

Highly Deformable Sewer Pipe を用いた圧力流れの解析に関する検討

愛媛大学大学院	正員	○山内	武志
愛媛大学工学部	正員	渡辺	政広
復建調査設計(株)	正員	栗原	崇
(株)荒谷建設コンサルタント	正員	岡本	晋

都市域の雨水排水システムを構成している各排水管渠には、雨水・汚水排水用の取付管（laterals、 $\phi = 150\text{ mm}$ ）が多数接続されている。こうした雨水排水管渠における圧力流れを、その基礎式が開水路流れのそれと同型の圧力流れへと置き換える方法について、本報告では、Highly Deformable Sewer Pipeにおける圧力流れへの置き換えを取り上げ、こうした方法の適用性について、数値シミュレーションを行なって検討した。

1. 取付管を有する排水管渠における圧力流れの基礎式

図1のように、雨水・汚水排水用の取付管が多数接続されている実流域の排水管渠における圧力流れの運動方程式と連続の式は、それぞれ次式のように表される。

$$(1/g)(\partial V/\partial t) + (V/g)(\partial V/\partial x) + \partial y/\partial x - S_o + S_f = 0 \quad \dots \textcircled{1}$$

$$; \quad c' = \{ g(\Delta L) (\sin \theta) (D/D_1)^2 \}^{1/2} \quad \dots \dots \dots \quad (3)$$

ここに、 V ：断面平均流速、 y ：管底から測ったピエゾメータ水頭、 S_t ：管渠底こう配、 S_f ：摩擦損失こう配、 D ：管渠の直径、 ΔL 、 θ および D_i ：取付管の平均取り付け間隔、平均設置（水平面からの）角度および直径、 g ：重力加速度、 x ：

The diagram illustrates a cross-section of a combined sewer system. At the top left, a street inlet is shown as a pipe entering a manhole. From the manhole, a lateral pipe extends downwards. Another lateral pipe from a nearby property enters the main sewer line at the bottom right. The ground surface is indicated by a dashed line. A large, thick-walled pipe, labeled 'Combined Sewer', runs horizontally through the center of the diagram. Arrows point from labels to their respective parts: 'Street Inlet' points to the manhole opening, 'House Inlet' points to another manhole opening, 'Laterals' points to the pipes connecting individual properties to the main sewer, 'Ground Surface' points to the dashed line, and 'Combined Sewer' points to the large central pipe.

図1 取付管

2. Highly Deformable Sewer Pipe における圧力流れへの置き換え

圧力流れの基礎式： 上述した取付管による流水の貯留効果を伴う圧力流れが、取付管は接続されていないが管渠自体の流水断面積が増減しそる排水管渠における圧力流れに置き換えると仮定する。こうした管渠断面積（＝流水断面積）の変化の大きい排水管渠（Highly Deformable Sewer Pipe、以下においてはHD管渠と呼ぶ）における圧力流れの運動方程式および連続の式は、それぞれ次式のように表される。

$$(1/g)(\partial V/\partial t) + (V/g)(\partial V/\partial x) + \partial y/\partial x - S_o + S_f = 0 \quad \dots \dots \dots (5)$$

$$; \quad \delta = (r_o/r)^2 \cdot [\{(\beta-2)/\beta\} \cdot (r/r_o)^\beta + 2/\beta] \quad ⑧$$

ここに、 r 、および a_0 : $y = D$ のときのHD管渠の半径および圧力波の伝播速度、 r および a : $y > D$ のときのHD管渠の半径および圧力波の伝播速度、 β : HD管渠壁の非線形弹性変化に関する係数。なお、 y と r との関係は、次式のように表される。

$$(r/r_o)^2 - (2a_o^2)/(gD)/\{(y/D)-1\} \cdot \{(r/r_o)^\beta - 1\}/\beta = 0 \quad \dots\dots(9)$$

パラメータ δ および β の取り扱い： ⑧、⑨式から明らかなように、 δ は y 、 a 、および β の関数であるが、ここでは実用上の立場から、 $1 \leq y/D \leq 9$ なる y の範囲を通じて $\delta \approx 1$ と見なしえるよう、 β および a を選ぶこととする。この近似条件を満たす β と a の関係を⑧および⑨式より求めると、図2（ここに、 $a_{**} = a_0 / ((gD)^{1/2})$ ）のようになる。ここで、 $1 \leq y/D \leq 9$ での相対誤差（平均値）は、最も

大きい場合 ($a_{0*} = 5$) でも 0.5 % 以内である。

c' と a_0 の関係： 取付管を有する排水管渠での取付管内貯留量 ∇c_* と、これに対応する HD 管渠における管渠断面積増加量 ∇a_* との関係（管渠の単位長さ当たり）は、上述した $1 \leq y/D \leq 9$ の範囲において、図 3 に示すようになる。ここに、貯留量および増加量は、 $y = D$ のときの管渠断面積に対する比率（%）で表されている。これより、任意の y/D に対し、取付管内貯留量と管渠断面積増加量とがほぼ等しくなるときの、すなわち $\nabla c_* \approx \nabla a_*$ が成り立つときの c' と a_0 の関係を求めるとき、図 4（ここに、 $c' = c'/(gd)^{1/2}$ ）に示すようになる。図 4 より、 $(c' - a_{0*})/a_{0*}$ は 0.

9.5 ~ 1.0 の範囲にあり、実用上からは、 $a_0 \approx c'$ として取り扱って良いことが分かる。

運動方程式の補正： HD 管渠における圧力流れは、本来的に、摩擦損失水頭が過小評価

される特性を内在している。また、この過小評価の割合は、管渠断面積の増加に伴って次第に大きくなっている。このため、取付管を有する排水管渠の圧力流れと対比すると、一般に、水面勾配あるいは水位が小さくシミュレートされ、特に水位ハイドログラフの適合度が低下していく傾向を示す。こうした点を改善するため、ここでは、定常流れ時における HD 管渠の圧力流れの基礎式が取付管を有する排水管渠のそれと一致するよう、HD 管渠の運動方程式⑤式の摩擦こう配項 S_f に次の補正係数 γ を付加することとした。

$$S_f = \gamma \cdot (n^2 |V| V / R^{4/3}) \quad ; \quad \gamma = (r/r_o)^{4/3} \cdot [\pm (V_{f+1}/a_0)^2 + (r/r_o)^4 \{1 - (V/a_0)^2\}] \\ , \quad V_{f+1} = (D/4)^{2/3} S_o^{1/2} / n \quad \dots \dots \text{⑩}$$

3. 適用性の検討

上述した HD 管渠における圧力流れについて、実流域で見られる規模の管渠諸量を有する幾つかの簡単な雨水排水システムを対象に流出シミュレーションを行ない、本圧力流れの基本的な流出諸特性を検討した。

流出シミュレーション結果の 1 例（長さ 25m の 10 本の排水管渠と、水面積 0.70m² の 10 個のマンホールとからなる管渠システムにおいて、各マンホールに sine 型の流量ハイドロを与えた場合）を図 5 に示す。これらより、今後さらに詳細な検討を進める必要があるが、実用上有用な HD 管渠の実流域への適用の見通しが得られた。

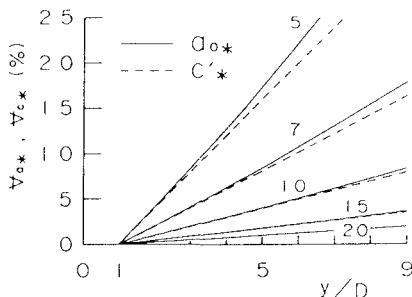


図 3 取付管内貯留量と管渠断面積増加量

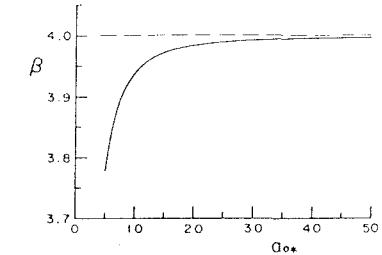


図 2 β と a_0 の関係

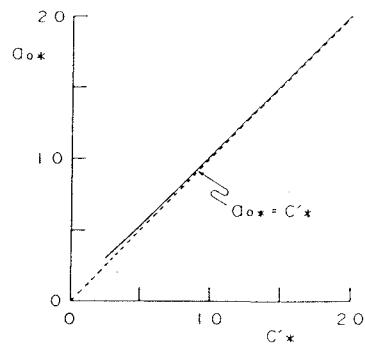


図 4 a_0 と c' の関係

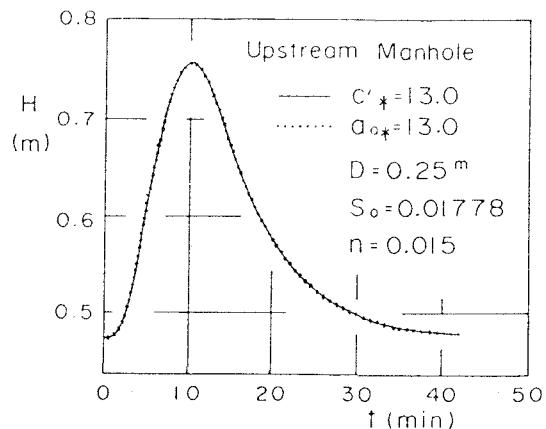


図 5 流出シミュレーション結果