

# p法 FEM による水抜き穴付コンクリート排水管の応力解析 Stress Analysis of Concrete Drainages with inclined holes

長友 克寛  
Katsuhiko NAGATOMO

## Abstract

A finite element analysis of precast concrete drainages was conducted. The drainage has inclined small holes to drain water into itself from the top surface. The holes can disturb stress distributions of a drainage and induce stress concentration in the vicinity of themselves. The main variables of the analysis were slope of the top surface, bearing coefficients of surrounding ground soil, existence of holes, diameter of a hole, and interval of holes. The analytical results showed followings: the safety factor obtained from the conventional specification is greater than that from FEM though both methods give safe estimation; the maximum principal stress exceeds the bending strength of concrete; the increase in angle of the top surface induces the increase of tensile stresses at the top and bottom edges of a drainage hole; the effect of bearing coefficients of surrounding ground on analytical results is small.

Key word: プレキャストコンクリート, 排水管, 水抜き穴, 有限要素法解析

## 1. はじめに

近年、道路面の排水性を高めるために、その路側に水抜き穴を設けたプレキャストコンクリート製ボックスカルバート（以下、排水管）が使用されるようになってきている。この排水管の設計に際しては、排水管を円環に置換し、それに上載荷重および土圧を左右対称な分布荷重として作用させた場合に生じる曲げモーメントの理論解が使用される。

しかし、排水管の頂面は傾斜しており、加えて水抜き穴が設置された場合、設計理論式での前提である排水管の対称性は大きく崩れる。そして、これらに伴って排水管内部の応力分布はかなり乱れることが予想される。従って、その検証を行うことは製品の安全性、経済性の両面から不可欠となっている。

本研究は、このような排水管の有限要素法解析を実施し、その応力状態、特に応力集中を含む応力分布の乱れを調べたものである。併せて、得られた結果に基づき、既往の設計法の妥当性についても検証した。

## 2. 解析方法

### 2.1 解析変数

図-1に本研究で対象とした排水管の形状および解析変数を示す。解析では、管軸（長さ）方向に配置された各水抜き穴の中間の領域を取り出した。そして、1つの水抜き穴がちょうど中央にくるような部分について p 法 3次元弾性有限要素解析を行った。

同図中に示した記号は全て解析変数である。今回は、その中から頂面の傾斜角 $\alpha$ 、周囲の土の地盤反力係数 $k_x$ 、 $k_y$ 、水抜き穴の有無、水抜き穴の径 $r_2$ 、上載荷重 $p_y$ の作用範囲等、幾つかの代表的変数に限定し、それらの変化が解析結果に及ぼす影響について考察する。

なお、以下では、水抜き穴を設けた面を側面 A、その反対側の面を側面 B、管軸に直交する面を側面 C および D と表現する。また、幅、高さ、長さ方向をそれぞれ  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向とする。

表-1に径 400mm の排水管の場合を例にとり、基準にした各変数の値を示す。

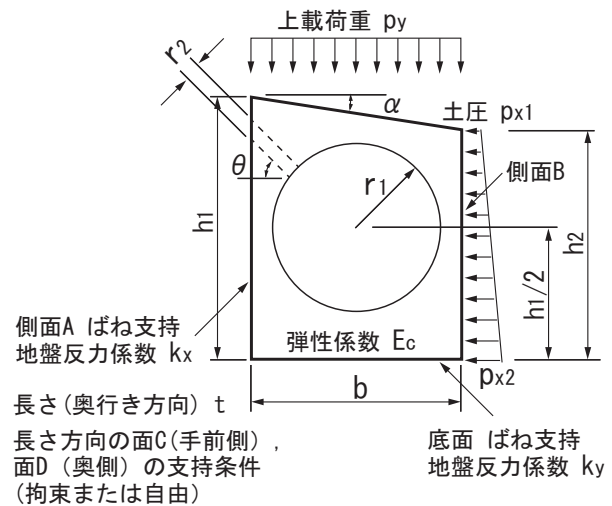


図-1 排水管の形状および解析変数

表-1 基準にした各変数の値

$h_1 = 575 \text{ mm}$	$p_{x1} = 5.00 \times 10^{-3} \text{ N/mm}^2$
$h_2 = 545 \text{ mm}$	$p_{x2} = 1.02 \times 10^{-2} \text{ N/mm}^2$
$b = 500 \text{ mm}$	$p_y = 0.13 \text{ N/mm}^2$
$t = 330 \text{ mm}$	$E_c = 2.0 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$
$r_1 = 200 \text{ mm}$	$\nu_c = 0.167$
$r_2 = 50 \text{ mm}$	$k_x = 0.1 \text{ N/mm}^3$
$\alpha = 3.4^\circ (6\%)$	$k_y = 0.1 \text{ N/mm}^3$
$\theta = 45^\circ$	

2.2 解析モデル

図-2に解析モデルの支持方法および荷重方法の一例を示す。プレハイ設計計算書<sup>1)</sup>に準拠する上載荷重  $p_y$  を頂面に、同じく大きさ  $p_{x1} \sim p_{x2}$  の台形分布の土圧を側面 B に作用させ、側面 A および底面にそれぞればね定数  $k_x$  および  $k_y$  の要素を配置して支持した。管軸に直交する面 C, D の長さ (z) 方向変位は拘束した。

最終的に、解析結果の検討に使用した要素は8次の6面体要素であり、全ての解析においてエネルギーノルムの収束精度に基づく推定誤差が6%以下になることを確認している。

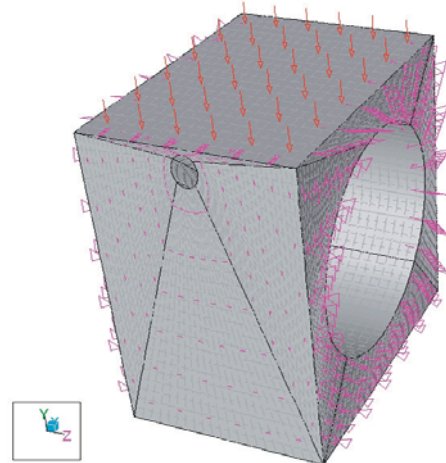


図-2 解析モデルの一例

3. 解析結果およびその考察

3.1 現行の設計指針より計算される理論値

設計指針では、例えば管頂の設計は以下の手順で行われる。

- (1) 円環に等分布活荷重  $p_y$  が作用した場合の理論解をもとに、次式より発生曲げモーメント  $M_1$  を求める。

$$M_1 = k_1 \cdot P_1 \cdot r^2 \tag{1}$$

ここに、 $k_1$ : 支承係数 (=0.279),  
 $P_1$ : 後輪活荷重 (=  $p_y$ ),  
 $r$ : 管中心から管厚中央までの距離である。

- (2) 弾性理論により、管の各縁の引張応力がコンクリートの曲げ引張強度に達する時の曲げモーメント (ひび割れ発生モーメント)  $M_R$  を求める。
- (3) 安全率  $M_R/M_1 \geq \gamma_i$  を確認する。  
 ここに、 $\gamma_i$  (=1.0) は許容安全率である。

表-2に、このようにして計算した管径 400mm の排水管に対する管頂、管底、管側での安全率をそれぞれ示す。何れの位置においても、かなり大きな安全率が確保されていることが分かる。

表-2 安全率の比較 (管径 400mm の場合)

安全率	抵抗 $M_R$ / 作用 $M_1$	曲げ引張強度 / 最大発生応力
管頂	2.51	1.56
管底	2.37	1.56
管側	16.99	3.89

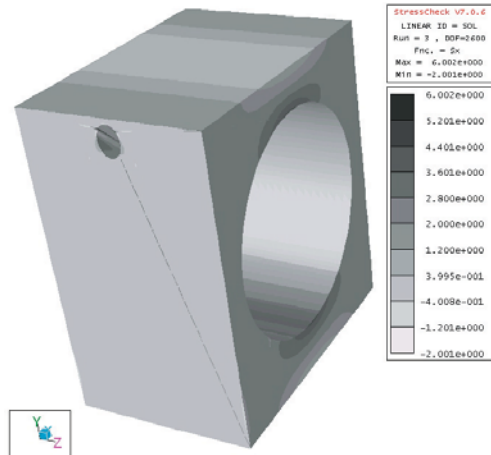
3.2 既製品の安全性の検証

図-3に、基準にした排水管 (径 400mm の既製品) の応力状態の一例を示す。同図 (a) は x (幅) 方向応力  $\sigma_x$  の分布を示すが、管の内側上・下縁の中央部に大きな引張応力が発生している。一方、同図 (b) は y (高さ) 方向応力  $\sigma_y$  の分布を示すが、管の外側左・右縁の中央部に大きな引張応力が発生している。

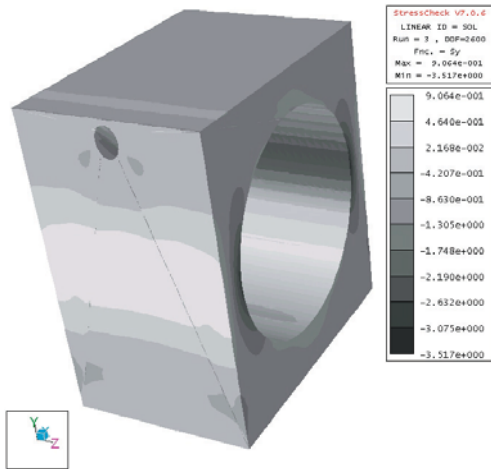
なお、各方向に発生した圧縮応力は、全てコンクリート圧縮強度よりもかなり小さかったため、以下では議論しない。

一方、図からは判読し難いが、水抜き穴の周方向に 6.9MPa の引張応力が発生しており、局部的に微細ひび割れ発生の可能性のあることが分かった。ただし、今回の結果は弾性解析に基づくものであり、コンクリートの引張塑性性を考慮すれば、この局所的引張応力は若干緩和されることになる。

解析では作用曲げモーメントの評価が難しいため、最大引張応力に対するコンクリート曲げ引張強度の比を安全率とし、それを表-2右端欄に示す。解析においても、全ての位置において安全側の評価が



(a)  $\sigma_x$  分布



(b)  $\sigma_y$  分布

図-3 基準にした排水管の応力状態

得られてはいるが、安全率の値そのものは、設計計算書に基づくものよりも低い。

### 3.3 各種の影響因子の応力分布への影響

図-4に上載荷重が水抜き穴に近い領域のみに作用する偏心載荷の状態を示す。図-5に上載荷重の作用領域を頂面全面、その1/2、そして1/3へと減少させた場合の最大引張応力への影響を示す。同図(a)は管頂および管底でのx方向最大引張応力 $\sigma_{xmax}$ 、同図(b)は水向き穴近傍の最大引張主応力 $\sigma_{1max}$ を示す。両図より、引張応力の最大値は、載荷面積比の減少率以上に低下することが分かる。同

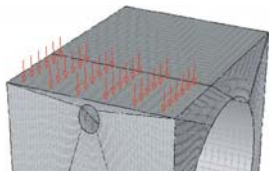
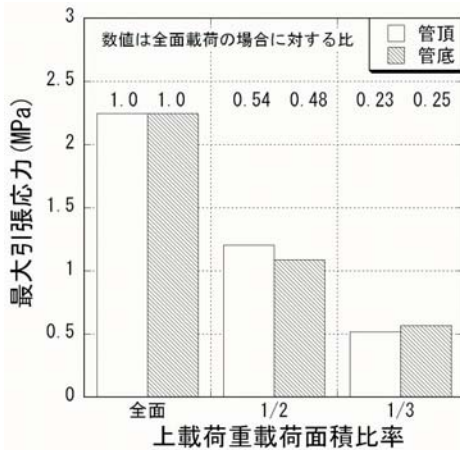
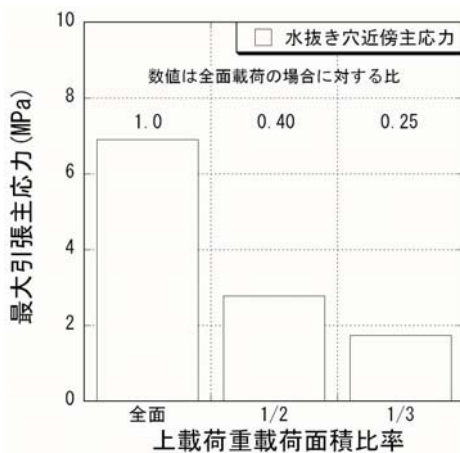


図-4 上載荷重の作用領域の影響



(a) x方向最大引張応力 $\sigma_{xmax}$



(b) 水抜き穴近傍域での最大主引張応力 $\sigma_{1max}$

図-5 頂面上の上載荷重載荷面積の影響

図(b)の結果は、偏心載荷に伴い、水抜き穴近傍での微細ひび割れの危険性は低下することを意味しており、注目される。

図-6に頂面傾斜角 $\alpha$ の管頂および管底での最大引張応力 $\sigma_{xmax}$ への影響を示す。同図より、 $\alpha$ が小さくなるにつれて $\sigma_{xmax}$ はほぼ直線的に減少し、 $\alpha=6\%$ から0%になることで約10%の応力低下になることが分かる。頂面傾斜角 $\alpha$ は、全因子の中では比較的発生応力に対する影響の大きい因子であると考えられる。

図-7に排水管周囲の地盤反力係数 $k_x$ 、 $k_y$ を変化させた場合の管頂および管底での $\sigma_{xmax}$ への影響を示す。同図より、 $k_x$ 、 $k_y$ を共に $0.1\text{N/mm}^3$ から $0.5\text{N/mm}^3$ へと大きくして変形を拘束することにより、 $\sigma_{xmax}$ を約3~4%低減させられることが分かる。一方、 $k_x$ 、 $k_y$ を共に $0.1\text{N/mm}^3$ から $0.01\text{N/mm}^3$ へと小さくしても、 $\sigma_{xmax}$ は約1%しか増加しない。いずれにしても、現実的な $k_x$ 、 $k_y$ の範囲では、その変化幅は約5%以内に収まる。

図-8に水抜き穴の有無および水抜き穴径 $r_2$ の

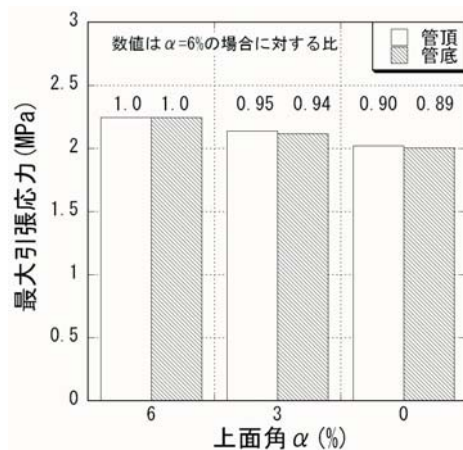


図-6 頂面の傾斜角 $\alpha$ の影響

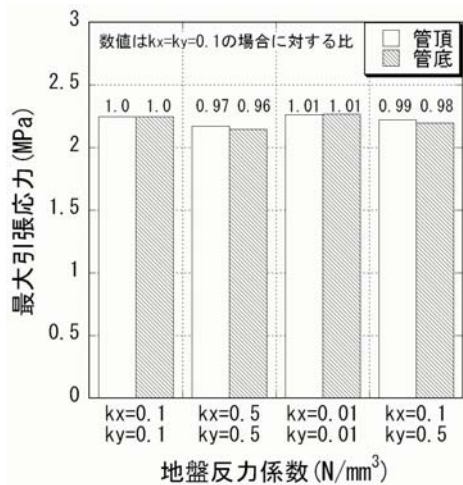
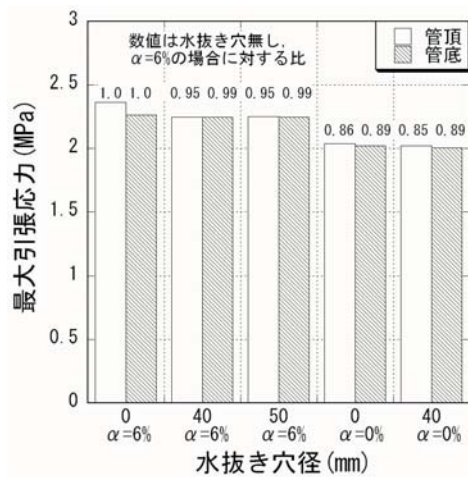


図-7 地盤反力係数 $k_x$ 、 $k_y$ の影響



図一八 水抜き穴の有無およびその径の影響

管頂および管底での  $\sigma_{xmax}$  への影響を示す。同図より、頂面傾斜角  $\alpha=6\%$  の場合、水抜き穴を設置した方が管頂における  $\sigma_{xmax}$  は約 5% 減少することが分かる。これは、水抜き穴の変形が応力を緩和する作用をするためであると考えられる。しかし、管底における  $\sigma_{xmax}$  には水抜き穴の有無および径の影響はほとんど現れていない。一方、 $\alpha=0\%$  の場合、 $\alpha=6\%$  の場合と比較して  $\sigma_{xmax}$  には 10 数% の低下が見られる。しかし、水抜き穴の有無の影響は現れていない。

なお、図示してはいないが、水抜き穴近傍の最大主応力については、 $\alpha=6\%$  の場合、径  $r_2$  を 40mm から 50mm へと増加させることによって 6.9MPa から 5.9MPa へと約 14% もの減少が見られた。

水抜き穴の間隔（解析モデルの長さ） $t$  を 330mm から 500mm へと増加させたことの解析結果への影響は非常に小さかった。

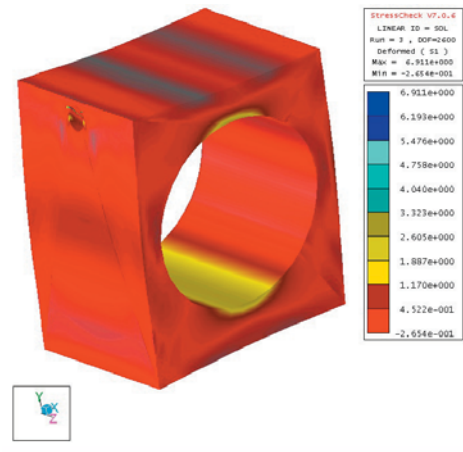
管軸に直交する片方の端面 C の長さ（ $z$ ）方向変位は拘束し、もう一方の端面 D の変位をフリーにした場合、管頂および管底の  $\sigma_{xmax}$  は約 5% 減少したが、水抜き穴近傍の最大主引張応力  $\sigma_{imax}$  は約 4% 増加した。このことは、複数の排水管を設置する場合、端部の排水管では水抜き穴近傍のコンクリートにおけるひび割れ発生の危険性が若干増加することを意味している。

図一九に基準とした解析ケースを例にとり、その変形図と第 1 主応力分布を示す。同図より、円管が扁平に変形している様子が明確に読み取れる。

#### 4. まとめ

本研究では、水抜き穴をもつプレキャストコンクリート製排水管を対象に有限要素解析を行った。以下に、得られた結果を要約する。

- (1) 有限要素法解析から得られた最大引張応力に対するコンクリート曲げ引張強度の比から算出した安全率は、既往の設計基準から算出した安



図一九 変形図と第1主応力分布の一例

全率よりも小さい。ただし、両者の安全率は共に危険側の評価とはならない。

- (2) 水抜き穴周辺では、局部的に曲げ引張強度を超える応力が生じ、微細なひび割れが発生する可能性がある。
- (3) 上載荷重が頂面の水抜き穴側の領域に偏心して作用すると、管頂、管底の引張応力は低下する。同時に、水抜き穴周囲の最大主引張応力も低下する。
- (4) 排水管頂面の傾斜角がゼロから 6% へと増加すると、管頂および管底の最大引張応力は約 10% 増加する。
- (5) 排水管周囲の地盤反力係数が増加して側方からの変形拘束が大きくなると、最大引張応力は低下するが、現実的な地盤反力係数の範囲内では、その変化幅は約 5% 以内に収まる。
- (6) 水抜き穴を設置した方が、管頂の最大引張応力は若干低下する。一方、管底の最大引張応力にはほとんど影響がない。
- (7) 水抜き穴の径が大きいほど、水抜き穴周囲の最大引張主応力は低下する。
- (8) 水抜き穴の間隔（解析モデルの長さ）の解析結果への影響は実用的な範囲内では小さい。
- (9) 管軸に直交する片方の端面の長さ方向変位は拘束し、もう一方の端面の変位をフリーにした場合、管頂および管底の最大引張応力は約 5% 減少するが、水抜き穴近傍の最大引張応力は逆に約 4% 増加する。
- (10) 排水管は、上載荷重を受けて扁平に変形する。

#### 謝辞

本研究は、四国プレハイ協会の助成のもとに実施したものである。ここに関係各位に謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) 四国プレハイ協会：プレハイ設計計算書