

# 論文 急曲線用コンクリート推進管の推進時の力学的挙動

福澤公夫<sup>\*1</sup>・吉田 淳<sup>\*2</sup>・作原陽一<sup>\*3</sup>・服部恵光<sup>\*4</sup>

**要旨：**急曲線推進工法には、従来、長さの短い管を多数用いる工法が採用されているが、推力に伴うひび割れ、管と管が直接接触し破損するなどの問題がある。1本の管に数カ所の可とう部を設けた急曲線用推進管が工夫され、それを用いた推進工法が提案されている。そこで、実大の推進管を用いて、曲率半径 22m の推進を模擬した実験を行った。その結果、急曲線用推進管を用いた工法では推力をコンクリート断面の広い範囲に分散し、従来の工法では不可能な急曲線推進が可能であることを確認した。

**キーワード：**急曲線推進、コンクリート推進管、可とう部、クッション材、FEM 解析

## 1. 序論

近年、都市では都市景観および環境を考慮し、電力ケーブルなど様々なケーブルの地中埋設化が進行している。その場合、交通等への影響を考慮してシールド工法により施工されることが多いが、建設費の高いことが問題となっている。コストダウンの一方法として下水道工事で用いられている推進工法の利用が考えられる。しかし、ケーブルの地中埋設の場合より小さな曲げ半径のカーブ、あるいはS字カーブなど、下水道に比べてより自由な曲線を描けなければならない。そのような場合には長さの短いコンクリート推進管(短管)を多数用いる工法が採用されているが、製造費、施工費ともに高価となる。また、管を曲がりやすくするため接続部のクッション材を全面に配置するのではなく、曲げの中心に部分的に配置する方法(以下センプラ方式という)が採用されることが多い。この場合、クッション材の端部で、推力に伴うせん断力により管軸方向にひび割れを生じたり、予定した折れ曲がり角度より大きくなり接続された2つの管が接触し破損することがある。これらの問題点を解決する新工法として管の中に数カ所の可とう部を設けた急曲線用コンクリート推進管を用いた推進工法が提案さ

れている。

本研究は、実大の急曲線用コンクリート推進管を用いた推進を模擬した実験により、従来の短管をセンプラ方式で接続する方法では不可能な急曲線推進が可能であることを実証するとともに、有限要素法(FEM)解析により、推進時のコンクリート推進管の力学的挙動を解明することを目的としている。

## 2. 実験の計画

実大の急曲線用推進管および短管を用いた推進実験を行った。表-1に実験の計画を示す。急曲線用推進管は呼び径 1500mm、管長 2430mm とし、壁厚 140mm および 200mm を比較した。

また、短管は呼び径 1500mm、管長 1215mm (半管)、壁厚 140mm を用いた。なお、両推進管とも遠心力製造され、コンクリート強度は約 50MPa である。

表-1 実験の計画

	急曲線用推進管		短管
	呼び径(mm)	1500	
管長(mm)	2430		1215
壁厚(mm)	140	200	140
実験種別	直線	曲線	曲線

\*1 茨城大学工学部 都市システム工学科 教授 工博 (正会員)

\*2 茨城大学大学院 理工学研究科 博士前期課程

\*3 奥村組土木興業(株)技術部

\*4 中川ヒューム管(株)技術部

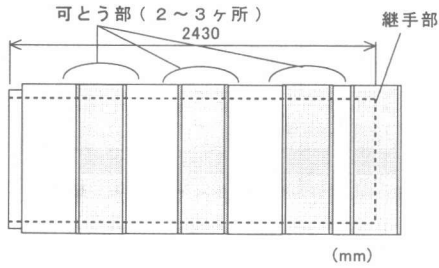


図-1 急曲線用推進管

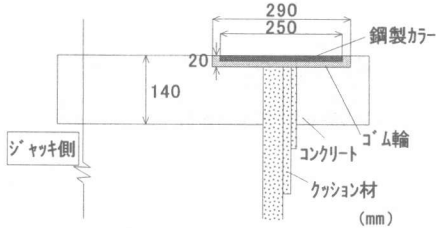


図-2 可とう部 (曲線推進時の圧縮部, 引張部)

### 3. 実大推進実験方法

急曲線用推進管は、図-1に示すように所要の曲げ角度に応じて管体数カ所にクッション材を配置した可とう部を設け、一本の管でありながら数本の管を接合したものと同様の働きを期待するものである。図-2に示すように可とう部は、クッション材、止水用ゴム輪および継手部保護用の鋼製カラーで構成されている。図-3(a)に示すように、さらに、クッション材の配置を工夫しており、厚さ5 mmのクッション材を上下部(曲げに対する中立軸を含む部分)で6枚、左右部(管は水平方向に曲げられるので、圧縮あるいは引張となる部分)で9枚、その中間に7枚配置して曲がる時圧縮となる部分のクッション材を厚く配置し、クッション材位置における曲がりを大きくするようにしている。クッション材としては発泡塩化ビニルが用いられている。

急曲線用推進管および短管の曲線推進試験方法を図-4および図-5に示す。急曲線用推進管の場合、コンクリート管を2つ接合し、可とう部に曲げ角度を与え、推進管を曲げた状態で、片側の管端面から8本の油圧ジャッキにより許容推力<sup>1)</sup>の2倍(7.84MN)まで載荷し、油圧ジャッキと反対側の管端面において4本のロードセルにより荷重を計測した。直線推進実験については、図-4における推進

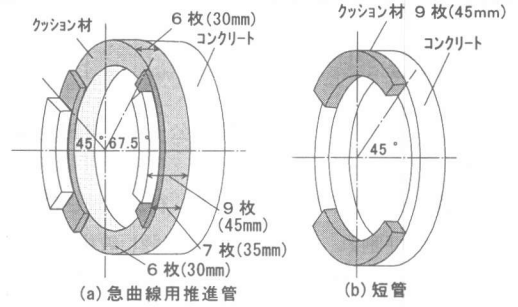


図-3 クッション材の配置

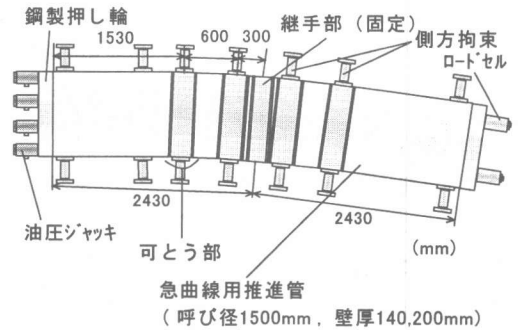


図-4 曲線推進実験 (急曲線用推進管)

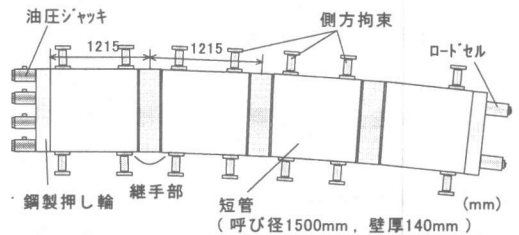


図-5 曲線推進実験 (短管)

管を一直線にした状態で、載荷を行った。図にも示されているように、可とう部は各管2カ所とし、管と管との継手部付近に集中させた。管と管との継

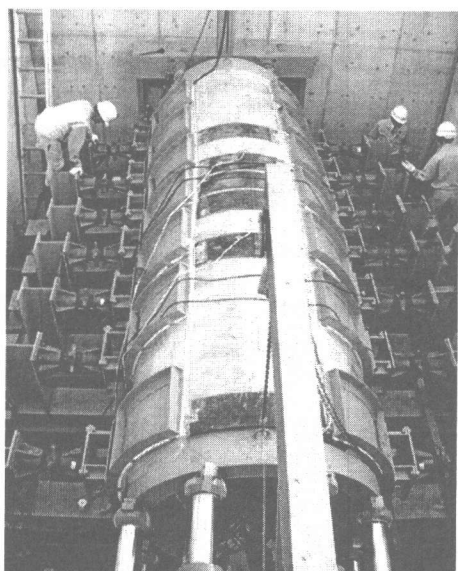


写真-1 急曲線用推進管の曲線推進実験状況

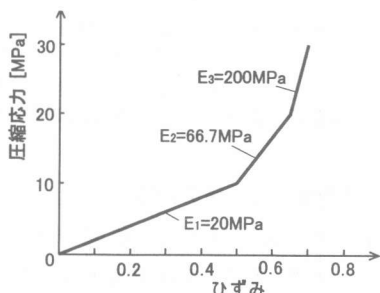


図-6 クッション材の応力-ひずみ関係

手部分は固定し、曲線推進実験時の曲げ変形は可とう部のみで生じさせることとした。実大急曲線用推進管の曲線推進実験状況を写真-1に示す。なお、可とう部における折れ曲がり角度は、 $1.63^\circ$ であり、これは曲線半径 $R = 22\text{m}$ に相当する。この値は、一般の推進管を用いるときの曲率半径の $1/3.5$ である。短管でも $1/4$ 管を用いれば、 $R = 22\text{m}$ とすることができるが、施工費の増大のほか、管が転倒しやすい、ひび割れが生じやすいなどの施工上の問題があり実施不可能といつてよい。

コンクリートのひずみの計測は、ワイヤストレインゲージ(ゲージ長 60mm)を用い、クッション材近傍(コンクリート端部から 100mm)を重点的に計測した。載荷側およびロードセル側それぞれ剛性の高い鋼製のリングを設置した。なお、短管の曲

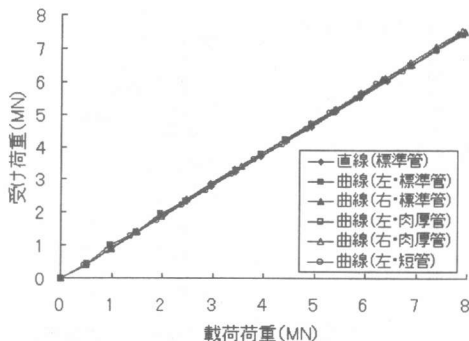


図-7 荷重-ロードセルの関係

線推進実験においては、継手の角度を保つため、図-5に示すように、片側の管端面から6本の油圧ジャッキにより許容推力の $1.5$ 倍( $5.87\text{MN}$ )まで載荷し、油圧ジャッキと反対側の管端面において4本のロードセルにより荷重を計測した。

図-3(b)は短管のクッション材の配置であり、先に述べたセンブラ方式によるクッション材の配置である。クッション材には従来のセンブラ方式と急曲線用推進管を用いた工法と比較するため、急曲線用推進管同様、発泡塩化ビニルを用い、1枚の厚さ $5\text{mm}$ のクッション材を管の中央部に9枚配置した。継手部一箇所の折れ曲がり角度は $1.54^\circ$ であり、急曲線推進管の可とう部の折れ曲がり角度とほぼ一致するようにした。図-6に発泡塩化ビニルの応力-ひずみ関係を示す。

また、推力伝達について、油圧ジャッキによる載荷荷重とロードセルによる荷重計測値の関係は図-7に示すように、直線推進および曲線推進とも、油圧ジャッキの計測値とロードセルの計測値の差は $5\%$ 程度の減少であり、推力伝達は十分行われていることが確認された。

#### 4. 直線推進時の挙動および応力の算定

##### 4.1 直線推進実験結果

図-8に急曲線用推進管のクッション材近傍の軸方向応力分布の測定例を示す。図に示すように、クッション材の厚い左右部で圧縮応力が小さく、クッション材の薄い上下部の圧縮応力が大きい。最上部、最下部の圧縮応力が高く、山の形の分布を

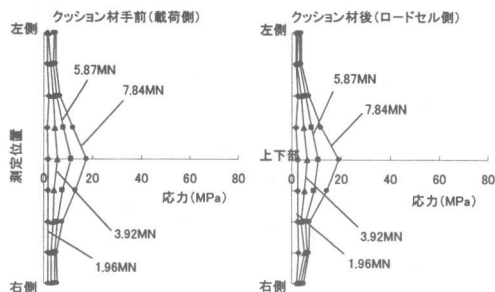


図-8 急曲線用推進管の軸方向応力分布

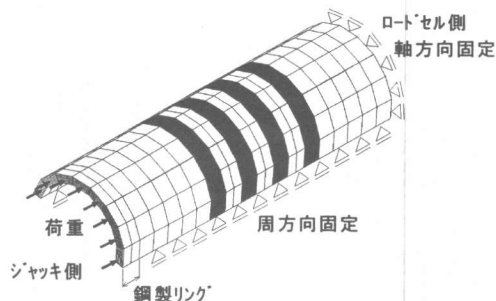


図-9 解析モデル図 (直線推進)

している。しかし、許容推力の 3.92MN 時においては、5MPa 程度であり、許容推力の2倍の 7.84MN 時においても 20MPa 程度の圧縮応力であった。

#### 4.2 可とう部近傍のコンクリートの圧縮応力の算定

可とう部におけるコンクリートの圧縮応力の算定には2つの方法を用いた。すなわち、1つはクッション材のみが変形し、コンクリートは変形しないものとしてクッション材近傍の応力を算定する方法<sup>2)</sup>である。他の1つは、3次元有限要素法である。解析モデルを図-9に示す。なお、解析モデルは推進管が管軸方向で上下対称であるため実物の推進管の半分のモデルを採用し、応力の変化が予測される可とう部を細かく分割した。また、拘束条件は、実物の半分のモデルを採用したため、その切断面に対し垂直方向の固定を行い、その連続性を再現した。また、推進管のロードセル側の端面を軸方向についての固定を行った。また、実験と同様に、推進管の端面に鋼製押し輪を配置した。クッション材の応力-ひずみ関係が非線形であることを考慮し、推進管の端面を均等に 0 ~ 7.84MN まで8ステップで載荷する非線形解析とした。クッション材の応力-ひずみ関係は図-6を用い、ポアソン比は 0.1 とした。材料特性値はコンクリートの弾性係数を 34.3GPa、ポアソン比を 0.167、ゴム輪の弾性係数を 9.6MPa、ポアソン比を 0.25 とした。なお、解析には汎用の有限要素法解析プログラム COSMOS/M Ver2.0を使用した。

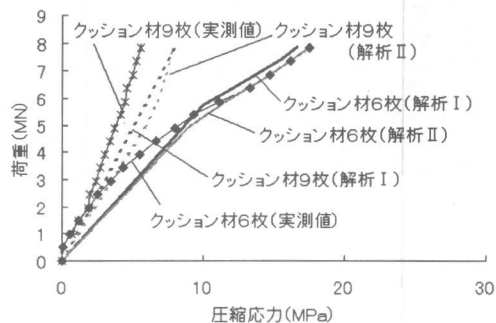


図-10 実測値、解析 I および解析値 II の比較

#### 4.3 実測値と解析値の比較

図-10にクッション材が9枚の位置と6枚の位置についてコンクリート応力の実測値とコンクリートの変形を無視した計算値(解析 I)<sup>2)</sup>および FEM 解析による計算値(解析 II)との比較を示す。図に示すように、コンクリートの変形を無視した計算値(解析 I)および FEM 解析による計算値(解析 II)とがほぼ一致していることが確認できる。クッション材が 6 枚の位置の実測値は変形が進んだ状態で一致し、9 枚の位置では、立ち上がりの部分が一致している。さらによく一致させるためには、クッション材の詳細な応力ひずみ関係を把握する必要がある。

### 5. 曲線推進時の挙動

#### 5.1 急曲線用推進管と短管の比較

図-11(a)および(b)に急曲線用推進管の標準管の左曲げおよび右曲げ試験時のクッション材近傍の軸方向圧縮応力分布の測定例を、図-12に短管のクッション材近傍の軸方向圧縮応力分布の測

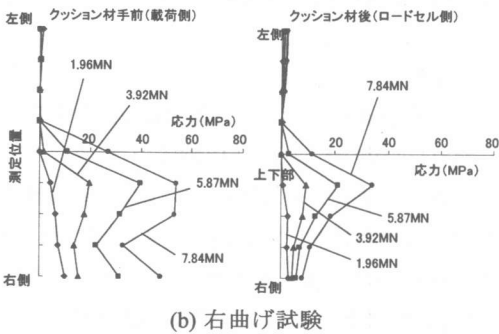
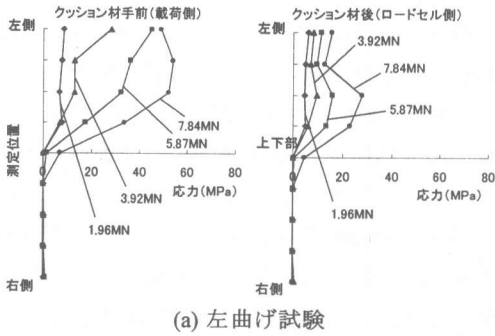
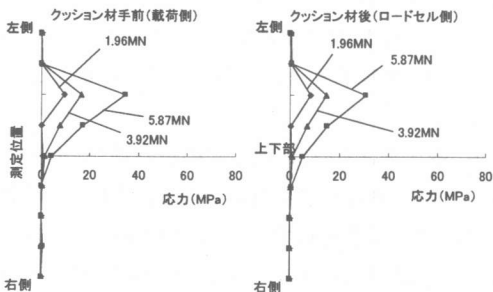


図-11 急曲線用推進管の軸方向応力分布



定例を示す。

図に示すように、急曲線用推進管の場合は、クッション材手前側(載荷側)に比べ、クッション材奥側(ロードセル側)の応力が小さい。これは、実験の都合上、その部分で管体を外から拘束したための影響と考えられる。ただし、既に述べたように載荷荷重そのものは、反対側に伝わっている。急曲線用推進管においては、曲げた時の内側(圧縮側)でほぼ均等な応力となる部分の存在することが確認された。なお、右曲げ試験においても、図-11

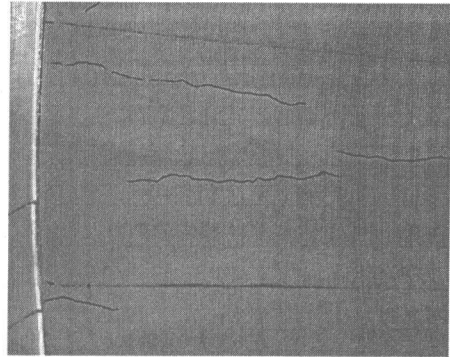


写真-2 急曲線用推進管のひび割れ状況 (7.84MN時)

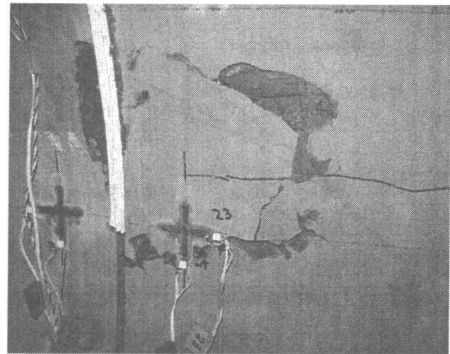


写真-3 短管のひび割れ状況 (5.87MN時)

(b)に示すように、左曲げ試験と同様の結果を得た。ここでは示さないが、他の可とう部のクッション材近傍の断面においても図-11に示すような傾向が確認された。

一方、短管の場合は、継手の位置で拘束を受けないためか、クッション材の両側でほぼ同一の応力となり、応力分布は山形となっている。最大応力の位置は、クッション材を配置した部分と配置しない部分の境界と一致した。ここでは示さないが、他の継手位置近傍の断面においても図-12に示すような傾向が確認された。なお、両推進管とも許容推力の 3.92MN 時では、コンクリート応力は 20MPa 以下であり、十分小さい。

写真-2に急曲線推進後の急曲線推進管の内部の状況を示す。写真に示すように 7.84MN まで載荷しても 0.1mm 以下のひび割れは生じたものの、推進管の破損につながるものは確認されなかった

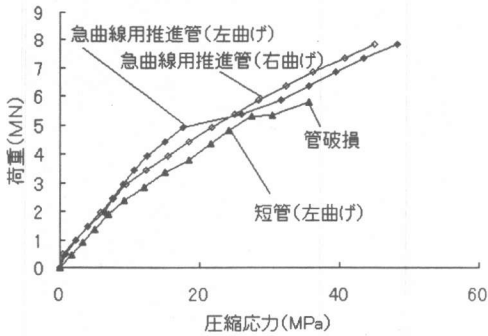


図-13 荷重—最大圧縮応力関係 (管種の比較)

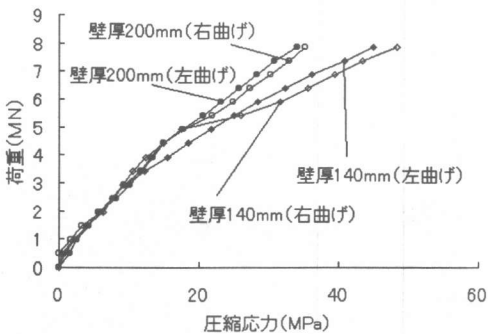


図-14 荷重—最大圧縮応力関係 (壁厚の影響)

(写真中の線はひび割れに沿ってマジックで書き入れたもの)。それに対し、短管は、1.96MN時に管軸方向にひび割れが発生し、写真-3に示すように5.87MNまでの载荷においてクッション材を配置した部分と配置しない部分の境界で、クッション材で押された部分のコンクリートの剥離が生じた。なお、ひび割れの発生位置と軸方向筋の位置とは、対応が見られなかった。

### 5.2 急曲線用推進管と短管の圧縮応力の比較

図-13に壁厚140mmの急曲線用推進管と同じ壁厚の短管の载荷荷重とコンクリートの最大圧縮応力の比較を示す。壁厚140mmの推進管の場合は、同一荷重における圧縮応力は、急曲線用推進管の圧縮応力の方が短管に比べて小さい。また、曲げ方向が変化してもほぼ同じ値が得られていることが分かる。

### 5.3 急曲線用推進管における壁厚の影響

図-14に急曲線用推進管の壁厚140mmと壁厚200mmの载荷荷重とコンクリートの最大圧縮応力の関係の比較を示す。壁厚が大きく変化したにもかかわらず、立ち上がり部分は、両推進管ではほぼ一致している。ただし、荷重が増大するに連れて、壁厚200mmの方が同一荷重に対する応力が小さくなる。また、壁厚200mmの場合においても、壁厚140mmの場合同様に曲げ方向が変化してもほぼ同じ値が得られていることが分かる。

### 6. 結論

- (1) 直線推進時において、急曲線用推進管のクッション材近傍のコンクリート圧縮応力は、クッション材が薄い位置の方が大きくなるものの、許容推力の3.92MN時においても十分小さい応力であった。コンクリートの応力は、変形がクッション材のみに生じると考えることによって、また、FEM解析によっても求めることができる。
- (2) 急曲線推進時において、従来の推進管(短管)に比べ、急曲線用推進管ではコンクリートの応力を圧縮側の半分にほぼ均一に分布させることができる。
- (3) 継手部あるいは可とう部の折れ曲がり角度を $1.6^\circ$ とする曲線推進実験において、従来の推進管(短管)では、許容推力の1.5倍の5.87MN時以上になると継手部のコンクリートが破壊するが、急曲線用推進管では、許容推力の2倍の7.84MN時においても多少のひび割れは生じるが、管の破損につながるものは確認されなかった。

### 【参考文献】

- 1) 全国ヒューム管協会: ヒューム管設計施工要覧
- 2) 吉田淳, 三井雅一, 福澤公夫, 服部恵光, 岡本泰彦, 藤原一博: 曲線推進用コンクリート管の直押し時の力学的挙動, 土木学会第54回年次学術講演会, V-394, pp.788-789, 1999.9.