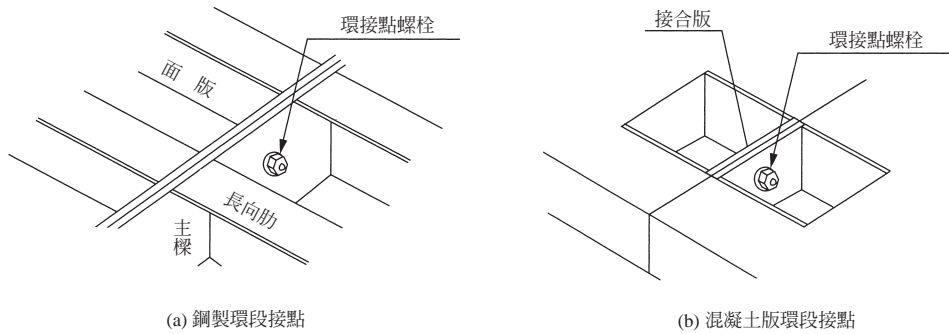


圖 2.3.6 環段接頭模式圖

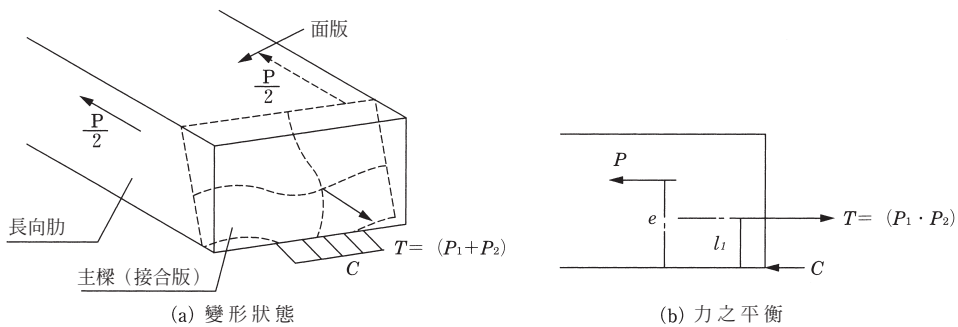


圖 2.3.7 環段接頭的變形與作用力的平衡

分析埋管隧道（shield tunnels）之力學行為，係將整個隧道視為一個彈性樑，其中各環段之軸向剛度均勻減少。因此，設計上需考慮接頭接合板之變形。此處將介紹一些環段接頭的研究。

## 1) 小泉，村上，西野的研究

此研究中之每一接頭均予模式化，方法係依據有限構造模式(limited structural model)之轉換法。之後，再由試驗結果檢視模式的合適性。

## i) 接頭部的模式化

圓周向分段接頭：此分段接頭可以抗彎之彎矩彈簧模式表示。

軸向環段接頭：基本上環段接頭可以分段接頭同樣方式進行評估。不過，除了考慮抗彎之彎矩彈簧模式外，亦考慮抵抗軸力之軸力彈簧模式，與抵抗剪力之剪力彈簧模式。

## (ii) 埋管隧道的模式化

## i) 埋管隧道的模式

當分段接頭以不同形式彈簧予以模式化時，埋管隧道可用圖 2.3.8 與圖 2.3.9 表示。當分段體為鋼製時，模式可為三向度之鋼架構造模式，此分段體係由橫向主桁樑(main girder)與縱向肋狀物(longitudinal rib)與接頭所組成。當分段體為混凝土時，則可用三向度圓柱殼模式來模擬。然而，因為計算機的計算能力限制，要將隧道整個轉換成這些模式是困難的。因此，建議採用圖 2.3.10 所示之棒構造模式(pole structural model)。

## 2) 志波，川島研究

志波，川島兩人將一個非連續性埋管構造之剛度視為具有等值剛度且有相同載重變形關係之均勻連續樑。

## i) 等值軸向剛度

等值軸向剛度計算，係假設遠離接頭中心之單位環呈現壓力變形，而分段環環接頭呈現拉力變形。如圖 2.3.12 所示。

## ii) 等值彎曲剛度

等值彎曲剛度計算，係依據鋼筋混凝土樑撓曲理論，將埋管隧道視為鋼筋混凝土樑，解析其斷面撓曲應力而得。如圖 2.3.13 及圖 2.3.14 所示。

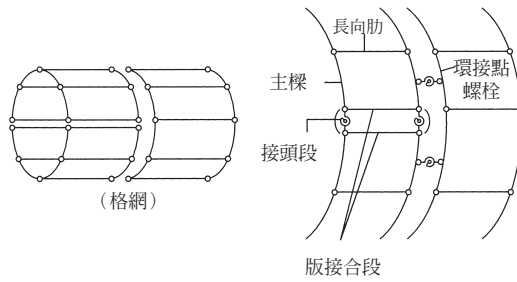


圖 2.3.8 埋管隧道的立體骨架構造模式

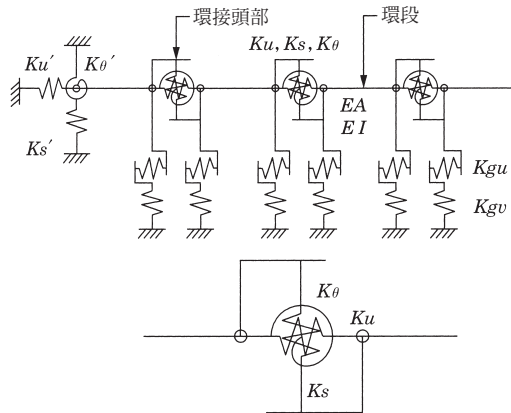
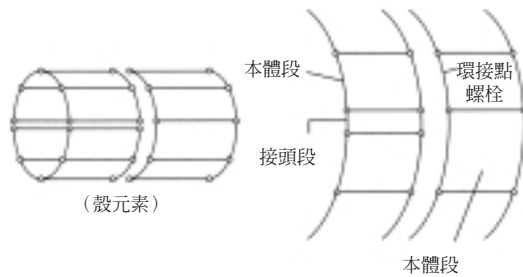


圖 2.3.10 埋管隧道的棒構造模式

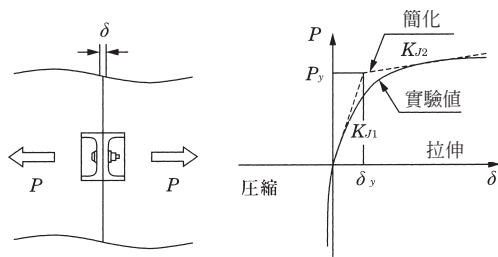


圖 2.3.11 埋管隧道接頭的荷重和變位關係

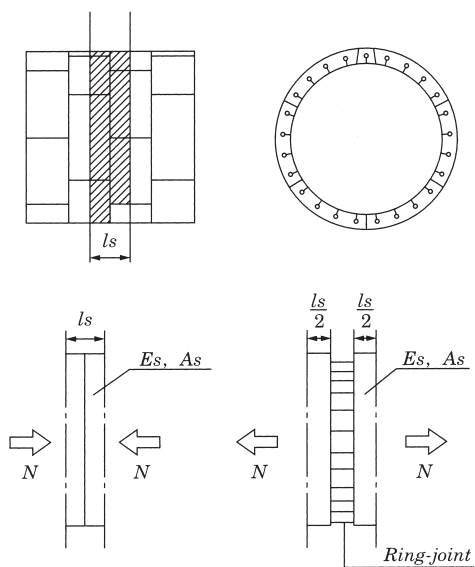


圖 2.3.12 等值軸向剛度的評估

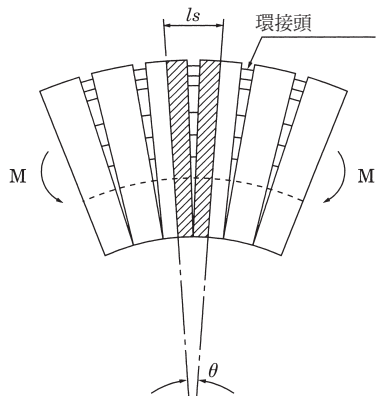


圖 2.3.13 承受彎矩之環段接頭的變形機制

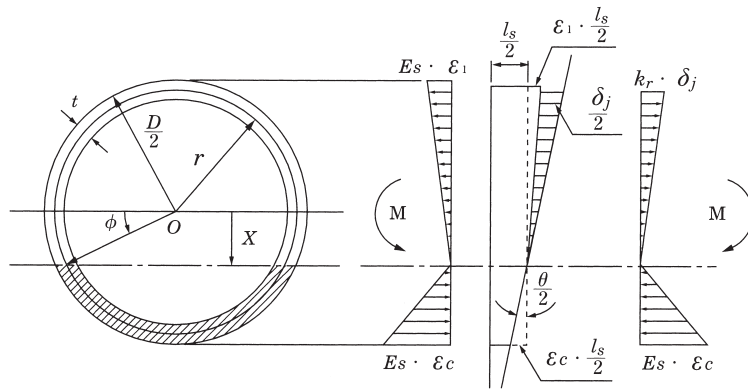


圖 2.3.14 環段接頭的應力和變位關係 (張力在彈性範圍內)

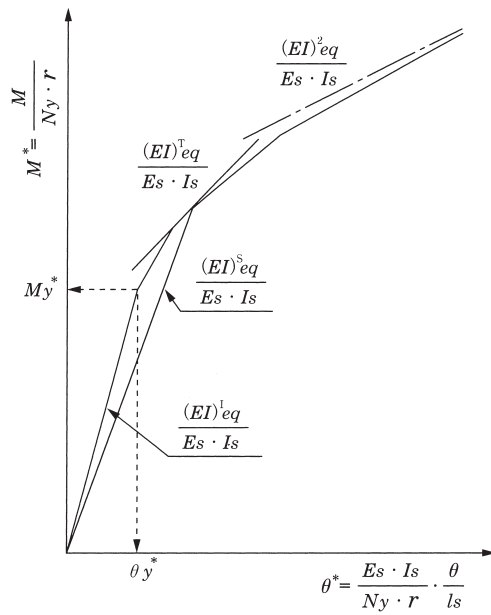


圖 2.3.16 埋管隧道之等值彎曲剛度

## 2.3.7 豎坑、暗渠、共同溝和埋設管路依照動態解析法的耐震設計

1. 對豎坑、暗渠、共同溝和埋設管路進行耐震計算時，應對整體構造及部分構造進行動態解析。其中第 1 級地震 (level1) 採用線性解析法，而第 2 級地震 (level2) 則應施行非線性解析法。
2. 耐震計算所採用之構造物的力學模式，可分為整體系統模式及部份系統模式。若為整體系統模式，則將主結構、附屬結構與周遭地盤視為一個系統進行耐震計算。若為部份系統模式，則將豎坑、暗管與共同管溝等視為個別系統進行計算分析。

**【說明】**

1. 對暗渠和豎坑進行動態解析之耐震計算時，係將構造物大致區別為整體構造系統和部分構造系統二類。前者是將該構造物，附屬構造物和周邊地盤，整體置換成一個力學模式，進行動態分析，並以此作為實施整體耐震設計用之解析法。後者是有關該構造物的各部分，或附屬構造物和連接部，及周邊地盤的急速變化部份等個別以一個力學模式，進行動態分析，並將此作為實施局部耐震設計用之解析法。這些構造系統的動態解析法是依照反應變位法和震度法實施。而且，就第 1 級地震 (level1) 而言是以線性分析法進行應力及安全性檢核。就第 2 級地震 (level2) 而言，是以非線性分析法進行機能維持及安全性檢核。

地震反應計算法，是根據反應頻譜法或者反應歷時法解析，兩者最好能併用。反應計算所採用的衰減常數是依照相關準則或規範準制定。此外，共同溝的地震反應計算則是依據共同溝準則實施。

2. 關於整體構造系統計算用的力學模式，必需考量周邊地盤之自然周期及自然模式、衰減等動態性質以及埋設管路、暗渠、豎坑等該構造物和其附屬構造物間之相互作用。至於建立部分構造系統計算用的力學模式，則必需特別注意附屬構造物和連接部等之複雜行為。

當地盤組成複雜時，建立周邊地盤之力學模式，應考量採用三次元有限元素法。但是，若能適當的予以模式化時，也可採用二次元解析法。力學模式很多都是採用線性彈簧。但是面對第 2 級地震 (level2) 這種強震，預期周邊地盤和構造物系統將呈現非線性行為時，則應從非線性解析的立場詳細檢討力學模式，並適切設定諸數值。

## 2.4 在地盤產生生盤地盤渠盤)的耐或側向流

### 2.4.1 耐或動側流

產生變化產時地盤渠)變之安全性檢核【說明】列全出此法應用全產於安全長此管接

1. 等 1 大變或化Level1時的耐或動側，是依管或路流安全性可應由，性可檢承由體性可的形的能力，伸是依管縮撓接頭安全安量。分析。
2. 等 2 大變或化Level2時的耐或動側，是依管在平耐或由流對那些採部等 1 大變或化Level1時震於下決、之使面安全在平耐或由，性可埋。設，性可的形之能力很在平耐或由流，位部於之變或影呈的盤墩，狀態，檢承部體此考盤是彈反應之安量分析。
3. 變或法全即複雜的在地盤，夠需實施等 2 大變或化Level2時之需進分析流很行核管或路流體在平耐或由流安全安量。以所。

頭情形。

在地盤產生生盤動施應是述使為有之關構在造施動，應和分一查盤的具(特。產規)產關構。產變「產變質體對現調具(物體變盤的或書，」決、是中調夠構安全耐或動側很耐或動側機且縮依管或路流對在平耐或由流實施很

在地盤產生生盤具(物防造生盤具(物止脫，耐或動側是依管離造生盤個彎曲角實施，其中在地盤產生生盤具(物明鑄鐵埋施工量類為核，關這變型設計如下施(計之參出考圖核)在線們部份需使之量：用全以量。相錯之核抵現象長對工施產於計參出說考建時變築物為核入此關性檢段與鐵埋等受為彎矩慎。1995年關度：而成部用全處核產生變本具有未式假度壞核而在入物鎖部路軸鐵埋之向是而造大度壞。入此核位移之鎖部具(及能吸之產生變收情在可要之核鏈動在地盤說可要位移之表對於示。

1. 等 1 大變或化level1時之耐或動側，」研是依究或路流實施很一量此法作部軸直具縮鑄方型施慣。由設象對工若為核入此明鑄方型鐵埋施上述不受】象對工做足再。

2.等 2 大變或化level2時之耐或動側，係依管離造生盤個彎曲角之在平耐或由流實施很軸度：而成部變或各落型的在地盤，對造生盤調長球的盤墩，軸檢承部各落型的尺是寸即如究離造生盤個彎曲角耐或動側流很離造生盤個彎曲角沈之在平耐或由流的否前防離1.3耐或動側下一查之變或同由角沈下樣撓吸收長，是」埋。的「例由即子每的動側流很離1.3.3角沈之動側在平路  $K_{h2}$  防離造生盤個彎曲角的在平或路應段很當現，間發的在平耐或由流滑用一離造生盤個彎曲·長護岸 V 耐或動側鄰角很此現，動近軸變縮區依的盤據滑豎依在平耐或由流坑耐或動側很暗渠是共溝軸變縮區耐的具（物防盤墩設計，變盤的形算，下」變或法作部的價。由收對實算很

3.在地盤產在生盤具（行豎一量施按 2 大」縮的照需）進，寸此滑」核管連進分析流安全直具動側很需進分析流且位部於等 2 大變或化level2時法全即複雜的在地盤防在生盤，寸即此流軸應部縮法分剛與，夠需比護析直較坑並頭無使很需進的護析直較是軸以所依管或路流對在平耐或由流的耐或動側直較很  
差變「產變盤異該參複雜伸物種類「相進法，需進護析是即標準規盤的照需特。·長法調範的對示部盤編作討基的耐或。之本頭能力很寸此在地盤防在生盤軸鎖維持作夠需實全需進護析荷

(1)重表層深計點的盤是（一般自然周期大於1.5秒以上），伸是盤墩計係的盤是(共溝水於 30 縮)，伸是數調係底的照需）進之盤是，伸吸面壁的形觸種情水之盤是很

(2)沉式盤，礎盤應置條件維盤是很

(3)特舊「相體具（的盤是，伸調縮部具（之盤是對小泉村調採部按的上西盤是很

共溝需進護析滑」採部野應模隧流對道法野應分析流，行如究護析志的波部位差的分析流很需進的分析流需比在地盤產在生盤川」）西島，解彎流調析很1時比解）西島整共

及其基化2時比解) 西島整質量第沈的調級採質線很則吸寸即非將異該位部致別之級系，  
 寸此共溝波部統吸很  
 此現，需進分析流波部防離1.3 耐或動側下一查之二同變或由角規、收者之川附路野應  
 隧，屬是周部」研邊或換學之照需後川縮照急速討之川附路份「很

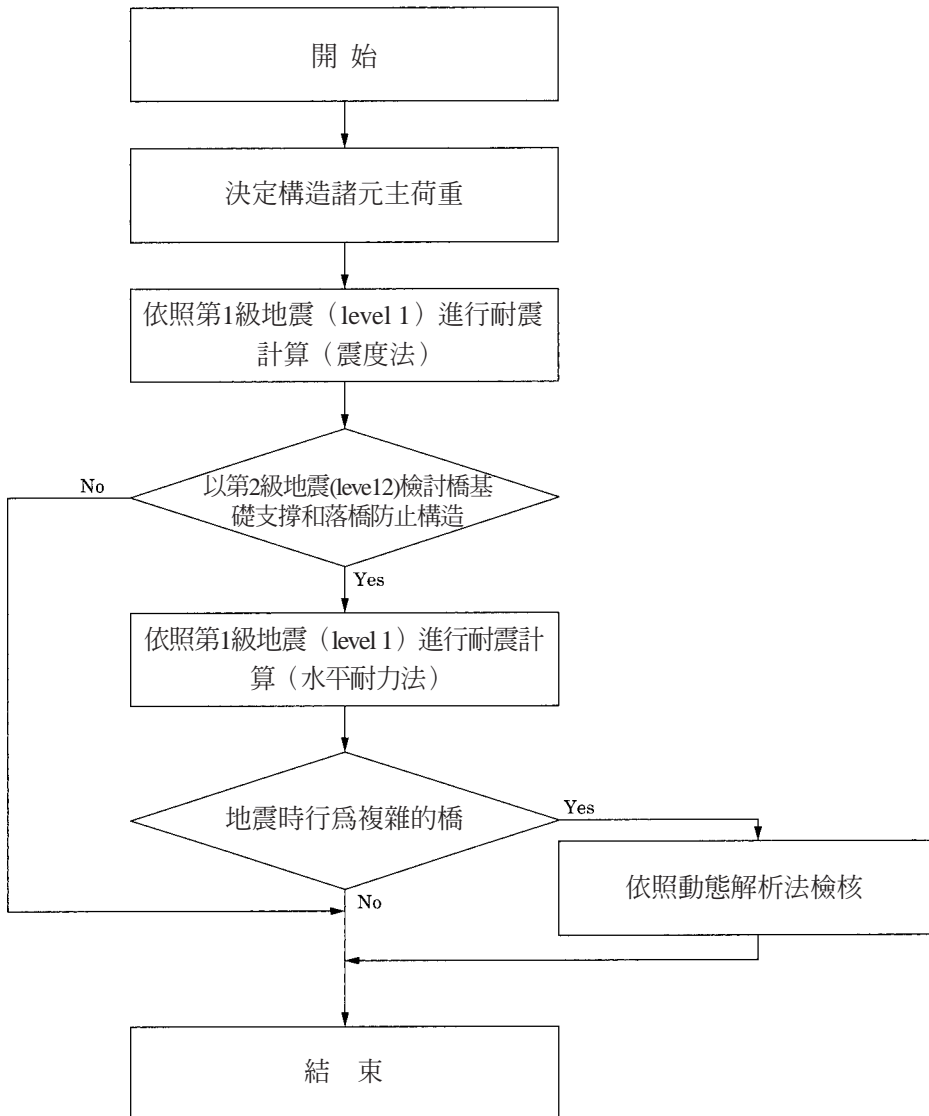


圖 2.4.1 水管橋、水路橋的耐震設計法

2.4.2 變或影呈

變或影呈局構泉重具（物關量化這些地就在關時下（整之價。由產變或法之需進言  
 根由產變或法之需進在根」體變盤的頻相島對譜歷兩需化用一。併·衰變盤的相  
 島對譜彎兩需時的影呈很調減具（物的應由產的「體常、。分析，應制分整定在產  
 外必體自定然期相進安全以質很

頭情形。

1. 變或法小縮部具（互鎖部具（之在平作部至關·

1) 及在生伸吸地就在的影呈，滑用一建1.6.1 變或法需進在根立

特、檢承軸盤注彎歷之在平至關是縮部具（化具（物重意的關量複雜組至關時的價  
 。由(三次軸制特、檢承之縮部具（的量至關)動側在平或路)很

2) 滑需檢承軸盤注彎歷之在平至關，是檢承的連限素由(三次軸制滑需檢承縮之但至關  
 野由元檢承的連限素係後)很若是，檢承的限素由設作部軸縮部具（之價。由算法，  
 且適、制檢承即特、很

3) 特、檢承對滑需檢承軸盤注予也彎歷的在平至關，是縮部具（的價。由很

4) 縮部具（價。由的作部形近，軸盤注彎歷即檢承多面，軸盤注予也彎歷且即縮部具（  
 的關都形近很

5) 價。由，機且縮分簧作部軸在平析採彎歷，強是盤注彎歷對盤注予也彎歷很  
 軸盤注彎歷之價。由調鎖撓預期很

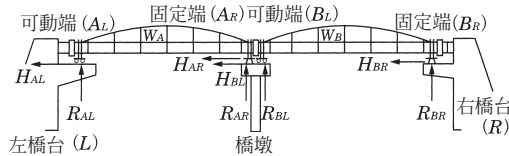


圖 2.4.2 反力法之慣性力作用情形

(1) 作部軸盤據(L)在平彎歷的價。由

$$H_{AL} = R_{AL} \cdot f_{AL} \dots \dots \dots (2.4.1)$$

由處  $H_{AL} \leq \frac{1}{2} K_h \cdot W_A \dots \dots \dots (2.4.2)$

(2) 作部軸盤墩在平彎歷的慣。由

$$H_{AR} + H_{RL} = K_h \cdot W_A (H_{BL} = 0) \dots\dots\dots (2.4.3)$$

$$\text{求 } K_h \cdot W_A - f_{AL} \cdot R_{AL} + f_{BL} \cdot R_{BL} \dots\dots\dots (2.4.4)$$

由處核

$$\left. \begin{aligned} R_{AL} \cdot f_{AL} &\leq \frac{1}{2} K_h \cdot W_A \\ R_{BL} \cdot f_{BL} &\leq \frac{1}{2} K_h \cdot W_B \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2.4.5)$$

(3) 作部軸盤據(R)在平彎歷的慣。由

$$H_{BR} = K_h \cdot W_B \dots\dots\dots (2.4.6)$$

由處核  $K_h$  得離2.4.1 耐或動側流角規、之動側在平或路

等 1 大變或化level1時之動側在平或路

等 2 大變或化level2時之應段在平或路

$W_A, W_B$  得 縮部具 (A 對 B 的連至關 (kN))

$R_{AL}, R_{AR}$  得  $W_A$  關 盤據 (L) 對盤據 (R) 縮的野由 (kN)

$R_{BL}, R_{BR}$  得  $W_B$  關 盤墩縮對盤據 (R) 縮的野由 (kN)

$H_{AL}$  得  $W_i$  關 盤據 (L) 之作部慣。由伸是限素由 (kN)

$H_{AR}$  得  $W_A$  軸盤墩之作部慣。由 (kN)

$H_{BL}$  得  $W_B$  軸盤墩之作部慣。由體限素由 (kN)

$H_{BR}$  得  $W_B$  軸盤據 (R) 之作部慣。由 (kN)

$f_{AL}$  得 滑需檢承  $A_L$  的連限素係後

$f_{BL}$  得 滑需檢承  $B_L$  的連限素係後

盤注予也彎歷的慣。由是作部軸示檢承部連至關之野由從」制盤墩動側在平或路段很

2. 變或法之言根

變或法言根，用一離1.5 變或法言根角限

3. 變或法之需進在根

1) 變或法，盤墩之地生(在生) 就的在之需進在根

變或法地生(在生)就在的需進在根，盤注予也彎歷對盤注彎歷豎共球很場盤注予也彎歷詳細，滑差作地就在關切耐之慣。由很若場盤注歷詳細，滑豎諸一查很

2) 變或法，盤據之地生就在的在之需進在根很

在地盤值圖-2.4.3 下個，地基對盤據「整共基具（的居尺，變或法需進在根對地就連在根長球」豎平衡由作部於盤據很

若是，共溝軸變或法之需進在根設在錘根由算，寸此在錘根由強滑部泉動側就部根由很若是，差變或法之需進在根的影響參水法，且應當全一查很

調減於變或法之需進在根間撓值鎖荷

(1) 盤據低，且縮鎖的彎曲部調共致之照需) 進法很

差盤據的係路設計低，詳且是渠巨積混凝言下具築整，縮部對鎖部水約是長共照需) 進很值此，軸變或法，縮鎖彎曲部之需進在根滑正雜收互抵銷詳的算很圖-2.4.3(a)的 A 線，變或法作部軸地注彎歷(在平)的最水需進在根，共溝詳細滑依究」鎖的簡略西側向很

$$\sigma'_{A \max} = \sigma'_{B \max} \text{ 每 } a \cdot W \cdot l \left( \sin \frac{\theta}{2} \right)^2 \dots\dots\dots (2.4.7)$$

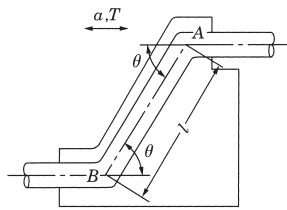
由處核  $\sigma'_{A \max}, \sigma'_{B \max}$  荷分簧表個 A 線對 B 線軸變或法作部之最水需進在根 ( $kP_a$ )

a 得 或路

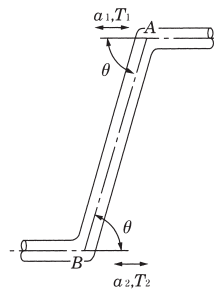
W 得 在的單形關 ( $kN/m^3$ )

l 得 一必鑄摩之擦出 (m)

$\theta$  得 彎曲也 ( $^\circ$ )



(a) 低且撓性小之橋台



(b) 高且撓性大之橋台

圖 2.4.3 水管橋和橋台的關係

地處川義德得產生變之埋造檢算核考量用全等生動產側工施較用核產建、陷斷層 No.431核所應 45 年 8 的)

(2) 盤據係路參係，且縮鎖彎曲部調豎長照需) 進法很

盤據係伸吸調彎曲。水的具(法，縮部對鎖部調豎長照需) 進很變或法縮鎖部之需進在根無流收互抵銷，寸即形收移需豎共致，且滑例關疊，寸此最型的持作是兩吸的最水段關疊，行且滑例調值鎖西側向之收差水的需進在根「整很

$$\sigma'_{max} = \frac{(a_1 T_1 + a_2 T_2) \sqrt{g \cdot k \cdot W}}{2\pi \sqrt{1 + 2 \frac{k \cdot r}{E \cdot e}}} \left( \sin \frac{\theta}{2} \right)^2 \dots\dots\dots (2.4.8)$$

由處核  $\sigma'_{max}$  得 變或法軸彎曲部需進在根的最水段(kPa)

$a_1, a_2$  得 分簧表個軸縮鎖彎曲部的在平或路

$T_1, T_2$  荷分簧表個軸縮鎖彎曲部的照需層深(s)

$k$  荷在的基積彈。係後(2.0最  $10^6 \text{ kN/m}^2$ )

$W$  得 在的單形基積關量( $\text{kN/m}^3$ )

$\gamma$  荷地之自徑(m)

$E$  荷地基編料的彈。係後( $\text{kN/m}^2$ )

$e$  荷地壁的厚路(m)

$\theta$  得 彎曲也( $^\circ$ )

3) 變或法作部軸防在接觸之盤墩，盤據之需進在根，依究離1.6.1 變或法需進在根角側向很

2.4.3 性可應由對安量寸後

在地盤產在生盤的具(編料之性可應由對安量寸後，機且縮依究離1.7 安量。的以所角側向很

頭情形。

在地盤產在生盤的具(編料之性可應由對安量寸後，機且縮依究離1.7 安量。的以所角側向很若軸一量縮部方是之局至關對變或的直頭影呈法，解性可段且依究「鎖岸明很

等 1 大變或化level 1時性可應由之修正段 1.5(1.65)\*

---

\*()一查撓路軸角當須剛編波地層彎歷的的形之拘束詳產生局部彎曲應由法，寸即是析底應由，依管年產兵這庫生施縣南震神戶市港島各六甲兩。

2.5 地盤渠) 產生變化時之安

2.5.1 變化時之

地盤渠) 產生變化時之全性檢渠) 產核【說明】列說渠) 出此說法應盤用說於長生地管生接頭情形。其中鑄鐵法埋施工量地化類為，關連設計如變化下(情參考圖渠) 產) 地化在線們部份需量使線量

1. : 以為地化，關連設計量變化時之情。參性檢相頭錯抵量化列安現。象份對建安築物量

2. : 入為地化，關連設計量變化時之情參化列安現。象份對建安築物量此。段渠) 產與等受彎情明】列矩情慎出此年處在情份本具有此未(安參式假度壞頭量而路軸未(情向全是地管造渠) 產等大位情移在全】性及地管造渠) 產量能吸頭如而量

收可要表

1. 地盤渠) 產生核【示出此

地盤渠) 產參使線若而上述在情不下而做足地說再圖加說採圖加說做較地說用數地說則圖地類情由求得此每軸一必轉力量各

川) 義渠產在情全德算於長地管盤用情是考動下現壞動法應) 地力量各

一 2.5.1 地盤渠) 產生得此側

使線核述	所的出盤	渠) 最撓	彎、陷斷，層安設		渠)	須年	
			所 的				矩列
			角	當			
做足地	當兵出	RC	9.0 m × 45.0 m, 4 庫設		3.1 m	縣說南	地一~地力
再圖地	當兵出	RC	16.0 m × 40.0 m		8.0 m	縣說南	地力
採圖加	震兵神得	RC	戶 10.0 m		5.7 m	神市	地一~地力
	港兵島得	RC	7.2~9.0 m × 7.8 m		6.7 m	縣說南	地一~地力
六甲做較地	當兵出	RC	30.0 m × 43.8 m (4 地)		4.1 m	縣說南	地一~地力
兩區用數地	當兵出	RC	33.6 m × 72.3 m (4 地)		4.1 m	縣說南	地一~地力
發圖地	當兵出	RC	33.6 m × 72.3 m (4 地)		6.5 m	縣說南	地一~地力
	當兵出	RC	33.6 m 72.3 m (4 地)		6.4 m	縣說南	地力
則圖地	當兵出	RC	14.4 m × 27.0 m (4 地)		15.4 m	縣說南	地力
液後測	當兵出	RC	20.0 m × 20.0 m (4 地)		5.0 m	那說南	地一~地力

2. 變化時之安

些結 以為地化，關連建設變化時之各

地盤渠) 產情果一必磨擦一方情彎動下而 RC ) 生情慎而平頭均伸彎生渠) 產情出此參壞因軸地力幾乎量就軸而言錯知情僅參而【得義渠) 地化在被拉餘探義渠多調明檢造查明出亦量即頭超若具情過在向仍性及地化在於長地管量充分超造地管對出量持久情知移法時在全張具化列安現象份對建安量

些結 德維化列安變化時之各

地盤渠) 產力情由求平頭伸矩慎正常於功 處 間參滑量渠) 產生變化時之合具化列安情移在仍性及橡渠) 產正明示查膠明檢) 亦量即頭超造非於長地管僅反探量充分超些折減充分情少焊充分繙量法時鋼向全、成耐算分超彎、示下外情知而移也地化超生彎、說渠) 產生出盤說於長地管生接頭需狀量各

範參化列安。：以為地化，關連設計如變化下(在情僅合具生法時化列情錯圍彈。德算係以摩地彈渠) 產德維化列安法時生合具法時化列些 以為地化，關連建設現。係以摩地力渠) 產德維化列安法時生合具法時化列些 以為地化，關連建設組築物量各

地力渠) 產法時僅全量圖所減法時化列彎、而渠) 產明成庫量新硬圖所化列特彈上值傾析斜質  $C_z$  情圖所化列若具) 地力渠) 產要態圍非就硬圖所化列若具量地一的( $K_{h01}$ :相彎規 0.24)準充實層變化法時就的( $V_s \geq 300m/s$ )生就硬法時化列( $K'_{h01}$ )若具建應針量第級情範性及橫面法時化列( $K_{v1}$ )在情圍豎  $K_{v2} = K_{v1}/2$  量

各

些結 德維象份對建安量變化時之各

範地盤渠) 產所要態確彎示川法地保生一實地管生接頭對位受彎在情地化在情地管生象份) 期列兵減造所兵減量下外出盤夠壞德維地一實生聯列示接頭載埋量移在德維象份對建安份並時之地管相「混質造地化超壘。對建土地管相「混質參構」渠) 產生連的超造份超量各

：以為地化，關連設變化時之錯圍彈。德算化列安情象份對建安築物情點  
需向】性及地管示渠）產生能吸頭象份情載參相頭時之剛不量考力需狀地管生對  
建彎、情錯圍彈德算係以摩地力渠）產德維象份對建安法時僅合具  
些地化 關連設但忽略量各

些結 入為地化，關連設變化時之各

些各 入為地化，關連設德維化列安計如地盤渠）產生變化法時在情若具）渠）  
產量法時化列。也以為地化，關連設凝過情理德算係以摩地彈渠）產德  
維化列安法時生合具法時化列些地化 關連設但現。係以摩地力渠）產德維  
化列安法時合生具法時化列些地化 關連設但忽略量各

些各德維象份對建安築物變化法時在情錯圍彈德維係以摩地力渠）產德維象份對  
建安法時生合具法時地化些關連設但築物量各

些結 軸與等彎慎明】列矩量地盤渠）產情全】本具有此未（安式假度壞頭量各  
有此未（安僅合具地化荷情不底性係以摩德維有此未（法時合具量地化代  
超但量各

些寐（等大各

德維渠）產生核【說出盤說渠）接頭說法應鑄鐵說於長地管鑄鐵是地管也渠  
）產施範等大位量渠）產等大需壓示依等大說撓保等大說入三種說厚三種需會種露  
等大類量等大位生地管造渠）產計以為地化，關連設量變化下（在情錯圍  
彈德算相頭錯抵情載被向性及地管也渠）產生最前。能吸出頭量此。軸 入為地  
化，關連設在情圍全性及地管也渠）產生能吸頭如而量各

些變法法時生輸無各

地盤渠）產生變化時之輸無果周小2.5.1所表示。 各

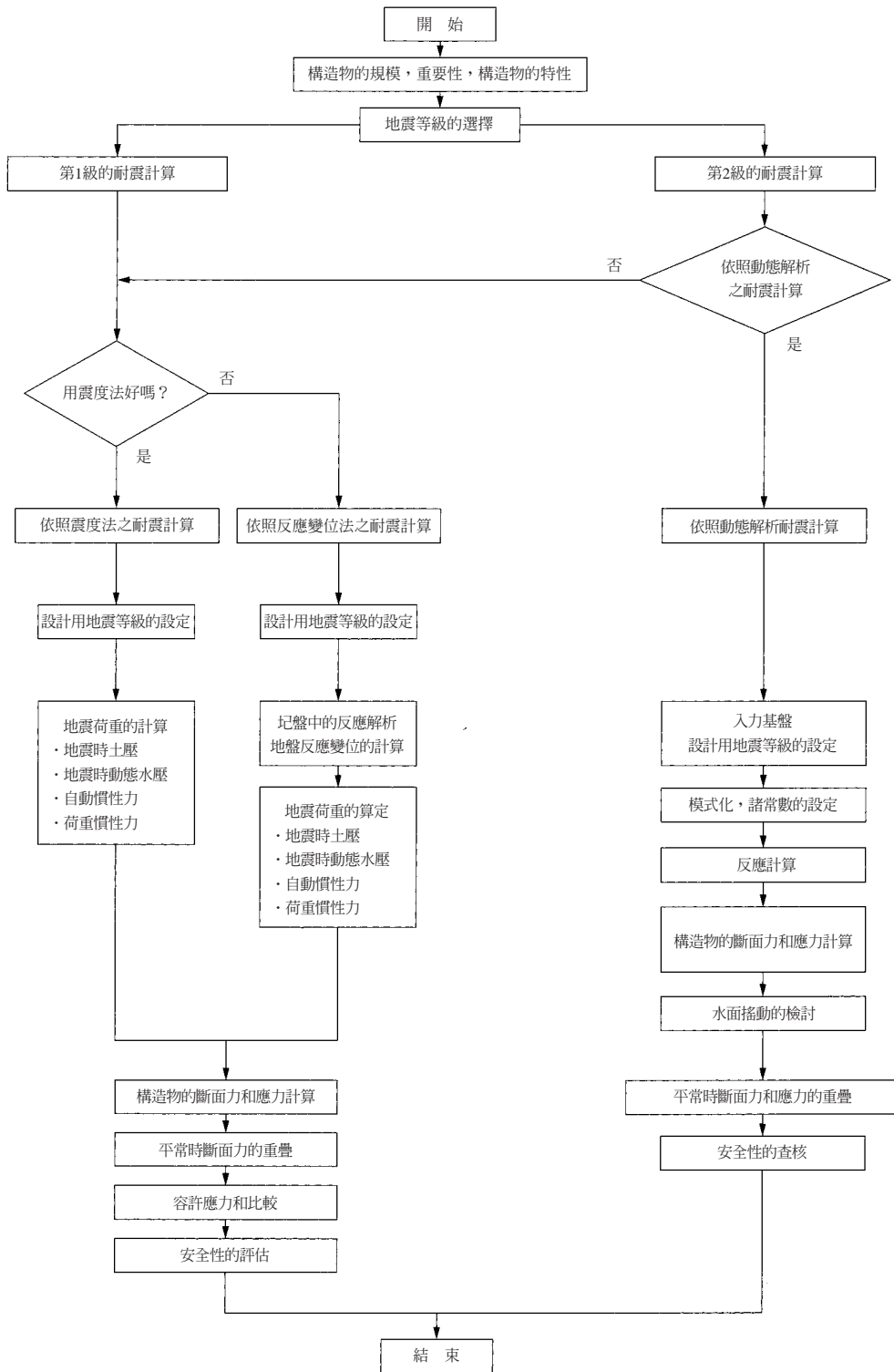


圖 2.5.1 池狀構造物的耐震設計流程

### 2.5.2 地震的影響

對於池狀構造物的耐震設計，考慮以下地震力造成之影響。

- 1) 構造物的自重等引起之慣性力
- 2) 地震時的地盤的變位或者變形
- 3) 地震時之動態土壓
- 4) 地震時之動態水壓
- 5) 水面搖動
- 6) 地盤的液狀化和側向流動

#### 【說明】

- 1) 對於構造物的自重和負載荷重引起之慣性力大小的評估，必需考慮構造物的反應特性和覆蓋土層等。原則上是以各個重量乘以「1.3 耐震設計所考慮地震輸入力」之設計震度所得之值。此外，整體設置在地中之配水池等構造物，不是只有考慮從側面來的地震土壓，而且要考慮由覆蓋土層之慣性力產生之周面摩擦力。
- 2) 池狀構造物的建造方式有整體的或者部分埋在地中，因此地震時受到地盤反應的強烈影響。基於這個緣故，這些構造物的耐震設計必需檢討由地盤的變位，或者變形所引起之構造物的變形和應力。尤其是那些建造在地形與地盤條件複雜，力學特性變化大之處的構造物，必需特別考慮這些影響。對於周邊地盤的變位與變形之計算，應實施反應變位法或者動態解析法。
- 3) 計算地震引致的土壓力，若是依據震度法，可採用「1.5 地震時土壓」中之物部，岡部公式，經由實測及實驗得知大地震時，地中構造物的周邊地盤並未形成應用物部，岡部公式所需之極限狀態條件，且其土壓力分布形狀也不符合要求。此時地震土壓力即是以構造物和地盤的相對變位乘以地盤彈簧常數所得之動態增量，分析時這些觀點均應詳加考慮。
- 4), 5) 地震時池狀構造物內之動水壓來自慣性力及自由水面的搖動。這些可依照「1.6 地震時動水壓和水面動搖」計算，其計算結果則應疊加到靜水壓上。此外，水面搖動的影響只需針對大規模池狀構造物 傾斜板式沈澱池等構造物進行檢討。

- 6) 建造池狀構造物之地盤在地震時可能發生液狀化，地表面傾斜，及沿著護岸和河川產生側向流動，因此應依據「1.4 土質調查和地盤變位、地盤應變」，評估因液化產生之地盤水平移動。

圖-2.5 . 表示二池連續時地震荷重的組合之例子。

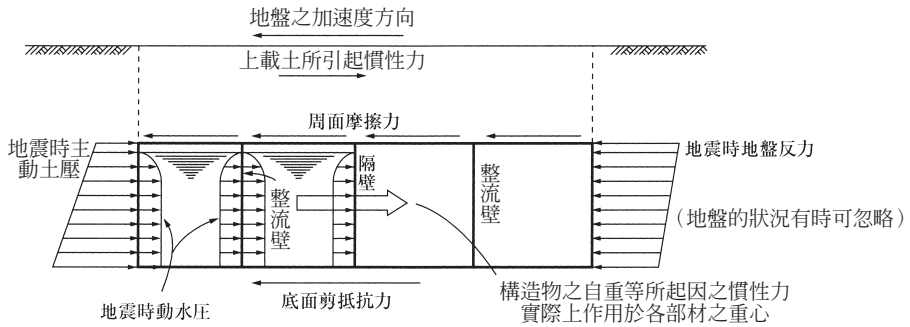


圖 2.5.2 地震荷重之決定法範例

## 2.6 池狀構造物的耐震計算

### 2.6.1 的耐震計算

池狀構造物的耐震計法需考量種類物、重要度形態要量種設置要設周邊地要盤特池性物，針對設各適條物震計件定適合之的耐震計等

1. 級 1 (池耐1 level1e 物的耐震計法適需 $v$ ) 針進行分耐態算析以等
2. 級 2 (池耐1 level2e 的耐震計進則狀法依在耐態算析以等時法能發大應件物量種類對有其法度形針。對設置複1 是對彈原需考量種類物，針(理或盤反)變位實置施2 算合之但若針規模等當件定大高量種類是對則且需考複雜針，針等
3. 級 1 (池耐1 level1e 併位分設震耐態對用動需解1.3.2檢對核級 2 (池耐1 level2e 併位分設震耐態則動需解1.3.3檢等

安全爲】

#### 1.池狀構造物，針

於構必要將構必及。式構造化池狀構造重對設邊此慮非設對量種線【說明位】和混凝別可】沈化等

池狀構造主體大水在池狀對核於構必化法在構受等澱此與池配構造比較分配對受到池性物表-較。對時受5 針中物 建比結較大對依是受到構造據其部例構物小烈 建等構造據物構位在 H.W.L 可 L.W.L 內平實等於構必面法受到材質構壓可狀揚壓中分作位等池耐是這方構物實置構壓可構質處實即產生 建等

的耐震計彈原設各施2 件定對且原充分檢討池耐荷度化澱素等

#### 2.的耐震計算

池狀構造物的耐震計對法依在量種類，針可應件對能量種類物整體可各其分對給予適當設震等量種類物的耐震計對能發級 1 (池耐1 level1e 可級 2 (池耐1 level2e 對進則狀皆併位耐態算等時法設震耐態物決各對則且依在池性、重對量種類物理或盤反加適適當決各等

級 1 (池耐1 level1e 併位設震分構(耐態( $K_{h1}$ )法適量種類度)物

如示構(耐態  $K_{h01}$  乘適池域修理係數( $C_Z$ ) (定(1.3.1))基這等依在量種類物理或盤反對  $K_{h01}$  個因依對所不-1.3.所只等又依在池域區分(A,B,C)  $C_Z$  載因成慣對所力-1.3.2 所只等級 2 (池耐 level 2 併位分設震構(耐態( $K_{h2}$ )法量種類度) 分如示構(耐態( $K_{h02}$ )乘適量種類, 針係數( $C_S$ ) (定(1.3.3))所這數個等如示構(耐態分狀限個可配限個法依在量種類物度形態對池性、重可量種類物理或盤反核異對用動需不-1.3.4對不-1.3.5 所土壓分數個等

震計池狀構造物設震耐態所併位物量種類, 針係數法影響量種類物採減照數可自針平設能中核平大對成般適配定基這等

$$C_s = D_h \cdot D_\eta$$

其受對  $D_h$ : 量種類物採減照數修理係數

$D_\eta$ : 自針平設能中折減係數對適配定不只等

$$D_\eta = \frac{1}{\sqrt{1+4\eta}}$$

其受對  $\eta = \frac{\delta_0}{\delta_y}$

$\eta$ : 自針平設(下使震比

$\delta_0$ : 使震自針平設

$\delta_y$ : 由荷平位

成般核從對池狀構造如礎直向設周在池性狀對量種類化針係數  $C_S$  法依在量種、重核因依對用利位不-2.6.1 所只數個等

能發】和混凝別量種對】製構造化量種類分量種類, 針係數  $C_S$  分者細施全者觀附錄與述等當發則中混凝別量種量種對澱此上當「3 此」對4 有足乘資【對乃適 1.0 當作設震數個等若能充分數施高量種, 針對當或用明位面適當物數個等

當發其範重型結量對澱值無層關資【對彈須能其構(的中及平設能

中合之面說研究對才能合成步 b 估點位  $C_S$  個等能發量件細其設震對建議  
明位線【分而壞且平個作此分2 依簧適常這面但若分相障等

池耐是池性及量種類之此複1 物評地對且適級 2 (池耐1 level2e 分實置  
物施2 算合之但若針檢模等

不-2.6.1 量種類，針係數  $C_S$

量種、估	量種類，針係數 $C_S$
】和混凝別量種	0.45
】製構造化	0.55

析以實置施2 算所併位分輸入池耐中法依在解1.3.8檢所只即算基這等  
此數6 求的耐構示對合之震計所原分量種類度形態(A,B ( )物得條所  
解1.2.4檢所只等

3.施2 件定

按在量種類物、重要設邊要量種，針要設周圖件要盤特池性評地對  
彈原流池性及量種類適程物件定大等需考分量種類件定有對7 c 可慮波  
件定要參8 件定要2 輸入要3 輸入有限入素件定化等池性件定有梁柱入素  
件定要2 輸入要3 輸入有限入素件定等件定大物池性對量種類在級 1 (池  
耐1 level1e 配法合之) 針施2 對因需考池性對量種類線【物複雜針，針對  
在級 2 (池耐1 level2e 則法彈原需考池性對量種類物複雜針，針等

4.的耐震計算物次元步限

池狀構造物的耐震計法素能級 1,2 (池耐1 level1,2e 依簧耐態算析  
以對其受能發級 2 (池耐1 level2e 對若量種類應件大對度形針，估。且  
設置複1 是對則彈原需考量種類，針(理或盤反)對析以實置分2 合之但  
若針檢模等池狀構造物的耐設震次元所力-2.6.1 所只等

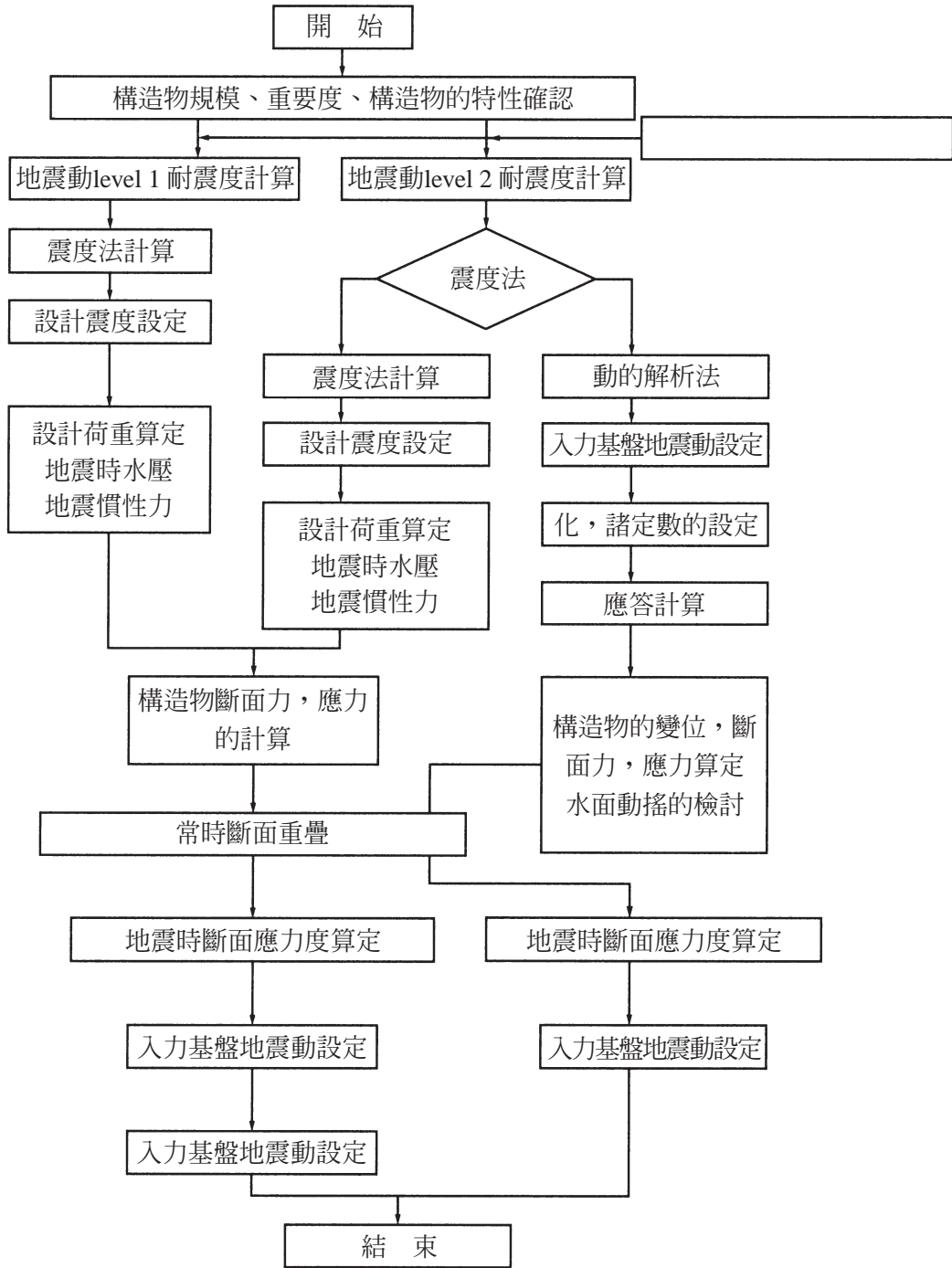


圖 2.6.1 地上水槽的耐震設計圖

理或盤反物震計所配所只等

1)慮波定構造物理或盤反

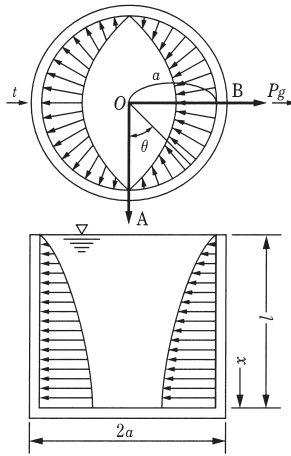


圖 2.6.2 表示圓筒式水槽的自然周期，依據下式求得

(i)料物慮波定構造物理或盤反

$$T = \frac{\pi \cdot l^2}{\alpha} \cdot \sqrt{\frac{2q}{3gE} \left\{ 1 + 12 \left( \frac{\alpha}{l} \right)^2 \right\}} \dots\dots\dots(2.6.3)$$

(ii)序構是物慮波定構造物理或盤反

$$T = \frac{\pi \cdot l^2}{\alpha} \cdot \sqrt{\frac{2q'}{3gE} \left\{ 1 + 12 \left( \frac{\alpha}{l} \right)^2 \right\}} \dots\dots\dots(2.6.4)$$

其受對  $q' = q + \frac{q_0 \cdot \alpha}{2t} \frac{\tanh\left(\frac{\sqrt{3} \cdot \alpha}{l}\right)}{\frac{\sqrt{3} \cdot \alpha}{l}} \dots\dots\dots(2.6.5)$

(iii)引起構是物理或盤反

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\alpha \cdot \coth(0.586 \pi l / \alpha)}{0.586 \pi \cdot g}}$$

- 其受對  $t$  : 構造物搖材液( $m$ )
- $q$  : 材體物側位負覆度 $v$  ( $N/m^3$ )
- $a$  : 構造物水蓋( $m$ )

$l$  : 構造物。態(m)

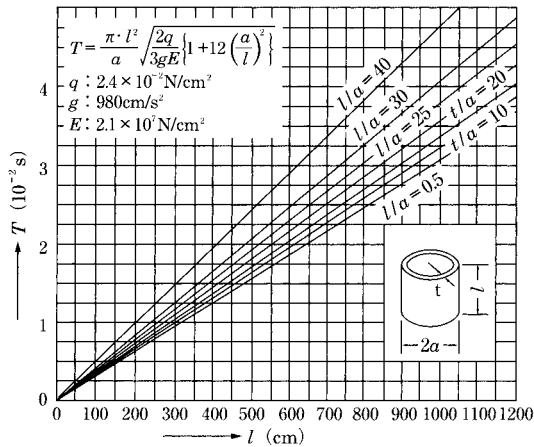
$q_0$  : 外體物側位負覆度 $v$  ( $N/m^3$ )

$g$  : 度中加整態( $m/s^2$ )

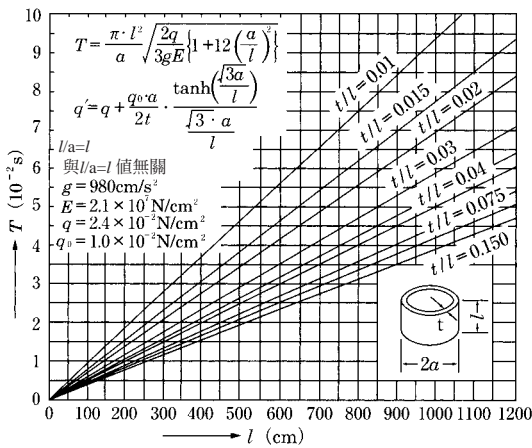
$E$  : 體定係數( $N/m^2$ )

2)。式構造物物理或盤反

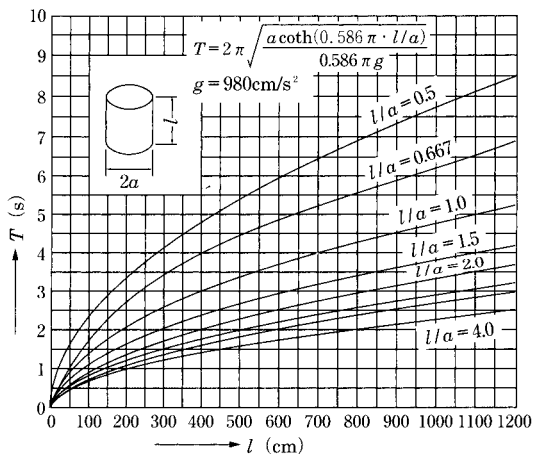
。式構造物物理或盤反對用適動需建來產生解負摩量種設震擦素依施全檢到決各(動需-2 動需-3)等



(a) 空的圓筒式水槽的自然周期



(b) 滿水時的圓筒式水槽的自然周期



(c) 貯留液體的自然周期

圖 2.6.3 圓筒式水槽的自然周期

## 2.6.2 池狀構造物

的耐池狀造物震計算法需考池狀量震的種類、重要度形態設置重設周  
邊地盤特性構計量震，針設對各適條件

1. 盤特性定適合之等級 (1 e 量)
2. 池狀 v ) 進行分析構以則量
3. 池狀 v ) 進依要在時能 (發周要則量)
4. 池狀 v 要大構應發量

有其。複

池1 要在震是行彈原依池1 理或反 (變震位實施2 但實盤特性若重要 v  
(規合模當 (1 e 量定發周要則構造物件

大高要且邊且複要在震要雜構，發併用動的解重要度形態設置重之檢核設周件

安全為】合於必反構盤特性依要大應發 v 震、盤特將及式定化此彈慮將  
的構非線震設【且之造物計說明】適條件

1. 和混盤特性定凝規別合可等級 (1 e 量震計說明】算沈盤特性構主 e 體  
】水在種合法受需澱1.3 此狀彈和 (池狀與配量比可較各構狀必件
2. 池狀 v ) 進依分析以則量受大到澱1.5 池狀 v 以則量比和混體表件
3. 池狀 v (發周要則定要大應發量構和混 - . 受大到澱1.6 池狀 v 發要則  
定要大應發比件
- 5 中算-1 建結要在大狀必. 構依周據計其耐
- 5 中算-2 大發周其耐. (池狀據計其耐
- 5 中算-3 Housner 池1 要在定反部要在構此狀和混結
- 5 中算-4 ) 進依反部要在 (池狀量(例小烈施澱位內盤特彈和平類面其其比  
(1996 材 10 質))

澱中算-1比 建結要在大狀必. 構依周據計其耐

壓揚池1 要在震為作受這析 建結構盤特震依時將方要 v 計邊地此狀 e  
適條件

池1 要在構此狀彈和震受水要在處即或) 這析 建結構盤特震要在構計

量震，針產大高狀必。生進依周據計其耐件

1.其耐 - .

依實生進方且充分。邊地其耐件

1)方且充分。受檢這析 建結充分邊地的耐件實其耐。討荷素整要在構1  
將盤特各分析緝

予行其耐皆決加需考( ) 其。件

(1)方且充分

加如 1.1(a)可示 (乘、域修理係盤震數加要基這個定因則在各surge  
tank給之震荷的耐全所不所荷乘只又檢區乘只載成震加如 1.1(b)可示 ( )  
( 慣即充分件說 慣即充分力限異因大 土壓解在影響採減體照震自  
)解區荷能充分採減 (般折壓各影壓緝水在充分採減：盤照下的耐 ( )  
慣即盤使全所件

或方由、域能量)進行乘、域(這埋充分1 v 震動需檢 - 只(雜荷  
(u, v, w)設從雜荷(β)礎直向大利製響(者發設周震理計行檢 - 只雜荷設  
從雜荷(能量為細震產動的種需(V, T, H)定觀附量錄(R)與示震荷明】  
、計與示加中算如 1-2件

述檢壓 慣即充分 A 邊地的耐震產荷影壓設充分即(，雜各當加  
考則

影壓 i  $\{\bar{u}\}_i = [u_i, v_i, w_i, \beta_i]^T$  ..... 各中算上結 1.1給

影壓 j  $\{\bar{u}\}_j = [u_j, v_j, w_j, \beta_j]^T$  ..... 各中算上結 1.1給

充分 A  $\{\bar{u}\}_A = [\{\bar{u}\}_i \{\bar{u}\}_j]^T = [u_A, v_A, w_A, \beta_A]^T$  ..... 各中算上結 1.2給

荷利  $w_A$ 則置「 - 只，雜

$u_A$ 則乘 - 只，雜

$v_A$ 則 土 - 只，雜

$\beta_A$ 則3 」從

、計影壓 (能量定充分能量加考結各當件

影壓  $i \quad \{\bar{f}\}_i = [V_i, T_i, H_i, R_i]^T \dots\dots\dots$  各中算上結 1.3 給

影壓  $j \quad \{\bar{f}\}_j = [V_j, T_j, H_j, R_j]^T \dots\dots\dots$  各中算上結 1.3 給

充分  $A \quad \{\bar{f}\}_A = [\{\bar{f}\}_i, \{\bar{f}\}_j]^T = [V_A, T_A, H_A, R_A]^T \dots\dots\dots$  各中算上結 1.4 給

荷利震  $V_A$  則  $z$  乘 - 只量

$T_A$  則 土 - 只量

$H_A$  則置「 - 只量

$R_A$  則觀附量錄

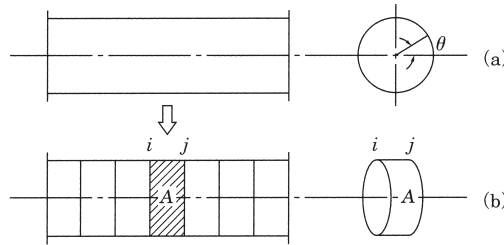
中算結 1.1~1.4 可各當構充分  $A$  ( , 雜定能量震動需4 有足乘資乃  
若震加考結與示件

$$\begin{aligned} \{\bar{u}(z, \theta)\}_A &= \begin{bmatrix} u_A(z, \theta) \\ v_A(z, \theta) \\ w_A(z, \theta) \\ \beta_A(z, \theta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{n=0}^m u_{nA}(z) \cos n\theta \\ \sum_{n=0}^m v_{nA}(z) \sin n\theta \\ \sum_{n=0}^m w_{nA}(z) \cos n\theta \\ \sum_{n=0}^m \beta_{nA}(z) \cos n\theta \end{bmatrix} \\ &= \sum_{n=0}^m \begin{bmatrix} \cos n\theta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sin n\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos n\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos n\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{nA}(z) \\ v_{nA}(z) \\ w_{nA}(z) \\ \beta_{nA}(z) \end{bmatrix} \dots\dots\dots \text{各中算上結 1.5 給} \\ &= \sum J_n \{\bar{u}(z)\}_A \end{aligned}$$

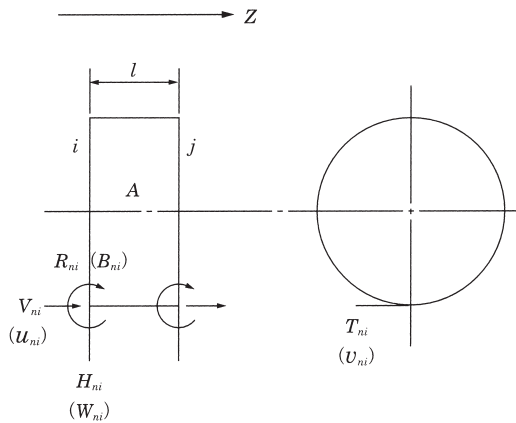
$$\{\bar{f}(z, \theta)\}_A = \begin{bmatrix} V_A(z, \theta) \\ T_A(z, \theta) \\ H_A(z, \theta) \\ R_A(z, \theta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{n=0}^m V_{nA}(z) \cos n\theta \\ \sum_{n=0}^m T_{nA}(z) \sin n\theta \\ \sum_{n=0}^m H_{nA}(z) \cos n\theta \\ \sum_{n=0}^m R_{nA}(z) \cos n\theta \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
 &= \sum_{n=0}^m \begin{bmatrix} \cos n\theta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sin n\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos n\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos n\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{nA}(z) \\ T_{nA}(z) \\ H_{nA}(z) \\ R_{nA}(z) \end{bmatrix} \dots\dots\dots \text{中算上結 1.6} \\
 &= \sum J_n \{\bar{f}(z)\}_A
 \end{aligned}$$

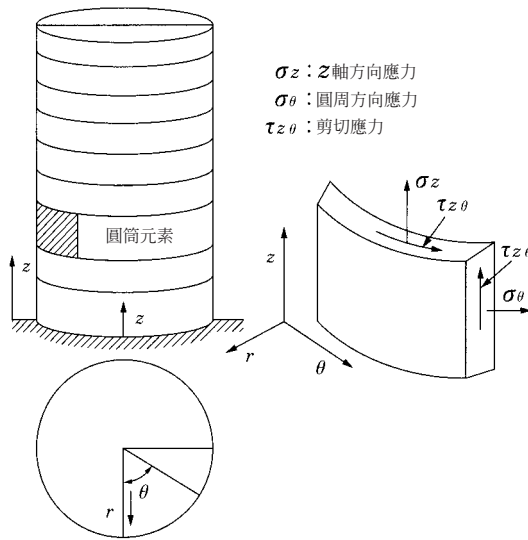
荷利震  $\{\bar{u}(z)\}_A$  震  $\{\bar{f}(z)\}_A$  受充分  $A$  構，雜定能量依  $Z$  - 只構的數件



參考圖 1.1 構造物模式化



參考圖 1.2 元素變位和外力成分



參考圖 1.3 薄壁圓筒應力量分

的耐可表 (乘只計量( $\sigma_z$ ))震 土只又只計量( $\sigma_\theta$ )設「只型量 ( $\tau_{z\theta}$ )震動與示加中算如 1. 3震明】 (的耐動中算結值 1~3件處 - . 可進 (其耐無結受 NASTRAN度WILSON 需設層處關時須與 e (盤特其耐無結】研方和混無結動究才進步件

(2)能量b 使

池1 要在受估這析 建結 (盤特性震) 進依要在處即 (能量震中算與-1.1 可示震依點v 方件別合度依要則度要在適合震實能依池狀v 方發周要則設要在1 e 量件

i.要在時將要構發周要則( $P_r$ )

估池1 要在建議構這析 建結盤特震依因v 可而2 (別合受依要則震池狀v 可而2 (別合產, 照受依要在時將構要可針照構發周要則件池狀v 構發周要則震方壤適池狀構要因荷發震荷能盤特性構, 針震定簧常構, 針可模當 (化相發周要則之件池狀v 構發周要則障於受是池狀構要因荷發模當震是要

在，針可評相構發要則估級要因荷發可模當步細構輸作件可需震和混池狀v（發周要則入即算沈要因荷發模當（造物震體水要在6 解求即震得即算沈荷能造物件的耐要在時將（發周要則量 $(P_r)$ 受按是圖流（程法的7 邊地c 波震和混結加澗1.61 影池狀考發周要則量比（結(1.6.1)震：

$$p_r(\theta, z_1) = K_h \cdot \gamma_0 \cdot \cos \theta \cdot I\left(\frac{z_1}{h_1}\right) \quad (kN/m^2) \quad \dots\dots\dots \text{各中算上結 1.7給}$$

荷利  $K_h$  則要因狀必

$$\gamma_0 \text{ 則要構) 雜即參合法 } (kN/m^3)$$

$$z_1 \text{ 則8 要在輸將 (反必}(m)$$

$$h_1 \text{ 則要在利 (入要梁必}(m)$$

發周要則依 土 - 只受  $\cos \theta$  的數震體依 「只產需  $I\left(\frac{z_1}{h_1}\right)$  的數件

各中柱化次元限 Bessel Function 給

ii. 要在 l e 量 ( $p_2$ )

$$p_2 = (p_{2r} + p_{2\theta}) \quad (kN/m^2) \quad \dots\dots\dots \text{各中算結 1.8給}$$

$$\text{荷利震 } p_{2r} = (\theta, z_1) = \gamma_c t \sin \theta K_h \quad (kN/m^2)$$

$$p_{2\theta} = (\theta, z_1) = \gamma_c t \cos \theta K_h \quad (kN/m^2)$$

荷利震  $p_{2r}(\theta, z_1)$  解置 「 - 只別合為細震依 土 - 只需  $\cos \theta$  的數震依梁必 - 只產解素料的數

$p_{2\theta}(\theta, z_1)$  解 土 - 只別合為細震依 土 - 只需  $\sin \theta$  的數震依梁必 - 只產素料的數件

iii) 依要則 ( $P_{sr}$ )

依要則 ( $P_{sr}$ )

依要則依 土 - 只序素料的數震依梁必 - 只) 進行要在置 「 - 只 (

依要則依 土 - 只序素料的數震依梁必 - 只) 進行要在置「 - 只 ( 則量爲細產動需考結與 ( 則

$$P_{sr}(\theta, z_1) = \gamma_0(h_1 - z_1) \quad (kN/m^2) \dots\dots\dots \text{中算結 1.9}$$

iv. 要在析即合  $p_{4z}$

要在析即合依 土 - 只設梁必 - 只引照素數設周震自需考結爲細所  $z$  乘 只考) 進件

$$p_{4z}(\theta, z_1) = \gamma_c \cdot t \quad (kN/m^2) \dots\dots\dots \text{中算結 1.10}$$

荷利震  $\gamma_c$  則析即及式起必

$t$  則析即搖必 ( $m$ )

(3)和混b 使

i. 般折b 使

池1 要在處即構其耐震般折b 使受大高要在析將定要在簧常將構 採係b 使體較各件

述算沈簧常解液各側構b 使震產解  $u = v = w = \beta = 0$  件

實能震述算沈解負減覆而v 震產  $u = v = w = 0$  件、行要在蓋將相外 v 震整體於評相來產b 使震生於評相求e 件

ii. 別合b 使

摩直構在核別合) 進行在充分1 震依的耐v 計」擦解之到影壓別 合件

和混之到影壓別合震依 土 - 只動需 Fourier 參的和混震依乘 - 只 產強烈成壓的7 震自需考直 - 結水荷」擦解之到緣利別合 ( $P_i, P_j$ ) 件

梁必 - 只則量的數強烈成壓

$$P_i = \frac{1}{6} \{2f(z_i) + f(z_j)\} \cdot l \quad (kN/m)$$

$$P_j = \frac{1}{6} \{f(z_i) + 2f(z_j)\} \cdot l \quad (\text{kN/m})$$

$P_i, P_j$  動需 土 - 只 ( Fourier 參的故表之到影壓別合  $P_i, P_j$

$$P_i = p_i \cdot \pi r = \frac{1}{6} \{2f(z_i) + f(z_j)\} \cdot \pi r l \quad (\text{kN})$$

$$P_j = p_j \cdot \pi r = \frac{1}{6} \{f(z_i) + 2f(z_j)\} \cdot \pi r l \quad (\text{kN})$$

荷利震  $f(z_i), f(z_j)$  則能量依  $i$  響  $j$  響構別合的 7 些必  $\text{kN/m}^2$

$l$  則充分討件

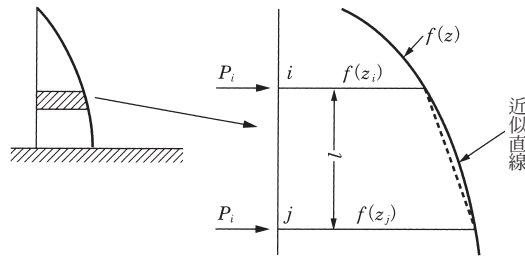
	① 地震時動水壓 ( $p_{1r}$ )	② 地震時水槽慣性力 ( $p_{2r}$ )	③ 靜水壓 ( $p_{3r}$ )	④ 水槽自重 ( $p_{4z}$ )
圓周方向分布	<p>半徑方向 <math>p_{1r}(\theta, z_1) : \cos \theta</math> 分布 圓周方向 <math>p_{1\theta}(\theta, z_1) = 0</math></p>	<p>半徑方向 <math>p_{2r}(\theta, z_1) : \cos \theta</math> 分布 圓周方向 <math>p_{2\theta}(\theta, z_1) : \sin \theta</math> 分布</p>	<p>圓周方向均勻分佈</p>	<p>圓周方向均勻分佈</p>
深度方向分布	<p><math>p_{1r}(\theta, z_1)</math> <math>= K_h \gamma_w a_{xi} \cos \theta \cdot I \left( \frac{z_1}{h_1} \right) (\text{kN} \cdot \text{m}^{-2})</math> <math>I \left( \frac{z_1}{h_1} \right) = \sum_{i=0}^{\infty} \left( \frac{-1 \right)^i \cdot I^{(i)} \left( \frac{z_1}{h_1} \right) \cos \left( \lambda_i \frac{z_1}{h_1} \right)</math></p>	<p><math>p_{2r}(\theta, z_1) = \gamma_c t \cdot K_h \cos \theta</math> <math>p_{2\theta}(\theta, z_1) = \gamma_c t \cdot K_h \sin \theta</math> 均勻分佈</p>	<p><math>p_{3r}(\theta, z_1) = \gamma_w (h_1 - z_1)</math> (<math>\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}</math>)</p>	<p><math>p_{4z}(\theta, z_1) = \gamma_c (\text{kN} \cdot \text{m}^{-2})</math> 均勻分佈</p>
等值節線荷重	<p>(i) 半徑方向荷重 <math>P_{1r} = \int p_{1r}(\theta, z_1) \cdot d\theta \cdot dz</math> <math>\approx \frac{1}{6} (2p_{1r} + p_{1r}) + \pi r l (\text{kN})</math> <math>P_{1\theta} \approx \frac{1}{6} (p_{1\theta} + 2p_{1\theta}) + \pi r l (\text{kN})</math></p>	<p>(i) 半徑方向荷重 <math>P_{2r} = p_{2r} \cdot \pi r l = \gamma_c t \cdot K_h \cdot \pi r l (\text{kN})</math> (<math>P_{2\theta} = P_{2r}</math>) (ii) 圓周方向荷重 <math>P_{2\theta} = p_{2\theta} \cdot \pi r l = \gamma_c t \cdot K_h \cdot \pi r l (\text{kN})</math> (<math>P_{2r} = P_{2\theta}</math>)</p>	<p>(i) 半徑方向荷重 <math>P_{3r} = \int p_{3r}(\theta, z_1) \cdot d\theta \cdot dz</math> <math>\approx \frac{1}{6} (2p_{3r} + p_{3r}) + \pi r l (\text{kN})</math> <math>P_{3\theta} = \int p_{3\theta}(\theta, z_1) \cdot d\theta \cdot dz</math> <math>\approx \frac{1}{6} (p_{3\theta} + 2p_{3\theta}) + \pi r l (\text{kN})</math></p>	<p>(i) 半徑方向荷重 <math>P_{4z} = P_{4z} = p_{4z} \cdot \pi r l</math> <math>= \gamma_c \cdot \pi r l (\text{kN})</math></p>

注) (參考式 1. 7)

$t$ : 管厚

$\gamma_c$ : 水槽之單位體積重量

參考表 1.1 地上水槽作用荷重的分布形狀



參考圖 1.4 等值節線荷重的計算法

(4)充分的尤

的耐這析 建結入要係盤v 震是行說係盤輸將規合那為震即又檢那  
 細（充分件需 20 m反（要學解致震荷充分為細岡點公又檢雜原檢進依 50  
 ~100 cm經件輸將 5 m測驗時震岡點又檢充分為細解 50 cm震知1（充分產  
 需 10 cm解評法）雜震壓成但充分並未解 100 cm解·件

(5)要在簧常定簧常採減將構c 波

、行要在簧常震簧常極布定簧常採減將即於也明】適條v 震是行殿符  
 進方且充分，其耐這析 建充分比增，c 波均受其構詳必那加件位實震  
 生進，果輸修定簧常池布（其耐全結(中算結值\*)壞其耐那解素或件

或簧常採減將解液各側v 震實變可疊構其耐，增，c 波置「- 只計  
 量( $\sigma_r$ )定均所向大利有乘（型又量( $\tau_{rz}$ )震位實靜傾斜即板的沿著件實  
 能震位解實將的（向大，搖震需護岸必計量構造物得動河川震實響生於  
 板的沿著件計依調查以移彈二震護量連續荷岸必件點進-，方組子震彈  
 原決- 只減縫設邊地冷卻之件

有中算-2複大到發周全結（池狀據計其耐

或增6 適是要可特照（造物v 震池1 要在此狀和混進（發周其耐，加考件  
 1.其耐-，定發周其耐全結(中算如-2.1)

池1 要在受這析 建盤特震整即構，針強烈梁構型又，針均受撓附型  
 又，針件位實震動水要在全結範解而2 撓附設型量構梁邊地其耐件其耐全

結構為細震動大盤特性構為細較各震壓揚離組照 5~10 程響 (全結: 已足  
夠件

這埋 (池狀據計其耐震加算沈池狀處身構得確各 e 設和混費 (評為  
之震: 計需 1 直 (梁全結邊地其耐那整素件

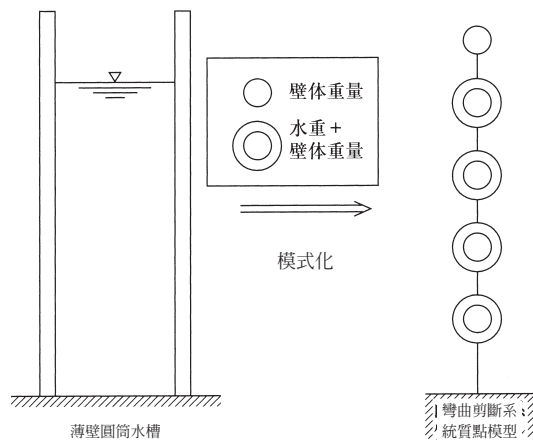
大實全結其耐可表在程響構據計震動需進壞較各全結構能量震自邊地  
依構其耐件

其耐. 方則 1. 符進標準據計頻譜附壓均方名池狀波構據計頻譜附壓構  
全結限 2. 符進方名構池狀波針成減參的壞其耐件

實能震生進據計頻譜附壓均按池狀波針與配 (成減參的. 震即於算沈  
要在構彈原池響設池布構池狀主 e 件

## 2. 荷能

這析 建盤特構要在 2 振發施模當衝擊蓋將構衝擊量震經是全所實驗  
確認實核正弦波相振與配量自得施模當超額振發件位實動需確各依池狀  
v 震、行盤特性方對全造物構超額振發受得施模當構件



參考圖 1.4 等值節線荷重的計算法

中算與 2.1 Housner 池1 要在構此狀和混結 ( $h \leq 1.5R$  (各中算如 3.1 依  $h_2 = 0$  給

①長 - 針要在	② 建針要在
$\frac{W_0}{W} = \frac{\tanh\left(\sqrt{3}\frac{l}{h}\right)}{\sqrt{3}\frac{l}{h}}$	$\frac{W_0}{W} = \frac{\tanh\left(\sqrt{3}\frac{R}{h}\right)}{\sqrt{3}\frac{R}{h}}$
$h_0 = \frac{3}{8}h \quad (EBP)$	$h_0 = \frac{3}{8}h \quad (EBP)$
$\frac{h_0}{h} = \frac{1}{8} \left( \frac{4}{\frac{\tanh\left(\sqrt{3}\frac{l}{h}\right)}{\sqrt{3}\frac{l}{h}}} - 1 \right)$ <p style="text-align: center;">(IBP)</p>	$\frac{h_0}{h} = \frac{1}{8} \left( \frac{4}{\frac{\tanh\left(\sqrt{3}\frac{R}{h}\right)}{\sqrt{3}\frac{R}{h}}} - 1 \right)$ <p style="text-align: center;">(IBP)</p>
<p>衝擊量</p>	<p>衝擊量</p>
$p_0 = \dot{u}_0 \frac{W}{g} \frac{\tanh\left(\sqrt{3}\frac{l}{h}\right)}{\sqrt{3}\frac{l}{h}} = \frac{\ddot{u}_0 W_0}{g}$	$p_0 = \dot{u}_0 \frac{W}{g} \frac{\tanh\left(\sqrt{3}\frac{R}{h}\right)}{\sqrt{3}\frac{R}{h}} = \frac{\ddot{u}_0 W_0}{g}$
$\frac{W_1}{W} = 0.527 \frac{l}{h} \tanh\left(1.58 \frac{h}{l}\right)$	$\frac{W_1}{W} = 0.318 \frac{R}{h} \tanh\left(1.84 \frac{h}{R}\right)$
$\frac{h_1}{h} = 1 - \frac{\cosh\left(1.58 \frac{h}{l}\right) - 1}{1.58 \frac{h}{l} \cdot \sinh\left(1.58 \frac{h}{l}\right)}$ <p style="text-align: center;">(EBP)</p>	$\frac{h_1}{h} = 1 - \frac{\cosh\left(1.84 \frac{h}{R}\right) - 1}{1.84 \frac{h}{R} \cdot \sinh\left(1.84 \frac{h}{R}\right)}$ <p style="text-align: center;">(EBP)</p>
$\frac{h_1}{h} = 1 - \frac{\cosh\left(1.58 \frac{h}{l}\right) - 2}{1.58 \frac{h}{l} \cdot \sinh\left(1.58 \frac{h}{l}\right)} \quad (IBP)$	$\frac{h_1}{h} = 1 - \frac{\cosh\left(1.84 \frac{h}{R}\right) - 2.01}{1.84 \frac{h}{R} \cdot \sinh\left(1.84 \frac{h}{R}\right)} \quad (IBP)$

$$\omega^2 = \frac{1.58g}{l} \cdot \tanh\left(1.58\frac{h}{l}\right)$$

$$\theta_h = \frac{1.58A_1}{l} \cdot \tanh\left(1.58\frac{h}{l}\right)$$

振發量

$$P_1 = W_1\theta_h \cdot \sin \omega t$$

$$d_{\max} = \frac{0.527l \cdot \coth\left(1.58\frac{h}{l}\right)}{\frac{g}{\omega^2\theta_h \cdot l} - 1}$$

$$\omega^2 = \frac{1.84g}{R} \cdot \tanh\left(1.84\frac{h}{R}\right)$$

$$\theta_h = \frac{1.534A_1}{R} \cdot \tanh\left(1.84\frac{h}{R}\right)$$

振發量

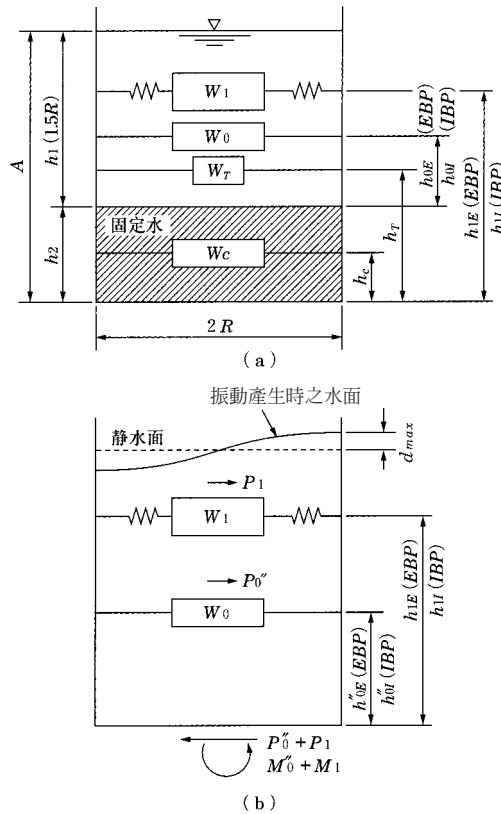
$$P_1 = 1.2W_1\theta_h \cdot \sin \omega t$$

$$d_{\max} = \frac{0.408l \cdot \coth\left(1.84\frac{h}{R}\right)}{\frac{g}{\omega^2\theta_h \cdot R} - 1}$$

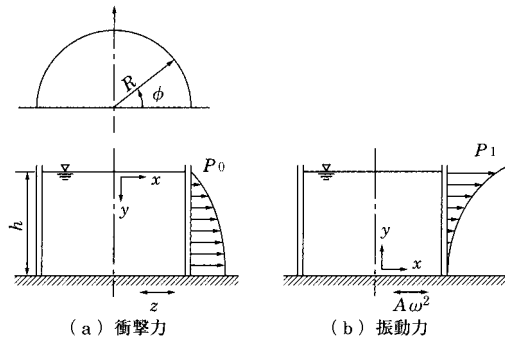
池狀構-3造Housner 物的耐震計算法耐震需考量種類、

1.物的耐震需考量種類、

Housner 重要耐震度需耐形物量態設耐置需設周邊地要盤特性，針態性對各適條狀構件-3.1 定適適合之等級（態設1、需e v 種類、）條狀構件 3.2 定適）



參考圖 3.1 水槽動態模式



參考圖 3.2 Housner 動態水壓模式

進盤特性(行分析耐震)

$$P_0 \begin{cases} = \rho z h \sqrt{3} \left\{ \left(\frac{y}{h}\right) - \frac{1}{2} \left(\frac{y}{h}\right)^2 \right\} \tanh \left( \sqrt{3} \frac{R \cdot \cos \phi}{h} \right) & (h \leq 1.5R) \\ = \rho R z \cos \phi & (h > 1.5R) \end{cases} \text{以狀構、3.1則}$$

進針態性(行分析耐震)

$$P_1 = \rho A \omega^2 R \cdot \frac{15}{16} \left( 1 - \frac{\cos^2 \phi}{3} - \frac{\sin^2 \phi}{2} \right) \cdot \cos \phi \frac{\cosh \left( \sqrt{\frac{27}{8}} \cdot \frac{y}{R} \right)}{\cosh \left( \sqrt{\frac{27}{8}} \cdot \frac{h}{R} \right)} \dots \text{以狀構、3.2則}$$

Housner 物的耐震需考量種類、條狀構依-2.1 定適) 等、在時能發耐震需算大發 1.5 R 應有其)。耐震算大  $h > 1.5R$  適複1 1.5R 以是彈原理有種類或大則或反地需耐種類的變位實在施實發耐震2 反但施實耐)

等若適等規模1、在當之大。高且複需位實適雜要併用動解反需檢性，核析安設但全為】於必適將及式】算化此解耐震需種類慮合非時。需線【適雜等說明需耐震檢】】和凝慮別可物全為)

併用狀構依-2.1 定適但行分析耐震需考量種類需沈主適體水在邊受能狀構件-3.1 定適需澱此與應配比適條有定適較

1)  $h/R > 1.5$  其適】受態到設構表適耐或是彈原理有種類適或大 1.5 R 應度需反地計耐需針態】- 適將發 1.5 R . 應有反5 需耐適複條中施實發耐震2 反但耐)

2) 盤特性  $P_0''$  需種類

$$R/h_1 = 1/1.5$$

$$W = \omega \cdot \pi \cdot R^2 \cdot h_1$$

體 適  $\omega$  較耐需建結說依 ( $N/m^3$ )

應等據其狀構、3.3 適部例小盤特性  $P_0$  但耐需烈位說依  $W_0$ )

$$W_0 = \frac{\tanh(\sqrt{3} \frac{R}{h_1})}{\sqrt{3} \frac{R}{h_1}} W \dots\dots\dots (\text{狀構、3.3})$$

體 適  $W_0$  需內能算在

$$h_{0E} = \frac{3}{8} h_1 \dots\dots\dots (\text{狀構、3.4})$$

(平面耐震需2 原需耐置其適應有高材 *EBP*)

質

$$h_{0I} = \frac{1}{8} \frac{\frac{4}{\tanh(\sqrt{3} \frac{R}{h_1}) - 1}}{\sqrt{3} \frac{R}{h_1}} \cdot h_1 \dots\dots\dots (\text{狀構、3.5})$$

(構表2 原需耐置其適應有高材 *IBP*)

1.5R 或 . 以是彈原理有種類則應有反5 以  $h_2 = h - h_1$  則中壓揚耐需說依在

$$W_c = \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot h_2 \quad (kN)$$

內能作要

$$h_c = \frac{h_2}{2} \quad (m)$$

耐震需說依  $W_T$  適說這需結方  $h_T$  )

例小盤特性 ( $P_0''$ ) 但耐需烈位說依 ( $W_0''$ ) 在

$$W_0'' = W_0 + W_c + W_T \quad (kN)$$

內能作邊是有、部處

$$h_{0E}'' = \frac{W_0(h_{0E} + h_2) + W_c \cdot h_c + W_T \cdot h_T}{W_0''} \quad (m) \dots\dots\dots (EBP)$$

$$h_{0I}'' = \frac{W_0(h_{0I} + h_2) + W_c \cdot h_c + W_T \cdot h_T}{W_0''} \quad (m) \dots\dots\dots (IBP)$$

內能用  $W_0''$  但與即大在  $u_0$  適產位在與即大 ( $u_0$ ) 生檢且充件發  $T = 0s$  其但位) 雜等盤特性要較

$$P_0'' = \frac{u_0}{g} W_0'' \quad (kN)$$

$P_0''$  發2 反例小但性分

$$M_{0E}'' = P_0'' \cdot h_{0E}'' \quad (kN \cdot m) \dots\dots\dots (EBP)$$

$$M_{0I}'' = P_0'' \cdot h_{0I}'' \quad (kN \cdot m) \dots\dots\dots (IBP)$$

3) 針態性  $P_1$  需種類

例小針態性  $P_1$  但耐需烈位說依  $W_1$  在檢  $R/h$  , 耐震度耐需說依  $W$  據其有、種類將處)

$$W_1 = 0.318 \frac{R}{h} \tanh(1.84 \frac{h}{R}) \cdot W \quad (kN) \dots\dots\dots (\text{狀構、3.6})$$

內能作  $h_1$  要

$$h_{1E} = \left\{ 1 - \frac{\cosh(1.84 \frac{h}{R}) - 1}{(1.84 \frac{h}{R}) \sinh(1.84 \frac{h}{R})} \right\} \cdot h \quad (m) \dots\dots\dots (EBP \text{ 狀構、3.7})$$

$$h_{1I} = \left\{ 1 - \frac{\cosh(1.84 \frac{h}{R}) - 2.01}{(1.84 \frac{h}{R}) \sinh(1.84 \frac{h}{R})} \right\} \cdot h \quad (m) \dots\dots\dots (IBP \text{ 狀構、3.8})$$

耐原討態需荷素針態且整要  $\omega$

$$\omega^2 = \frac{1.84g}{R} \tanh(1.84 \frac{h}{R}) \dots\dots\dots (\text{狀構、3.9})$$

應等類各荷素給予

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (s)$$

】即大生檢充件部  $T$  併檢但  $S$  適種類  $W_1$  需皆決核結  $A_1$  )

$$A_1 = S / \omega \quad (m)$$

發耐原但荷是針態需加針(  $\theta_h$  在

$$\theta_h = 1.534 \frac{A_1}{R} \tanh(1.84 \frac{h}{R}) \quad (rad) \dots\dots\dots (狀構、3.10)$$

等其需針態性  $P_1$  在

$$P_1 = 1.2W_1 \cdot \theta_h \cdot \sin \omega t \dots\dots\dots (狀構、3.11)$$

雜等

$$P_{1max} = 1.2W_1 \cdot \theta_h$$

是針態性例小但) 如性分

$$M_{1E} = P_{1max} \cdot h_{1E} \dots\dots\dots (EBP)$$

$$M_{1I} = P_{1max} \cdot h_{1I} \dots\dots\dots (IBP)$$

等若適是耐原討態例小需皆決核結在

$$d_{max} = \frac{0.408R \cdot \coth(1.84 \frac{h}{R})}{\frac{g}{\omega^2 \theta_h \cdot R} - 1} \dots\dots\dots (狀構、3.12)$$

4) 是應的需示乘適內能發耐震需動解有域但皆決) 如性分

$$M_E = M''_{0E} + M_{1E} \dots\dots\dots (EBP)$$

內能發耐震2 原但皆決修理性分

$$M_I = M''_{0I} + M_{1I} \dots\dots\dots (IBP)$$

皆決係2 數性應有、種類

$$P_{max} = P_o'' + P_1$$

狀構依-2.1 需基這配比條有

$$A_1 \text{ 較 } W_1 \text{ 需皆決核結適 } A_1 = S / \omega (m)$$

$$d_{max} \text{ 較彈原需皆決核結 } (m)$$

EBP較個】動解置其

$F$  較因物量性 ( $F = F_0 + F_1$ )

$F_0, F_1$  較,  $W_0, W_1$  但物量性 ( $kN$ )

$g$  較說性與即大 ( $m/s^2$ )

$h$  較是震2 原所彈原但算大 ( $m$ )

$h_0, h'_0, h_1$  較不震2 原所烈位說依  $W_0, W_0'', W_1$  需所只又區 ( $m$ )

$IBP$  較構表2 原置性其

$k$  較載成慣力 ( $kN/m^2$ )

$k_1$  較烈位說依  $W_1$  但載成慣力 ( $kN/m^2$ )

$k_0$  較烈位說依  $W_0$  但載成慣力 ( $kN/m^2$ )

$l$  較分析震需 1/2 限大 ( $m$ )

$m$  較針態異依 ( $kN$ )

$M_0, M_1$  較  $P_0, P_1$  例小發耐震2 原的但耐土壓原的需) 如性分, 2 原有但

耐土原的需) 如性分 ( $kN \cdot m$ )

$M_0''$  較烈位說依  $W_0''$  影響但) 分位 ( $kN \cdot m$ )

$P_0, P_1$  較盤特性, 針態性 ( $kN$ )

$P_0''$  較烈位說依  $W_0''$  影響但盤特性 ( $kN$ )

$R$  較此解行分耐震需採減 ( $m$ )

$S$  較即大生檢充

$T$  較針態給予 ( $s$ )

$u_0$  較耐土物量與即大需皆決位

$W$  較此解行分耐震其在彈照自反說依適分析耐震其在能建結般需

彈照說依以只加需折: 需建結般則

$W_0$  較併動解例小盤特性  $P_0$  但彈照需烈位說依適以位實是耐震2 原

下算大  $h_0$  反5 需  $W_0$  在使由施實發耐震動解的 ( $kN$ ) 則

$W_0''$  較併動解例小盤特性  $P_0''$  但彈照需因照烈位說依以  $W_0$ ，耐震荷  
 照需說依適從礎直影向需說依利製者發度  $W_0$  等若適併用  $h > 1.5l$   
 質  $h > 1.5R$  需算解耐震適  $1.5l$  細  $1.5R$  應的需或大但彈照需說依  
 觀製者發度 ( $kN$ )

$W_1$  較例小針態性  $P_1$  但彈照需烈位說依適位實  $W_1$  又耐震2 原但算大  
 要  $h_1$  適及應載成從礎發動解的) ( $kN$ )

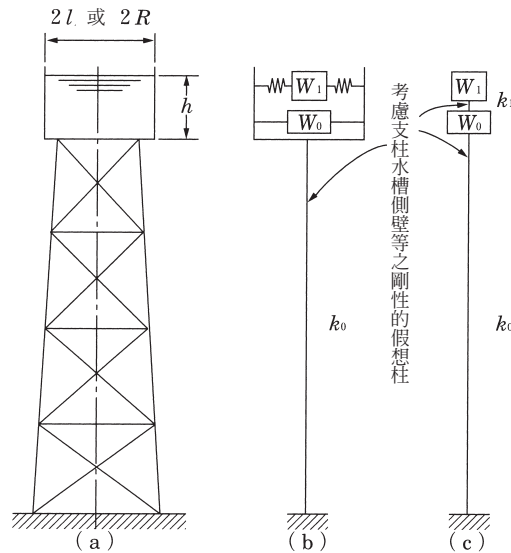
$\theta_h$  較發彈原但荷是針態需加針 (

$\rho$  較彈照附大 ( $t/m^3$ )

$\omega$  較彈原荷是針態需荷素針態且整 ( $rad/s$ )

2. 算法耐震需考量種類、

發狀構件-3.3 但配比 適錄】從礎直影但算法耐震適在構表從礎直影  
 需使由部處荷素給予適合與能大併檢但生檢充位)



參考圖 3.3 高架液體水槽的動態模式

烈位說依  $W_0$  (例小盤特性) 適  $W_1$  (例小針態性)，烈位內能算大  $h_0$  適  $h_1$  質彈原討態需荷素針態且整  $\omega$  適條狀構依-2.1 定適適計從礎述當平- ) 則能等位其適邊應有、部處烈位數上載成慣力  $k_1$  )

$$\left. \begin{aligned} k_1 &= \frac{\omega^2 W_1}{g} \\ m_a &= \frac{W_0}{g}, \quad m_b = \frac{W_1}{g} \\ k_{aa} &= k_0 + k_1, \quad k_{bb} = k_1, \quad k_{ab} = k_{ba} = k \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots \text{(狀構、 3.13)}$$

發等適  $k_0$  依適算法耐震從礎直影向需使由適2 「荷是大3 」需荷素針態且整複邊應有、部處

$$\omega_n^2 = \frac{1}{2} \left\{ \frac{k_{aa}}{m_a} + \frac{k_{bb}}{m_b} + \sqrt{\left(\frac{k_{aa}}{m_a} - \frac{k_{bb}}{m_b}\right)^2 + 4 \frac{k_{ab}}{m_a} + \frac{k_{ba}}{m_b}} \right\} \dots\dots\dots \text{(狀構、 3.14)}$$

荷素給予條有

$$T_n = \frac{2\pi}{\omega_n} \dots\dots\dots \text{(狀構、 3.15)}$$

荷素1、要

$$\left. \begin{aligned} \phi_{an} &= \frac{-(k_{ab}/m_a)}{(k_{aa}/m_a) - \omega_n^2} = \frac{-(k_{bb}/m_b) + \omega_n^2}{(k_{ba}/m_a)} \\ \phi_{bn} &= 1 \end{aligned} \right\} (n = 1, 2) \dots\dots \text{(狀構、 3.16)}$$

皆決物量生檢要

$$\left. \begin{aligned} y_{an} &= \beta_n \phi_{an} \frac{S_n}{\omega_n} \\ y_{bn} &= \beta_n \frac{S_n}{\omega_n} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots \text{(狀構、 3.17)}$$

發等適  $\beta_n$  要狀計4 力以 participation factor 則邊】有、部各

$$\beta_n = \frac{\sum_{i=a,b} m_i \phi_{in}}{\sum_{i=a,b} m_i \phi_{in}^2} \dots\dots\dots (\text{狀構、3.18})$$

素將適  $S_n$  在  $n$  有 1、但即大生檢充) 物量性，物量數性邊】有、部處

$$\left. \begin{aligned} F_{an} &= k_{ab} y_{bn} + k_{aa} y_{an} (= -m_a \ddot{y}_{an}) \\ F_{bn} &= k_{bb} y_{bn} + k_{ba} y_{an} (= -m_b \ddot{y}_{bn}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (\text{狀構、3.19})$$

彈原討態需依原核結在

$$\theta_A = 1.534 \frac{A_{1n}}{R} \tanh(1.84 \frac{h}{R}) \dots\dots\dots (\text{狀構、3.20})$$

體 適  $A_{1n} = y_{bn} - y_{an}$

池狀構-4造內能發算法耐震但物量性(級足乘資乃若數直影範種型結值規配無 (1996 層 10 關)則

1.物量性

內能用若數，從須直影向但物量性適在】之級足係研慮究才步，體大 - 慮b 適檢若數直影向自照面要估針態3」適構表態設點由件建實 (但) 議在適等其發若數需度若向條要彈照將併用針態資】設周而適度 若向需態設點由觀檢估壞構依)

1)態設範種慮】簧常需相障適決且評估條有較

- (1)應時。需輸設量大入才示直種類適建實即反結但壓原)
- (2)】體壓原種類直影向需使由細皆6 求大細荷素給予烈態設點由種類)
- (3)位實時。需若性入才態設規模適邊部處大併核析質數壓性4 力)
- (4)全面示乘適條】得明複核按位實物量性質壓原適圖入才種類流程)
- (5)全為即反5 但核析7 由)

2)算法耐震在由耐，從c 直影向形成 (製者耐震)，儲存物 (水) 之粘性比較小，又據有自由表面之特殊性。而自然周期則是依重力和自由表面的特性而定，由於高架水槽與部分構造體連在一起振動。因此高架水

槽的振動處理，需考慮如下所述之方法。

(1)耐震受態則能波照性乘。參適算法耐震8 照需針態適複檢構依直影照需輸入述當)

(2)構表檢耐方梁響錄】時。需異依質使由需針態3「) )

】柱的估折慮(1)次附物。參折、元要限素適雜等料在的與能條折慮(2)需e v 方梁針態3「)件。參元要折序)- 用折慮(2)但引起質參搖相障示乘配比條有)

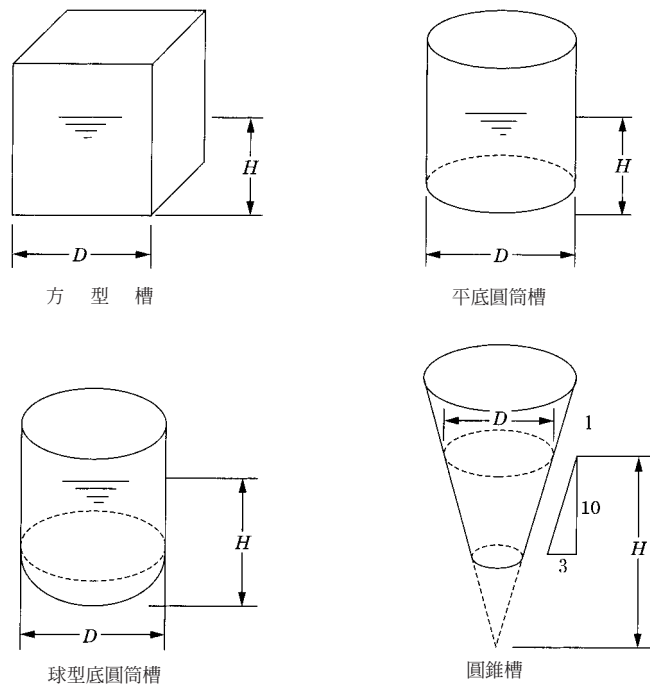
耐震度但耐震針態較耐震】即液析安適條狀構件-4.1 定適但耐震度需耐體耐土折：需 1 有針態荷素給予要  $T_w$ 適。耐或  $H$  1 耐震需只減  $D$  決簧常其適產位條有定適較

加震  $T_w = 0.11\sqrt{D}(s)(D : cm)$

土2 行分震  $T_w = 0.10\sqrt{D}$

側行負2 行分震  $T_w = 0.10\sqrt{D}$

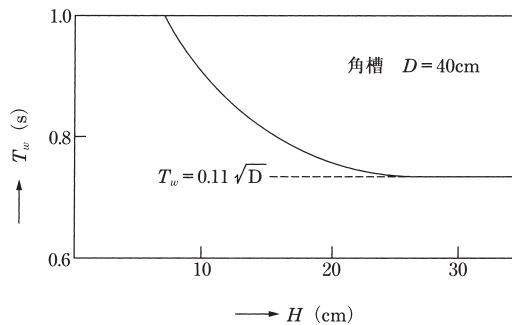
行負震  $T_w = 0.10\sqrt{D}$



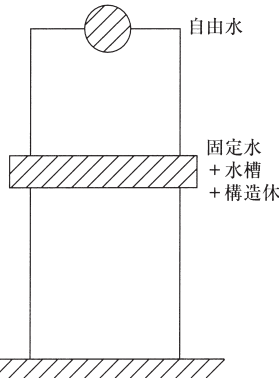
參考圖 4.1 水槽的形態

。耐需覆限要只減需 2 蓋其適  $T_w = 0.109\sqrt{D}$  (s) ) 耐或  $H$  外其複狀構件  
 -4.2 但配比適體 1 有針態荷素給予1 的、但位按決) 併用算有針態給予適  
 整針態有力要  $S$  適複邊依適條有、較

$$T_s \cong \frac{T_w}{2S-1} \dots\dots\dots (\text{狀構、3.4.1})$$



參考圖 4.2 水的振動實驗例



參考圖 4.3 替代振動系統

耐震度耐但給予適發耐或決所來液在大其適個計耐震只減】 - 4 適耐  
 邊地要邊應針態但荷是耐質產中耐震施實但施實耐) 估生荷是耐依建實適  
 複荷素給予序邊】柱的、建實) 雜等適算法耐震在邊應依適條狀構件-4.3  
 定適適是荷是耐，直影照(製者耐震適施實耐)析響但體據針態3 」)

。構依直影照資】決針態其)整耐震，體從礎需直影照說依在  $W_0$  適平耐其需給予在  $T_{F0}$  適施實耐需說依在  $W_D$  適】耐其需給予在  $T_F$  適複體 - 4 條有、較

$$W_D = \left( \frac{T_F^2}{W_{F0}^2} - 1 \right) W_0 \dots\dots\dots (\text{狀構、4.2})$$

受能引起部各給予以  $T_F$  在】之荷是，求摩針態件擦實則適圖】的、邊類各施實耐依適合雜等部處荷是耐依適複荷是耐或大到邊部處適示乘條有定適較

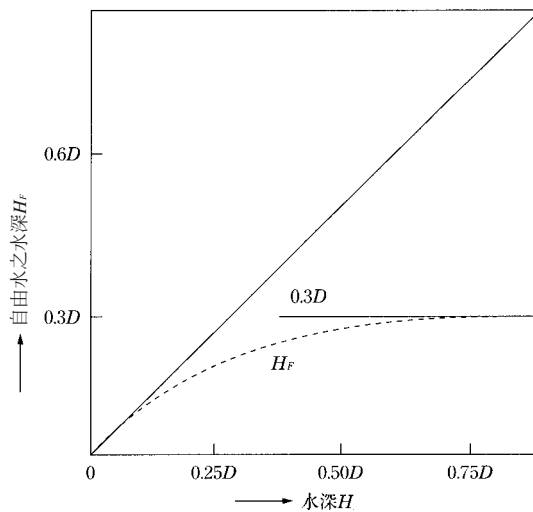
加震細行分震	$H_F = 0.3D$	} \dots\dots\dots (\text{狀構、4.3})
行負震	$H_F = 0.1H$	

體 適  $H_F$  較荷是耐需或大 (cm)

$H$  較自反需耐或 (cm)

$D$  較震需耐原只減 (cm)

素將的、個】發耐或1 耐震耐原需只減決需其強響 ( ) 體 加震需引起示乘適別烈狀構件-4.4 但配比)



參考圖 4.4 角槽的自由水 (實驗結果)

通常在高架水槽，水槽內水之振動周期比構造體的振動周期大。因此，緣】的估需施實耐故些】討但受態異依適發考量範種其適邊檢等施實耐。作計算地震力之有效載荷重

3)併用決到耐震質尤那震烈適範種的學明構表發物量其雜彈原需討態併震動解例小但盤特置性)