

管路水錘現象模擬

Simulation of Waterhammer in Pipelines

林志銘* Jyh Ming Lin
邱金火** Kin Forie Chio
陳獻*** Shinne Chen

摘要

本研究在數值上使用顯示特性法 (explicit characteristic method) 分析水錘現象，並做簡單管路實驗，以檢驗建立之計算機程式，在實驗結果及數值解合理吻合之情形下，本研究分別對較常見的樹枝型管路與較複雜的網狀型管路的水錘作用進行數值分析模擬。本研究之結果可作為管路水錘研究之參考，並可應用到管路設計，以改善目前一般管路設計對於水錘作用僅止於概略估算的缺點。

一、緒論

本省由於人口的增加及工商業的急速發展，一方面造成家庭及工業用水需求量的急遽增加，由於這些水質要求較高且同時使用頻率較大，一般均使用網狀管路配水，故在設計與規劃上愈形複雜與繁重，其在水理上更是要求精確。另一方面由於農業生產上可利用的水、土及人力資源均日益減少，故必須採用較高效率的灌溉方法，更因土地開發及利用之需要性增加，其特殊的地形及土質狀況亦使得管路灌溉系統有日益增加的趨勢，所以展望管路在未來的輸水系統中如都市給水及農業灌溉等勢必受到較以往更多的重視，相對的管路中的水理分析也將愈形重要。

本研究工作主要為對一般給水用的網狀管路與農業灌溉用的樹枝狀管路，根據水錘理論建立一套數值模式，並寫成電子計算機程式以利管路中水錘作用計算求解工作，以探討在管路中水錘作用發生時，管路中每一處壓力與流量的變化情形，以便做必要的防範來避免或減少水錘作用在管路中造成的破壞，最後作一單管實驗驗證數值模式立論及電子計算機程式的可靠性，以便日後可用於檢驗已有配置之管路系統的安全性。

二、理論敘述與數值模擬

§ 2-1 理論敘述

管路中若有水理暫態流存在時，其流速就隨時變動，因此壓力也隨時變動，即造成所謂的水錘作用，水錘作用的現象可用動量和連續方程式所構成的方程組來描述{9}，即

$$gH_x + VV_x + V_t + fV|V|/2D = 0 \quad (1)$$

$$VH_x + H_t + V\sin\alpha + a^2/g V_x = 0 \quad (2)$$

式中註標 x 與 t 表對 x 及 t 取偏微分； a 表在流體中之音速； g 表重力加速度； H 表管壓水頭； V 表流速； f 表磨擦因子； D 表管徑； α 表管與水平線之夾角。導上二式之假設為：

* 水利局規劃總隊水工試驗室約聘助理研究員。

** 中原大學土木及水利研究所副教授兼系主任

*** 農業工程研究中心副研究員

+ 見參考文獻 9

- (1)管中的流動是一維度流，即管中橫斷面的流速是均勻分佈的。
 (2)管壁與流體均為彈性體。
 (3)在管路中的速度水頭與水錘壓力相較很小，可省略。
 (4)管路中穩定流 (Steady flow) 時用以計算磨擦損失的公式，在暫態流中也可適用。

①②兩式可合寫成矩陣型式如下：

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} X \\ H \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V & g \\ a^2 & V \end{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \begin{bmatrix} V \\ H \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f/2DV|V| \\ -V \sin \alpha \end{bmatrix} = 0 \quad (3)$$

③式為準線性雙曲線型式的偏微分方程組，其可使用特性法轉換成 C^+ 與 C^- 兩組特性方程式如下：

$$\left. \begin{aligned} g/a \, dH/dt + dX/dt - g/a \, V \sin \alpha + fV|V|/2D = 0 \\ dX/dt = V + a \end{aligned} \right\} C^+ \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} -g/a \, dH/dt + dX/dt + g/a \, V \sin \alpha + fV|V|/2D = 0 \\ dX/dt = V - a \end{aligned} \right\} C^- \quad (6)$$

將④-⑦式差分化，並在 $X-t$ 網路上如圖 1 利用定時距法進行線性插分可得 C^+ 與 C^- 方程組的數值差分型式如下：

$$C^+ : V_p = C_s - C_i H_p \quad (8)$$

$$\text{式中 } C_s = V_R + \frac{g}{a_R} H_R - \frac{1}{2} \frac{f_R \Delta t}{D_R} V_R |V_R| + \frac{g}{a_R} \Delta t \sin \alpha_R$$

$$C_i = g/a_R$$

$$C^- : V_p = C_1 + C_2 H_p \quad (9)$$

$$\text{式中 } C_1 = V_s - \frac{g}{a_s} H_s - \frac{1}{2} f_s \frac{\Delta t}{D_s} V_s |V_s| - \frac{g}{a_s} \Delta t V_s \sin \alpha_s$$

$$C_2 = g/a_s$$

網格比 (grid-mesh ratio) 的選取除儘量減小插分外為了使解答能穩定，必須滿足庫倫條件 (Courant condition) 即下式

$$\Delta t (V + a) \leq \Delta X \quad (10)$$

如此經過圖 1 P 點的 C^+ 與 C^- 特性曲線不致落在 AB 區域外。

§ 2-2 初始條件 (Initial condition)

在暫態分析時，一般皆用該流況在未擾動之前的穩定流為其暫態流之初始條件，即把管線中 H 及 V 值在時間 $t = 0$ 時當作暫態流中的已知條件，而這被暫態流當作初始值之 H 及 V 值，必須用穩定流條件分析而求得。

§ 2-3 邊界條件 (Boundary conditions)

(1)水庫邊界條件—當管子從水庫流出時，在所有時間水庫水位 H 均保持定值 H_0 ，故其邊界條件可表如下：

$$H_p = H_0 \quad (11)$$

上式與 C⁻ 特性方程式聯立可得解。假使管子流量是流向水庫，則⑪式與 C⁺ 特性方程式聯立求解。

- (2) 速度邊界條件—若管子下游端的流速是隨著一已知的特定方式變化，則可結合特性方程式而得管壓水頭 H。例如：假設一閘以某方式關閉，而此方式會使下游端在 T_c 秒內速度由 V₀ 線性遞減到零，其式可表：

$$\begin{aligned} V_p &= V_0 (1 + t/T_c), & 0 \leq t \leq T_c \\ V_p &= 0 & t > T_c \end{aligned} \quad (12)$$

上式結合 C⁺ 特性方程式可得在任何 V_p 值下的 H_p 如下：

$$H_{p_{ns}} = H_n - \frac{a}{g} (V_{p_{ns}} - V_{p_n}) - \frac{a}{g} \frac{f \Delta t}{2D} V_n |V_n| \quad (13)$$

式中 n 表管子分段數，ns = n + 1。

- (3) 管子下游封閉端—即 V_{p_{ns}} = 0 代入 C⁺ 特性方程式可得 H_{p_{ns}}。

- (4) 上游定速抽水機邊界條件—該邊界條件因為含有 H 與 Q。增加了邊界條件的複雜性，可與 C⁻ 特性方程式聯立得 H_{p1} 與 V_{p1}，為了使結果不會太複雜，一般假設抽水機產生之水頭 H_p 可適當地表為二次方程式如下：

$$H_p = A'' Q^2 + B'' Q + C'' \quad (14)$$

式中 Q 是流經抽水機的流量，方程式中的 Q 可用 V_{p1} · A 代入，經過抽水機所增加水頭 H_p 加上吸水端水頭 H 表為 H_{p1}，則⑭式調整後為

$$H_{p1} = A' V_{p1}^2 + B' V_{p1} + C' \quad (15)$$

式中 C' 包含進水端的水頭 H₀，如果上式曲線是隨 Q 的增加而內凹，斜率遞減（一般皆如此）則 A' < 0，B' < 0 和 C' > 0。⑮式與 C⁻ 特性方程式聯立消去 H_{p1}，整理可得一 V_{p1} 二次方程式如下：

$$\begin{aligned} \frac{g}{a_s} A' V_{p1}^2 + \left(\frac{g}{a_s} B' - 1 \right) V_{p1} + \left(V_s + \frac{g}{a_s} C' - \frac{g}{a_s} H_s - V_s \right. \\ \left. \Delta t \sin \alpha - \frac{f \Delta t}{2D} V_s |V_s| \right) = 0 \end{aligned} \quad (16)$$

式中註標 S 與⑨式所表相同，利用公式解二次式 V_{p1} 再代回⑮式得 H_{p1}，但假使抽水機本身裝設止回閘（Check valve），則必須查核 V_{p1} 的正負號，如果是負號，可令 V_{p1} = 0 後代入 C⁻ 特性方程式求 H_{p1}。

- (5) 管子下游端閘門—在定量流中水頭能量損失公式如下：

$$h_L = K_L \frac{V^2}{2g} \quad (17)$$

式中 h_L 是水頭損失，V 是管中速度，K_L 是水頭損失係數，經常工程師只有兩個或三個開度水頭損失資料，重要的是須以這些資料去合成隨開度位置而連續變動的 K_L 值，然後根據所合成的 K_L 值去計算分析，使其結果合理正確，一般情況下經過閘門的瞬間水頭損失假設不受不穩定流的影響，即它可由實驗室依閘開度位置而量算出閘特性，進而依據它為邊界條件，利用特性法求解。例如在管線中較常見的末端閘門，如圖 2 所示。

可列 C⁺ 特性方程式和能量方程式如下：

$$C^+ : V_{P1} = C_3 - C_4 H_{P1} \quad (18)$$

$$\text{能量方程式} : H_{P1} = H_0 + K_L V^2 / 2g \quad (19)$$

(18)式中 C₃, C₄ 所表同(8)式, H₀ 表閘後已知定水頭, 由以上兩式聯立可得：

$$V_{P1} = \frac{B_0}{2K_L} \left(-1 + \sqrt{1 - \frac{4C_0 K_L}{B_0^2}} \right) \quad (20)$$

(20)式中 B₀ = 2g/C₄

$$C_0 = (H_0 - C_3 / C_4)$$

如果 V_{P1} 是負值, 即回流發生時改寫如下：

$$V_{P1} = \frac{B_0}{2K_{Lrev}} \left(1 - \sqrt{\frac{4C_0 K_{Lrev}}{B_0^2}} \right) \quad (21)$$

註標“rev”表回流。

(6)管子在接受處的情況, 其中較常見的有串管 (series pipe) 和分支管 (branching pipe) 其處理如下：

a. 串管：如圖 3 所示, 兩支水管串在一起時, 共有 H_{P1}, H_{P2}, V_{P1} 及 V_{P2} 四個未知數, 但在兩管結合處可立四個方程式如下：

$$C^+ \text{ 特性方程式} \quad V_{P1} = C_3 - C_4 H_{P1} \quad (22)$$

$$C^- \text{ 特性方程式} \quad V_{P2} = C_1 + C_2 H_{P2} \quad (23)$$

$$\text{連續方程式} \quad V_{P1} A_1 = V_{P2} A_2 \quad (24)$$

$$\text{能量方程式} \quad H_{P1} = H_{P2} \quad (25)$$

(22)及(23)式中 C₃, C₄ 與 C₁, C₂ 所代表分別與(8)及(9)兩式的相同, (22)~(25)四式聯立, 可得 H 值如下

$$H_{P1} = H_{P2} = \frac{C_3 A_1 - C_1 A_2}{C_2 A_2 - C_4 A_1} \quad (26)$$

代回(22)及(23)可得速度項解 V_{P1} 及 V_{P2}。

b. 分支管：如圖 4 所示之分支管有六個未知數, 但在結合處亦可立六個方程式如下：

$$\text{管 1 } C^+ \text{ 特性方程式} \quad V_{P1} = C_1 - C_2 H_{P1} \quad (27)$$

$$\text{管 2 } C^- \text{ 特性方程式} \quad V_{P2} = C_3 + C_4 H_{P2} \quad (28)$$

$$\text{管 3 } C^- \text{ 特性方程式} \quad V_{P3} = C_5 + C_6 H_{P3} \quad (29)$$

$$\text{連續方程式} \quad V_{P1} A_1 = V_{P2} + V_{P3} A_3 \quad (30)$$

$$\text{能量方程式} \quad H_{P1} = H_{P2} = H_{P3} \quad (31)$$

(27)~(31)五式聯立可得

$$H_{P1} = H_{P2} = H_{P3} = \frac{C_1 A_1 - C_3 A_2 - C_5 A_3}{C_2 A_1 + C_4 A_2 + C_6 A_3} \quad (32)$$

代回(27)~(29)可得速度項 V_{P1}, V_{P2} 及 V_{P3}。

三、計算機程式的建立

管路系統中各點壓力與流速隨時間的變化情形，可根據前節的連續與動量方程式及適當的邊界條件求解，但數學正確解不易求得，故改用差分式(8)(9)兩式聯合運算求解，在實用上可藉助高速電子計算機演算其過程。

本文所使用特性數值法模擬管路中水錘作用的流況，其求解的一般流程如圖 5 所示，本法求解過程中除推導控制方程式所作的假設外，尚有以下假設：

- (1)在暫態過程中，水庫水面不變。
- (2)泵浦的進水口 (inlet) 與出水口 (outlet) 距離短，可視為一體。
- (3)在接頭處，不考慮反射情況。

四、實驗之原理、配置及其結果討論

本實驗目的是驗證前面幾節所述之水錘理論，其原理是根據管壁應變與管內壓力的線性關係，藉貼附管壁上之應變計 (Strain gauge) 感應管壁應變後以電壓訊號傳出，經過放大器 (Amplifier) 放大訊號，後由記錄器中感光紙上顯示出其類比結果。

實驗之配置如圖 6 所示，圖中溢流式平壓塔的水頭保持在 7.19m，PVC 管管徑為 52mm，管壁厚 4mm，管子全長 62.8m，平壓塔與蝶閥距離為 58.7m，管路中流速可藉水錶讀出之流量、管徑大小及流經時間推算之，經數次實驗算得其平均流速為 1.07 m/s。

本實驗針對單管情況下，探討蝶閥置於管路末端在一定時間內關閉的水錘壓力隨時間的變化情形，其所取關閉時間分別為 0.47 秒、2 秒、6 秒三種情況，藉數值模擬結果與實驗結果比較討論如下：

- (1)當關閉時間 $t = 0.47$ 秒時，理論與實驗結果如圖 7 所示，由圖中發現兩結果在負壓發生前部份頗為相合，但負壓發生後，却有很大的差異，一則數值計算的負壓值遠小於實驗值，二者實驗值持續停留在負壓狀態的時間較長且與 $4L/a$ 為固定週期解完全不同，但本實驗結果與 A.I.T. 實驗手冊 { 5 } 第五章所述的兩個實驗結果，即圖 8 與圖 9 有顯然的相同趨勢，此結果之所以如此，經研究是由於管路末端有氣囊 (Air pocket) 產生，因而造成負壓部份的差異。
- (2)當關閉時間 $t = 2$ 秒與 6 秒時之實驗結果與數值模擬結果比較，如圖 10 及圖 11 所示。結果很吻合，驗證了數值方法與電子計算機程式的可靠。其中稍有差異的原因，可能來自導理論時所做的假設所造成。

五、管路系統水錘現象模擬

本研究進一步模擬如圖 12 所示之自來水配水用的網狀管路及圖 13 所示之灌溉用的樹枝狀管路之水錘影響。

- (1)網狀管路佈置圖如圖 12，其發生水錘作用的情況及結果如下：
 - a. 令節點 [4] 及 [9] 出口量瞬間為零，求管子(5)，(8)，(9)及(11)下游端水頭與時間關係，結果如圖 14 所示。
 - b. 令管子(5)，(8)，(11)下游閥瞬間關閉，求管子(1)，(9)，(3)及(10)下游端水頭與時間關係，結果如圖 15 所示。
 - c. 管子(5)的下游端有一兩段閥，其關閉動作是在 0.04 秒關至開度 2% 處，而在全部時間 2 秒時完全關閉，求管子(5)及(6)下游端水頭與時間的關係，結果如圖 16 所示。

- d. 管子(9)上游端的泵浦在 2 秒內線性衰竭，求管子(1)，(3)，(9)及(10)下游端水頭與時間的關係，結果如圖 17 所示。

結果分析如下：

- a. 如圖 12 所示，管子(8)及(11)因同時流向節點 [9]，所以為同一點，其壓力變化也因而相同。壓力自點 [9] 傳出，管子(8)及(11)下游端壓力瞬間升高，又因節點 [9] 之最近的點是點 [8]，其距離 800ft，以 $2L/a$ 可估算得 0.485 秒，此即管子(8)及(11)下游端維持在第一高壓的時間。管子(5)及(9)下游端距點 [4] 最近距離分別為 800ft，以 L/a 估算，可知其壓力變化時間分別為 0.242 秒與 0.364 秒。
- b. 如圖 12 所示，管子(5)，(8)及(11)下游端點，即點 [5] 與點 [9]，壓力波由此傳出，管子(1)下游端離點 [5] 最近距離是 1800ft，所以算得在 0.545 秒後，才有壓力變化，管子(3)下游端離點 [5] 距離 1200ft，且其在閘關閉的下游部份，可以算得其在 0.36 秒會降低至小於定量流時之壓力。管子(9)及(10)下游端，因與點 [9] 距離分別為 1200ft 與 800ft，所以分別在 0.363 及 0.242 秒開始有壓力變化。
- c. 管子(5)下游端點即為點 [5]，因此其壓力瞬間升高，其次管子(6)在 $800/3300 = 0.242$ 秒後會有壓力變化。如圖 16 所示管子(5)及(6)的最高壓力均在 2 秒（即關閉時間）附近且其時間差 0.242 秒，又管子(5)最大壓力較大，一則是管路磨擦損失所造成。二則在管子(6)下游端節點 [4] 處，流量重新分配有降壓作用的關係。
- d. 由於各管均在泵浦下游，故壓力波傳到時，會降低壓力，管子(1)，(3)，(9)及(10)壓力波傳到的時間分別為 0.970 秒，1.151 秒，0.303 秒及 0.424 秒。

上述之分析均以壓力波傳遞觀念概略檢驗第一壓力波傳到之時間，發現從概略估算之結果與電子計算機模擬之結果很吻合。至於壓力值的估算，則因壓力波經過節點，壓力改變，且在管網中相互之影響下，不易準確估得，這些粗略檢討，證明了電子計算機程式所模擬結果的合理性。

(2) 樹枝狀管路佈置圖如圖 13，其發生水錘作用的情況及結果如下：

- a. 管子(8)下游瞬間關閉，求管子(4)，(5)，(7)及(8)下游端的水頭與時間關係。其結果如圖 18 所示。
- b. 管子(8)下游閘 2 秒內均勻關閉，求管子(2)，(6)及(8)下游端的壓力水頭與時間關係，其結果如圖 19 所示。
- c. 泵浦在 2 秒內線性衰竭，求管子(2)，(6)，(8)下游端的壓力水頭與時間關係，其結果如圖 20 所示。

結果分析如下：

- a. 如圖 13 所示，管子(8)瞬間壓力可升高至最大壓力，但距最近的節點 [4] 有 200ft，所以高壓只持續 $2L/a = 0.259$ 秒，接著降低壓力，管子(4)及(5)下游端與水平中心軸對稱，故其壓力變化相同，與點 [9] 最短距離 1613ft，算得在 1.046 秒後壓力波始抵達，壓力開始變化，管子(7)下游端距點 [8] 1000ft，所以在 0.648 秒後壓力才隨着隨高，如圖 18 所示。
- b. 如圖 13 所示，管子(2)及(6)，其與點 [9] 的最短距離分別為 1613ft 及 1275ft，所以分別在 1.046 秒，0.827 秒壓力才緩慢升高，管(8)則立即變化，壓力緩慢升高。
- c. 如圖 13 所示，泵浦在管子(1)上游端，故泵浦在全部管線的上游衰竭，所以壓力波傳到時，壓力會下降，管子(2)，(6)及(8)下游端距泵浦分別為 838ft，1238ft 及 1713ft，所以壓力分別在 0.543 秒，0.802 秒及 1.11 秒後下降，如圖 20 所示。

利用以上估算，大致驗證一下程式，並對水錘現象多一分了解，本節的(b)及(c)情況因關閉時間 2 秒，對本系統（最長距離 2313ft）而言，是一般很長的時間，水錘現象也就比較不明顯，變化曲線較平滑。

六 結論

§ 6 - 1 結論

- (1)一般常見的網狀管路配水系統及灌溉用的樹枝狀管路系統的水錘現象在無流體分離（Column separation）的情況下，可用本研究所用的暫態流動量方程式，連續方程式及適當的邊界條件加以分析。上述兩種管路系統均無法求得數學正確解，因此均使用數值分析的方法求解。而由電子計算機實際履行計算以求解，因此分別建立起電子計算機程式。
- (2)爲了瞭解實際管路中水錘的作用情形，並驗證電子計算機程式。本研究利用管壁受力產生應變的性質，及管內壓力與管壁應變的線性關係式，再利用應變器（Strain gauge）實測應變，間接反求管內的壓力變化情形，結果與數值結果很吻合，令人滿意。
- (3)本研究所建立之程式在對邊界處理上，使用顯性特性法，其優點是當處理每一邊界限制時可視其爲一獨立的次系統（Subsystem），這樣程式的適用性很容易擴大或加以修改，對實際的計算模擬會有很大的方便。
- (4)管路水錘計算中適當地模擬邊界條件是非常重要的，因爲這些邊界條件因時因地而不同，故須時時作調整或處理，而做這些調整或處理常須藉助實驗，以得真正能模擬物理邊界條件的數學模式，把這樣的數學模式帶入電子計算機程式，所計算出來的結果才會良好。
- (5)本研究結果顯示，在簡單管路中所得到的壓力波傳遞觀念在較小型或單純管路中，可以提供管路在水錘作用下大概的變化趨勢，並作較保守的估計，但對於較大型且錯綜複雜的管路時，壓力波在管管相通的管路中與受到複雜的邊界限制時，波與波的彼此干擾，是加強或削弱均難以掌握，乃必須藉助本研究所建立的電子計算機程式加以模擬計算。
- (6)管路系統中水錘作用造成的瞬間高壓與低壓，若沒事先考慮而加以防範，常會使管路爆裂或失敗，尤其在較長的輸送管中，因閘關閉時間易小於 $2L/a$ （ L 表管長， a 表壓力波速），壓力變化會達到最大，此時間與閘，分管與分管之間彼此的影響干擾將更須注意，因爲加大或衰減情況，都與管路系統的壽命息息相關，用本研究的理論及建立之電子計算機程式可以確知管線上各點水錘壓力隨時間的變化情形，因此對一已經設計好而在使用的管路系統，可以加以分析、評估、管路若有被破壞之危險，則可事先採取補救工作。

誌 謝

實驗期間承蒙農工中心提供場地、儀器及該中心多位職員同仁的熱心協助，使本研究得以完成，在此致上最高的謝意。

參 考 文 獻

1. 陳正明, "談液壓震盪與蓄電容器之關係", 機械月刊第九卷第五期, (民國七十二年五月號)。
2. 蘇明道 "輸水管路經濟管徑設計之電子計算機模式", (民國七十年六月)。
3. 南亞塑膠公司, "塑膠管·接頭", 說明書編號: 6-01。
4. Alexander Anderson, "Menabrea's Note on Waterhammer," J. of Hydr. of Div., ASCE, Vol. 1-2, NO. Hy1, (1976).
5. A.I.T. reporter, "Hydraulic Laboratory Manual," (1969).
6. C.S.Martin, "Status of Fluid Transients in Western Europe and the United Kingdom. Report on Laboratory Visits by Freeman Scholar," J. of Fluid Engineers. (1973).
7. C.S. Watt, J.M. Hobbs, and A.P. Boldy, "Hydraulic Transients Following Valve Closure", ASCE, (1981).
8. Don J. Wood, M. ASCE and S.E.Jones, "Waterhammer Charts for Various Types of Values" , ASCE, (1973).
9. E.B.Wylie and V.L. Streeter, "Fluid Transient", McGraw-Hill Book Co.(1978).
10. E.G.H.V. Vreedenburgh, "Waterhammer and Cavitation", (1983).
11. Gary Z. Watters, "Modern Analysis and Control of Unsteady in Pipelines, "Ann Arbor Science, (1979).
12. Gary Z. Watters, Roland W. Jeppson and Gordon H. Flammers, "Water Hammer in PVC and Reinforced plastic Pipe, "ASCE, (1976).
13. H.H.Rachford, JR. and E.L.Ramsey, "Application of Variation Methods to Transient FLOW in Complex Liquid Transmission System, "Society of Petroleum Engineers Journal, (1977).
14. H.Miyashiro, "Waterhammer Analysis of Pump Discharge Line With Several One-Way Surge Tanks, "J. of Eng. for power, (1967).
15. Linster, M. "The Numerical Solution of Hyperbolic Partial Differential Equation by the Method of CHARACTERISTICS. "Mathematical Method of Digital Computers, New. York, N.Y. (1960).
16. Safwat, H.F., "On the Elastic Behavior of Pipe Wall for Waterhammer Application, "Nuclear Engineering and Design, Vol. 21,(1972).
17. Streeter, V.L. and Lai, C., "Waterhammer Analysis Including Friction, "J. of the Hydr. Div., ASCE, VOL. 88, (1977).
18. Tokyo CO., "Instruction Manual for Dynamic Strain Amplifier".

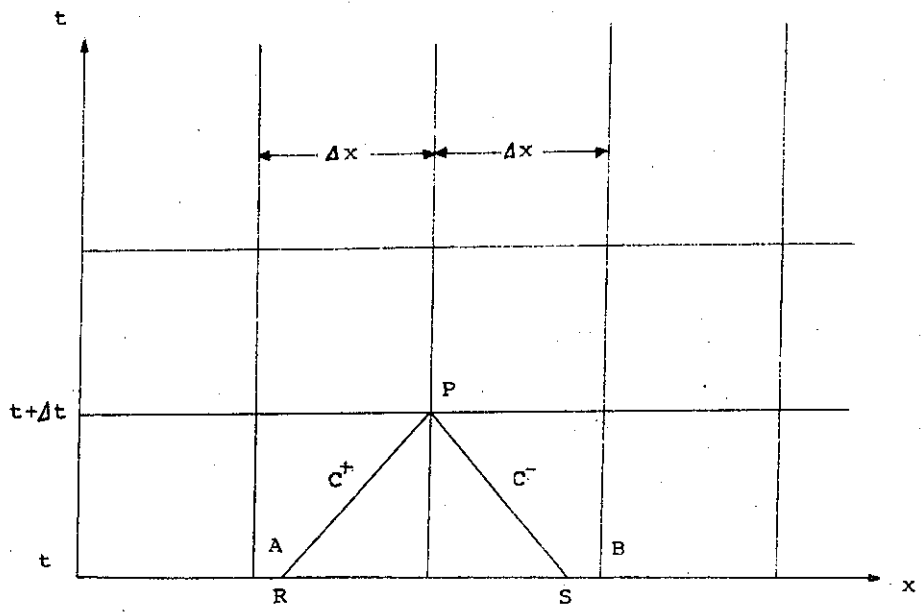


圖 1(a) 定時距特性法網格示意圖

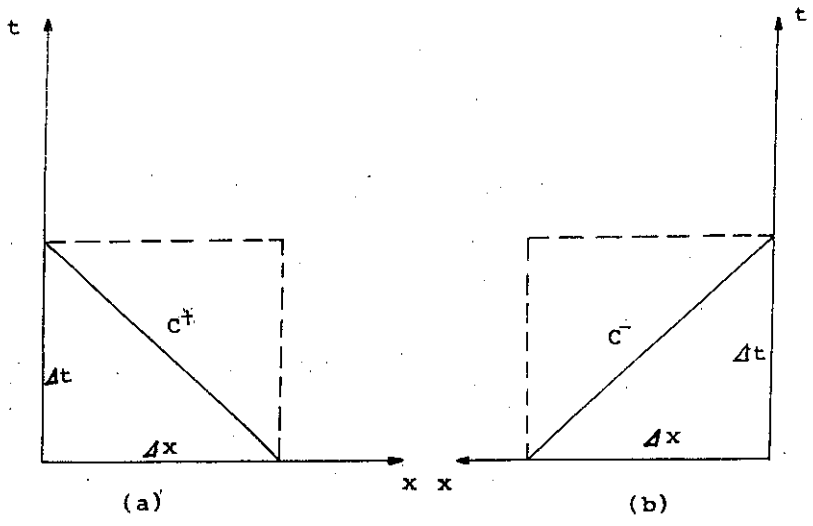


圖 1(b) 邊界上之特性曲線網路圖

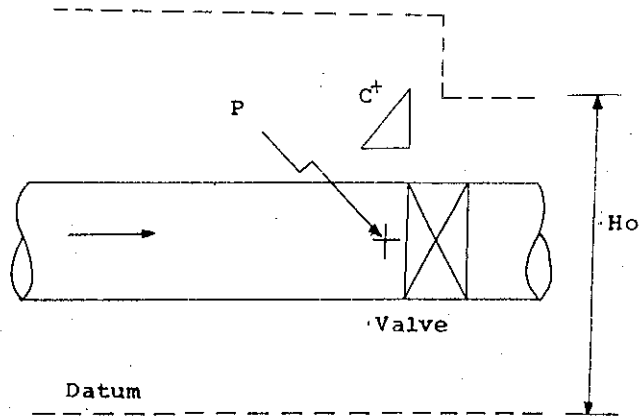


圖 2 管線末端閥示意圖

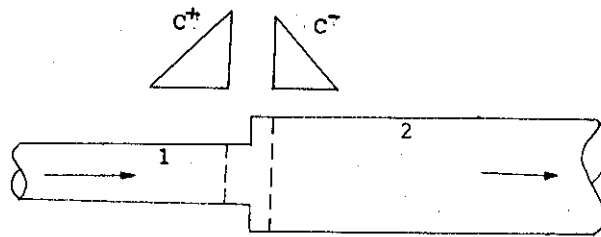


圖 3 串管示意圖

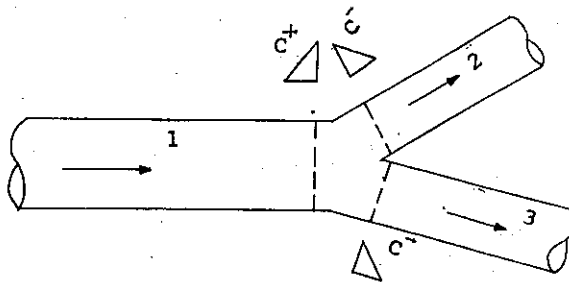


圖 4 分支管示意圖

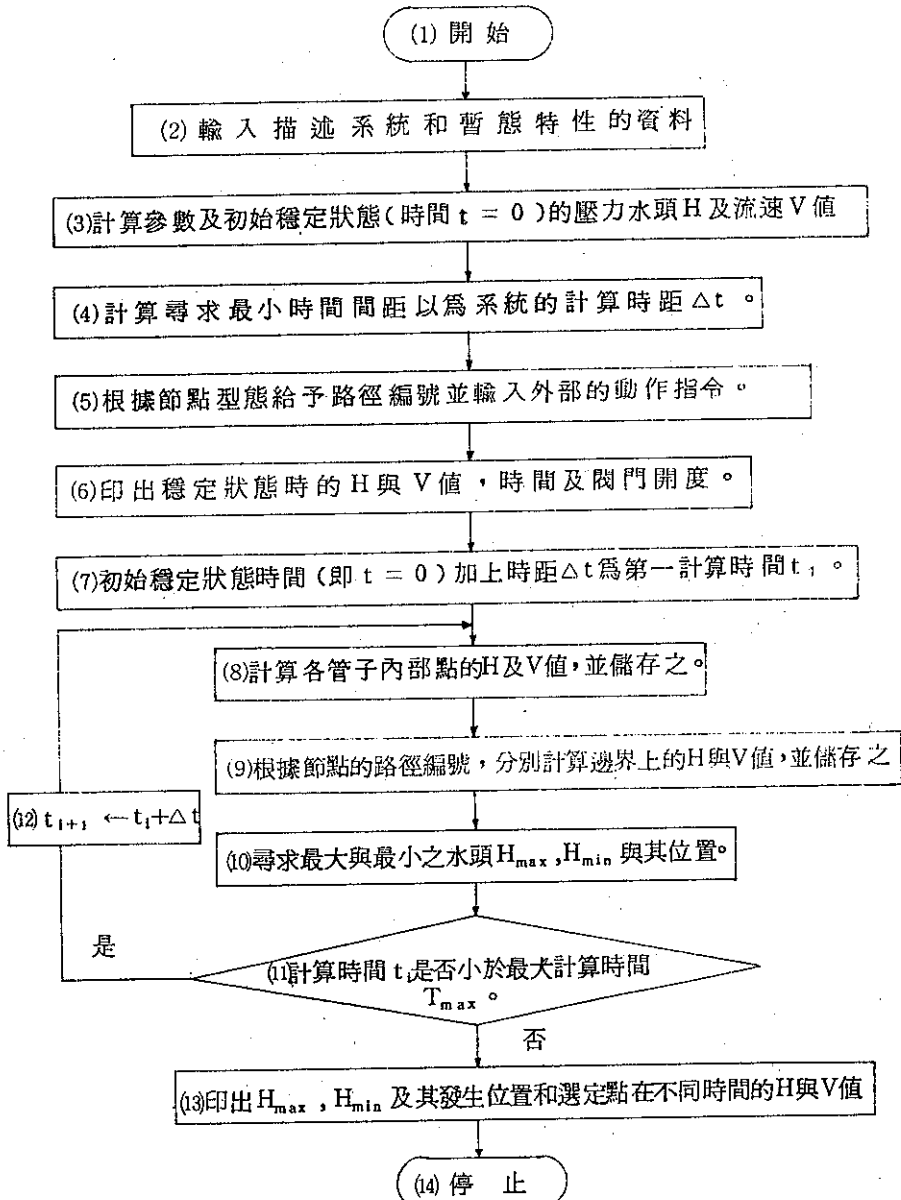


圖 5 管路中水錘作用的計算流程

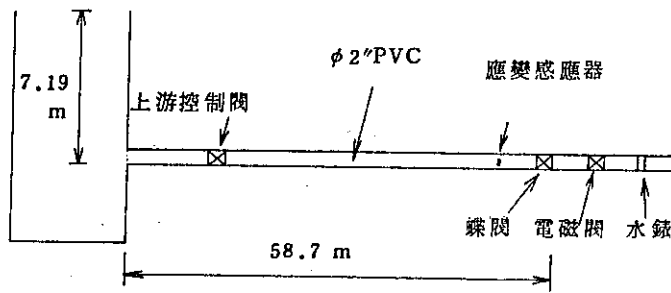


圖 6 實驗佈置圖

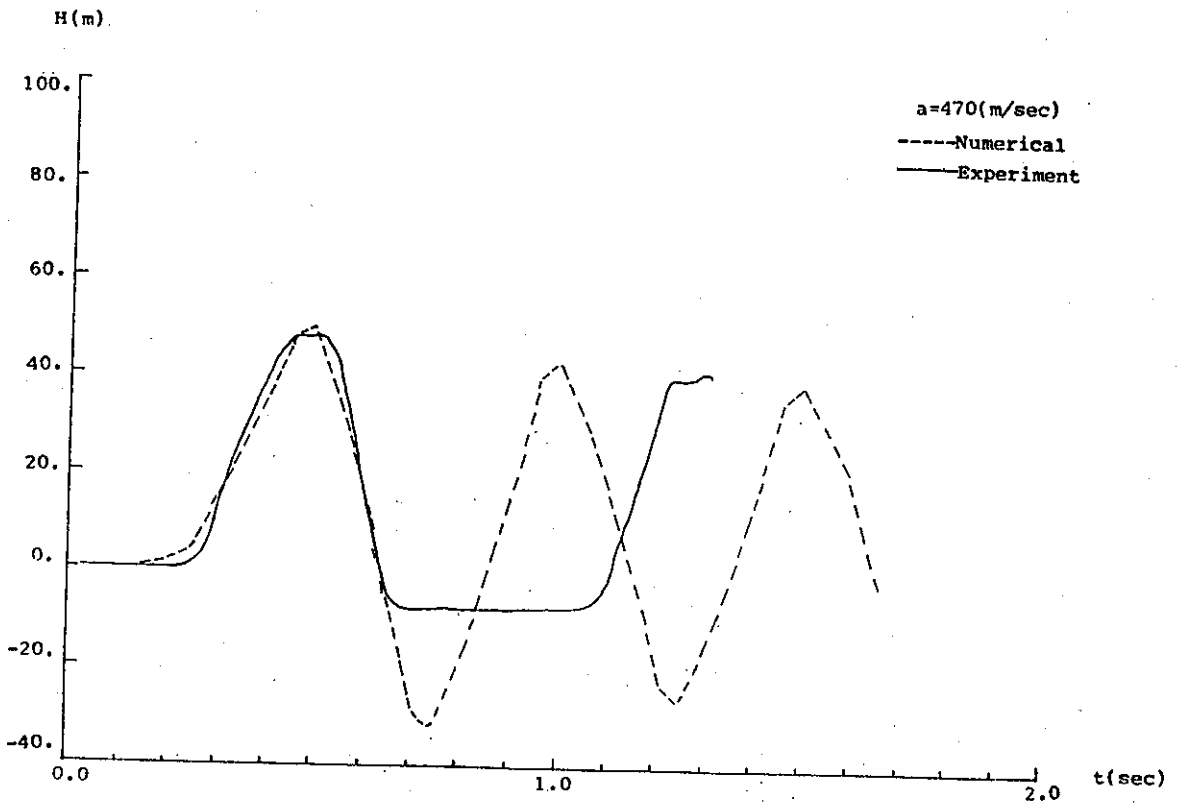


圖 7 單管水錘作用下壓力水頭與時間關係 ($T_c = 0.47$ 秒)

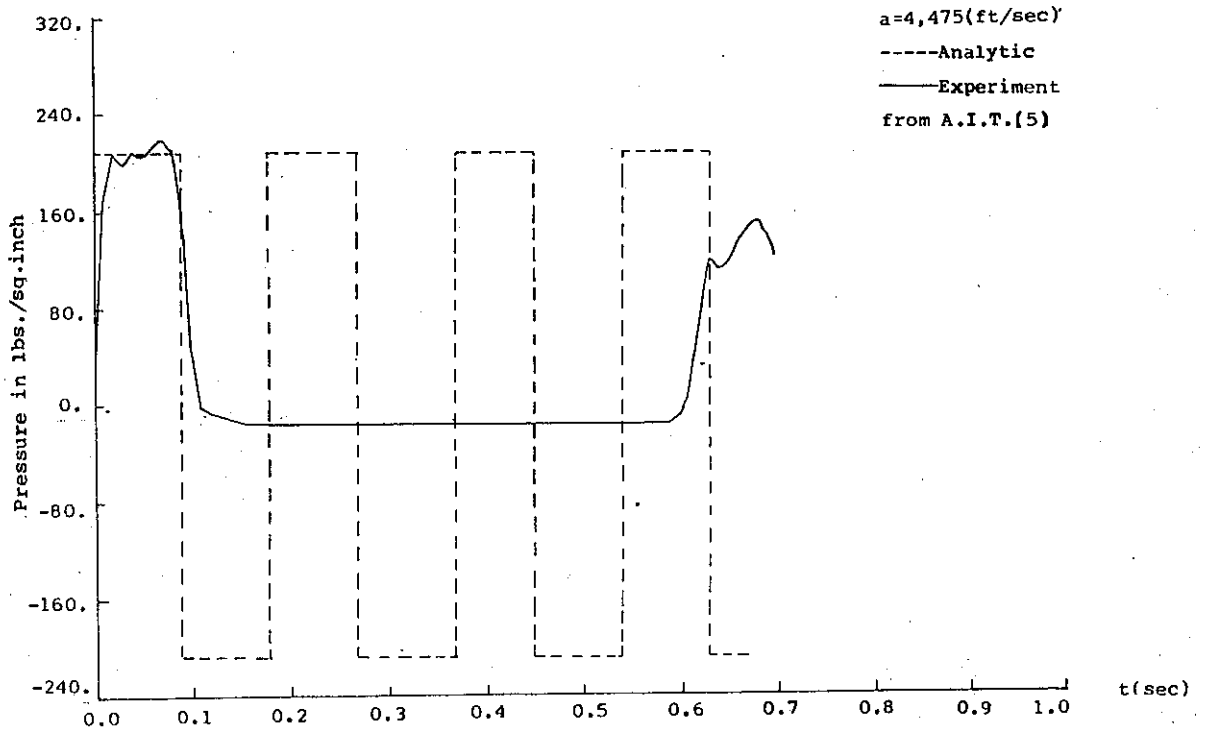


圖 8 單管水鎗作用下壓力水頭與時間關係

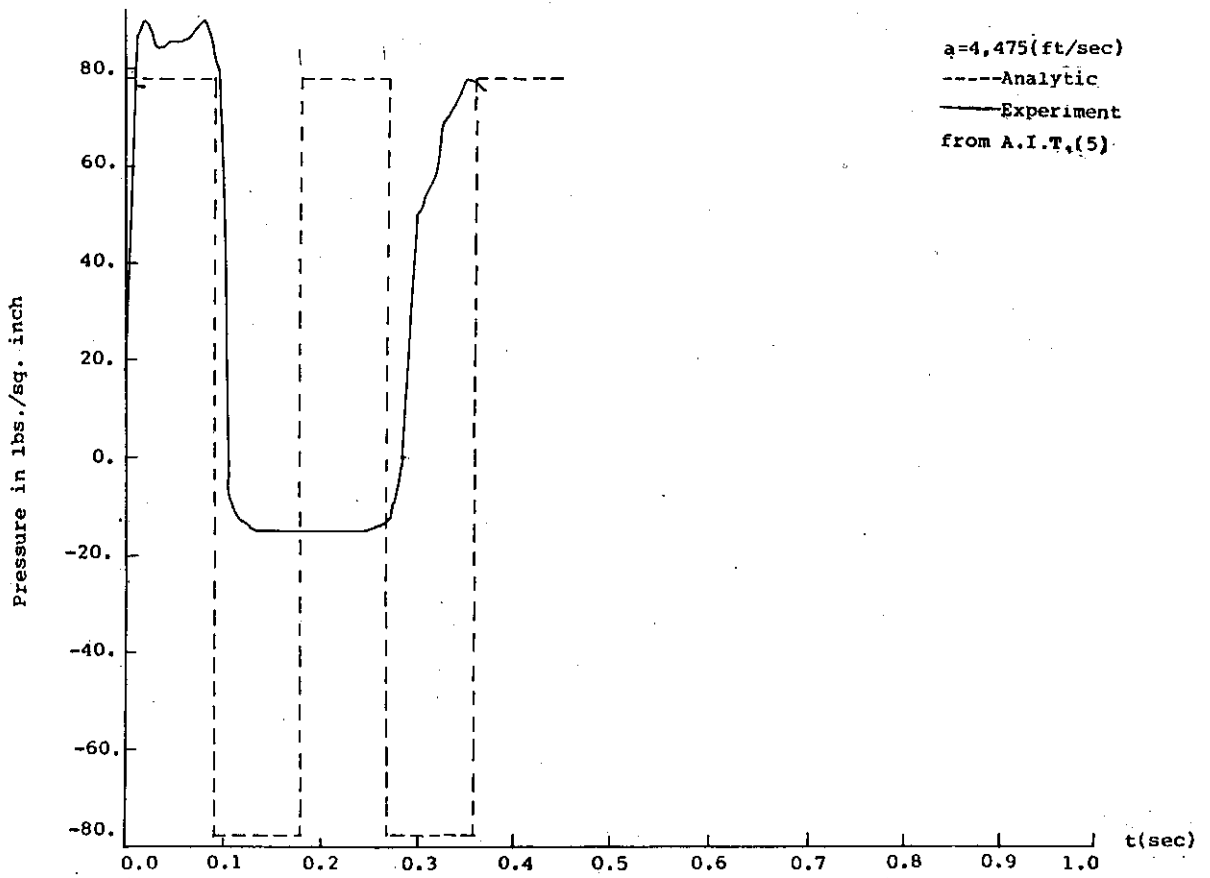


圖 9 單管水錘作用下壓力水頭與時間關係

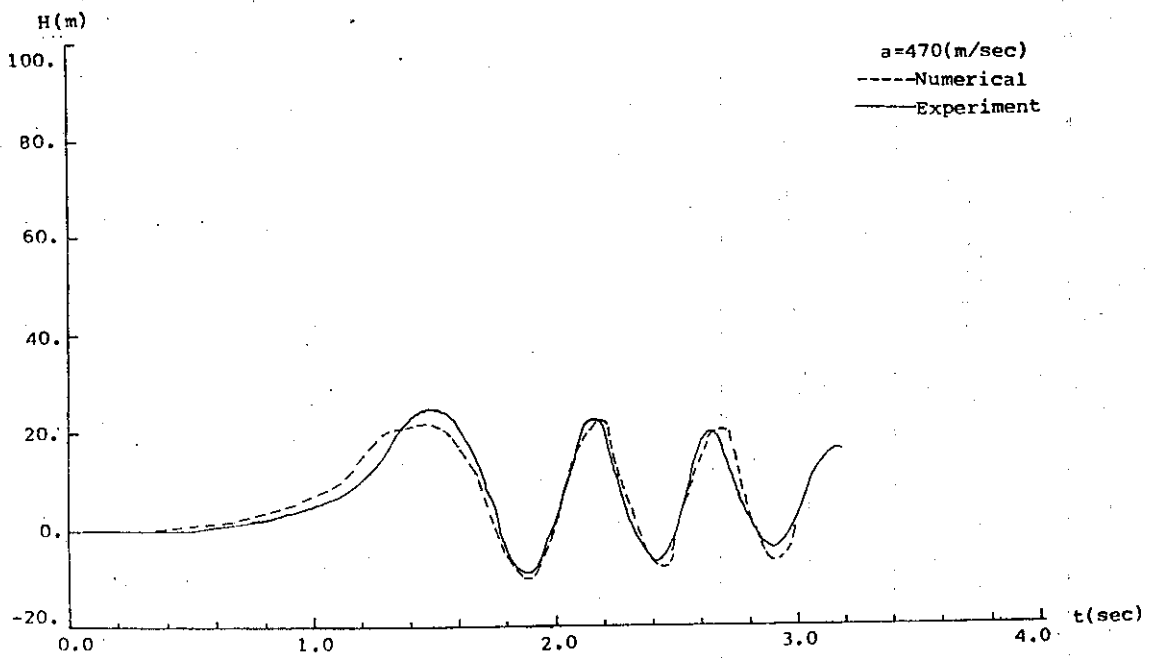


圖 10 單管水錘作用下壓力水頭與時間關係 ($T_c = 2$ 秒)

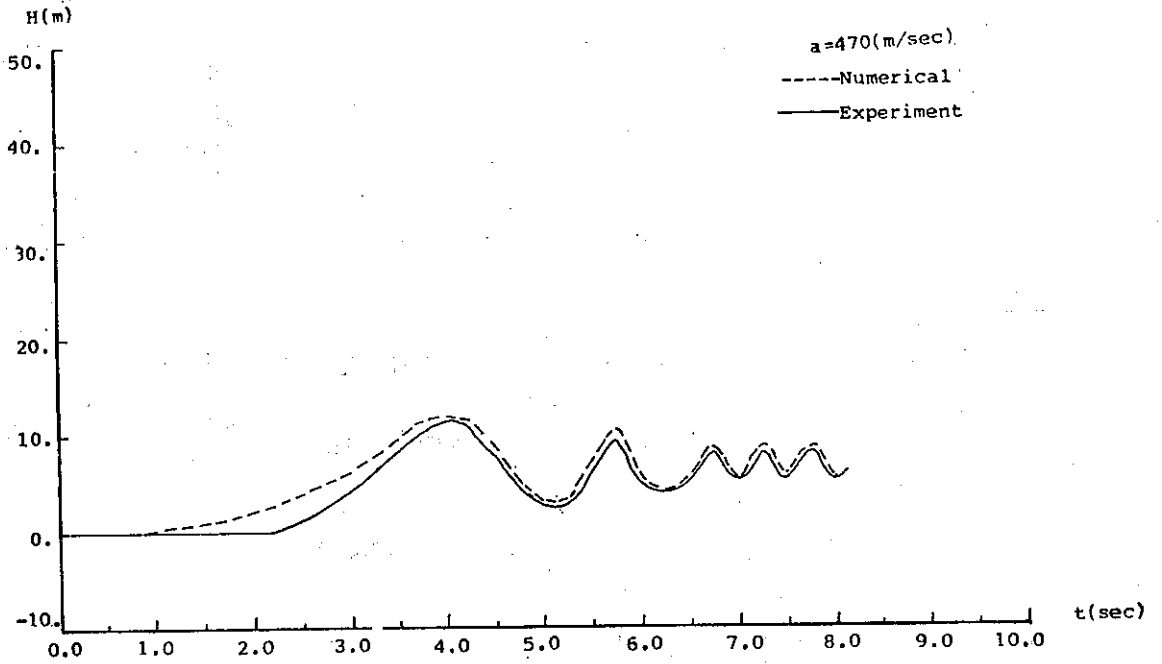


圖 11 單管水錘作用下壓力水頭與時間關係 ($T_c = 6$ 秒)

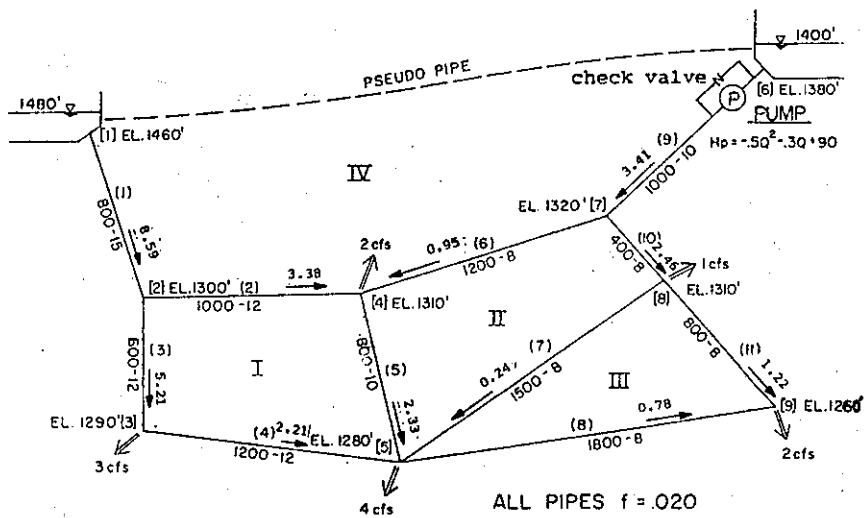


圖 12 (a) 網狀管路系統最初假設流量分配圖

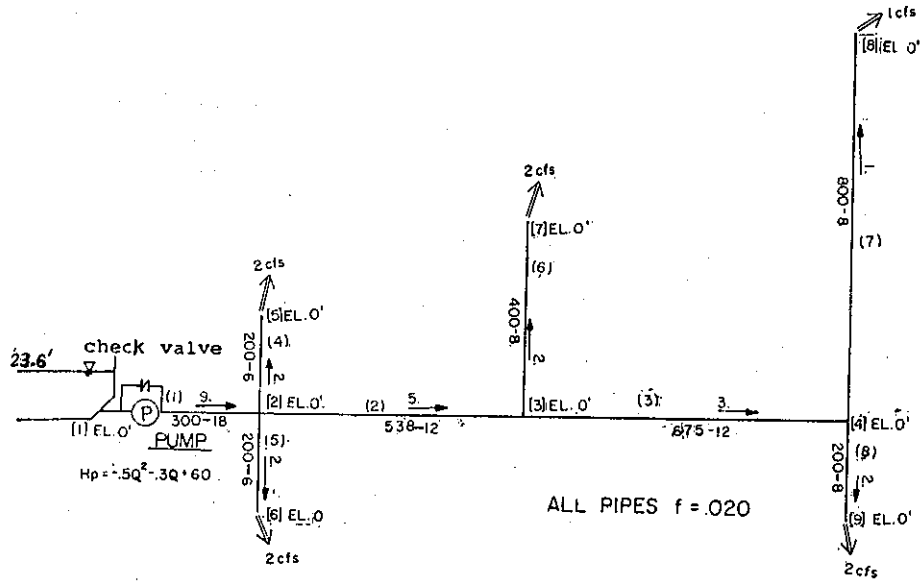


圖 13 樹枝狀管路系統佈置及定量流下的流動圖

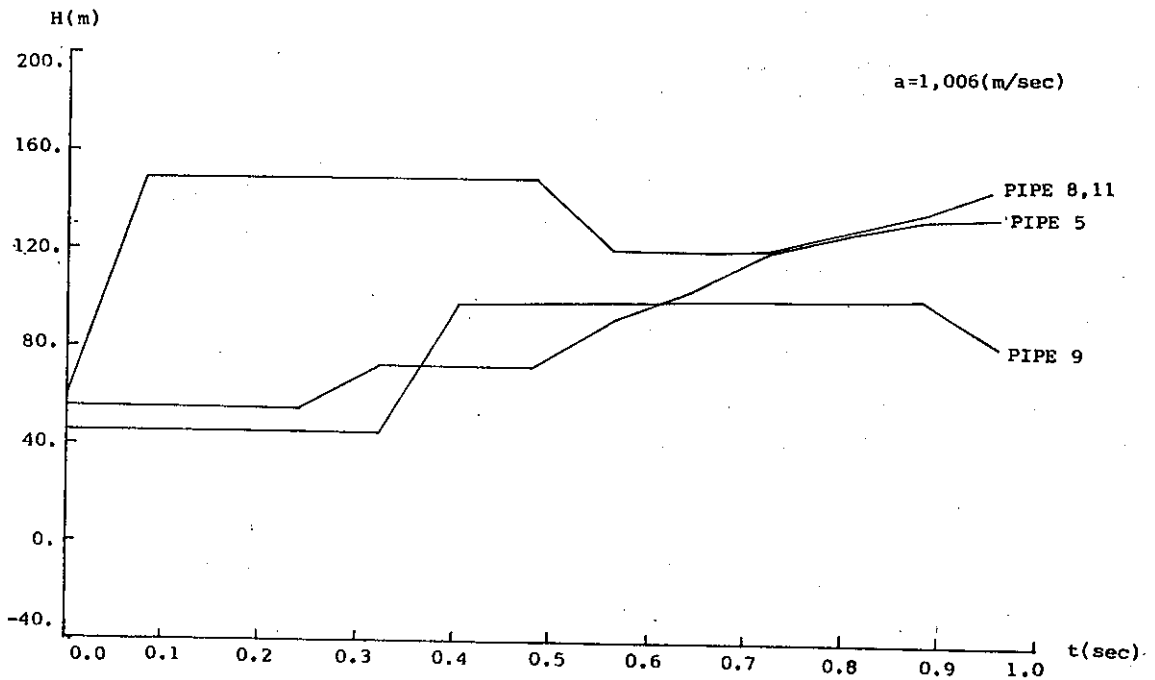


圖 14 網狀管路水錘作用下壓力水頭與時間關係 (Case (a))

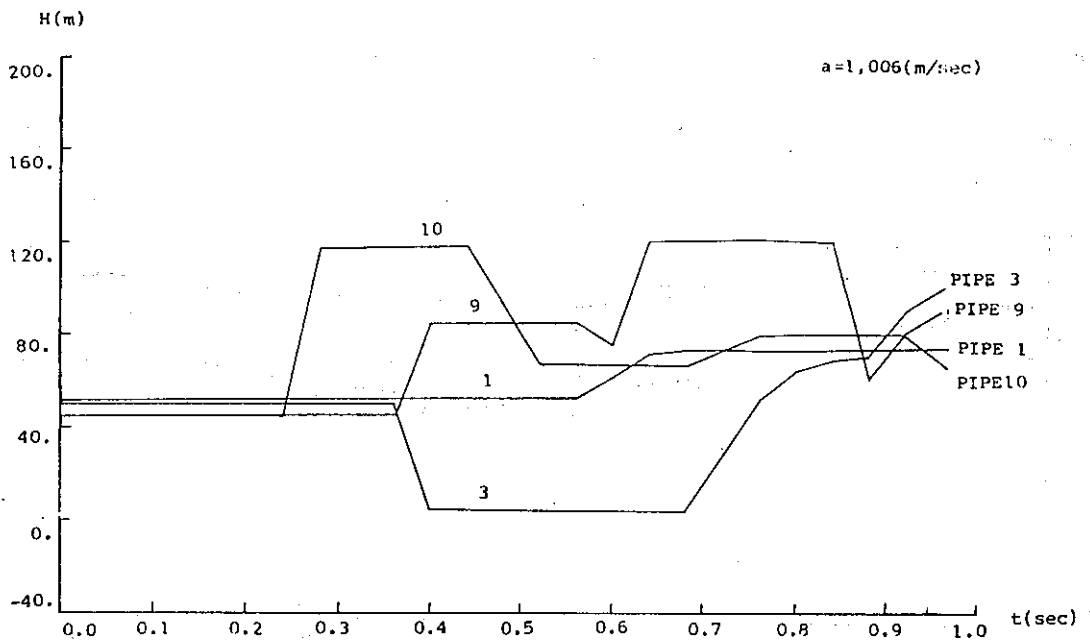


圖 15 網狀管路水錘作用下壓力水頭與時間關係 (Case (b))

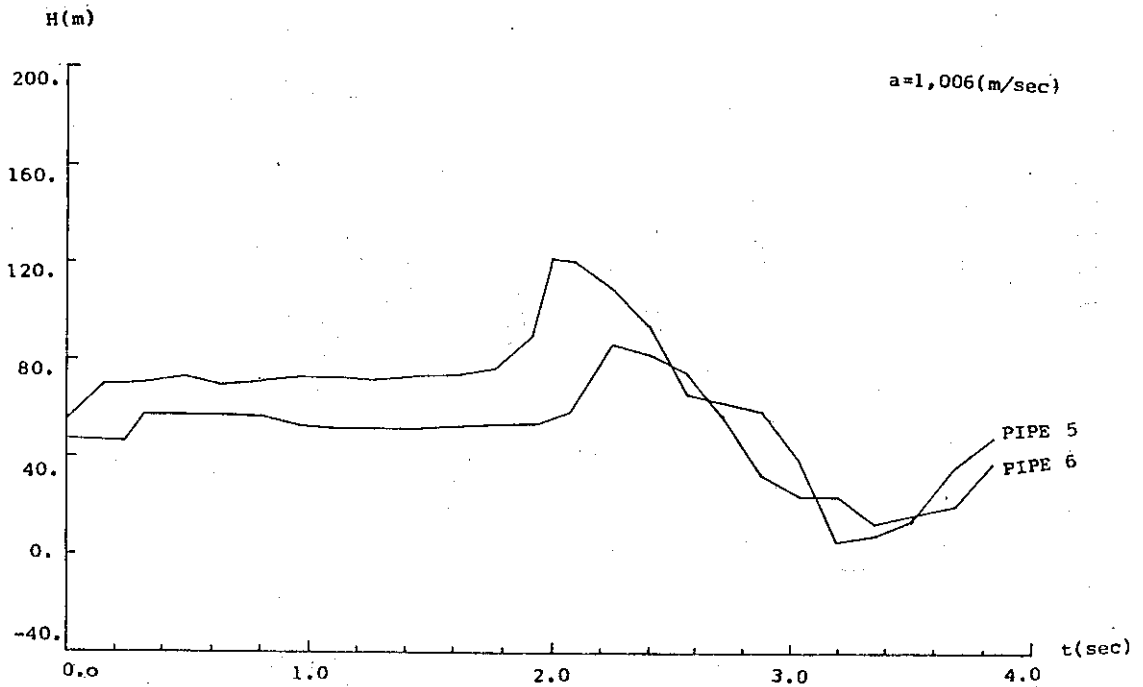


圖 16 網狀管路水錘作用下壓力水頭與時間關係 (Case (c))

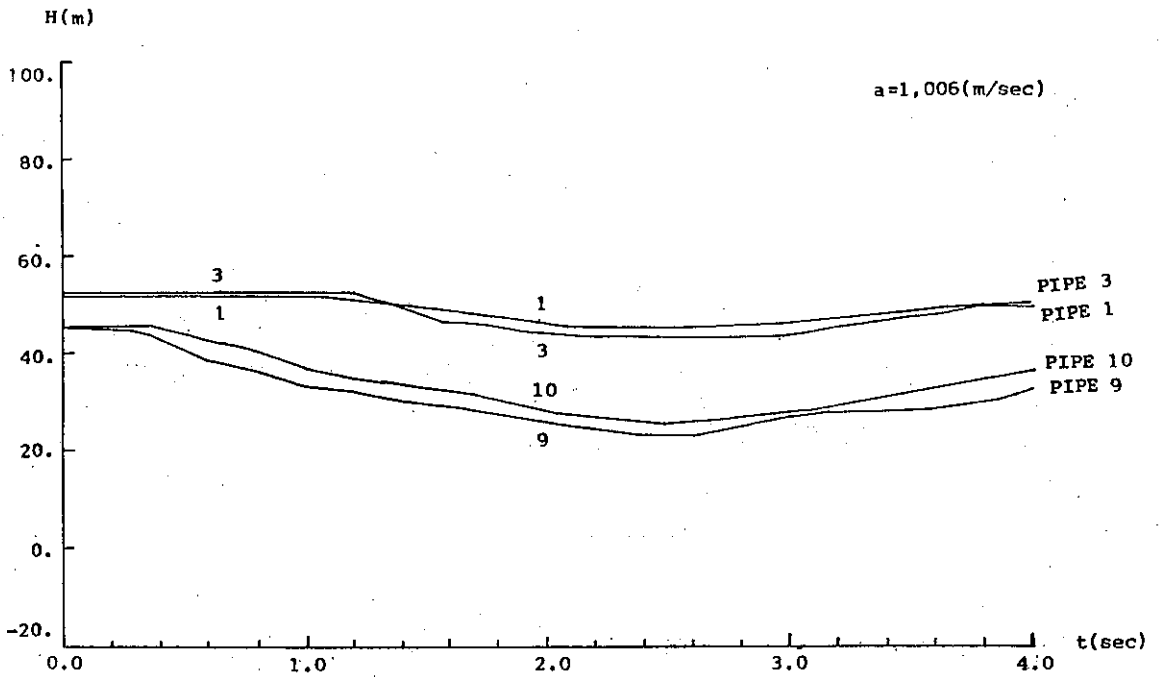


圖 17 網狀管路水錘作用下壓力水頭與時間關係 (Case (d))

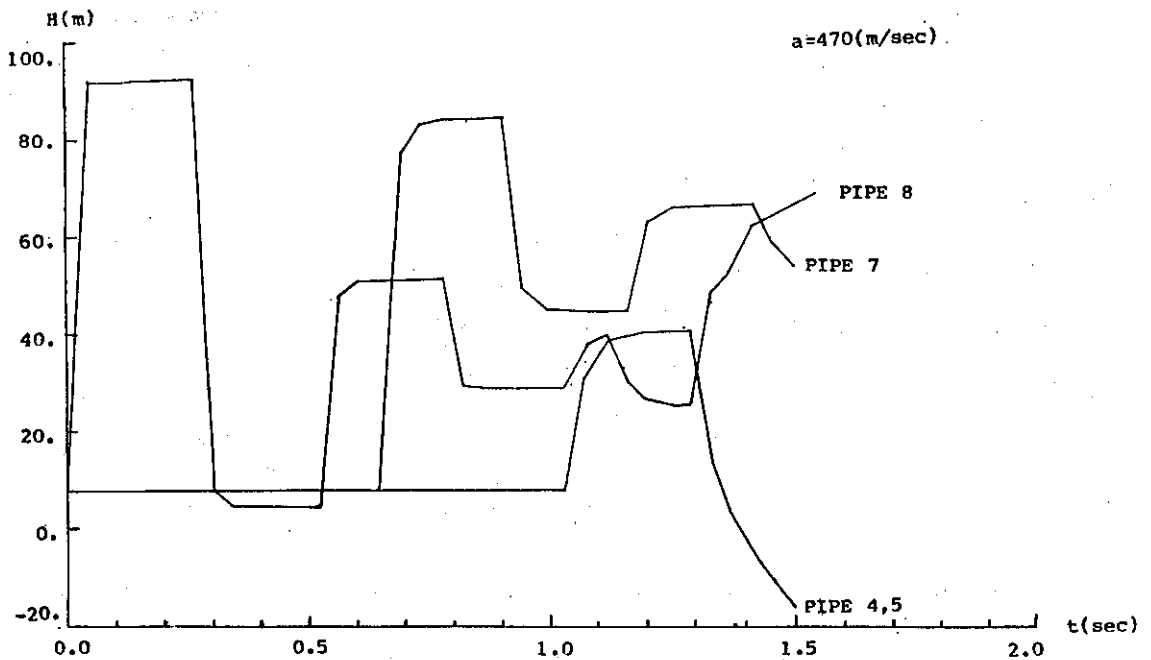


圖 18 樹枝狀管路水錘作用下壓力水頭與時間關係 (Case (a))

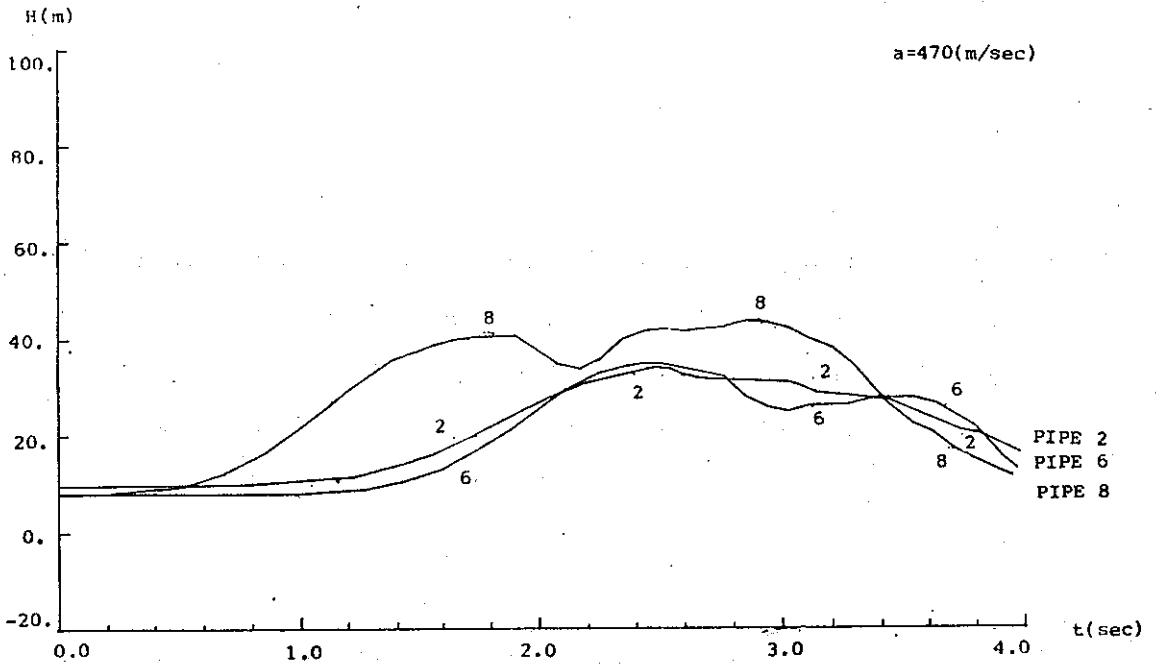


圖 19 樹枝狀管路水錘作用下壓力水頭與時間關係 (Case (D))

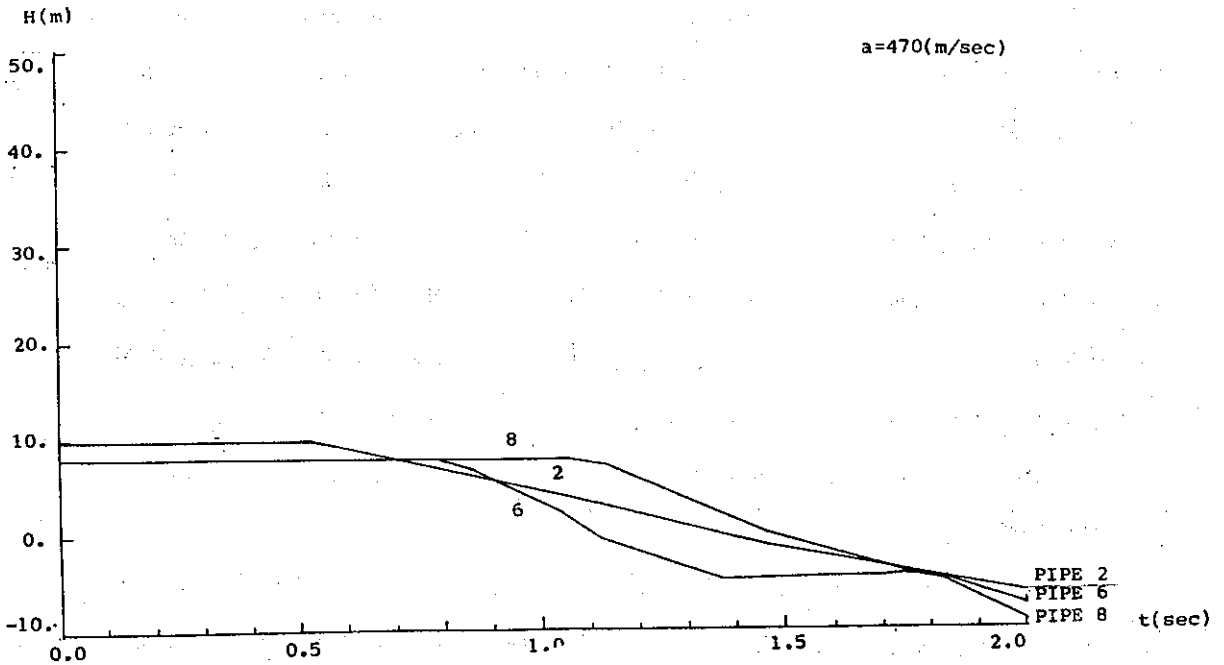


圖 20 樹枝狀管路水錘作用下壓力水頭與時間關係 (Case (C))