

モデル化された各級都市における消火栓設置による水道管費用の増加に関する研究

日本万国博覧会協会建設部 保野健治郎

1. 緒論

水道施設と都市防火施設との合理的な計画方法の解明を目的とするこの研究においては、その基本的な考え方として、「消火用水の費用、建物の損失面積の損害額、消火栓設置による水道管の増加費用および消防施設の費用の年間合計額が最小になるように年間平均風速時の建物の1火災当りの平均損失面積(火を除く)を求めて それに対する水道施設および都市防火施設を計画するのが、より合理的であると考えている立場をとっている。以下これらの費用を算定するために必要なモデル化および数式について説明する。

2. 水道管網のモデル化

消火栓設置による水道管の増加費用と消防施設の費用と計算するには、市街地面積、市街地形状、管延長、最大静水圧、および水道水量のモデル化を行う必要がある。

市街地面積のモデル化は次のようにする。市街地人口と全市人口との関係は

$$Y_1 = 0.833 X_1 - 1.332, \quad 30 > X_1 \geq 1.6 \quad \text{----- (1)}$$

ここに Y_1 = 市街地人口 (10^4 人) , X_1 = 全市人口 (10^4 人)

となる。また、市街地面積と市街地人口との関係は、近似的に式(2)を得る。

$$A_T = 0.542 Y_1, \quad 30 > Y_1 \quad \text{----- (2)}$$

ここに、 A_T = 市街地面積 (km^2)

また、昭和26年から昭和37年の全国約200都市の水道管網図面より、給水人口と給水区域面積との関係は、式(3)のようである。

$$A_w = 0.66 Y_2, \quad 20 > Y_2 \quad \text{----- (3)}$$

ここに A_w = 給水区域面積 (km^2) , Y_2 = 給水人口 (10^4 人)

一方、昭和38年の全市人口10万人以上の都市における給水人口と全市人口との関係は、(4)となる。

$$Y_2 = 0.733 X_1 - 1, \quad 20 > X_1 \geq 1.365 \quad \text{----- (4)}$$

したがって、市街地面積および給水区域面積を全市人口の関数として表示すれば、式(1)、式(2)、式(3)および式(4)より

$$A_T = 0.451 X_1 - 0.721, \quad X_1 \geq 1.6 \quad \text{----- (5)}$$

$$A_w = 0.483 X_1 - 0.66, \quad X_1 \geq 1.365 \quad \text{----- (6)}$$

となるから、 $A_w > A_T$ であるが近似的に $A_w \approx A_T$ とみなすこともできよう。

給水区域のモデル化については、市街地の形状を矩形におきかえ式(3)を求めた資料と同一資料を用いて、配水池を中心に給水区域の縦横比と給水人口との関係を調査したものが、式(7)である。

$$Y_T = 0.234 Y_2, \quad 20 > Y_2 \quad (7)$$

ここに Y_T = 配水池を中心とした給水区域の縦横比

つぎに、給水人口と配水管総延長について、 A_w と同一資料より式(8)を得た。

$$S_L = 1.6 Y_2, \quad 20 > Y_2 \quad (8)$$

ここに S_L = 配水管総延長(10+m)

管網数と給水人口との関係は、同じく A_w と同一資料より、管口径 50 mm 以上、75 mm 以上および 100 mm 以上の場合について、それぞれ式(9)、式(10)および式(11)となった。

$$N_{50} = 36 Y_2, \quad \sigma_{50} = 75.5, \quad 20 > Y_2 \quad (9)$$

$$N_{75} = 25 Y_2, \quad \sigma_{75} = 66.7, \quad 20 > Y_2 \quad (10)$$

$$N_{100} = 15.7 Y_2, \quad \sigma_{100} = 38.5, \quad 20 > Y_2 \quad (11)$$

ここに N_i = 口径 i mm 以上の場合の管網数

σ_i = 口径 i mm 以上の場合の管網数の標準偏差

式(9)、式(10)および式(11)からわかるように、各給水人口に対してかなり多くの管網数をもっていることがわかるが、管網計算上においては一般にどのような管網数で計算しているのか調査したところ式(12)を得た。

$$N_d = 2.14 Y_2, \quad \sigma = 4.53, \quad 20 > Y_2 \quad (12)$$

ここに N_d = 管網計算上の管網数

また、現在の都市水道における配管口径は、一般に口径 75 mm 以上であるから、式(10)の N_{75} と式(12)の N_d との割合より、実際の管網数の約 $1/11.7$ の管網数によって計算していることがわかる。

$$\left. \begin{aligned} Z_{50} &= \frac{N_{50}}{N_d} = 16.8 \\ Z_{75} &= \frac{N_{75}}{N_d} = 11.7 \\ Z_{100} &= \frac{N_{100}}{N_d} = 7.34 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

ここに Z_i = 口径 i mm 以上の場合の実際の管網数と N_d との比

最大静水圧と給水人口および最大管口径と給水人口との関係を A_w と同一資料より調査して、式(14)および式(15)を得た。

$$H_m = 0.0667 Y_2 + 5.3, \quad 20 > Y_2 > 1 \quad \cdots (14)$$

$$D_m = 24.8 Y_2 + 250, \quad 20 > Y_2 > 1 \quad \cdots (15)$$

ここに H_m = 最大静水圧 (kg/cm^2)

D_m = 最大管口径 (mm)

また、日最大給水量と給水人口との関係を昭和38年の場合についてみると式(16)となった。

$$Q_m = 0.285 Y_2^{0.057}, \quad 20 > Y_2 > 1 \quad \cdots (16)$$

ここに Q_m = 1人当りの日最大給水量 ($m^3/d \cdot \text{人}$)

式(16)からわかるように、給水人口10万人以下となれば、10万人以上の時の Q_m よりやや給水量が減少している傾向にあるが、近似的には、給水人口30万人以下においては、 Q_m は給水人口に無関係で、その Q_m も約 $0.35 (m^3/d \cdot \text{人})$ とみなすこともできよう。

なお、式(1)から式(16)における X_1, Y_1 および Y_2 の制限範囲は、各々の式の意味および資料の範囲より決定したものである。

3. 消火栓設置による水道管費用の増加について

昭和26年から昭和37年の全国約200都市の水道管網図面をみると、縦横比が約1:2の矩形が市街地の基本形となって、一般にそれらが、4~6個組合されて1つの街区を形成していることがわかった。つぎに、日常の1人当りの給水量であるが、1人当りの日最大給水量はほぼ $0.35 m^3/d \cdot \text{人}$ である。しかし、平常時の管口径は一般に各給水区域の時間最大給水量で決定される。ところで各級別都市の1人当りの時間最大給水量とモデル化する資料が不十分であったので、各級別都市とも300, 400, 500, 600および700 $l/d \cdot \text{人}$ の各々の場合をもって1人当りの時間最大給水量とした。

また、最大静水圧 ($H_m, \%$) の平均値は5.5~6.0 $\%$ であるが、この数値は資料にかなりのばらつきがあるので、3.0, 4.0, 5.0, 6.0, および7.0 $\%$ の最大静水圧を各級別都市とも採用することにした。また、流速係数の C については、新設管ならびに一般に $C=130$ とってもよいと言われて113が、実際の管網で実測した結果によれば、 $C=80 \sim 140$ 値まで変化して113から、 C は80, 100, 120, および140の場合を各級別都市ともとることとした。

つぎに、火災時水道管に流れる所要最大消火用水流量については、火災が街区の中心で発生し、消火栓が火災の燃火面積規模によって順次使用されるものとし、火災所においても、各管の流向は、変換させないものとした。各管の流向に関する条件は、もし火災時の管の流向が、平常時と逆になれば、一般に水道水に濁りの問題が発生することがあるので、流向を変換させないようにしたもののである。また、火災が市街地のどの地点にも発生する可能性があるものとするから、火災時の火災規模による

管の最大流量は どの管にも発生するものであると考える必要がある。

以上のことをまとめたものが表-1である。

また消火栓設置による水道管費用の増加は、管の材質に影響されるから、口径500mm以上は鑄鉄管、口径450mm以下については、硬質塩化ビニル管を使用した場合と、全口径に鑄鉄管を使用した場合とに別けて計算する。

全 市 人 口 (10 ⁴ 人)	5	7	10	15		
最大 静 水 圧 (H _M %)	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	
焼 失 面 積 (A _焼 ㎡)	10	40	91	300	640	
水 利 点 数 N _S	1	2	3	5.5	8	
各管の最大消火用水量 (q _r ℓ/s)	2.0	3.0	4.0	4.5	5.5	
時間最大給水量 (q _p ℓ/人)	300	400	500	600	700	
流 速 係 数 (β)			80	100	120	140

表-1

硬質塩化ビニル管と鑄鉄管の1m当りの単価(日本水道協会の提案

した消火用水による配水管の増加工費の資料による)は省略する。

最小残存水圧は、時間最大給水時(時間最大給水量+消火水量)の時も各報列都市に無関係に 1.5 kg/cm² とした。これは下市において実験および調査(昭和42年3月3日~11日)した結果 残存水圧 1.0 kg/cm² では決して不便を感じ、1.25 kg/cm² で特に不便はないが、1.8 kg/cm² 以上になれば、蛇口2個を同時に十分使用することはわかったので、最小残存水圧として1.5 kg/cm² を採用した。

表-1にもとづいて消火栓設置による水道管費用の増加を計算するが、これは「時間最大給水量」および「時間最大給水量+消火水量」の場合のそれぞれの配管費(管材料費+施工費)を計算して、その差額が求めようとする消火栓設置による水道管費用の増加分である。

なお、計算による所要の管口径が端数となるが、JIS規格の口径にするためと、消火栓の本体の最小口径が約100mmであるから、各入口規模の大小に無関係に最小口径を100mmとし、JIS口径の間にある計算上の端数の口径は、それぞれのJIS口径に近い方の口径の値として水道管費用を計算した。

また、消火栓設置による水道管の増加費用と因子との関係は式(17)のようにならねばならず、その一般式として式(18)を仮定してみた。

$$\left. \begin{array}{ll}
 X_1 = 0 & 0E_1 = 0 \\
 A = 0 & 0E_1 = 0 \\
 A \rightarrow \text{大} & 0E_1 \rightarrow \text{大} \\
 g_f = 0 & 0E_1 = 0 \\
 g_f \rightarrow \text{大} & 0E_1 \rightarrow \text{大} \\
 g_P \rightarrow \text{大} & 0E_1 \rightarrow \text{小} \\
 C \rightarrow \text{大} & 0E_1 \rightarrow \text{小} \\
 H_M \rightarrow \text{大} & 0E_1 \rightarrow \text{小}
 \end{array} \right\} \cdots \cdots (17)$$

ここに g_f = 火災による管の最大消火水流量 (ℓ/s)
 g_P = 1人当りの時間最大給水量 (ℓ/d・人)

$A = \text{浸失面積 (m}^2\text{)}$

$0E_1 = \text{消火栓設置による水道管の増加費用}$

$$\log E_1 = \log m_1 + m_2 \log X_1 + m_3 \log A + g_p \log m_4 - m_5 \log C - m_6 \log H_m \quad \text{----- (18)}$$

ここに $m_1, m_2, m_3, m_4, m_5, m_6 = \text{係数}$

火災所の管の口径を求めるときには、管網設計に g_p を使用したから、 $0E_1$ は g_p の関数になるはずである。

しかし式(18)において、 g_p の代りに A が因うとして入っているのは、消火用水の費用、浸失面積の損害額および消防施設の費用が浸失面積 A の関数として、表示されるので、 $0E_1$ は A の関数として表示した。

A と g_p の関係は式(19)を得る=とができる。

$$A = 2.2 \times 10^{-5} g_p^{4.25} \quad \text{----- (19)}$$

$0E_1$ は管材料を鑄鉄管および硬質塩化ビニル管を使用した方が安くなる。また $0E_1$ は単純に A の指数関数として表示すれば、その $0E_1$ の精度は人口 5 万 7 千人においては、かなり落ちることがわかった。したがって $0E_1$ の一般式として、式(18)のような指数関数の積の形に仮定することは式の精度を落すが、その計算結果はつぎのようであった。

$$\log 0E_1 = \log 21.92 + 1.762 \log X_1 + 2.288 \log A + g_p \log 0.03541 + 3.526 \log C \\ + 0.5327 \log H_m \quad \text{--- (鑄鉄管)}$$

$$\log 0E_1 = \log 20.90 + 1.714 \log X_1 + 2.252 \log A + g_p \log 0.03487 + 3.482 \log C \\ + 0.5674 \log H_m \quad \text{--- (塩ビ管+鑄鉄管)}$$

この式をみれば、 m_5 および m_6 がともに負の値をとっているから、式(19)と矛盾する。これは、 X_1, A, g_p, C および H_m の指数関数の積の形に仮定したことに無理があったものと思われる、 $0E_1$ はもっと別な形の式に表現されるべきものと思われるが、精度を少し落した計算モデルには使用できるものと考えられる。なお計算した E_1 は資本回収係数 (ψ_{n_1}) によって、消火栓設置による年間の水道管増加費用 (円/年、 E_1) は

$$E_1 = \psi_{n_1} \cdot E_1 \quad \text{----- (20)}$$

$$\text{ここに } \psi_{n_1} = (1+Y_1)^{n_1} / \left[1 + \sum_{i=1}^{n_1-1} (1+Y_1)^i \right]$$

と表示されるが、 ψ_{n_1} における利率 ($\% \text{年}$, Y_1) を 0.08 とし、耐用年数 (n_1) は 40 年として計算することにする。

4. 消火水量、浸失面積および消防施設費用のモデル化

年間の消防関係によって使用される水の費用 E_2 (円/年) は式(21)となる。

$$E_2 = 27.17 C_{02} X_1^{1.099} A^{0.796} \dots \dots (21)$$

ここに C_{02} = 水の単価 (円/m³)

つぎに建物の年間焼失面積による損害額 E_3 (円/年) は

$$E_3 = C_3 \{ 0.738 X_1^{1.099} A + 8.12 (1 - 0.3 X_1^{-0.101}) X_1^{1.2} \}$$

ここに C_3 = 単位焼失面積の損害額 (円/m²)

となるが、小火による損害額は小火以外の火災による損害額と比較してはるかに小さいから、これを無視して式(22)で表示できる。

$$E_3 = C_3 \times 0.738 X_1^{1.099} A \dots \dots (22)$$

また消防署および消防ポンプ自動車の年間費用 E_4 (円/年) はつぎのようになった。

$$E_4 = S_f \{ (0.318 \sqrt{A} + 1) C_4 \psi_{n1} + C_5 \psi'_{n1} + C_6 \psi_{n1} \} + C_7 \psi'_{n1} \dots \dots (23)$$

$$S_f = \frac{0.483 X_1 - 0.66}{2 R_f^2 \{ (\frac{A}{A_h})^{\frac{2}{3}} - 2 (x_1 + x_3) (\frac{A}{A_h})^{\frac{1}{3}} + (x_1 + x_3)^2 \}}$$

ここに C_4 = 消防ポンプ車の単価 (円/台), C_5 = 消防署の単価 (円/署)

C_6 = 火災報知機受信機単価 (円/台), C_7 = 署長公舎の単価 (円/軒)

$\psi'_{n1} = \psi_{n1} \times 0.9 + \gamma_f \times 0.1$, R_f = 消防自動車の走行速度 (km/min)

a', b' = 常数, x_1 = 通報時間 (min), x_3 = ホース延長時間 (min)

つぎに消防署の年間の人件費 E_5 (円/年) であるが、式(24)のようになった。

$$E_5 = (10.9 \times (0.318 \sqrt{A} + 1) S_f + 1.29 X_1 + 1.2) C_8 \dots \dots (24)$$

ここに C_8 = 署員 1 人当りの年間の人件費 (円/人・年)

また、消火栓の年間の費用 E_6 (円/年) であるが、式(25)のようであった。

$$E_6 = \frac{10.5(0.483 X_1 - 0.66) \times 0.318 \sqrt{A}}{A_h} C_9 \psi_{n1} \dots \dots (25)$$

$$A_h = (2 \times 14 \pi_H + 1.412 \sqrt{A})(2 \times 14 \pi_H + 0.706 \sqrt{A}) - A$$

ここに C_9 = 消火栓の単価 (円/本), π_H = ホース本数

火災報知機の年間費用 E_7 (円/年) であるが、式(26)のようであった。

$$E_7 = \frac{1}{0.0225} \times (0.483 X_1 - 0.66) C_{10} \psi_{n1} \dots \dots (26)$$

ここに C_{10} = 火災報知機の単価 (円/基)

したがって、1火災の平均焼失面積 A の関数で表示された $E_1 \sim E_6$ と E_7 を合計した E (円/年)を

$$E_{\text{sum}} = \sum_{i=1}^7 E_i \quad \text{----- (27)}$$

ここに E_2 = i 番目の年間経費および損害額(円/年)

最小にする A を求めれば、これが各都市級別に求める許容焼失面積(m^2 , A_{ya})となる。

これら $E_1 \sim E_7$ の式が幾何値を使用して求められたものであり、しかも各都市の特性をモデル化したものであるから、各人口規模の都市に対応する許容焼失面積(A_{ya})は、むしろこれら係数値の最高値と最小値を使用して、 A_{ya} の値を1つの決定した数値ではなく、ある範囲の値によって表示した方が实际的であると思われるので、この A_{ya} の値を範囲によって示すように計算する。なお E_1 , E_2 , E_3 および E_6 は A の増加関数であり、 E_4 および E_5 は A の減少関数であって、 E_7 は全市人口によって一定値を示すものである。

なお、 $E_2 \sim E_7$ の各係数については説明を省略する。

5. モデル化された各級都市における許容焼失面積の検討

E_{sum} および A_{ya} を計算した結果の一例を示すと表-2のようである。

X_1 (10'人)	5		7		10		15	
$A_{ya}(m^2)$	55	372	55	372	55	372	55	377
$E_{\text{sum}}(\text{円})$	26,116,651	69,608,574	37,417,032	100,890,845	55,506,908	150,629,779	86,427,085	235,736,051
E_1	$\left(\frac{12.5}{3.267,816}\right)$	$\left(\frac{5.1}{3,552,281}\right)$	$\left(\frac{11.3}{4,234,294}\right)$	$\left(\frac{4.8}{4,791,677}\right)$	$\left(\frac{11.8}{6,542,412}\right)$	$\left(\frac{5.6}{8,329,844}\right)$	$\left(\frac{12.3}{10,622,670}\right)$	$\left(\frac{6.1}{14,342,476}\right)$
E_2	19,389	884,787	28,064	128,078	41,533	189,545	64,851	299,128
E_3	11,941,357	48,249,735	17,284,164	69,857,655	25,579,122	103,353,907	39,940,171	163,551,611
E_4	450,497	722,285	665,933	1,087,320	989,087	1,634,873	1,527,677	2,404,582
E_5	8,730,236	16,009,196	12,557,135	23,516,480	18,297,484	34,777,405	27,864,732	51,425,295
E_6	1,228,792	507,826	1,905,153	787,347	2,919,694	1,206,629	4,610,596	1,916,571
E_7	478,764	478,764	742,289	742,289	1,137,576	1,137,576	1,796,388	1,796,388

表-2 許容焼失面積および損害額と全市人口との関係

X_1 が約20~30万人以下の場合では、全市人口にほとんど無関係であって、その値は、約55~375 m^2 であり、最大値の A_{ya} の値でわずかに5 m^2 の差にすぎず、 A_{ya} の平均値は約215 m^2 である。したがって、 A_{ya} の値が55~215~375 m^2 のとき、必要消防ポンプ自動車台数(P_1)、必要消火水量(Q_1 , m^3/min)、および火災による管の最大消火水流量(g_t , l/sec)を計算すれば、それぞれ P_1 (2.36~4.66~6.15台)、 Q_1 (2.83~5.6~7.97 m^3/min)および g_t

(33~44~50 ℓ /sec)となることがわかる。

このように A_{gr} は大きく変化されるものがあるから、全市人口が同一規模であるからといって、都市防火施設を画一的に同一標準によって設置すべきでない。

最後にこの研究にあたり終始御指導頂いた京都大学工学部堀内三郎教授、ならびに末石富太郎教授に謝意を表する。