

論文 土中に埋設した各種断面形状を有するコンクリートカルバートの力学的挙動

福澤公夫^{*1}・三井雅一^{*2}・安原一哉^{*3}・服部恵光^{*4}

要旨: ヒューム管等のコンクリートカルバートの設置深度が増加しており、それに伴いカルバートの耐荷性能の向上が求められている。本論は、カルバートの断面形状および設置方法を工夫することにより耐荷性能を向上することが可能であるかを模型土槽を用いた実験および有限要素法による解析から検討を行った。その結果、カルバートの最小部材厚を一定として、外断面の形状を変化させた場合、カルバート外面に作用する土圧分布が変化するとともに、カルバートに生じるひずみも変化した。結果として、正方形の外断面を有するコンクリートカルバートを45°傾け土中に設置することで、同一部材厚のヒューム管に比べ約2.5倍の耐荷性能の向上が図れることが分かった。

キーワード: コンクリートカルバート, 耐荷性能, 土槽実験, 土圧分布, 有限要素法

1. はじめに

近年、大深度地下開発および宅地造成のための大規模な埋め立てにより、ヒューム管による暗渠の設置深度が増加してきている。その場合、既存のヒューム管の耐荷性能を高めるため、施工現場にて管の下部に鉄筋コンクリートの固定基礎を設置したり、管の全周に対して鉄筋コンクリートを巻き立てる工夫が行われている¹⁾。しかし、このような方法は現場における作業が煩雑になり、コンクリート製品を利用することによる省力化のメリットが低減してしまう。そこで、耐荷力の向上を図った暗渠を築造するための部材（以下、コンクリートカルバートという）が、施工コスト低減および品質向上の観点から求められている。

本論は、コンクリートカルバートの断面形状および設置方法を工夫することにより耐荷性能を向上することが可能であるかを実験的、解析的に検討したものである。すなわち、①断面の内側の形状は円形で、断面の外側の形状が正方形、五角形およびアーチ形であるコンクリートカルバート（以下、矩形管、五角形管およびアーチ管という）と一般的な断面の内・外側が円

形のヒューム管（以下、円形管という）との比較、および②矩形管を用いる場合で辺を水平に設置する場合と45°傾けて設置する場合（以下、矩形45°管という）との比較を行った。

2. 実験方法

2.1 供試管

図-1に実験に用いたコンクリートカルバート（以下、供試管という）の断面形状を示す。各供試管とも内径は300mm、最小部材厚は60mmである。ただし、円形管については、既存のヒューム管の型枠による制約により57mmとなっている。また、表-1に配筋の仕様を示す。円周方向には、らせん筋を用い、軸方向筋は、そのらせん筋の内側に配置している。軸方向筋およびらせん筋の線材はJIS G 3532の3.2mm普通鉄線である。なお、各供試管とも遠心成形により製作した。

2.2 模型土槽

実験に用いた模型土槽を図-2に示す。模型土槽は、内法寸法が1800×1200×520mmの鋼製の槽である。図-2に示すように、槽の中心に供試管が配置されるよう、砂の充填および供試

*1 茨城大学工学部 都市システム工学科 教授 工博
 *2 茨城大学大学院 理工学研究科 博士後期課程
 *3 茨城大学工学部 都市システム工学科 教授 工博
 *4 中川ヒューム管工業(株) 技術部部長

(正会員)
 (正会員)
 (正会員)
 (正会員)

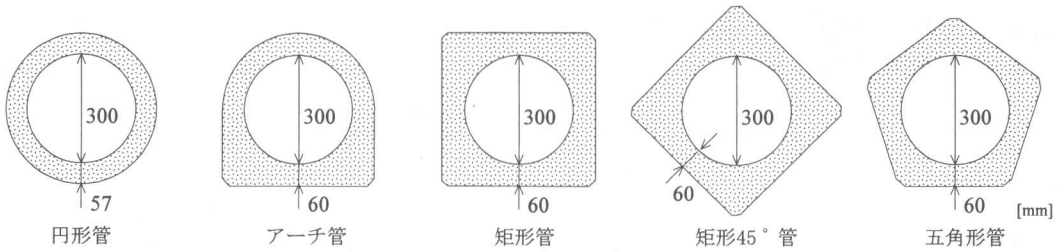


図-1 各供試管の断面形状

表-1 配筋仕様

供試管	らせん筋			軸方向筋 本数
	鉄筋比 [%]	ピッチ [mm]	かご径 [mm]	
円形管	0.5	28	340	10
アーチ管	0.2	65	330	10
矩形管	0.3	45	335	10
五角形管	0.5	27	340	10

* 矩形 45° 管は矩形管と同一

表-2 各実験における砂試料の充填状態

供試管	単位体積重量 γ_d [kN/m ³]	間隙比 e	相対密度 Dr [%]
円形管	14.9	0.754	66.8
アーチ管	15.1	0.736	71.6
矩形管	15.1	0.730	73.2
矩形 45° 管	14.9	0.756	66.3
五角形管	14.6	0.791	57.1

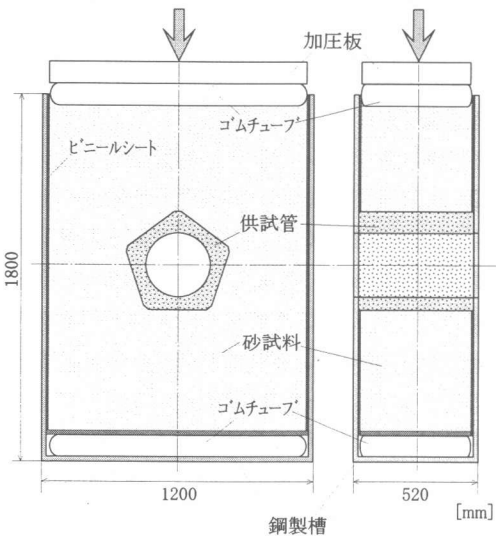


図-2 模型土槽および供試管の配置

管の設置を行った。なお、管の内面の観察ができるよう鋼製槽の側板の中心部に管内径と等しい孔を設けた。砂試料は、日光珪砂 4号を使用した。それぞれの実験にて均一かつ 65% 程度の相対密度 D_r を有する砂地盤とするため、一定速度で落下させ段階的に砂の充填を行った。各実験における砂の単位体積重量 γ_d 、間隙比 e および相対密度 D_r を表-2に示す。

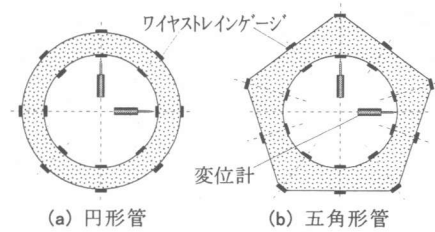


図-3 ワイヤストレインゲージおよび変位計の設置例

なお、使用した砂試料は圧密-排水三軸試験を行ったところ内部摩擦角 ϕ は 39.5° であった。

砂試料の上面に所定の鉛直土圧を生じさせるため、1000kN 試験機により鋼製の加圧板を介して载荷を行った。その際に砂試料へ均等に荷重を伝達させるために、模型土槽の上下には水を入れたゴムチューブを配置した。また、鋼製槽の側面にはあらかじめ潤滑剤を挟み込んだビニールシートを設置しておき、砂と鋼製槽の壁内面との摩擦の低減を図った。

2.3 各種測定項目および測定方法

ワイヤストレインゲージ (ゲージレンジ 60mm) により供試管に生じるひずみ値の測定を行った。図-3に測定位置の例として、円形管および五角形管について示す。図に示すように、供試管内面および外面にそれぞれ 8カ所 (五角

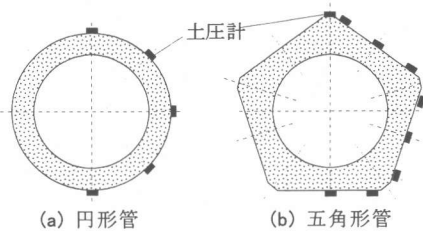


図-4 土圧計の設置例

形管のみ 10 カ所、図-3(b)参照) について測定を行った。供試管外面のワイヤストレインゲージについては、砂試料との直接的な接触から避けるため、供試管へ接着後に、その周囲にワックスを塗布しプチルゴムシートで全体を覆い保護した。また、供試管の内径の鉛直方向と水平方向の変化量を測定するためワイヤストレインゲージ変換式の変位計(容量 10mm)を図-3に示すように設置した。

供試管外面に作用する土圧を測定するためワイヤストレインゲージ変換式の土圧計(容量 2N/mm^2)を図-4に示すように供試管の周囲に配置した。土圧計は図に示すように供試管の片側外面のみとし、載荷とともに移動しないように土圧計の周囲をエポキシ樹脂で固定した。

また、荷重条件は、供試管の変形のみが進行し載荷荷重の増加が認められなくなるまで、あるいは鋼製槽の耐荷力の限度(載荷応力 $p = 1.5\text{N/mm}^2$)まで載荷するものとした。

3. 数値解析法

3.1 要素分割および境界・荷重条件

数値解析は、有限要素法(FEM)によった。図-5に五角形管の要素分割例を示す。コンクリートおよび砂については、平面応力の 4 節点固体要素とした。鉄線は、その剛性を鉄線と要素を共有するコンクリートの要素へ付加することが可能な 2 節点の埋め込み鉄筋要素とした。土槽壁面において水平方向の変位の拘束を、土槽底部において鉛直方向の変位の拘束を行った。コンクリート要素と砂要素との境界は、その垂直方向の変位は境界面に対して両要素の節点を

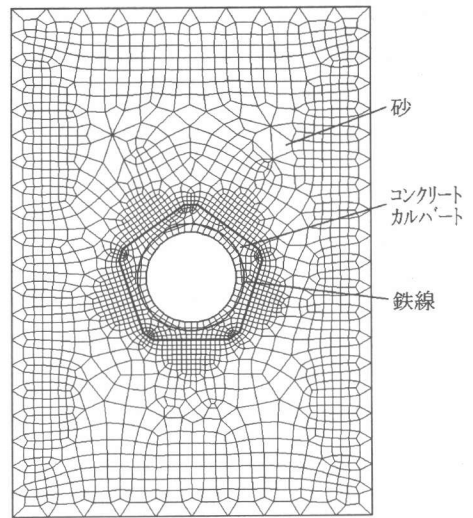


図-5 要素分割図(五角形管)

同値とすることで作用力を伝達させる条件とし、境界面の接線方向のせん断応力を 0 とすることで摩擦力を生じさせない条件とした。また、荷重は実験と同様に土槽上面へ等分布荷重として作用させた。なお、数値解析には非線形 FEM 解析コード、DIANA Ver.7.2 を使用した。

3.2 各材料特性

コンクリート要素は、圧縮域を Von-Mises の塑性モデル、引張域は分散ひび割れモデルを用いた。その分布ひび割れモデルは、ひび割れ後の終局ひずみ ϵ_u を 3300μ とした引張軟化モデルを定義した²⁾。なお、コンクリート要素は、材料試験結果に基づき圧縮強度 f'_c を 45N/mm^2 および弾性係数 E_c を 33000N/mm^2 に、引張強度 f_t は土木学会コンクリート標準示方書・設計編[平成 8 年度制定]の(3.2.2)式により算出した値 3N/mm^2 とした。また、らせん筋要素は、降伏強度を試験結果に基づく値 483N/mm^2 とする Von-Mises の塑性モデルとした。なお、事前に各供試管単体の外圧試験の結果(管の内外面に生じるひずみ分布およびひび割れ発生荷重など)をシミュレートする予備解析を行い、コンクリートおよび鉄筋要素に対する特性値およびモデルの要素分割等の有用性を検証した。また、砂の材料特性は、三軸試験結果に基づき得られ

た非線形弾性特性を与えた。つまり、弾性係数 E_s は式-1に示す拘束圧 σ_3 ($= K_0 \times p$, ここで K_0 は静止土圧係数, p は荷重応力) との関係の近似式を三軸試験の結果に基づき求めた。

$$E_s = 41 \sigma_3 + 20 \quad (1)$$

なお、式-1の単位は N/mm^2 である。また、ポアソン比 ν_s は、静止土圧係数 K_0 との関係式 ($\nu_s = K_0 / (1 + K_0)$) から 0.265 とした。

4. 各管の土中における力学的挙動

4.1 管に作用する土圧分布

各土圧計から得られた管外面に作用する土圧の分布および FEM 解析によりシミュレートした土圧の分布を図-6に示す。土中における円形管の外面に作用する土圧分布については、東田らが弾性理論を用いた二次元弾性モデルを提案している³⁾。この二次元弾性モデルは、土の応力および変位の誘導には、無限平板面にプラグが埋め込まれた場合の弾性解を土圧問題に適用した Hög のモデルを使用し、管の変位の誘導には、円形アーチの変形および断面力の関係を提案した Walthking のモデルを使用している。この弾性理論により得られた土圧分布を図-6に併せて示す(濃い破線)。なお、図に示す土圧分布は、管外面に対し垂直方向の土圧成分 σ_v であり、荷重応力 p が $0.5N/mm^2$ の時点での土圧分布を示している。

円形管では、管の上面および底面部に土圧が集中して作用することが実測値、FEM 解析値および弾性理論値から確認できる。また、FEM 解析値と弾性理論値との比較では、管の上面および底面部における値は両者で一致するのに対し、管の側面における土圧に差異が認められる。これは、地盤側方の境界条件の違いによるものと考えられる。つまり、二次元弾性モデルでは、地盤側方を無限縁と定義し、その無限縁におけるひずみの水平成分を 0 とする境界条件を与えるのに対して、FEM 解析では鋼製槽を再現するため地盤が有限幅となり、さらに砂要素に比

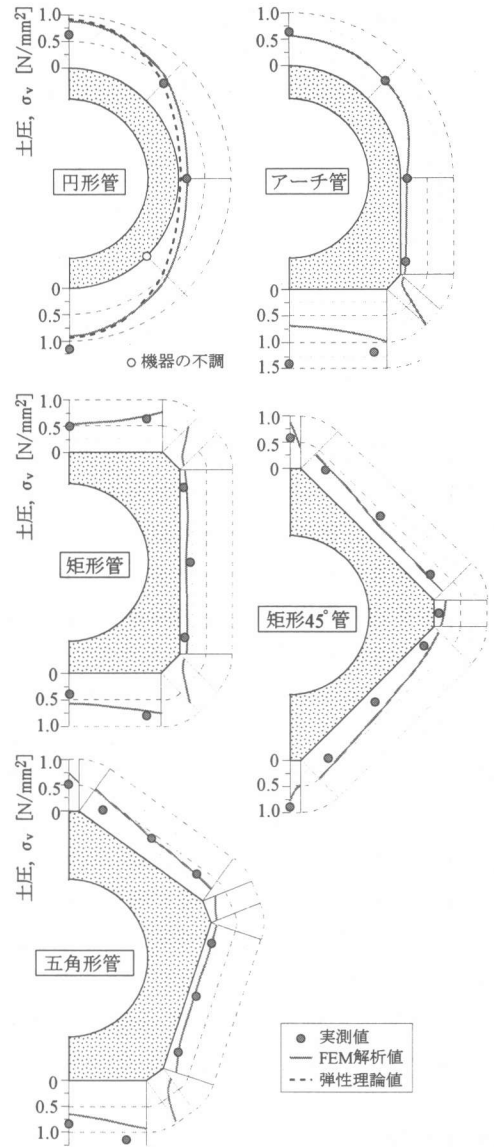


図-6 外面に生じる土圧 (荷重応力 p , $0.5N/mm^2$)

べて十分剛体と考えられる鋼製槽により水平変位が拘束されたため管の側面に作用する土圧が増加したものと考えられる。

矩形管には、主としてその上面および底面に土圧が作用する。また、その土圧分布は、中央部より端部に近い位置に高い値を示すことが実測値および解析値の両者から確認できる。

矩形管を 45° 回転して土中に配置した矩形

45°管では、矩形管とは大きく異なる土圧分布を示す。図から分かるように、管の側面（斜面）においても土圧が作用し、管外面の全周について土圧が分布しており、また、実測値と解析値はほぼ一致している。

アーチ管のアーチ部は円形管の土圧分布に近く、実測値と解析値はよく一致している。また、その底部の土圧分布の解析結果は矩形管の分布に近いのに対して、実測値がその解析値より高い値を示している。これは、アーチ管の土槽実験において管底部の砂が所定の締め固め程度を上回ってしまったためと考えられる。また、五角形管は、管の上部および側面は矩形45°管に近い土圧分布を示し、その底部では矩形管の土圧分布に近い分布となり、実測値と解析値とはよく一致している。以上のことから、各管の外面に作用する土圧分布の解析結果は実測値を的確に表現しているといえ、数値解析によるシミュレーションの有用性が認められる。

4.2 管に生じるひずみおよびひび割れ状態

図-7に、実験にて測定した各コンクリートカルバート内面の最大引張ひずみと載荷応力 p との関係を示す。図の上部に、最大引張ひずみを示した測定位置を示す。矩形管を除く各供試管の最大引張ひずみは内面の底部に生じた。矩形管については内面の上部のひずみが、若干、底部のひずみを上回った。また、図に示す解析値は、実測値にて最大ひずみを示した位置のひずみである。図-7から分かるように、実測値および解析値ともに最大引張ひずみと載荷応力 p との関係は、各管にて、ひずみ値が 100μ 程度を示した後、載荷応力 p の増加に対して引張ひずみの顕著な増加が認められる。これは、その時点にてひび割れが発生したためと考えられる。なお、実験では、いずれの管においても肉眼で観察できるひび割れは生じなかった。管に生じる引張ひずみの挙動は、その断面形状の違いにより大きく異なり、とくに円形管およびアーチ管では最大引張ひずみの増加が顕著である。また、図-7に示す最大引張ひずみと載荷応力 p と

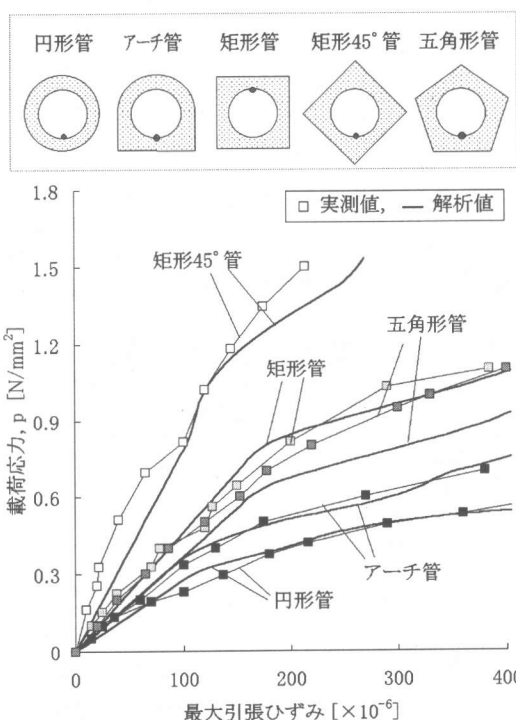


図-7 管に生じる最大引張ひずみと載荷応力の関係

の関係の実測値と解析値との比較から、各管の非線形挙動を再現する本論の FEM 解析の有用性が確認できる。

図-8には FEM 解析により得られた各管のひび割れ図を示す。円形管のみ載荷応力 p が 0.5 N/mm^2 の解析結果であり、その他の管は 1.0 N/mm^2 の結果を示す。図から、ひび割れのほとんどが管の内面の上部あるいは底部であり、初期ひび割れの発生位置（図-8の矢印にて示す箇所）は、図-7に示すゲージにて測定した最大ひずみを示した位置とほぼ一致していることが分かる。ただし、解析結果から得られる矩形45°管のひび割れ状況を見ると、そのひび割れ位置は、管内面の最上部および最下部から左右にずれた箇所であることが分かる。これは、矩形45°管は、その位置が最も部材厚が厚くなるため、ひび割れの発生は部材厚の薄い側方となったことを示している。アーチ管については管の外面にも曲線部と直線部の交点付近にて

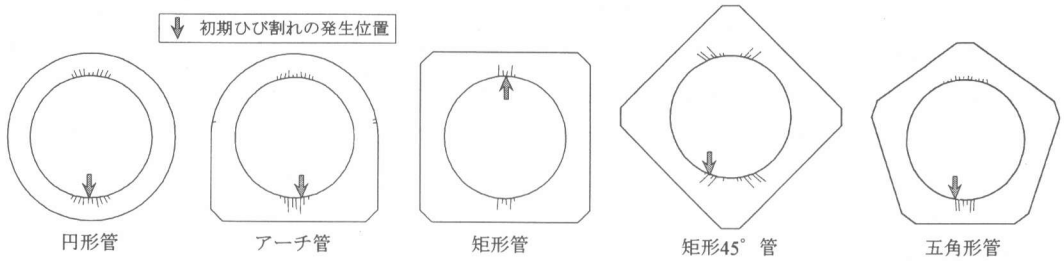


図-8 各カルバートの FEM 解析から得られるひび割れ図 (円形管：載荷 0.5N/mm^2 時，他の管： 1.0N/mm^2 時)

表-3 ひび割れ発生時載荷応力と耐荷性能指標

供試管	ひび割れ発生時 載荷応力 p_c [N/mm^2]	耐荷性能 指標
円形管	0.381	1.00
アーチ管	0.521	1.37
矩形管	0.831	2.18
矩形 45° 管	0.963	2.53
五角形管	0.655	1.72

ひび割れを示した。実際に、この位置に設置したゲージの値は、FEM 解析においてひび割れが生じた載荷応力付近にて顕著なひずみの増加が確認された。

4.3 耐荷性能の比較

数値解析により得られるひび割れ発生時の載荷応力 p_c から耐荷性能の評価を行った。このひび割れによる各カルバートの評価は、その内面にひび割れが発生する時点が使用限界と考えるヒューム管についての既存の設計基準に基づいたものである⁴⁾。また、ここでは各カルバートの物理的条件を一定とするため、円形管については、その部材厚を 57mm から他の管と同じく 60mm とするとともに、各カルバートごと異なっていたらせん筋は円形管と同一の条件を用いた。表-3に、ひび割れ発生時の載荷応力 p_c および円形管を基準値とした耐荷性能指標を示す。表に示すように、アーチ管、五角形管、矩形管そして矩形 45° 管の順に耐荷性能は高くなるという結果となった。とくに、矩形 45° 管では同一の部材厚を有する円形管に比べ、約 2.5 倍の耐荷性能を有する。同一の矩形管を用いても、その設置方法を工夫することにより耐荷性能が向上することが分かる。

5. 結論

本研究から次のことが言えよう。

- (1) コンクリートカルバートの断面形状を変化させることにより、土中の管外面に作用する土圧分布が変化することを土槽実験により確認するとともに非線形 FEM 解析によりシミュレートできることを示した。
- (2) コンクリートの非線形材料特性を導入した本論の FEM 解析は、土槽実験にて得られた各カルバートの力学的挙動を的確に再現できることを示した。
- (3) 本論にて対象としたコンクリートカルバートの内、正方形の外断面を有する矩形管を、土中に 45° 傾け設置する矩形 45° 管が最も高い耐荷性能を有することが分かった。また、その矩形 45° 管は、ひび割れ発生時の載荷応力による比較により、同じ部材厚の円形管に比べ約 2.5 倍の耐荷性能を有すると評価される。

参考文献

- 1) 福澤公夫，沼尾達弥，岩松幸雄，平野貴規：コンクリート巻立てヒューム管の力学的挙動，土木学会論文集，No.433，V-15，pp.167-176，1991。
- 2) 山田哲也：梁曲げ降伏型鉄筋コンクリート造骨組の非線形解析，三井建設技術研究報告，No.24，pp.93-97，1999。
- 3) 東田淳，三笠正人：弾性論による埋設管の土圧の検討，土木学会論文集，No.376，III-6，pp.181-190，1986。
- 4) ヒューム管設計施工要覧，全国ヒューム管協会，1980。