

マンホールのエネルギー損失特性と雨水管路網の合理的設計手法に関する研究

荒尾, 慎司

<https://doi.org/10.11501/3150967>

出版情報 : 九州大学, 1998, 博士 (工学), 論文博士
バージョン :
権利関係 :

第5節 まとめ

本章では、雨水管路網全体のエネルギー損失を減らす目的で、2方向接合落差マンホール部の底面形状や出口形状を改善した新しいマンホール構造を提案し、マンホール部のエネルギー損失の軽減効果について実験的検討を加えた。また、既設マンホールを新しいマンホール構造に改善したときの、雨水管路網での計算水位の低減効果を明らかにした。

本章で得られた結果を総括すると以下の通りである。

- (1) 従来の研究では、上・下流管の接合が管底接合でしかもインバートの深さが管径程度である場合には、マンホール内でのスケールの大きな単一方向回転渦の発生を抑制することができ、マンホール部のエネルギー損失をかなり軽減することが可能であると報告されているが、本実験ではこのような結果は得られなかった。この理由は明らかではなく、今後マンホール内の流況を詳細に検討する必要がある。
- (2) マンホール出口形状の上半分をベルマウス型にし、さらにインバートの深さを管径程度に改善した併用型では、現場で利用されているものを簡単にモデル化した角端型に比べて損失係数を最大1程度減少させることが可能である。
- (3) 段差比 S/D_d (S : 上・下流管の段差、 D_d : 下流管内径) が1より小さい場合にはマンホール出口形状だけを改良したもの(ベルマウス型)よりも併用型の方がマンホール部のエネルギー損失係数をより小さくすることが可能であるが、段差比が1を超えると併用型ではインバートの足のせ部を高くしていることが損失係数を増加させる要因となるため逆にベルマウス型の方が有利である。
- (4) マンホール水深比 h/D_u (h : 上流管頂(内壁頂部)から水面までの距離、 D_u : 上流管径) が2~6では、いずれの実験条件でもエネルギー損失係数は極端に増加することはない傾向にあるので、管路の埋設深さを決定するにはこのことを十分考慮する必要がある。
- (5) 従来より用いられている90度曲げ接合マンホール底面(従来型90度マンホール)のインバートをマンホール壁に沿って配置した新型90度マンホールを提案した。これを用いると段差比0と0.5では、いずれの段差比でも新型90度の方が従来型90度よりも損失係数は0.1~0.8程度小さくなり、明らかにインバートの改善効果が認められる。新型90度ではマンホールを上から見て反時計周りのロート状のスケールの大きな渦が発生するが、この単純な単一方向回転渦は損失係数を大きくするのではなく、逆に上流管からの流入水を下流管へ流出しやすくしているものと思われる。
- (6) 第4章で設定した雨水管路網の仮想モデルにおいて、既設マンホールを併用型マンホールと新型90度マンホールに改善した結果、管底接合では最上流のマンホール水深の低減効果は10%未満でそれほど大きくないが、段差接合(段差を管径の半分あるいは管径分に設定)では20%を超える低減効果がある。したがって、都市部の平地部で流下能力が十分にあるようなところでは、上流側の地形勾配の急な地区での浸水防

除には有効である。

第6章 GAを用いた雨水管路網の合理的設計手法の提案

第1節 はじめに

雨水管路の設計では、多くの考慮すべき条件、たとえば敷設対象地域の地理的諸条件、雨水管路への流入水量を算出する際の水文学的諸条件、管内流速や損失水頭に関する水理学的諸条件、管路形状および管路の接合部であるマンホール形状、管路およびマンホールのサイズ、管路の水平面接合角度、管勾配、マンホールの上・下流管の段差等の構造的諸条件などが存在するため¹⁾、現在でも合理的に設計し難い状況にある。同時に、第2章でも述べたように設計基準にマンホールにおけるエネルギー損失（以下、マンホール損失）が全く考慮されていないという問題もかかえている。渡辺²⁾は、理論的研究からマンホールが圧力管水路流れの流出特性を決定づける重要な要素であり、マンホールでの損失や貯留効果を無視した場合の流出シミュレーション結果には致命的な誤差が含まれる可能性の高いことを指摘している。また、第2章から第5章でも示したように、Lindvall³⁾、Howarthら⁴⁾、著者⁵⁻⁷⁾も主として模型実験によりマンホールでのエネルギー損失メカニズムの解明を進めるとともに、マンホール損失が管路における摩擦損失（以下、管摩擦損失）に比べて無視できないことを明らかにしてきた。

上述したような種々の条件を考慮した雨水管路網設計の最適化に関する研究は国内外においてあまり見当たらず、類似の研究として上水道を対象とした沢野らのポンプ加压式配水管網施設の総費用（管路費用とポンプ費用の合計）最小化による最適管網設計⁸⁾があるが、雨水管路網を直接対象とする研究としては高桑らの先駆的研究^{9, 10)}と著者らの研究¹¹⁾があるに過ぎない。高桑ら^{9, 10)}は、マンホールにおける流水断面の拡大により流水の持つ速度水頭のほとんどが失われると仮定して、管路の摩擦損失水頭と管路からマンホールへの流出損失水頭との和が管勾配と管長の積に等しくなるように管径を算出する方法を提案している。しかし、マンホールの上・下流管の水平面接合角度が180度で段差が小さい場合には著者らの研究⁵⁻⁷⁾により流水の持つ速度水頭の一部しか失われないことが判明しており、高桑らの方法では管径をやや過大に設計することになると考えられる。

本章は、雨水管路網の設計に内在する問題点を克服するための第一歩として文献11)で提案した遺伝的アルゴリズム(GA)による設計手法の推進を意図するもので、管径・マンホール径および管勾配を主要設計要素とする雨水管路網の設計にマンホール損失を考慮する意義を明確にすることと最適化手法の導入によって設計の合理化を図ることを目的とする。そのため、まず、第2節および第3節で、管勾配を固定した全損失(=管摩擦損失+マンホール損失)最小化による管径・マンホール径決定問題の定式化と遺伝的アルゴリズム(scsga)¹²⁾を用いた数値計算結果を提示する。次に、得られた最適解の特性分析結果に基づき開発した“解特性法”を概説する。さらに、第4節で、費用最小化関数を導入して管勾配をも設計変数とする2目的問題を定式化し、“解特性法”を活用したGAによる解法の開発および数値実験による検討結果を示す。

第2節 対象管路網と損失解析

2.1 対象管路網

図-6.1に示すように検討対象とする雨水管路網は第4章で用いたものと同じである。ここに、あるマンホールとその直下流管を管路要素（以下、要素）と呼ぶこととし、また、最上流に位置するマンホールを起点マンホール、起点マンホールを含む要素を起点要素と呼ぶ。各要素には、上流要素から下流要素へ一連の要素番号を与える。ただし、図-6.1に示すように、要素番号を付与された要素が合流点に達し、しかも要素番号のない起点要素が存在する場合には、次の要素番号をその起点要素に付与する。以後、要素番号を示す記号には i を用い、 I を要素総数とする（図-6.1に示す対象管路網は全20要素で構成されているので $I=20$ である）。なお、マンホール損失の解明に関する研究の現況から、ここでは円形マンホールと円管で構成される要素のみを対象とし、マンホールにおける上・下流管の接合はすべて段差が無い管底接合とする。また、雨水管路網の水理計算では計算モデルの構成上、すべてのマンホールから雨水が流入すると仮定することが一般的である（したがって下流ほど流量は増加することになる）ので、設計基本式はこの仮定に基づき定式化される。ただし、提案手法の特性を数値的に検討する数値実験例においては、検討パラメータの減少を図るため雨水の流入箇所を起点マンホール2箇所限定し、それぞれの流入量を等しく Q_{in} とすることにする。

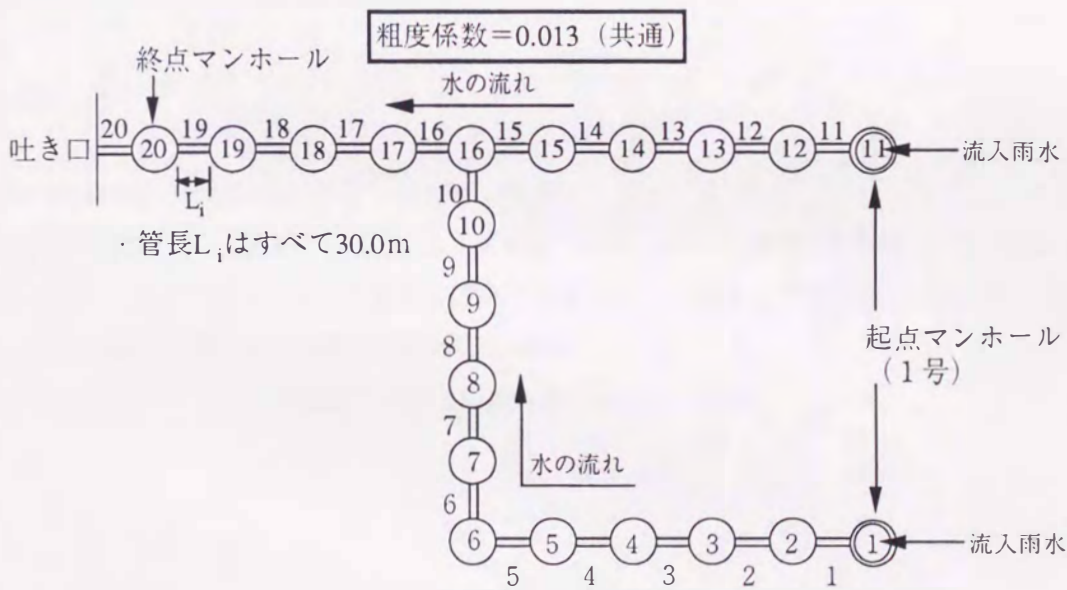


図-6.1 対象管路網の概況

2.2 管摩擦損失とマンホール損失

雨水管路に円形管路を用いる場合、現行の設計基準では確率年で5～10年の最大計画雨水流出量が満管流れで自然流下できればよいことになっている。計画降雨規模以上の降水でしかも降雨強度が非常に大きい場合には、管路内は圧力管水路流れとなり、マンホール等からの溢水により浸水被害をもたらすことがある。こ

のような計画降雨規模以上の降雨に対してより安全な設計条件を考えると、氾濫想定区域では雨水管路網のエネルギー損失が極力小さくなるように管路網の各種構造寸法や平面的配置計画を立案することが必要であると思われる。そこでここでは、雨水管路網全体のエネルギー損失水頭 E' を管摩擦損失水頭の総和 E'_F とマンホール損失水頭の総和 E'_M の和として(6.1)式のように定式化する。ちなみに、現行の設計基準では管摩擦損失のみが考慮されており、マンホール損失に関する記述は全くない。

$$E' = E'_F + E'_M = \sum E'_{Fi} + \sum E'_{Mi} \\ = \sum (f_i L_i / D_i + K_i) (V_i^2 / 2g) \quad (i = 1 \sim I) \quad (6.1)$$

ここに、 E'_{Fi} は要素 i の管摩擦損失水頭、 E'_{Mi} は要素 i のマンホール損失水頭、 L_i は要素 i の管長、 D_i は要素 i の管径、 V_i は要素 i の管の断面平均流速、 $f_i (= 124.5 n_i^2 / D_i^{1.3})$ は要素 i の管摩擦損失係数、 n_i は要素 i の管の粗度係数、 K_i は要素 i のマンホールのエネルギー損失係数、 I は要素数、 g は重力加速度である。

第4章4.3では、雨水管路網の計算水位を計算するためにマンホール部での圧力損失係数を設定する必要があったが、ここでは、雨水管路網全体のエネルギー損失を算定する必要があるため、2方向および3方向接合マンホール部のエネルギー損失係数 K_i には下記①~③の値を用いる。ただし、上・下流管の管径が同一径であれば、マンホール部のエネルギー損失係数は圧力損失係数と同じになる。

①2方向接合マンホール(上・下流管の水平面接合角度=180度)の場合

$$K_i = k_i (b_i / D_i^u) \quad (6.2)$$

ただし、 $k_i = [0.105 + 0.055 (D_i / D_i^u - 1.0) / 0.2]$

ここに、 D_i^u は要素 i の上流要素の管径、 b_i は要素 i のマンホールの内径である。(6.2)式は上・下流管の管径比 $D_i / D_i^u = 1.0$ と1.2における著者らの実験結果をもとに作成した実験式(エネルギー損失係数)⁷⁾であるが、実験範囲外の管径比にも適用可能と仮定する。

②2方向接合マンホール(上・下流管の水平面接合角度=90度)の場合

$$K_i = 1.7 \quad (6.3)$$

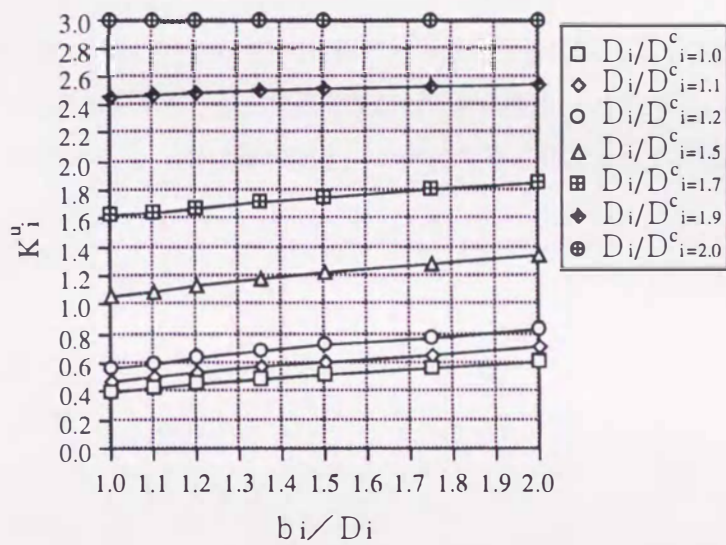
厳密には、この場合の K_i も(6.2)式と同様にマンホール径比 b_i / D_i^u 値によって変化するが、その程度は小さく⁷⁾、設計においては一定値としても支障ない。なお、上・下流管を異径とした研究例は未だ皆無であるので(6.3)式は上・下流管が同一径のときのみ適用可能である。

③3方向接合マンホールの場合

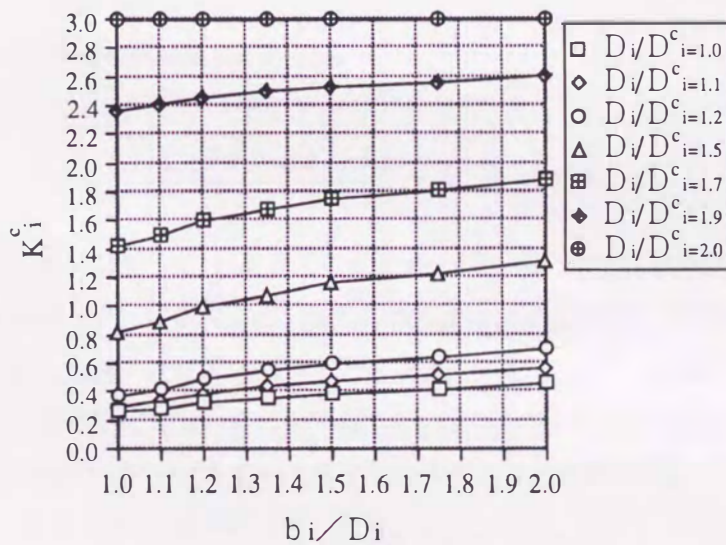
$$K_i^* = k_i^* + (Q_i^* / Q_i)^2 (D_i / D_i^*)^4 - 1 \quad (6.4)$$

ここに、上付き添字*は主上流管(上・下流管の水平面接合角度=180度)については u 、横上流管(主

上流管に対して直角に合流する管) に関して c をあてはめることによってその区分を示す記号、 K^* はエネルギー損失係数、 k^* は圧力損失係数、 Q^* 、 D^* ($*=u$ または c) は、それぞれ流量および管径である。(6.4) 式は Sangster ら¹³⁾ が実験結果から提案した圧力損失係数の算定式をもとにエネルギー損失係数に換算した式である。その実験範囲は $1.0 \leq b_i/D_i \leq 2.0$ 、 $0.6 \leq D_i/D_c \leq 2.0$ であるが、ここではこれ以外でも適用可能と仮定する。また、実験ではマンホール底面にインバートは設けられていなかったため実際のエネルギー損失係数は (6.4) 式より若干小さいと推定されるが、十分な解明がなされていないので特に修正は行わない。(6.4) 式により算定されるエネルギー損失係数の一例として $Q^*/Q_i = 0.5$ の場合を図-6.2 に示す。なお、上記①~③に示す K_i とマンホール水深の関係については現在でも解明途上にあるので^{3), 5), 6)}、特に考慮しないこととする。



(a) b_i/D_i と K_u の関係



(b) b_i/D_i と K_c の関係

図-6.2 3方向接合マンホール部のエネルギー損失係数の一例

第3節 エネルギー損失最小化による管径・マンホール径の決定

3.1 管勾配を固定した設計基本式の定式化¹¹⁾

現行の設計手法では、計画設計流量（たとえば確率年で5年に一度発生する流量）・管勾配を定めた後、動水勾配線が少なくとも地表面を越えないようにマンシング式により必要な管径・マンホール径を求めている。ここでは、計画設計流量よりも大きい超過外力が発生した場合、すなわち圧力管水路流れとなる場合を想定しているため動水勾配線に関しては特に議論しないこととする。

さて、雨水管路網に要求される最も基本的な特性、“雨水を上流から下流へスムーズに流下させる”に着目したとき、(6.1)～(6.4)式によって算定される管路網全体のエネルギー損失は雨水管路網の設計の良否を判定するひとつの指標と考えられる。この観点から、ここでは雨水管路網のエネルギー損失最小化を設計の最適性規準とする。設計変数にはエネルギー損失に関与する重要な設計因子として管径 D_i およびマンホール径 b_i を選ぶ。後述するようにエネルギー損失に影響を及ぼす管勾配 S_{L_i} をも同時に設計変数とすると取扱いが煩雑な2目的問題となるので、ここでは管勾配 S_{L_i} を固定することによって次式のように設計基本式を定式化する。

固定値： S_{L_i}

設計変数： D, b

$$\text{目的関数： } E' = E'_F + E'_M \rightarrow \min. \quad (6.5a)$$

$$\text{制約条件： } V^L \leq V_i \leq V^U \quad (i=1,2,\dots,I) \quad (6.5b)$$

$$V_{m_i} \leq V_i \quad (i=1,2,\dots,I) \quad (6.5c)$$

$$V^U_i \leq V_i \quad (\in \text{起点要素を除く要素番号}) \quad (6.5d)$$

$$\text{管路網} \in \text{適合管路網} \quad (6.5e)$$

$$D_i \in \text{管径の規格値} \quad (i=1,2,\dots,I) \quad (6.5f)$$

$$b_i \in \text{マンホール径の規格値} \quad (i=1,2,\dots,I) \quad (6.5g)$$

ただし、 $D = \{D_1, D_2, \dots, D_I\}$, $b = \{b_1, b_2, \dots, b_I\}$, $S_L = \{S_{L_1}, S_{L_2}, \dots, S_{L_I}\}$,

$$V_{m_i} = R_i^{2/3} S_{L_i}^{-1/2} / n_i \quad (\text{マンシングの式})$$

ここに、 S_{L_i} は要素 i の管勾配、 V_i は要素 i の管流速、 V^U 、 V^L は管流速の上・下限値、 V_{m_i} は要素 i の満管流れを保証する流速、 V^U_i は要素 i の上流要素の管流速、 R_i は要素 i の管の径深、 n_i は要素 i の管の粗度係数である。なお、(6.5b)式は管流速の上下限値制約¹¹⁾を、(6.5c)式は満管流れを保証する制約を、(6.5d)式は要素 i の管流速が上流要素のそれを下回らないという制約¹¹⁾を、それぞれ表している。

次に、(6.5e, f, g)式の意味を表-6.1を用いて具体的に説明する。本章で対象とする円形マンホールは、内径90cmの1号マンホールから30cm刻みで2号、3号および4号マンホール（内径180cm）が規格化されており、それぞれに接続可能な適合管径が接続形態との関係で定められている。管径も表-6.1に示すように内径25～150cmに離散的に15種類が規格化されている。このため、ある管がとり得る管径は、その上流および下流マンホール号数と下流マンホールへの接続形態によって表-6.1に○で示すもののいずれかでなければな

らない。また、起点マンホールには通常1号（内径90cm）を使用する。全管路網にわたってマンホール径と管径がこの適合条件を満足するものを適合管路網と表現する。結局、(6.5)式はこれらの制約条件をすべて満足したうえで、(6.5a)式に示す全エネルギー損失を最小とするような離散的な設計変数D、bを求める組合せ最適化問題である。

表-6.1 上・下流マンホール号数と下流マンホール接続形態による適合管径

下流 接続 形態	上流 下流 → 号数 号数	管径 (cm)												備 考			
		25	30	35	40	45	50	60	70	80	90	100	110		120	135	150
中 間 点	1 → 1	○	○	○	○	○	○	○									
	1 → 2	○	○	○	○	○	○	○									
	1 → 3							○									
	1 → 4																→適合管径なし
	2 → 1	○	○	○	○	○	○	○									
	2 → 2	○	○	○	○	○	○	○	○	○							
	2 → 3							○	○	○	○						
	2 → 4										○						
	3 → 1							○									
	3 → 2							○	○	○	○						
	3 → 3							○	○	○	○	○	○				
	3 → 4										○	○	○	○			
	4 → 1																→適合管径なし
	4 → 2										○						
	4 → 3										○	○	○	○			
	4 → 4										○	○	○	○	○	○	
会 合 点	1 → 1	○	○	○	○	○											
	1 → 2	○	○	○	○	○	○	○									
	1 → 3							○									
	1 → 4															→適合管径なし	
	2 → 1	○	○	○	○	○											
	2 → 2	○	○	○	○	○	○	○									
	2 → 3							○	○	○							
	2 → 4										○						
	3 → 1															→適合管径なし	
	3 → 2							○									
	3 → 3							○	○	○							
	3 → 4										○						
	4 → 1															→適合管径なし	
	4 → 2															→適合管径なし	
	4 → 3															→適合管径なし	
	4 → 4										○						
吐 き 口	1 → 5	○	○	○	○	○	○	○									
	2 → 5	○	○	○	○	○	○	○	○	○							
	3 → 5							○	○	○	○	○	○	○	○		
	4 → 5									○	○	○	○	○	○		

マンホール号数1~4の内径はそれぞれ90,120,150,180cmで、下流号数=5は吐き口を意味する。

3.2 遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm) の概要

3.2.1 単純GAについて

遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm) は生物の進化の過程をヒントに多様な親世代の形質を選択、淘汰および交配により子世代へ伝達させ、準最適解 (あるいは真の最適解) を求める方法である。すなわち、変数 X を個体の遺伝子、 $f(X)$ を環境との適応度と考え、低い適応度をもつ個体を淘汰して消滅させ、高い適応度をもつ個体を増殖させ、親の形質を継承した遺伝子をもつ子孫の個体を生成する世代交代シミュレーションを実行して最終的に非常に高い適応度の個体を求める手法である。単純GAは、適応度比例戦略による選択・淘汰と単純 (1点) 交叉を用いる点でGAの最も基本的なアルゴリズムであり、一般的によく用いられる手法であるが下記に示す欠点も挙げられる。

- ① 個体数が少ない場合、単純GAを繰り返していくと線列 (遺伝子) の多様性がなくなり、同一の線列を持つ個体が増大する可能性が高い。個体数が多い場合、解の改良速度が総じて遅く、計算効率が問題となる。
- ② 最適性順位の高い個体が交配によって消滅することがあり、世代数を重ねることが必ずしも解の改良には直結しない。

3.2.2 交配個体選択GA (scs GA) について

ここでは、前述したような単純GAの欠点を克服するために三原ら¹²⁾によって開発された交配個体選択GA (scs GA) について簡単に説明する。多くの動物種で形態的にも行動上にも大きな雌雄差がある。一方の性 (たいてい雄だが) の個体は交尾するために同姓間で競合し、他方の性の個体はその競合者の中から交尾の相手を選ぶ。この概念を導入することにより、GAの信頼性を向上させることが期待できる。しかし、実際の問題では、各個体には性別が無く交配システムに直接導入することは困難である。このため、各個体に性別を表わす新たな性質を付加するか、性別に似た方策を取る必要がある。そこで、最適性順位が高い少数の個体を交配個体として選択し、そうでない個体群を被交配個体 (交配個体と区別) に区分し、交配個体と被交配個体の確実な交配により次世代集団を構成する交配システムを交配個体選択GAと呼んでいる。この交配個体選択GA (scs GA) の処理手順は以下の通りである。

① GA的パラメーター (人口数 N_p , 交配個体数 N_s , 突然変異発生確率 P_m , 計算世代数 N_G) の設定
後述する雨水管路網の最適設計では、GA的パラメーターは以下のことを表わしている。

- ・ 人口数 N_p : 雨水管路網全体をひとつの個体として考えたときの雨水管路網の初期設定個体数
- ・ 交配個体数 N_s : 雨水管路網として設定された個体数の中で適応関数値の高い (雨水管路網全体のエネルギー損失が小さい (6.5a) 式参照) 個体数
- ・ 突然変異発生確率 P_m : ある雨水管路網が別の雨水管路網に突然変異するときの確率
- ・ 計算世代数 N_G : 雨水管路網を改良する際の繰り返し計算回数

② N_p 個の初期世代個体群のランダム生成

③適応関数値の算出

④交配個体の選択と交配選択確率の算出

scsGA では、全 N_p 個の個体群のうち良好な適応関数値をもつ少数 (N_s 個) の個体を交配個体として選択し、他を被交配個体として類別する。ある個体 n は、その適応関数値 f_n に応じた交配選択確率 $P_n = f_n / f_t$ を与えられる。 P_n 値はその個体が有する性質の次世代への伝わりやすさを示す。ここに f_t は N_s 個の交配個体が全 N_p 個の個体群の第 $1 \sim N_s$ 番目となるように並替えられているとして次のように算定される。

- i) 個体 n が交配個体の場合 $f_t = \sum f_{t_i} \quad (i=1,2,\dots,N_s)$
- ii) 個体 n が被交配個体の場合 $f_t = \sum f_{t_i} \quad (i=1+N_s,\dots,N_p)$

⑤単純交叉による次世代線列の生成

親個体として交配個体と被交配個体が 1 個ずつ交配選択確率 P_n によるルーレットゲームで選ばれる。これらの間で「確実な」ビット交換がランダムに決定された交叉位置で行われ、新たな子 (次世代) 個体が形成されて、1 対の交叉オペレーションが完了する。この交叉オペレーションは子個体数が $(N_p - N_s)$ 個になるまで繰返され、 N_s 個については交配個体がそのまま次世代個体として残存する。

⑥突然変異と繰返し

N_p 個の次世代線列に対して突然変異確率により突然変異の発生を判定する。突然変異を行う場合には、ランダムに決定された 1 つのビット値のみを $0 \rightarrow 1$ にもしくは $1 \rightarrow 0$ に変更する。この突然変異オペレーティングが終了し、次世代個体群が確定した後③へ戻る。

⑦最良解の判定

以上の一連のオペレーティングを N_G 回実行し、全世代における最大の評価関数値を有する個体を最良解とする。

3.3 GA による最適解探索と解特性分析

(6.5) 式に示すエネルギー損失最小化による管径・マンホール径決定問題の解を交配個体選択 GA (scs GA) ¹⁴⁾ を用いて求めた。解法として用いた交配個体選択 GA (SCS GA) は離散的最適構造設計問題の解法 ¹⁴⁻¹⁷⁾ として開発されたものであるが、原理的には組合せ最適化問題全般へ適用可能である ^{18), 19)}。その結果の一例として、管勾配 S_{L1} を $S_{L1-15} = 5.88\%$ 、 $S_{L16-20} = 5.00\%$ 、管流速の制限値を一般値 $(V^L, V^U) = (0.8, 3.0) \text{ m/s}$ 、起点マンホールからの雨水流入量 $Q_m = 0.1 \text{ m}^3/\text{s}$ に設定した場合の可能解の推移を表-6.2 に示す。固定して用いた GA 的パラメータは、人口数 $N_p = 1,000$ 、突然変異発生確率 $P_m = 0.3$ 、計算世代数 $N_G = 300$ であり、交配個体数 N_s を 10 刻みに $100 \sim 200$ と変化させた 11 通りの計算結果から目的関数値が最小の解を最適解と判定した。表-6.2 には、目的関数として (6.5a) 式をそのまま用いる「マンホール損失を考慮する場合 (Case I)」と、(6.5a) 式の $E'_M = 0$ とおいた「マンホール損失を考慮しない場合 (Case II)」の 2 ケースを併せて示している。表の最左欄から計算過程において可能解が出現・更新された世代数、全損失、管摩擦損失、マンホール損失を順に示し、各可能解の設計変数値をマンホール号数と管径 (cm) で表している。ただし、Case II の全損失およびマンホール損失は参考として示している。

まず、Case II では 40 世代までは最良解でも (6.5b ~ e) 式の制約を満足しない不能解であり、41 世代目に初めて可能解が出現し、88 世代目に出現した解が最適解と判定された。この間、解が更新されているように

見えるが、実際にはマンホール径の値が変化しているだけで管径値はまったく変化しないため、このケースにおける目的関数値である管摩擦損失の値は全然変化せず、同値の解が得られているに過ぎないことがわかる。この現象は88世代以降にも観察された。一方、Case I では24世代目で可能解が出現すると比較的頻繁な解の更新が行われ、97世代目の解が最適解と判定された。その設計変数値の変化に着目すると、管径は徐々に大きくなる方向に変化しており、マンホール径は逆に小さくなる傾向が認められる。特に32世代で管径値が $D_{1-15} = 30\text{cm}$ 、 $D_{16-20} = 40\text{cm}$ に収束した以降の2号マンホール（内径120cm）の個数が $8 \rightarrow 8 \rightarrow 6 \rightarrow 5 \rightarrow 4 \rightarrow 2 \rightarrow 2 \rightarrow 1 \rightarrow 0$ と順次少なくなっていることに顕著であり、Case II に比較してマンホール径を特定できる点においてマンホール損失を考慮する重要な意義が認められる。その他の設計条件による数値計算においても同様の傾向を確認することができた。なお、前述したように、ここでは動水勾配線あるいはエネルギー線の議論はしないが、参考までに、Case I の97世代目の最適解のエネルギー線の計算結果（マンホール No.1 ~ 10、No.16 ~ 20）を図-6.3 に示す。

表-6.2 管勾配固定 ($S_{L1-15} = 5.88\text{‰}$, $S_{L16-20} = 5.00\text{‰}$) のときの scs GA による可能解の出現状況

	要素番号				マンホール号数																管径(cm)									
	①	②	③	④	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	1~15	16	17	18	19	20
Case I	24	9.244	8.064	1.180	1	1	1	1	2	1	2	1	2	1	1	1	2	2	1	2	1	2	1	1	30	40	35	35	35	30
	26	8.285	7.202	1.083	1	2	1	1	2	1	2	1	2	1	1	1	2	2	1	2	1	2	1	1	30	40	40	40	40	30
	27	7.549	6.483	1.066	1	1	1	2	2	2	2	2	2	1	1	1	2	2	1	1	2	1	2	2	30	40	40	40	40	35
	28	7.516	6.483	1.033	1	1	1	2	2	1	2	1	1	2	1	1	2	2	1	1	2	1	1	1	30	40	40	40	40	35
	29	7.506	6.483	1.023	1	1	1	1	2	1	2	1	2	1	1	1	2	2	1	1	2	1	1	1	30	40	40	40	40	35
	30	7.505	6.483	1.022	1	1	1	1	2	2	1	1	2	1	1	1	2	2	1	1	2	1	2	1	30	40	40	40	40	35
	32	7.276	6.196	1.080	1	2	1	1	2	1	2	1	2	1	1	1	2	2	1	2	1	2	1	1	30	40	40	40	40	40
	34	7.235	6.196	1.039	1	2	1	1	2	1	2	1	2	1	1	1	2	2	1	1	2	1	1	2	30	40	40	40	40	40
	35	7.214	6.196	1.019	1	2	1	1	2	1	2	1	2	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	30	40	40	40	40	40
	36	7.203	6.196	1.007	1	2	1	1	2	1	2	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	30	40	40	40	40	40
	37	7.182	6.196	0.986	1	2	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	30	40	40	40	40	40
	38	7.171	6.196	0.975	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	30	40	40	40	40	40
	42	7.161	6.196	0.965	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	30	40	40	40	40	40
	75	7.156	6.196	0.960	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	30	40	40	40	40	40
97	7.150	6.196	0.954	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	30	40	40	40	40	40	
Case II	41	7.811	6.770	1.041	1	1	2	2	2	1	1	2	1	2	1	2	2	1	2	1	1	2	1	2	30	40	40	40	35	35
	42	7.874	6.770	1.104	1	1	1	2	2	2	1	1	2	1	1	2	2	1	2	1	2	1	1	2	30	40	40	40	35	35
	43	7.892	6.770	1.122	1	1	1	1	2	2	2	1	1	2	1	1	1	2	1	2	2	1	2	1	30	40	40	40	35	35
	44	7.874	6.770	1.104	1	1	1	1	1	2	2	2	1	1	1	2	1	1	1	2	1	2	2	1	30	40	40	40	35	35
	88	?	6.770	?	(さまざまな1と2の組合せ)																30	40	40	40	35	35				
	88	7.254	6.196	1.058	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	2	1	2	2	2	1	1	2	30	40	40	40	40	40
	93	7.204	6.196	1.008	1	1	1	1	1	2	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	1	1	1	1	30	40	40	40	40	40
	98	7.264	6.196	1.068	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	2	1	2	2	2	2	1	2	30	40	40	40	40	40
	∴	?	6.196	?	(さまざまな1と2の組合せ)																30	40	40	40	40	40				

①: 計算世代数、②: 全損失(m)、③: 管摩擦損失(m)、④: マンホール損失(m)

Case I : マンホール損失を考慮した場合($N_s=120$)、Case II : マンホール損失を考慮しない場合($N_s=200$)

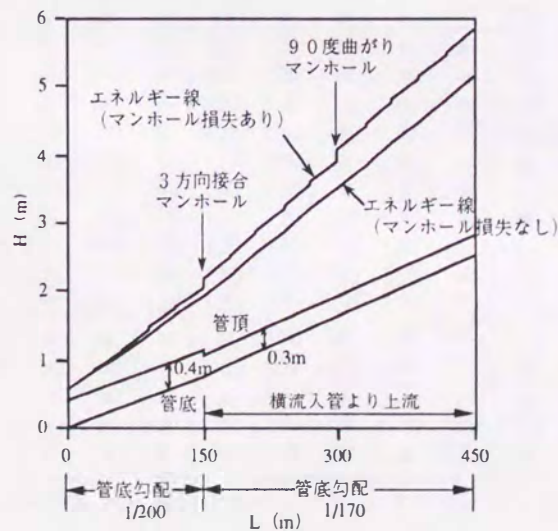


図-6.3 エネルギー線の計算結果の一例 (Case I, 97 世代目)

以上に述べた解の傾向を分析した結果、マンホール損失を考慮したエネルギー損失最小化による最適解における各設計変数値の解特性を以下のようにまとめることができた。

特性1) $D_k = \max [D_k \in V_k^* \leq V_k \leq V^u]$

ただし、i) 起点要素の場合 $V_k^* = \max (V^L, V_{m_i})$,

ii) その他の場合 $V_k^* = \max (V^L, V_{m_i}, V^u)$

特性2) $b_k = 90\text{cm}$ (起点要素の場合),

$b_k =$ 上流管の接続形態および上・下流管径による表-6.3の値 (その他の場合)

ここに、 D_k は管径規格値のk番目 ($k = 1, 2, \dots, 15$)のデータである。なお、表-6.3はあるマンホールの上流管の管径および接続形態と下流管径から配置可能なマンホール径を抽出し、それらの中で最も小さな値のマンホールを選択したものである。マンホール径の増大につれて増大傾向を示すマンホール損失を極力小さく抑えるという意図で構成されたものである。

表-6.3 上流管の接続形態と上・下流管径 (cm) による最小マンホール径 (cm)

接続 形態	下流 管径	上流管径														
		25	30	35	40	45	50	60	70	80	90	100	110	120	135	150
中間 点 接 続	25	90	90	90	90	90	90	90	120	120	120	×	×	×	×	×
	30	90	90	90	90	90	90	90	120	120	120	×	×	×	×	×
	35	90	90	90	90	90	90	90	120	120	120	×	×	×	×	×
	40	90	90	90	90	90	90	90	120	120	120	×	×	×	×	×
	45	90	90	90	90	90	90	90	120	120	120	×	×	×	×	×
	50	90	90	90	90	90	90	90	120	120	120	×	×	×	×	×
	60	90	90	90	90	90	90	90	120	120	120	150	150	150	×	×
	70	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	150	150	150	×	×
	80	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	150	150	150	×	×
	90	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	150	150	150	180	180
	100	×	×	×	×	×	×	×	150	150	150	150	150	150	180	180
	110	×	×	×	×	×	×	×	150	150	150	150	150	150	180	180
	120	×	×	×	×	×	×	×	150	150	150	150	150	150	180	180
	135	×	×	×	×	×	×	×	×	×	180	180	180	180	180	180
	150	×	×	×	×	×	×	×	×	×	180	180	180	180	180	180
会 合 点 接 続	25	90	90	90	90	90	120	120	×	×	×	×	×	×	×	
	30	90	90	90	90	90	120	120	×	×	×	×	×	×	×	
	35	90	90	90	90	90	120	120	×	×	×	×	×	×	×	
	40	90	90	90	90	90	120	120	×	×	×	×	×	×	×	
	45	90	90	90	90	90	120	120	×	×	×	×	×	×	×	
	50	90	90	90	90	90	120	120	×	×	×	×	×	×	×	
	60	90	90	90	90	90	120	120	150	150	×	×	×	×	×	
	70	120	120	120	120	120	120	120	150	150	×	×	×	×	×	
	80	120	120	120	120	120	120	120	150	150	×	×	×	×	×	
	90	120	120	120	120	120	120	120	150	150	180	×	×	×	×	
	100	×	×	×	×	×	×	×	150	150	180	×	×	×	×	
	110	×	×	×	×	×	×	×	150	150	180	×	×	×	×	
	120	×	×	×	×	×	×	×	150	150	180	×	×	×	×	
	135	×	×	×	×	×	×	×	×	×	180	×	×	×	×	
	150	×	×	×	×	×	×	×	×	×	180	×	×	×	×	

マンホール径=×は適合するマンホール径がないことを示す。

3.4 解特性に基づく管径・マンホール径の決定手法

3.3で示した解特性に着目すると、マンホール損失を考慮したエネルギー損失最小化による最適な管径・マンホール径は以下のような手順で決定することができる。この手順による解法を以下では“解特性法”と呼ぶ。

- ①設計条件の把握（管勾配 S_L は固定）、流量計算
- ②特性1)による管径 D の決定
- ③管径 D のいずれかが未決定の場合には“管径不適合”で計算終了、そうでない場合には④へ
- ④特性2)によるマンホール径 b の決定
- ⑤マンホール径 b のいずれかが表-6.3に示す‘×’の場合には“マンホール径不適合”で計算終了、そうでない場合には⑥へ
- ⑥決定された D 、 b に対する(6.5b~d)式の制約条件値を算出し、制約条件をすべて満足していることを確認した上で最適解の出力

3.5 解特性法による数値計算および考察

3.3に述べたscs GAによる計算例と同様に管勾配 S_{L1} を $S_{L1-15} = 5.88\%$ 、 $S_{L16-20} = 5.00\%$ と固定し、起点マンホールからの雨水流入量 Q_{in} (m^3/s)を0.10から増分量0.01で変化させたときの解特性法による計算結果を表-6.4に示す。管流速の制限値には、一般値(V^L, V^U) = (0.8, 3.0) m/s と推奨値(V^L, V^U) = (1.0, 2.0) m/s の2ケースを考慮した。表-6.4から Q_{in} が大きくなると管径・マンホール径とも当然のことながら全般に大きくなっており、定性的な意味で解特性法の妥当性を確認することができた。ただしこの傾向も、管流速の制限値が一般値の場合でも $Q_{in} = 0.70$ までである。それ以上の流入量に対しては、無条件に1号マンホールが配置される起点マンホールに接続可能な管の最大管径60cmでは制約を満足することができず適合管路網が形成されない。管流速の制限値が推奨値の場合には、 $Q_{in} = 0.50$ まで解が求められたが、 $Q_{in} = 0.20 \sim 0.21$ および $0.29 \sim 0.47$ では $V_j \leq V^U$ の制約により“管径不適合”となり、解の連続性が確保されないことがわかる。

表-6.4 解特性によるエネルギー損失最小化基準の設計値

$Q_{in}(m^3/sec)$	管径(cm)		マンホール径(cm)								管流速の制限値が推奨値の場合の解	
	1~15	16~20	1	2~5	6	7~10	11	12~15	16	17~20		
0.10~0.11	30	40	90	90	90	90	90	90	90	90	90	一般値と同一の解
0.12~0.15	35	45	90	90	90	90	90	90	90	90	90	〃
0.16~0.19	40	50	90	90	90	90	90	90	90	90	90	〃
0.20~0.21	40	50	90	90	90	90	90	90	90	90	90	管径不適合で解なし
0.22~0.28	45	60	90	90	90	90	90	90	90	90	90	一般値と同一の解
0.29~0.47	50	60	90	90	120	90	90	90	120	90	90	管径不適合で解なし
0.48~0.50	60	80	90	90	120	90	90	90	120	120	120	一般値と同一の解
0.51~0.70	60	80	90	90	120	90	90	90	120	120	120	管径不適合で解なし
0.71~	管流速の制限値が一般値でも適合管路網が形成されず解なし											

図-6.4は、横軸に流入量 Q_{in} をとり、得られた設計値の全損失、管摩擦損失およびマンホール損失との関係を示す。全般に管摩擦損失の方がマンホール損失に比較して大きいことがわかる。しかし Q_{in} が増大すると、全損失に対するマンホール損失の比率は徐々に大きくなり、 $Q_{in} \geq 0.48$ では20%以上になるなどマンホール損失が決して無視できないことがわかる。また、設計値 D 、 b が同一のとき、 Q_{in} が増えると管摩擦損失およびマンホール損失はともに増加傾向にあり、結果的に全損失も増大している。しかし Q_{in} がわずかに増加して設計値が変化すると全損失は激減している。管路網の設計においてエネルギー損失を考慮する場合には適切な流入量の設定が重要であることを再認識させられる。同時に、マンホールや管路の適切な平面配置による流入量コントロールの可能性も読みとれる。つまり通常の管路網では、2.1の仮定条件の設定で述べたようにすべてのマンホールに雨水が流入し、その流入量は各マンホールの集水面積、流出係数および降雨強度に依存する。一方、本章で対象としているようなさほど広くない集水域では降雨強度の地域間変化はほぼ無視できるので、流出係数を一定と仮定すると各マンホールへの流入量は集水面積のみの関数と捉えることができる。したがって、マンホールの平面配置を適切にコントロールすれば各マンホールへの集水面積、ひいては流入量をコントロールできることになる。このテーマの追求は、しかし、本章のテーマからそれることになるので今後の課題としたい。

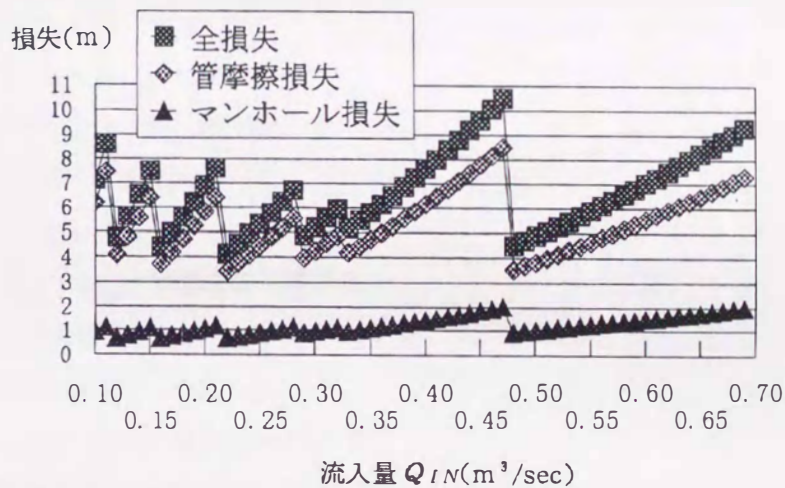


図-6.4 流入量と損失の関係

第4節 費用最小化による管勾配の決定

4.1 管勾配を設計変数とする設計基本式の定式化

前節では管勾配を固定して取扱ったが、実際の管路網設計ではこの管勾配の適切な設定も重要である。また、本章で用いているscs GAに限らずGAによる解法一般では設計変数の増加・減少などの変更には線列構成の変更で容易に対処することができる。そこで、(6.5)式において管勾配 S_{L_i} をも設計変数として数値実験を試みた。しかし、事前に予想した通りの結果しか得ることができなかった。すなわち、管摩擦損失の方がマンホール損失より全般に大きな値であることから、マンホール径 b_i が若干大きくなることがあってもできるだけ各管径 D_i を大きく設定して管摩擦損失を小さく抑える方向に解が改良され、そのために管勾配 S_{L_i} の最適値は与えた離散値データの最小値に収束した。(6.5)式の設計基本式では管勾配 S_{L_i} を大きくする要因が全く存在しないためである。その要因のひとつとして、また実際の管路網設計ではより重要と考えられるファクターとして、ここでは費用関数 C の導入を図り、設計基本式を2目的問題として次式のように定式化する。

設計変数： D, b, S_L

$$\text{目的関数： } E' = E'_F + E'_M \rightarrow \min. \quad (6.6a)$$

$$C = \sum b_i^2 \Delta_i \quad (i=1,2,\dots,I) \rightarrow \min. \quad (6.6b)$$

$$\text{制約条件： } V^L \leq V_i \leq V^U \quad (i=1,2,\dots,I) \quad (6.6c)$$

$$V_{m,i} \leq V_i \quad (i=1,2,\dots,I) \quad (6.6d)$$

$$V^U_i \leq V_i \quad (\in \text{起点要素を除く要素番号}) \quad (6.6e)$$

$$\text{管路網} \in \text{適合管路網} \quad (6.6f)$$

$$D_i \in \text{管径の規格値} \quad (i=1,2,\dots,I) \quad (6.6g)$$

$$b_i \in \text{マンホール径の規格値} \quad (i=1,2,\dots,I) \quad (6.6h)$$

$$\Delta_i \geq H_a + D_{\max} \quad (i=1,2,\dots,I) \quad (6.6i)$$

ただし、 $\Delta_i = H_i - Z_i$, $D_{\max} = \min [D_k \geq \{(4/\pi)(Q_{\max}/V^U)\}^{0.5}]$, $Q_{\max} = \max [Q_i]$

ここに、 H_i は要素 i のマンホール直上の地表標高、 Z_i は要素 i のマンホールの底面標高、 H_a は許容土被り厚（ここでは1.2 mに固定）、 D_k は管径規格値の k 番目（ $k=1,2,\dots,15$ ）のデータある。

ここで、(6.6)式は先述の(6.5)式に(6.6b)式と(6.6i)式が付加されたものである。(6.6i)式は地表標高とマンホール底面標高の差 Δ_i が D_{\max} 値と許容土被り厚 H_a の和以上でなければならないという埋設深さに関する制約であり、(6.6b)式は採用した費用関数で最小化される目的関数である。そもそも雨水管路網の施工費用には種々雑多なものが含まれるため、費用関数としての一般的な定式化は困難と考えられる¹⁰⁾。そこで、ここでは管勾配 S_{L_i} を大きな値に変化させる要因となり、ある程度実際の意味合いが明確で、しかも定式化が容易なものとしてマンホール敷設のための掘削土量に注目して(6.6b)式に示す費用関数を設定した。

さて、(6.6)式は離散的2目的最適化問題であり、しかもその2つの目的の物理的意味は全く異なる。このような問題の解法として満足化トレードオフ法などの適用¹⁷⁾も考えられるが、その取扱いはかなり煩雑にな

ることが予想される。よってここでは、“解特性法”を導入して解法の簡便化を図る。解特性法は先に示したように、ある管勾配 S_L に対して適合管路網が構成可能であるとき、全損失を最小にする管径 D ・マンホール径 b を決定することができる。したがって(6.6)式の解探索にあたり適切な S_L を探索することが第一義的(明示的)であり、 D 、 b の探索は副次的(暗黙的)と区分して考えることができる。この観点から(6.6)式を見直すと(6.6a)式、(6.6c~e)式および(6.6g,h)式は解特性法の実行により考慮されていると解釈でき、残された問題は次のような単一目的問題として整理されることになる。

明示的な設計変数： S_L

暗黙的な設計変数： D 、 b

$$\text{目的関数： } C = \sum b_i^2 \Delta_i \quad (i=1,2,\dots,I) \rightarrow \min. \quad (6.7a)$$

$$\text{制約条件： 管路網} \in \text{適合管路網} \quad (6.7b)$$

$$\Delta_i \geq H_a + D_{\max} \quad (i=1,2,\dots,I) \quad (6.7c)$$

$$\{D, b\} = \text{解特性法による値} \quad (6.7d)$$

4.2 GA適用のための定式化

(6.7)式は連続変数 S_L を設計変数とする単一目的問題であるので動的計画法などの数理計画法を基礎とする最適化手法の適用も可能である。しかし、文献11)に提示した方法の活用と今後の拡張性を勘案してscs GAの適用を試みる。本章で対象としている設計問題のように、その解が設計者の意志決定の補助を果たすような場合には、単に問題の最適解を求めるに留まらず、最適化過程において比較的良好な解をも探索するという性質を有するGAが適しているからである。GAでは各線列の優劣を判定するための評価関数を無制約最大化形式で定義する必要がある。その方法は種々提案されているが、(6.7)式に対する評価関数 F を簡明さの観点から文献11)の方法と同様に、制約条件がすべて満足されているか否かによって次式のように使い分ける方法を採用する。

制約条件がすべて満足されるとき

$$F = F_0 - C \quad (6.8a)$$

制約条件のいずれかが満足されないとき

$$F = F'_0 - \gamma_1 N_1 - \gamma_2 N_2 \quad (6.8b)$$

ここに、 F_0 は制約条件がすべて満足されるとき基準値、 F'_0 は制約条件のいずれかが満足されないときの基準値($\leq F_0$)、 N_1 、 γ_1 は(6.7b)式が満足されない場合の不適合管または不適合マンホールの個数とペナルティー係数、 N_2 、 γ_2 は(6.7c)式を満足しない要素数とペナルティー係数である。また、交配・突然変異といったGAオペレーションの直接対象となる線列には、単純に各 S_{L_i} を要素番号順に並べたbinary線列全体をgray線列に変換して用いた¹¹⁾。

4.3 数値実験および考察

提案法の解法特性を観察するため、すべての管勾配 S_{L_i} の離散値データを1~8% (2進数表示で3ビット) と与え、管流速の制限値は一般値とし、表-6.5に示す3ケースについて数値実験を行った。ここに、 $H = |H_1, H_2, \dots, H_n|$ である。解探索に用いたGA的パラメータは3.3と同様の値、 $N_p = 1,000$ 、 $P_m = 0.3$ 、 $N_G = 300$ 、 $N_S = 10$ 刻みに100~200とした。また評価関数値の算出に用いた(6.8)式の定数は $F_0 = 100.0$ 、 $F'_0 = 50.0$ 、 $\gamma_1 = 5.0$ 、 $\gamma_2 = 2.0$ とした。

表-6.5 計算ケース

	流入量 $Q_{In}(m^3/sec)$	地表標高	
Case I	0.35	H ₁	$H1 = 3.95, 3.80, 3.65, 3.50, 3.35, 3.20, 3.20, 3.20, 3.20, 3.20, 3.95, 3.80, 3.65, 3.50, 3.35, 3.20, 3.10, 3.00, 2.90, 2.80 $ (m)
Case II	0.45	H ₁	
Case III	0.35	H ₂	

4.3.1 以後の比較のための基準設計および解法特性の検討

表-6.6にCase Iの解の更新状況を更新順に示す。すべての解においてマンホール径は同じ組合せ ($b_{16} = b_{16} = 120cm$ 、他はすべて90cm)であったが、管径Dには6種類の組合せ、管勾配 S_L には様々な組合せが出現した。管径Dの6種類の組合せ①~⑥を表-6.6の下段に管径の解区分として示す。表には最左欄から解の更新があった世代数、C値、管径Dの区分番号(○数字)および要素番号順の管勾配 S_L を並べて表示している。

1世代目で可能解が出現し、112世代までは比較的小さな世代間隔で順調に解の更新が行われている。その次の更新まで123世代の間隔が空き、その直後の248世代に最適解が出現している。ここに、最適解の判断は、別途Spread Sheet上に構築した管勾配 S_L を入力すると(6.7c)式の制約条件値と(6.7a)式のC値を出力するだけの試行錯誤的設計システムを用いて、248世代目の解をベースに種々の管勾配 S_L について検討を行った結果、ベースとした解よりも良好な解が得られなかったことに基づくものである。解の停滞が始まる112世代目のC値と最適解のC値がわずか0.4%しか変わらないこと、全組合せ総数 $8^{20} \approx 1.15 \times 10^{15}$ に対してscs GAの総計算回数=人口数1000×計算世代数300×11通り $= 3.3 \times 10^6$ ですむことを勘案すると、この種の組合せ最適化問題に対するscs GAの最適解探索能力は評価できる。ただし、解の停滞が100世代以上もあることから一層の効率化・強化を可能にする検討が必要である。解の変化状況を詳細に見ると、75世代以降の解はわずかに管勾配 S_L の組合せが異なるだけでほぼ同等の解と評価される。ここで用いたscs GAのみならずGAによる解法全般ではこのように最適解に至るまでに他の可能解が容易に得られ、設計のような技術者の判断が重要な場面においてその意志決定のための資料を提供できる点は他の方法に見られない特長である。

Case Iの最適解を模式的に図-6.5に示す。選択された管勾配 S_{L_i} の分布に着目すると、上流部においては地表勾配と同じ5%が多く選択され、要素番号 $i = 6 \sim 10$ の水平部では与えた離散値データの最小値1%が多く、 $i = 16 \sim 20$ の下流部では逆に離散値データの最大値8%が多く選択されていることがわかる。一方、

埋設深さ Δ_i に注目すると $H_a + D_{\max} = 1.2 + 0.6 = 1.8$ m に対してクリティカルな要素は $i = 1 \sim 6$ および $11 \sim 13$ と 9 要素 (その Δ_i 値 = 1.82 m) あり、そのすべてが上流部に集中している。つまり、下流部の埋設深さをある程度犠牲にしても上流部の埋設深さをできるだけ小さくするように管勾配 S_{L_i} が決定されていることがわかる。なお、 $i = 10, 13 \sim 16$ の S_{L_i} が他の要素と異なる傾向を示しているのは、 $i = 16$ の合流点マンホールにおける管底接合のためと考えられ、このような微妙な組合せを巧みに発見することができる scs G A の特性を立証している。

表-6.6 Case I の解の更新状況

世代	C値 (m ³)	管径	管勾配 (%)																			
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	38.1000	①	8	2	4	3	8	1	3	5	2	1	8	2	3	6	6	7	2	7	6	8
2	37.8549	②	3	3	1	8	2	2	1	4	6	1	2	1	7	5	5	8	3	7	5	8
6	37.6119	③	5	4	3	8	2	2	1	4	6	1	2	1	7	5	5	8	3	7	5	8
7	37.3203	④	7	5	4	7	2	3	1	2	5	3	8	1	4	8	4	6	6	3	8	8
8	37.1367	④	2	3	1	2	5	1	4	7	1	1	8	1	8	7	7	6	8	5	5	8
10	36.9800	①	4	3	6	6	2	1	3	1	8	3	6	3	8	7	7	6	8	5	5	6
13	36.9342	①	7	5	7	2	8	1	1	2	5	3	6	7	5	8	8	8	1	7	8	6
14	36.6949	①	7	5	4	7	2	2	1	6	1	1	8	1	8	7	7	6	7	7	5	8
15	36.4563	⑤	8	3	4	7	3	1	4	4	3	2	2	8	6	8	5	8	4	4	8	8
16	36.4491	①	7	5	4	7	2	3	1	2	1	3	8	1	8	7	7	6	8	5	7	8
17	36.2781	①	8	3	6	5	3	3	3	1	1	1	4	5	1	5	8	8	5	8	7	8
19	36.2548	①	5	5	6	7	2	3	1	1	5	1	4	1	5	7	5	7	8	6	8	6
21	36.1889	⑤	8	2	4	7	2	2	1	4	1	6	3	5	7	8	8	8	4	6	6	8
23	35.9460	①	8	3	4	7	2	1	2	3	5	3	6	7	8	7	8	7	5	4	8	8
25	35.7191	①	7	5	4	7	2	2	1	6	1	1	8	1	8	7	7	6	7	7	8	7
28	35.6085	①	7	5	4	7	2	2	2	1	1	3	8	1	5	7	5	7	8	6	8	8
29	35.4573	⑤	7	5	4	7	2	2	1	4	1	2	2	8	6	5	8	8	5	8	7	8
35	35.4087	⑤	8	3	4	7	3	2	1	4	1	2	2	8	6	5	8	8	6	6	8	8
36	35.1225	⑤	5	5	7	4	3	1	1	4	1	2	2	8	6	5	8	8	5	8	8	8
43	35.0442	⑤	8	3	4	7	3	2	1	4	1	2	2	7	8	7	8	7	5	8	8	8
50	34.9767	⑤	4	5	6	4	5	1	1	4	1	2	2	8	6	5	8	8	5	8	8	8
53	34.9469	⑤	5	5	6	5	4	2	1	4	1	2	2	7	8	7	8	7	5	8	8	8
54	34.7877	①	5	2	5	5	5	2	1	1	1	3	6	8	6	5	8	8	8	6	8	8
59	34.6662	①	4	5	5	5	5	2	1	1	1	3	6	8	6	5	8	8	8	6	8	8
69	34.6419	①	5	5	5	5	5	2	1	1	1	3	6	8	6	5	8	8	8	6	8	8
74	34.6176	⑥	2	5	5	5	5	1	1	2	1	3	8	1	8	7	8	8	8	6	8	8
75	34.5447	①	5	5	5	5	5	1	1	2	1	3	8	1	8	7	8	8	8	6	8	8
79	34.5204	①	4	5	5	5	5	1	1	2	1	3	8	1	8	7	8	8	6	8	8	8
80	34.4961	①	5	5	5	5	5	1	1	2	1	3	8	1	8	7	8	8	6	8	8	8
86	34.4475	①	5	5	5	5	5	1	1	2	1	3	8	1	8	7	8	6	8	8	8	8
102	34.3503	①	4	5	5	5	5	1	1	2	1	3	5	5	8	7	8	6	8	8	8	8
107	34.3260	①	5	5	5	5	5	1	1	2	1	3	5	5	8	7	8	6	8	8	8	8
112	34.3017	①	5	5	5	5	5	1	1	2	1	3	5	5	7	8	8	6	8	8	8	8
235	34.2531	①	5	5	5	5	5	1	1	1	1	4	5	5	7	8	8	6	8	8	8	8
248	34.1613	①	5	5	5	5	5	1	1	1	1	3	5	5	7	8	8	6	8	8	8	8
管径の解区分	要素番号→		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	①		50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	60	60	60	60	60
	②		60	60	60	50	50	50	50	50	50	50	60	60	50	50	50	60	60	60	60	60
	③		50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	60	60	50	50	50	60	60	60	60	60
	④		60	60	60	60	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	60	60	60	60	60
	⑤		50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	60	50	50	50	50	60	60	60	60
⑥		60	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	60	60	60	60	60

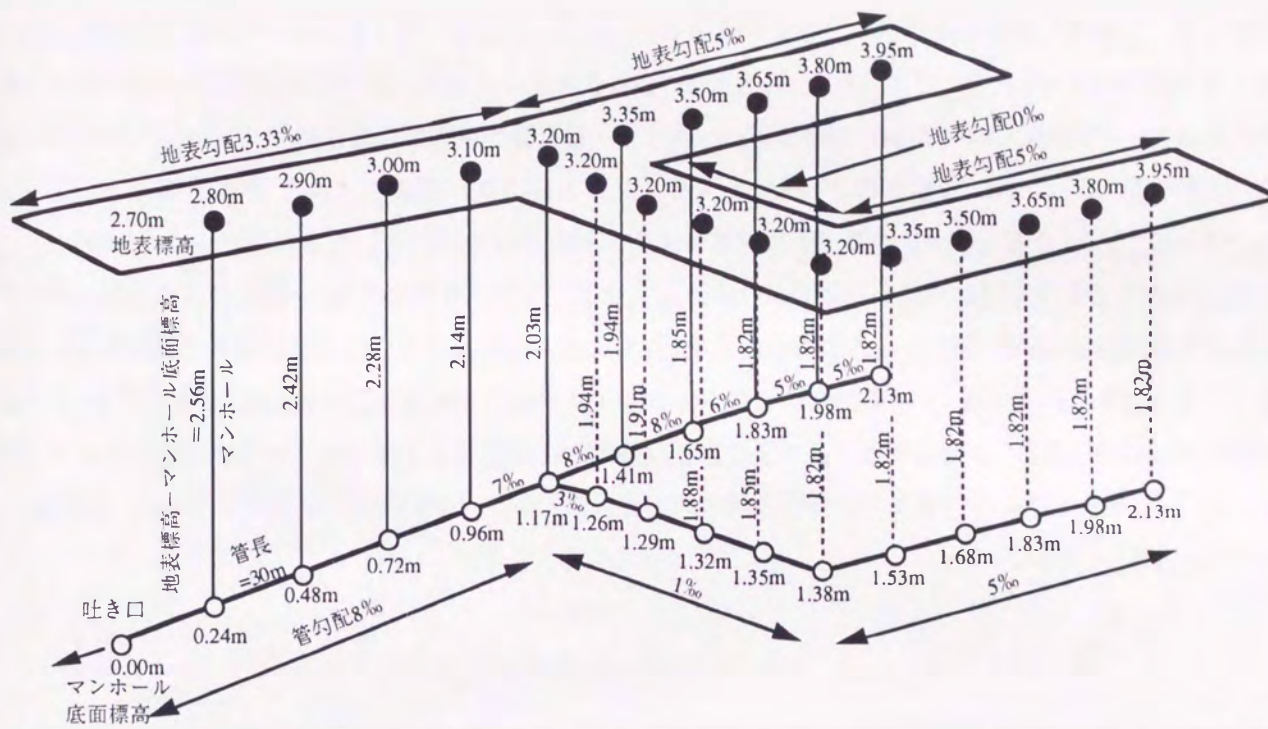


図-6.5 Case I の最適解の模式図

4.3.2 流入量 Q_{in} の影響

Case II の設計条件は、Case I と比べると流入量 Q_{in} のみが若干大きく、他の条件は同一であり、流入量の違いが解に及ぼす影響を検討するためのものである。 Q_{in} が大きいため $H_a + D_{max} = 1.2 + 0.7 = 1.9 \text{ m}$ も Case I より 0.1 m だけ大きい。得られた最適解の管径 D ・マンホール径 b を表-6.7 に、模式図を図-6.6 にそれぞれ示す。表-6.7 より管径は $D_{14,15}$ を除いて Case I より 1 ランク大きいものを選択されている。その結果、 $D_{16-20} = 70 \text{ cm}$ となったため b_{16-20} も Case I より 1 ランク大きな値が選択されている。また、 $D_{14,15}$ のみが Case I と同じ値であるのは図-6.6 に示すように $S_{L,14,15}$ が 8‰ と本計算例中では急な勾配を有するため $V_{m,i}$ が比較的大きな値として算定されたことに原因がある。一方、 $S_{L,i}$ の分布は Case I とほぼ同様の傾向を示している。 $H_a + D_{max}$ が 0.1 m 大きいことに対してはクリティカルな要素の埋設深さ Δ_i を 1.91 m とすること、および $i = 16$ の合流点マンホールにおける管底接合で柔軟に対応していることがわかる。また、本 Case の C 値 = 41.2713 は、Case I に比較して約 20.8% 大きく、流入量増大の影響がかなり大きいことがわかる。

表-6.7 Case II の最適解の管径 D 、マンホール径 b

要素番号	1~5	6	7~13	14,15	16~20
$D(\text{cm})$	60	60	60	50	70
$b(\text{cm})$	90	120	90	90	120

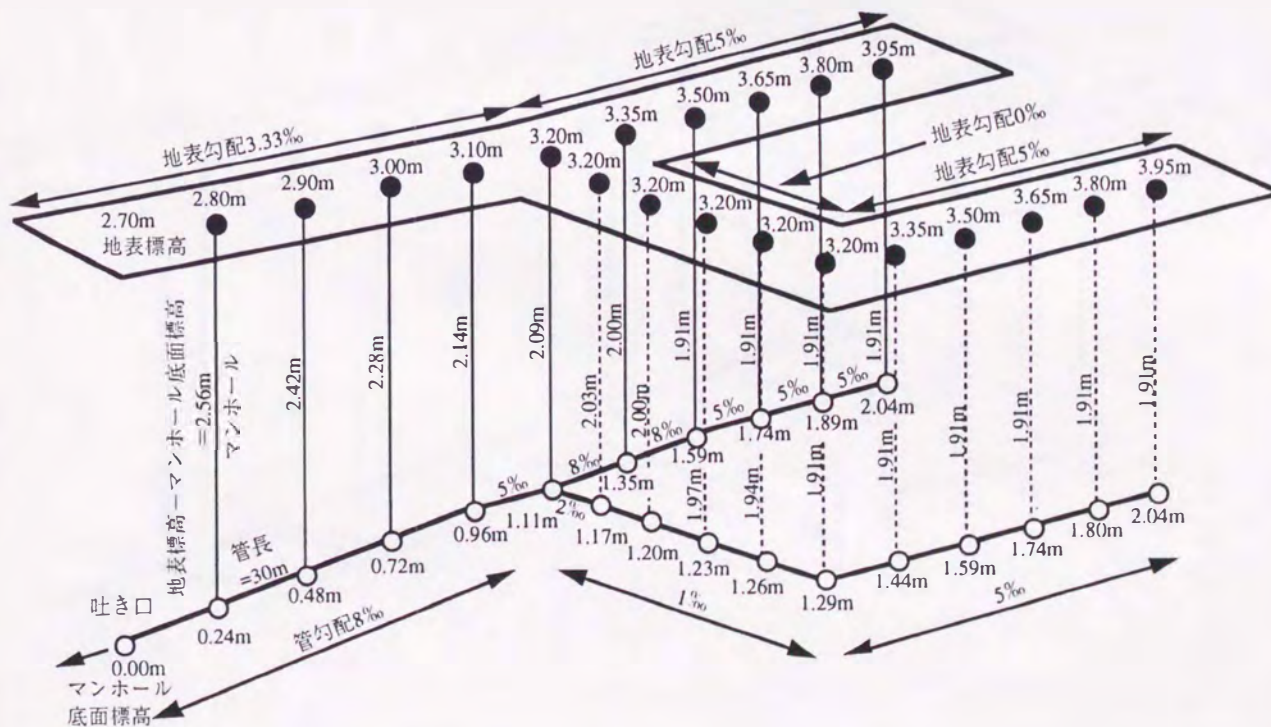


図-6.6 Case II の最適解の模式図

4.3.3 地表標高Hの影響

Case IIIの設計条件はCase Iに対して地表標高Hの違いを検討するものである。最適解の管径D・マンホール径bはCase Iとまったく同じであり、得られたC値=34.1667はCase Iより若干大きいがほぼ等しい。この点において地表標高Hの影響はあまり大きくないと判断される。得られた最適解に関する情報を図-6.7に示す。Case Iに比べて上流部の地表勾配が小さいことから S_{L_i} の分布は、当然のことながらCase Iとは異なっている。その結果、埋設深さ Δ_i が上流から下流方向へ小さくなることはCase Iではなかったが、本Caseでは Δ_{2-6} や Δ_{14-15} で認められる。ただし、 $S_{L_{1-5}}$ の平均値3.4‰はほぼ地表勾配3.33‰に等しいことから、 Δ_{2-6} での逆転現象は、上流部の埋設深さをできるだけ小さくするように管勾配 S_{L_i} を選択する際に、地表勾配と一致する管勾配の離散値データが準備されていないことに起因するものと考えられる。また、 Δ_{14-15} での逆転現象は管底接合のためであり、これも本計算例における離散値データの粗い設定の影響と思われる。

上記Case I～IIIの結果では全般に下流側の管勾配が上流側に比較して急勾配であることがわかる。これは本研究で用いた費用関数(6.7a)式の影響と考えられ、管路網全体の費用の最小化には下流部の埋設深さをある程度犠牲にしても上流部の埋設深さをできるだけ小さくするように管勾配 S_{L_i} が決定されたものと解釈される。なお、本計算例では解法特性の検討を主眼としたため管勾配データはすべての S_{L_i} で等しく1～8‰と設定したが、解法にGAを使用しているのでデータ数を増加させたり、あるいは各 S_{L_i} のデータ範囲を変更したりすることは容易であり、対象管路網の規模拡大とともに今後の課題としたい。

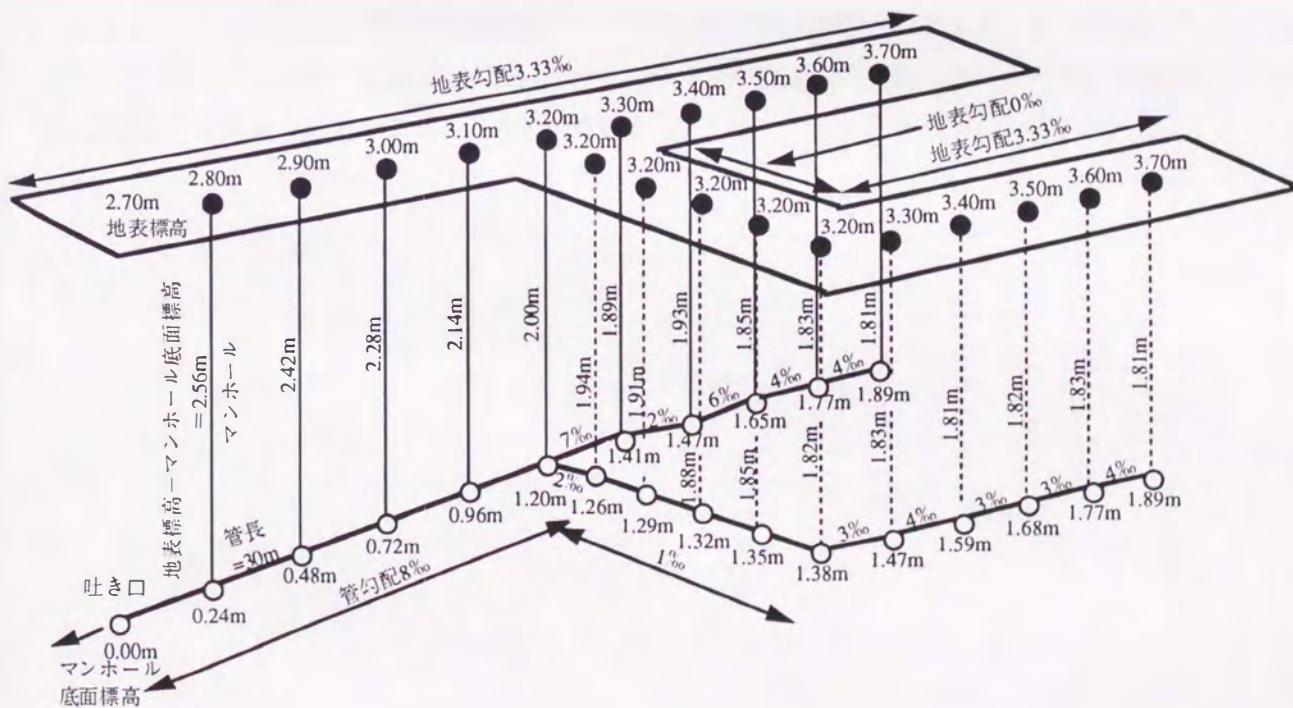


図-6.7 Case IIIの最適解の模式図

第5節 まとめ

本章では、管径・マンホール径および管勾配を主要設計要素とする雨水管路網の設計にマンホール損失を考慮し、さらに最適化手法の導入によって設計手法の合理化を検討した。

本章で得られた結果を総括すると以下の通りである。

- (1) 管勾配を固定した全損失(=管摩擦損失+マンホール損失)最小化による管径・マンホール径決定問題を示し、交配個体選択GA (scs GA) を用いた数値計算結果から全損失最小化における管径・マンホール径の最適解特性を明らかにした。
- (2) 全損失最小化における管径・マンホール径の最適解特性に基づく“解特性法”と名付けた解法を開発することができた。解特性法を用いた数値計算結果からマンホール損失が全損失の20%以上に達することもあり、設計上、マンホール損失が決して無視できないことを確認した。
- (3) 費用最小化関数を導入することにより管勾配をも設計変数とする2目的問題を定式化し、さらに“解特性法”を活用することにより管勾配を決定するための単一目的問題への変換方法を樹立した。
- (4) 上記最適化問題に対してscs GAを適用し、流入量および地表標高の影響について検討することにより提案法の妥当性を確認することができた。
- (5) 本章で展開した解法には管勾配の離散値データの設定や対象管路網の規模拡大など今後検討すべき問題もあるが、GAによる解法は拡張性に富むためマンホールの最適配置問題やマンホールにおける貯留を考慮した問題への適用も可能と思われ、今後の課題としたい。

第7章 総括

本論文では、従来より問題となっている2方向接合円形落差マンホール部のエネルギー損失特性を実験的に明らかにするとともに、開水路流れおよび管水路流れのそれぞれについてマンホール部のエネルギー損失を定式化した。また、浸水防除の一手法としてマンホール出口形状と底面形状を改良した新しいマンホール構造を提案し、従来から用いられているマンホール構造を新しいマンホール構造に改善した場合のマンホール水位の低減効果について検討した結果、本モデルの有用性を確認することができた。さらに、雨水管路網の合理的設計手法確立のための第一歩として、マンホール部のエネルギー損失を考慮した雨水管路網全体のエネルギー損失最小化問題を定式化し、交配個体選択GAを用いた最適化手法を導入することにより、合理的に雨水管路網の各種構造寸法を決定できる手法を開発した。

今後の課題として、3方向および4方向接合マンホール部のエネルギー損失特性に関する検討が必要である。特に、4方向接合マンホールに関する研究例は皆無である。また、本論文では、上述したように雨水管路網の合理的設計手法の確立のための第一歩として、雨水管路網全体のエネルギー損失最小化に基づいた定式化を行ったが、建設費用を極力抑えるという経済的な側面からは検討の余地が残されている。

本論文で得られた主要な結果は以下の通りである。

第1章では、本論文の背景、意義、目的および構成について述べた。

第2章では、2方向接合および3方向接合マンホール部でのエネルギー損失や圧力損失に関する従来の研究成果を整理し、雨水管路の設計や浸水予測計算に有用な知見を提供した。また、従来の研究に関する問題点を明らかにし、今後の検討課題を提示した。さらに、雨水管路網の合理的設計手法に関する従来の研究についても整理し、雨水管路網に関わる各種構造寸法を合理的に決定する手法が未だ確立されていないことを示した。

第3章では、上・下流管の水平面接合角度を180度と90度とした2方向接合円形落差マンホール部において、マンホールと接合管路に関わる種々の構造要素（マンホール径比（マンホール径/上流管径）、上・下流管の管径比および段差比（段差/下流管径））を考慮した実験モデルを10種設定し、それぞれの実験モデルについて流量を増加させながら、管路内の流れ（定常状態）を開水路流れから管水路流れに変化させ、段差比がある程度大きくなると流量の増加によりマンホール部のエネルギー損失が減少する領域と増加する領域が存在することや、マンホール水位が上流管頂付近にあるときにエネルギー損失が最小になることを明らかにした。また、管水路流れにおけるマンホール部のエネルギー損失を定式化するために、エネルギー損失係数を増加させるようなスケールの大きな渦がマンホール内で発生しない範囲のマンホール水位においてマンホール部のエネルギー損失係数を求めた結果、180度と90度では段差比の増加に伴う損失係数の変化状況はかなり異なることを明らかにした。さらに、上述した2種類の接合角度に135度を加えて、マンホール水位とマンホール部のエネルギー損失との関係を詳細に検討した結果、段差比が1より小さいときには、180度と90度ではマンホール水深の変化に伴うマンホール部のエネルギー損失の変化状況や損失係数の値にかなり差

があることがわかった。段差比が1を超えると接合角度の違いによるエネルギー損失の差は非常に小さくなることも示した。

第4章では、第3章の実験結果をもとに、管路内の流れを開水路流れおよび管水路流れとした場合の2方向接合円形落差マンホール部のエネルギー損失の定式化を試みた。上・下流管に段差を伴い、しかも管路内の流れを開水路流れ（下流管のみが管水路流れとなる場合も含む）としたときの流量とマンホール部のエネルギー損失水頭との関係から、上・下流管の水平面接合角度、マンホール径比および管径比が一定であれば、段差に関係なく流量とエネルギー損失水頭との関係をほぼ一義的に表現できることを示した。ただし、流量が少なく、段差のため下流管で射流が発生するときには、別途検討しなければならない。また、上・下流管の流れを管水路流れとし、しかも上・下流管の水平面接合角度を180度としたマンホール部のエネルギー損失を定式化するために宇井らのモデルと Margason の式を適用した結果、上・下流管が異径の場合にやや問題は残るが、本モデルが雨水管路の設計や浸水予測計算において非常に有用であることを示した。上・下流管の水平面接合を90度としたものについても、限定された段差比の範囲ではあるが、180度で得られたモデルが適用可能である。

第5章では、雨水管路網全体のエネルギー損失を減らす目的で、2方向接合円形落差マンホール部の出口形状や底面形状を改善した新しいマンホール構造を提案し、マンホール部のエネルギー損失の軽減効果について実験的検討を加えた。マンホール出口形状の上半分をベルマウス型にし、さらにインバートの深さを管径程度に改善した併用型では、現場で利用されているものを簡単にモデル化した角端型に比べて損失係数を最大1程度減少させることが可能である。また、段差比が1より小さい場合にはマンホール出口形状だけを改良したもの（ベルマウス型）よりも併用型の方がマンホール部のエネルギー損失係数をより小さくすることが可能であるが、段差比が1を超えると併用型ではインバートの足のせ部を高くしていることが損失係数を増加させる要因となるため逆にベウマウス型の方が有利であることを明らかにした。さらに、従来より用いられている90度曲げ接合マンホール底面（従来型90度マンホール）のインバートをマンホール壁に沿って配置した新型90度マンホールを提案し、実験により新型90度の方が従来型90度よりも損失係数はかなり小さくなることを明らかにした。第4章で設定した雨水管路網の仮想モデルにおいて、既設マンホールを併用型マンホールと新型90度マンホールに改善した結果、管底接合では最上流のマンホール水深の低減効果は10%未満でそれほど大きくはないが、段差接合（段差を管径の半分あるいは管径分に設定）では20%を超える低減効果があった。したがって、上流側の地形勾配の急な地区や90度接合マンホールが多く敷設されているところでは本モデルが有用である。

第6章では、管径・マンホール径および管勾配を主要設計要素とする雨水管路網の設計にマンホール損失を考慮し、さらに最適化手法の導入によって設計手法の合理化を検討した。まず、管勾配を固定した全損失（=管摩擦損失+マンホール損失）最小化による管径・マンホール径決定問題を示し、交配個体選択GA (scs GA) を用いた数値計算結果から全損失最小化における管径・マンホール径の最適解特性を明らかにした。次に、全損失最小化における管径・マンホール径の最適解特性に基づく“解特性法”と名付けた解法を開発し、“解特性法”を用いた数値計算結果からマンホール損失が全損失の20%以上に達することを示し、設計上、マ

ンホール損失が決して無視できないことを再確認した。また、費用最小化関数を導入することにより管勾配をも設計変数とする2目的問題を定式化し、さらに“解特性法”を活用することにより管勾配を決定するための単一目的問題への変換方法を樹立した。上記最適化問題に対して交配個体選択GAを適用し、流入量および地表標高の影響について検討することにより提案法の妥当性を確認することができた。

第7章では、本研究の結果をまとめて結論とした。

参考文献

第2章

- 1) 水理公式集, 第5編上下水道・水質保全編, 土木学会, p.404, 昭和60年版.
- 2) Hinds, J. : The Hydraulic Design of Flume and Siphon Transition, Trans. ASCE, Vol.92, pp.1423-1459, 1928.
- 3) Sangster, W.M., Wood, H.W., Smerdon, E.T., and Bossy, H.G. : Pressure Changes at Storm Drain Junctions, Bull. No.41, Engineering Experiment Station, Univ. of Missouri, Columbia, Missouri, 1958.
- 4) 下水道施設計画・設計指針と解説—前編—, 第2章管路施設, 第7節マンホール, 日本下水道協会, pp.164-176, 1994.
- 5) Ackers, P. : An Investigation of Head Losses at Sewer Manholes, Civ. Eng. and Publ. Works. Rev. Vol. 54, No.637, pp.882-884 and 1033-1036, 1959.
- 6) 宇井 正和, 安川 浩 : 管路接続用チャンバーによるエネルギー損失, 第31回水理講演会論文集, pp.347-352, 1987.
- 7) Christodoulou, G.C. : Drop Manholes in Supercritical Pipelines, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Vol.117, No.1, pp.37-47, 1991.
- 8) Sangster, W.M., Wood, H.W., Smerdon, E.T. and Bossy, H.G. : Pressure Changes at Open Junctions in Conduit, Trans. Am. Soc. Civ. Eng. 126, pp.364-396, 1961.
- 9) Archer, B., Bettes, F., and Colyer, P.J. : Head Losses and Air Entrainment at Surcharged Manhole, Rept. No. IT185, Hydraulics Research Station, Wallingford, England, 1978.
- 10) Hare, C.M. : Magnitude of Hydraulic Losses at Junctions in Piped Drainage Systems, Civil Engineering Transactions, Institution of Civil Engineers, pp.71-77, 1983.
- 11) Howarth, D.A. and Saul, A.J. : Energy Loss Coefficients at Manholes, Proc. 3rd Int. Conf. Urban Storm Drainage, Chalmers Univ. of Technology, Goteborg, Sweden, pp.127-136, 1984.
- 12) Lindvall, G. : Head Losses at Surcharged Manholes with a Main Pipe and a 90° Lateral, Proc. 3rd Int. Conf. Storm Drainage, Chalmers Univ. of Technology, Goteborg, Sweden, pp.137-146, 1984.
- 13) Marsalek, J. : Head Losses at Sewer Junction Manholes, J. Hydraul. Eng. Am. Soc. Civ. Eng. Vol.110(8), pp.1150-1154, 1984.
- 14) Marsalek, J. : Head Losses at Selected Sewer Manholes, Special Report NO.52, Am. Public Works Association, Chicago, 1985.
- 15) 松本 良一 : マンホールの損失水頭を考慮した下水管渠設計法について, 建設技術研究所報, 1984.
- 16) Johnston, A.J. and Volker, R.E. : Head Losses at Junction Boxes, J. Hydraul. Eng. Am. Soc. Civ. Eng. Vol.116, No.3, pp.326-341, 1990.
- 17) Bo Pedersen, F. and Mark, O. : Head Losses in Storm Sewer Manholes: Submerged Jet Theory, J. Hydraul. Div. Am. Soc. Civ. Eng. Vol.116, No.11, pp.1317-1328, 1990.
- 18) Yevjevich, V. and Barnes, A.H. : Flood Routing through Storm Drains, Part II, Colorado State Univ., Fort Collins, Colorado, Hydrologic Papers No.43-46, 1970.

- 19) Townsend, R.D. and Prins, J.R. : Performance of Model Stormsewer Junctions, J. Hydraul. Div. Am. Soc. Civ. Eng. Vol.104(HY), pp.99-104, 1978.
- 20) 沢野 英明, 安福 千尋, 福森 潤一 : 管網における合理的管径決定に関する考察, 水道協会雑誌, 第66巻第3号(第750号), pp.36-46, 1997.
- 21) 高桑 哲男, 船水 尚行 : 雨水管網の設計における流量と管径の算定法, 下水道協会誌論文集, No.13, Vol.32/No.383, pp.15-31, 1995.
- 22) 高桑 哲男, 船水 尚行 : 最大流量法による雨水管網の設計, 下水道協会誌論文集, No.13, Vol.32/No.383, pp.15-31, 1995.
- 23) 吉本 国春 : 雨水管における土砂の堆積防止に必要な最小流速について, 下水道協会誌, Vol.31/No.377, pp.68-73, 1994.
- 24) Mayerle, R. : Sediment Transport in Rigid Boundary Channels, PhD thesis, University of Newcastle upon Tyne, UK, 1988.
- 25) Nalluri, C. and Ab. Ghani, A. : Bed Load Transport without Deposition in Channels of Circular Cross Section, 6th Int. Conf. on Urban Storm Drainage, Niagara Falls, Ontario, Canada, pp.625-630, 1993.
- 26) Ackers, P. and White, W.R. : Sediment Transport : New Approach and Analysis, Proc. ASCE, Vol. 99, No.11, pp.2041-3060, 1973.
- 27) Ab. Ghani, A. and Nalluri, C. : Storm Sewer Design Incorporating Graded Sediment Transport, 7th Int. Conf. on Urban Storm Drainage, Hannover, Germany, pp.283-288, 1996.
- 28) May, R.W.P. : Sediment Transport in Pipes and Sewers with Deposited Beds, Hydraulic Research Wallingford; Report SR320, 1993.

第3章

- 1) 荒尾 慎司, 楠田 哲也 : 2方向接合マンホール部のエネルギー損失特性—レビューと課題—, 下水道協会誌, Vol.33, No.396, pp.75-86, 1996.
- 2) Lindvall, G. : Head Losses at Surcharged Manholes with a Main Pipe and a 90° Lateral, Proc. 3rd Int. Conf. Storm Drainage, Chalmers Univ. of Technology, Goteborg, Sweden, pp.137-146, 1984.
- 3) 宇井 正和, 安川 浩 : 管路接続用チャンバーによるエネルギー損失, 第31回水理講演会論文集, pp.347-352, 1987.
- 4) Christodoulou, G.C. : Drop Manholes in Supercritical Pipelines, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Vol.117, No.1, pp.37-47, 1991.
- 5) 荒尾 慎司 : マンホールでの損失を考える, 月刊下水道3月号, Vol.20, No.3, pp.60-64, 1997.
- 6) 下水道施設計画・設計指針と解説—前編—, 第2章管路施設, 第7節マンホール, 日本下水道協会, pp.164-176, 1994.
- 7) Marsalek, J. : Head Losses at Sewer Junction Manholes, J. Hydraul. Eng. Am. Soc. Civ. Eng. Vol.110(8), pp.1150-1154, 1984.
- 8) Johnston, A.J. and Volker, R.E. : Head Losses at Junction Boxes, J. Hydraul. Eng. Am. Soc. Civ. Eng. Vol.116, No.3, pp.326-341, 1990.

- 9) 村上 孝雄, 櫻井 真一: 下水道マンホールの水理に関する検討, 重点領域研究「自然災害」研究報告書 01601011, 都市域における異常出水の予測とその流出抑制工法に関する研究, 1990.
- 10) 榊原 隆, 今井田 敏宏: マンホールにおけるエネルギー損失, 土木技術資料, 38-6, pp.62-67, 1996.
- 11) Bo Pedersen, F. and Mark, O.: Head Losses in Storm Sewer Manholes: Submerged Jet Theory, J. Hydraul. Div. Am. Soc. Civ. Eng. Vol.116, No.11, pp.1317-1328, 1990.
- 12) Sangster, W.M., Wood, H.W., Smerdon, E.T., and Bossy, H.G.: Pressure Changes at Storm Drain Junctions, Bull. No.41, Engineering Experiment Station, Univ. of Missouri, Columbia, Missouri, 1958.
- 13) Sangster, W.M., Wood, H.W., Smerdon, E.T. and Bossy, H.G.: Pressure Changes at Open Junctions in Conduit, Trans. Am. Soc. Civ. Eng. 126, pp.364-396, 1961.
- 14) Marsalek, J.: Head Losses at Selected Sewer Manholes, Special Report NO.52, Am. Public Works Association, Chicago, 1985.
- 15) 松本 良一: マンホールの損失水頭を考慮した下水管渠設計法について, 建設技術研究所報, 1984.
- 16) Kusuda, T., Arao, S. and Moriyama, K.: Energy Losses at Junctions and Transient Flow in Sewer Networks, Proc. 6th Int. Conf. Urban Storm Drainage, Vol.1, pp.122-127, 1993.
- 17) Ackers, P.: An Investigation of Head Losses at Sewer Manholes, Civ. Eng. and Publ. Works. Rev. Vol. 54, No.637, pp.882-884 and 1033-1036, 1959.
- 18) Archer, B., Bettes, F. and Colyer, P.J.: Head Losses and Air Entrainment at Surcharged Manhole, Rept. No. IT185, Hydraulics Research Station, Wallingford, England, 1978.
- 19) Yen, B.C.: Hydraulics of Sewers, Advances in Hydrosiences, Academic Press, Orland, Florida, Vol. 14, pp.1-122, 1986.

第 4 章

- 1) Marsalek, J.: Head Losses at Selected Sewer Manholes, Special Report NO.52, Am. Public Works Association, Chicago, 1985.
- 2) Christodoulou, G.C.: Drop Manholes in Supercritical Pipelines, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Vol.117, No.1, pp.37-47, 1991.
- 3) 村上 光清, 清水 幸丸, 白上 平治: 三次元曲管内の流動に関する実験的研究, 日本機械学会論文集第 2 部, 35 巻, 272 号, pp.763-773, 1969.
- 4) 宇井 正和, 安川 浩: 管路接続用チャンバーによるエネルギー損失, 第 31 回水理講演会論文集, pp.347-352, 1987.
- 5) Margason, R.J.: The path of a jet directed at large angles to a subsonic stream, N.A.S.A., TN.D.- 4919, Langley Research Center, Hampton, Virginia, 1968.
- 6) 下水道施設計画・設計指針と解説—前編—, 第 2 章管路施設, 第 7 節マンホール, 日本下水道協会, pp.164-176, 1994.
- 7) 荒尾 慎司, 楠田 哲也: 2 方向接合マンホール部のエネルギー損失特性—レビューと課題—, 下水道協会誌, Vol.33, No.396, pp.75-86, 1996.
- 8) Sangster, W.M., Wood, H.W., Smerdon, E.T., and Bossy, H.G.: Pressure Changes at Storm Drain Junctions, Bull. No.41,

Engineering Experiment Station, Univ. of Missouri, Columbia, Missouri, 1958.

- 9) Sangster, W.M., Wood, H.W., Smerdon, E.T. and Bossy, H.G. : Pressure Changes at Open Junctions in Conduit, Trans. Am. Soc. Civ. Eng. 126, pp.364-396, 1961.
- 10) Lindvall, G. : Head Losses at Surcharged Manholes with a Main Pipe and a 90° Lateral, Proc. 3rd Int. Conf. Storm Drainage, Chalmers Univ. of Technology, Goteborg, Sweden, pp.137-146, 1984.

第5章

- 1) 荒尾 慎司, 楠田 哲也 : 2方向接合マンホール部のエネルギー損失特性—レビューと課題—, 下水道協会誌, Vol.33, No.396, pp.75-86, 1996.
- 2) 荒尾 慎司, 楠田 哲也ら : 円形マンホール部のエネルギー損失特性 (圧力流れ), 土木学会第50回年次学術講演会講演概要集第2部(A), pp.310-311, 1995.
- 3) 荒尾 慎司, 楠田 哲也ら : 2方向接合落差マンホール部のエネルギー損失特性—上・下流管径が異なる場合—, 土木学会第51回年次学術講演会講演概要集, pp.286-287, 1996.
- 4) Kusuda, T. and Arai, S. : Energy Losses at Circular Drop Manholes, Proc. 7th Int. Conf. Urban Storm Drainage, Institute Wasserwirtschaft Universitaet, Hannover, Germany, vol.1, pp.85-90, 1996.
- 5) Howarth, D.A. and Saul, A.J. : Energy Loss Coefficients at Manholes, Proc. 3rd Int. Conf. Urban Storm Drainage, Chalmers Univ. of Technology, Goteborg, Sweden, pp.127-136, 1984.
- 6) Lindvall, G. : Head Losses at Surcharged Manholes with a Main Pipe and a 90° Lateral, Proc. 3rd Int. Conf. Storm Drainage, Chalmers Univ. of Technology, Goteborg, Sweden, pp.137-146, 1984.
- 7) Marsalek, J. : Head Losses at Sewer Junction Manholes, J. Hydraul. Eng. Am. Soc. Civ. Eng. Vol.110(8), pp.1150-1154, 1984.
- 8) Johnston, A.J. and Volker, R.E. : Head Losses at Junction Boxes, J. Hydraul. Eng. Am. Soc. Civ. Eng. Vol.116, No.3, pp.326-341, 1990.
- 9) 村上 孝雄, 櫻井 真一 : 下水道マンホールの水理に関する検討, 重点領域研究「自然災害」研究報告書 01601011, 都市域における異常出水の予測とその流出抑制工法に関する研究, 1990.
- 10) 下水道施設計画・設計指針と解説—前編—, 第2章管路施設, 第7節マンホール, 日本下水道協会, pp.164-176, 1994.

第6章

- 1) 下水道施設計画・設計指針と解説—前編—, 第2章管路施設第7節マンホール, 日本下水道協会, pp.164-176, 1994.
- 2) 渡辺 政広 : 都市下水道流域の浸水はんらん解析法に関する研究, 平成5年度科学研究費補助金・一般研究(C).
- 3) Lindvall, G. : Head Losses at Surcharged Manholes with a Main Pipe and a 90° Lateral, Proceedings of the 3rd International Conference on Urban Storm Drainage, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden, pp.137-146, 1984.

- 4) Howarth, D.A. and Saul, A.J. : Energy Loss Coefficients at Manholes, Proceedings of the 3rd International Conference on Urban Storm Drainage, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden, pp.127-136, 1984.
- 5) 荒尾 慎司, 楠田 哲也 : 2方向接合マンホール部のエネルギー損失特性—レビューと課題—, 下水道協会誌, Vol.33, No.396, pp.75-86, 1996.
- 6) Kusuda, T. and Arai, S. : Energy Losses at Circular Drop Manholes, Proceedings of the 7th International Conference on Urban Storm Drainage, Institut Wasserwirtschaft Universitaet, Hannover, Germany, Vol.1, pp.85-90, 1996.
- 7) 荒尾 慎司, 楠田 哲也 : 2方向接合円形落差マンホール部のエネルギー損失特性, 下水道協会誌論文集, No.18, Vol.34/No.419, pp.14-28, 1997.
- 8) 沢野 英昭, 安福 千尋, 福森 潤一 : 管網における合理的管径決定に関する考察, 水道協会雑誌, 第66巻第3号(第750号), pp.36-46, 1997.
- 9) 高桑 哲男, 船水 尚行 : 雨水管網の設計における流量と管径の算定法, 下水道協会誌論文集, No.13, Vol.32/No.383, pp.1-14, 1995.
- 10) 高桑 哲男, 船水 尚行 : 最大流量法による雨水管網の設計, 下水道協会誌論文集, No.13, Vol.32/No.383, pp.15-30, 1995.
- 11) 荒尾 慎司, 三原 徹治, 楠田 哲也 : GAによる雨水管路網設計の最適化に関する基礎的研究, 第5回システム最適化に関するシンポジウム講演論文集, pp.207-212, 1997.
- 12) Mihara, T., Chijiwa, H. and Ohta, T. : On the efficiency of GA with Selecting the Crossing Strings for the Discrete Optimal Problems, Proceedings of International Symposium on Optimization and Inovative Design, #105, 1997.
- 13) Sangster, W.M., Wood, H.W., Smerdon, E.T. and Bossy, H.G. : Pressure Changes at Storm Drain Junctions, Bull. No.41, Engineering Experiment Station, University of Missouri, Columbia, Missouri, 1958.
- 14) 千々岩 浩巳, 三原 徹治, 太田 俊昭 : 離散的最適構造設計への交配個体選択GAの適用に関する一考察, 構造工学論文集, Vol.42A, pp.381-388, 1996.
- 15) 千々岩 浩巳, 三原 徹治, 太田 俊昭 : GAによる鋼管杭基礎構造の最適配置決定法に関する研究, 土木学会論文集, No.519/I-32, pp.223-232, 1996.
- 16) 千々岩 浩巳, 三原 徹治, 太田 俊昭 : 橋梁下部工の合理的な設計手法に関する一考察, 構造工学論文集, Vol.43A, pp.585-592, 1997.
- 17) 三原 徹治, 太田 俊昭, 日野 伸一 : GAを用いた多柱式高橋脚の予備設計法に関する基礎的研究, 第5回システム最適化に関するシンポジウム講演論文集, pp.213-218, 1997.
- 18) 太田 俊昭, 池田 弘幸, 三原 徹治 : GAを用いた新交通・輸送システムの最適建設路線に及ぼす最適性基準の影響, 土木計画学研究・講演集, No.19(2), pp.269-272, 1996.
- 19) 千々岩 浩巳, 三原 徹治, 兼松 建男, 太田 俊昭 : GAによる道路トンネルの5心円型内空断面の最適化に関する基礎的研究, 第5回システム最適化に関するシンポジウム講演論文集, pp.201-205, 1997.

記号表

- A : 管路内の流れの流下断面積
- A_1 : 開水路流れあるいは管水路流れにおけるマンホール流入端 (入口) での管路内の流下断面積
- A_2 : 開水路流れあるいは管水路流れにおけるマンホール流出端 (出口) での管路内の流下断面積
- A_m : 模型における管路内の流下断面積
- A_p : 原型における管路内の流下断面積
- b : マンホール内径
- b_m : 模型でのマンホール内径
- b_p : 原型でのマンホール内径
- b_i : マンホールと直下流管をひと組みの要素 i として番号付けしたときの要素 i のマンホール内径
- C : マンホールの掘削土量に着目して定義した費用関数
- C_c : マンホール出口付近の下流管で発生する流れの縮流係数
- D : 管内径
- d : 噴流出口のノズルの直径
- D_u : 2 方向接合マンホール部においては上流管内径、3 方向接合マンホール部においては主流方向の上流管内径
- D_l : 3 方向接合マンホール部での横流入管の内径
- D_d : マンホール直下流管の内径
- D_m : 模型の管内径
- D_p : 原型の管内径
- D_i : 雨水管路網の要素 i の管内径
- D_i^* : 3 方向接合マンホール部を要素 i とするときの上流要素の管内径: * = u は主流方向の上流管内径、* = c は横流入方向の上流管内径
- D_k : 管径規格値の k 番目 ($i=1,2,\dots,15$) のデータ
- ΔE_E : マンホール部でのエネルギー損失水頭
- $\Delta E (= \Delta E_E)$: 第 3 章~第 5 章で用いているマンホール部でのエネルギー損失水頭
- ΔE_P : マンホール部での圧力損失水頭
- ΔE_{Eu} : 3 方向接合マンホール部での主流方向のエネルギー損失水頭
- ΔE_{Pu} : 3 方向接合マンホール部での主流方向の圧力損失水頭
- ΔE_{El} : 3 方向接合マンホール部での横流入方向のエネルギー損失水頭
- ΔE_{Pl} : 3 方向接合マンホール部での横流入方向の圧力損失水頭
- E_1 : マンホール流入端 (入口) での全エネルギー
- E_2 : マンホール流出端 (出口) での全エネルギー
- E' : 雨水管路網全体での管摩擦損失とマンホール部のエネルギー損失水頭の合計値
- E_F' : 雨水管路網全体での管摩擦損失水頭の合計値
- E_M' : 雨水管路網全体でのマンホール部のエネルギー損失水頭の合計値

- E_{Fi} : 雨水管路網での要素 i の管摩擦損失水頭
 E_{Mi} : 雨水管路網での要素 i のマンホール部のエネルギー損失水頭
 f_b : マンホールでの摩擦損失係数
 F_r : 管路内の流れのフルード数
 f_i : 要素 i での管摩擦損失係数
 f_n : 交配個体選択 (scs GA) における適応関数値
 f_t : scs GA において N_s 個の交配個体が全 N_p 個の個体群の第 $1 \sim N_s$ 番目となるように並び替えられたときの各個体の適応関数値の合計、あるいは残りの $(N_p - N_s)$ 個の被交配個体の第 $1 + N_s \sim N_p$ 番目の各個体の適応関数値の合計
 F : scs GA により算出される評価関数値
 F_o : scs GA において制約条件がすべて満足されるときの基準値
 $F_{o'}$: scs GA において制約条件のいずれかが満足されないときの基準値
 g : 重力加速度
 h : 上流管頂内壁頂部から水面までの距離
 h_1 : マンホール流出端 (出口) で上流管頂内壁頂部を基準として測定した水面までの距離
 h_2 : マンホール側壁中央部で上流管頂内壁頂部を基準として測定した水面までの距離
 h_3 : マンホール流入端 (入口) で上流管頂内壁頂部を基準として測定した水面までの距離
 H_a : 埋設する管路の許容土被り厚
 H_i : 雨水管路網の要素 i のマンホール直上の地表標高
 K_E : マンホール部でのエネルギー損失係数
 $K (= \Delta K_E)$: 第3章~第5章で用いているマンホール部でのエネルギー損失係数
 K_P : マンホール部での圧力損失係数
 K_{Eu} : 3方向接合マンホール部での主流方向のエネルギー損失係数
 K_{Pu} : 3方向接合マンホール部での主流方向の圧力損失係数
 K_{El} : 3方向接合マンホール部での横流入方向のエネルギー損失係数
 K_{Pl} : 3方向接合マンホール部での横流入方向の圧力損失係数
 $\overline{K_{Pu}}$: 3方向接合マンホール部での b/D_d と D_d/D_l の変化による主流方向の圧力損失係数の補正項
 $\overline{K_{Pl}}$: 3方向接合マンホール部での b/D_d と D_d/D_l の変化による横流入方向の圧力損失係数の補正項
 K_b : マンホールでの壁面摩擦による損失係数
 K_u : 上流管からの流入水がマンホール下流壁へ到達までのマンホール部の入口損失係数
 K_d : マンホール出口から下流管で急縮・急拡が生じる場所までのマンホール部の出口損失係数
 K_s : マンホール内の渦による損失係数の増加分
 K_c : 実験での最大の段差比におけるエネルギー損失係数の実測値
 K_i : 雨水管路網の要素 i のマンホール部でのエネルギー損失係数
 K_i^* : 3方向接合マンホール部 (要素 i) でのエネルギー損失係数 : $* = u$ は主流方向のエネルギー損失係数、 $* = c$ は横流入方向のエネルギー損失係数
 k_i : 雨水管路網の要素 i のマンホール部での圧力損失係数

- k_i^* : 3方向接合マンホール部(要素*i*)での圧力損失係数 : * = uは主流方向の圧力損失係数、* = cは横流入方向の圧力損失係数
- L_u : 実験装置の上流管長
- L_d : 実験装置の下流管長
- n_i : 雨水管路網での要素*i*の管の粗度係数
- N_p : 雨水管路網全体をひとつの個体として考えたときの雨水管路網の初期設定個体数
- N_s : 雨水管路網として設定された個体数の中で適用関数値の高い個体数
- N_G : 雨水管路網を改良する際の繰り返し計算回数
- N_1 : scs GAにおいて適合管路網が形成されないときの不適合管または不適合マンホールの個数
- N_2 : scs GAにおいて管路の埋設深さが許容埋設深さを満足しないときの要素数
- P_m : ある雨水管路網が別の雨水管路網に突然変異するときの確率
- P_n : 交配選択確率
- Q : 管路内の流量
- Q_u : 2方向接合マンホール部においては上流管流量、3方向接合マンホール部においては主流方向の上流管流量
- Q_d : 下流管流量
- Q_m : 模型管路での流量
- Q_p : 原型管路での流量
- Q_l : 3方向接合マンホール部での横流入方向の上流管流量
- Q_d : マンホールの直下流管流量
- Q_i : 雨水管路網での要素*i*の管流量
- Q_i^* : 3方向接合マンホール部(要素*i*)での上流管の流量 : * = uは主流方向の上流管流量、* = cは横流入方向の上流管流量
- Q_m : 雨水管路網での起点マンホールからの雨水流入量
- R_i : 雨水管路網での要素*i*の管の径深
- S : 2方向接合マンホール部での上・下流管の段差
- S_u : 3方向接合マンホール部での主流方向の上・下流管の段差
- S_l : 3方向接合マンホール部での横流入方向の上・下流管の段差
- S_L : 管勾配
- S_{L_i} : 雨水管路網での要素*i*の管勾配
- V : 管路の断面平均流速
- V_u : 上流管の断面平均流速
- V_d : 下流管の断面平均流速
- V_m : 模型管路での断面平均流速
- V_p : 原型管路での断面平均流速
- V_b : マンホールでの鉛直下向きの流れの断面平均流速
- V_i : 雨水管路網での要素*i*の管流速

- V_i^u : 雨水管路網での要素 i の上流要素の管流速
 V^L : 雨水管路の設計基準における管流速の下限値
 V^U : 雨水管路の設計基準における管流速の上限値
 V_{mi} : 雨水管路網での要素 i の管の満管流れを保証する流速
 y : マンホール内の水深 (マンホール底面から水面までの距離)
 y_m : 模型での管路内の水深
 y_p : 原型での管路内の水深
 y_1 : マンホール流入端 (入口) での管路内の水深
 y_2 : マンホール流出端 (出口) での管路内の水深
 Z_i : 雨水管路網での要素 i のマンホール底面標高
 α : 噴流の中心線上の流速を噴流に対して横から流入する一様流の流速で除した値
 α_u : マンホールの入口損失係数に関わる定数
 α_d : マンホールの出口損失係数に関わる定数
 γ_1 : scs GAにおいて適合管路網が形成されず不適合管または不適合マンホールが発生した場合のペナルティー係数
 γ_2 : scs GAにおいて管路の埋設深さが許容埋設深さを満足しない要素が発生した場合のペナルティー係数
 Δ_i : 雨水管路網での要素 i の管路の埋設深さ
 ζ : マンホール底面の benching 形状の違いによる損失係数の補正項
 θ : マンホール部での上・下流管の水平面接合角度
 θ_u : 3方向接合マンホール部での主流方向の上・下流管の水平面接合角度
 θ_l : 3方向接合マンホール部での横流入管と主流方向の上流管の水平面接合角度
 ρ : 流体の密度
 μ : 流体の分子粘性係数
 ν : 流体の動粘性係数

謝 辞

本論文は、著者が平成3年度に九州共立大学工学部開発学科助手として採用されて以来、九州大学工学部地球環境工学科楠田哲也教授、元九州共立大学工学部土木工学科粟谷陽一教授（九州大学名誉教授）、九州共立大学工学部土木工学科三原徹治助教授の御指導と御助言のもとに行った研究成果をとりまとめたものである。

楠田哲也教授には、教育研究者としての姿勢についてきびしくも温かいご指導を賜りました。特に、著者が九州大学工学部水工土木学科下水研究室に在籍していた当時から研究に対する適切な御指導・御助言を頂きましたことが、本論文のとりまとめに結びついたと思います。ここに、深く感謝の意を表わすと共に厚く御礼を申し上げます。

粟谷陽一教授には、著者が九州共立大学工学部開発学科助手に採用されてから土木工学科に移籍するまでの6年間、実験装置の作成から研究成果のとりまとめに至るまで研究を遂行する上で終始適切な御指導と御助言を賜りました。深く感謝の意を表します。

三原徹治助教授には、学問的な面だけでなく日常生活や人生観等多岐にわたり御指導と御激励を賜りました。厚く御礼を申し上げます。

また、本論文をとりまとめるにあたり、温かい御配慮と御指導を賜りました九州大学工学部地球環境工学科の小松利光教授、神野健二教授、九州大学工学部知能機械工学科古川明德教授には、深く感謝の意を表すと共に厚く御礼申し上げます。

さらに、九州共立大学工学部土木工学科小島治幸教授、森山克美教授、九州大学工学部地球環境工学科山西博幸助手、大石京子助手、山口大学工学部社会建設工学科今井 剛助手には、有益な御助言と多大なる御協力を頂きました。深く感謝の意を表します。また、九州大学工学部旧建設都市工学科（現地球環境工学科）都市環境工学研究室の卒業生並びに九州共立大学工学部開発学科・土木工学科の卒業生で本研究に携わって頂いた諸氏には、厚く御礼を申し上げます。

最後に、本論文をとりまとめるにあたり、常日頃から暖かく見守ってくれた妻、父母そして義父母に深く感謝の意を表します。



Inches 1 2 3 4 5 6 7 8
cm 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19

Kodak Color Control Patches

© Kodak, 2007 TM: Kodak

Blue	Cyan	Green	Yellow	Red	Magenta	White	3/Color	Black

Kodak Gray Scale



© Kodak, 2007 TM: Kodak

A 1 2 3 4 5 6 **M** 8 9 10 11 12 13 14 15 **B** 17 18 19

