

曲線推進に用いる推進工法用コンクリート管の鋼製カラーの厚さに関する研究

A study on the thickness of the steel-collar splices attached to concrete pipes for curve jacking method

三井雅一*, 福澤公夫**, 三岡善平***, 服部恵光****

Masakazu MITSUI, Kimio FUKUZAWA, Zenpei MIOKA and Toshimitsu HATTORI

- * 修士(工学), 茨城大学大学院理工学研究科 (〒316-8511 茨城県日立市中成沢町 4-12-1)
** 工博, 茨城大学教授, 工学部都市システム工学科 (〒316-8511 茨城県日立市中成沢町 4-12-1)
*** ティビュー (株), 生産技術本部生産部 (〒130-0026 東京都墨田区両国 4-30-5)
**** 中川ヒューマン工業 (株), 技術部 (〒300-0051 茨城県土浦市真鍋 1-1-13)

Pipe jacking is a method of constructing underground conduits for sewage. Works by the method are increasing steadily because of the lower cost compared with that of the shield tunnelling. For preventing pipe separation during curve jacking, a steel-collar splice is set between pipes. The thickness of the steel-collars have been determined empirically, since no experiments on the structural behavior of the steel-collars have been reported. In the present study, experiments on the structural behavior of steel-collars with pipes are described, and it is proved that the analyses using the finite element method gives a reasonably accurate prediction of the behavior. Furthermore, it is proposed that the steel-collar thickness of pipes from 800 to 3000 mm could be reduced to 40% of the present value based on the analysis.

Key Words: pipe jacking method, steel-collar, concrete pipe, FEM

1. はじめに

推進工法はシールド工法に比べ、掘削土量が少なく、施工コストを抑えられる点などから、とくに都市部の下水道工事に広く適用されている。近年その工事量は増加しており、とくに、1992年度からの増加が顕著である¹⁾。建設省都市局は、工事に伴う専有面積が小さいことから、1996年8月に推進工法をはじめとする非開削工法の活用の意向を明らかにしており¹⁾、今後ますます推進工法の採用が増加するものと思われる。

推進工法は、土中において推進管を順次、水平方向に押し込む工法であり、先端の掘削方法などの相異によりいくつかの工法に分類できる²⁾。推進工法用コンクリート管（以下、推進管という）を用いた推進工法においては、先行管と後続管の間には両者のずれ防止および漏水防止のため、鋼製のリング状金具である鋼製カラー（以下、カラーという）が取り付けられる。推進工事が行われた当初、推進管とは独立したカラーが用いられており、推進に伴い先頭方向からカラーと推進管との間に土が侵入し、カラーの変形あるいは破断などの事故が頻発した。その後、推進管の製造時にカラーを取り付け固定するという改良がなされ、その問題は解決している。しかし、曲線推進の場合、カラーは直線推進時に具備すべき性能に加えて、曲線部において後続の推進管が抜け出さない

ような寸法と曲げ変形に対する構造的耐力を有するものでなければならない。ところが、直線推進時はもとより、曲線推進時を対象とするカラーの構造的な研究についての報告は見あたらず、そのカラーの厚さは経験的に定められているのが現状である。そこで、曲線推進時を中心とするカラーの力学的挙動に関する実験を行うとともに、3次元有限要素法（FEM）解析によりその挙動の再現を試みた。さらに、その解析方法を用いて、各推進管寸法に応じたカラー厚さの提案を行った。

2. 実験概要

2.1 カラーの具備すべき性能

推進管のカラーを含む継手部は、曲線推進を含む施工時に接続された推進管が抜け出さないような構造であること、施工後において漏水しない構造であることが求められる。それらの性能を満足するには、曲線部の施工においてカラーに生じる応力は常に弾性範囲内であることが必要となる。これは、曲線部で塑性変形を起こすと、その部分が直線部に移動したときに、カラーと推進管との間に隙間が生じて、漏水する恐れがあるからである。

また、カラーは供用期間中、腐食に対する十分な厚さを有するとともに、搬出入時でも容易に変形しない構造・厚さを考慮しなければならない。

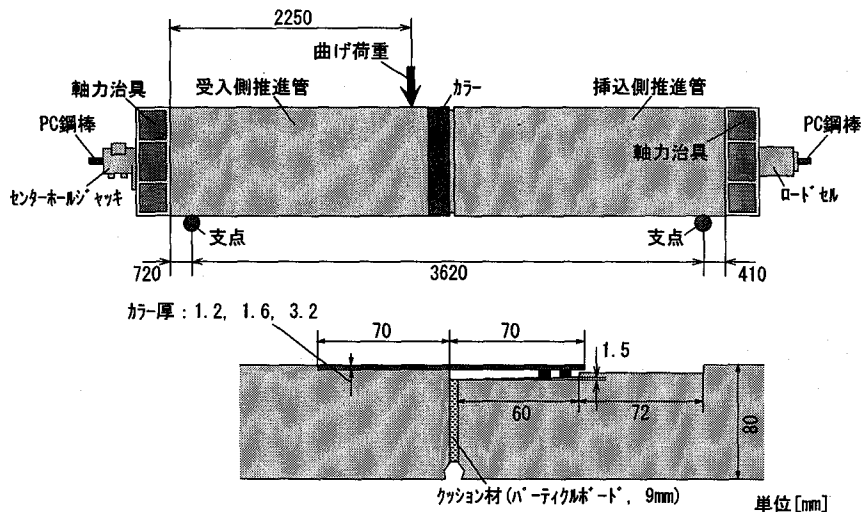


図-1 推進管および曲げ実験方法

表-1 実験組み合わせ

実験 No	カラー厚(mm)	ゴム輪位置
1	1.2	①
2	1.6	①
3	3.2	①
4	1.6	①+②

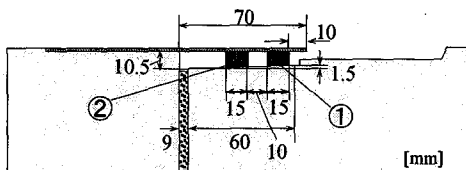


図-2 ゴム輪位置

本研究は、曲線推進時におけるカラーを含む継手部の挙動に関する実験および解析を行い、その結果をもとに曲線推進時にカラーの具備すべき厚さを提案することを目的とする。なお、カラーの腐食および搬出入時の変形については本研究の範囲外とする。

2.2 実験に用いる推進管

本研究では、建設コスト削減の流れの中で、推進工法の経済性から今後その使用が増加するであろう中・大口径曲線推進工法（呼び径 800 ～ 3000）に着目した。そこで対象とする推進管は、日本下水道協会が規定している「下水道推進工法用鉄筋コンクリート管」(JSWAS A-2)の呼び径 2600（内径 2600mm）とした。なお、この管のカラーの厚さは 9.0mm、突出し長さは 220mm そしてコンクリート管の厚さは 220mm である。実験では、呼び径 2600 の模型管として呼び径 800 の推進管を用いた。この呼び径 800 の推進管寸法を図-1に示す。呼び径 2600 のカラー厚 9.0mm に対応する模型管のカラー厚さは 2.8mm と算定される。鋼板の規格（JIS G 3101）の関係上、1.2、1.6 および 3.2mm を用いて実験を行った。また、カラー突出し長さは縮尺により 70mm とした。

2.3 実験方法

実験は、図-1に示すように 2 体の推進管を接合し、中央にφ 23 の PC 鋼棒を配置し、センターホール型の油圧ジャッキにて緊張を行い推進時の推力と考えた。軸力は、50kN 刻みで 200kN まで変化させた。その軸力は PC 鋼棒端部に取り付けたロードセルにより測定した。その状態で、受入側推進管の継手部付近に曲げ荷重を与え、接合部に折れ角度φを生じさせた。

2.4 実験の組み合わせ

実験の因子は、カラーの厚さとカラー内面に設置される止水用ゴム輪の本数および位置とした。実験の組み合わせを表-1に示す。厚さについては、前述のように現行厚さに近い 3.2mm、その 1/2 厚の 1.6mm およびさらに薄い 1.2mm の 3 水準とした。カラーは、熱間圧延鋼板の SS400 を用いて製作した。

止水用ゴム輪（以下、ゴム輪と呼ぶ）は、その材質が JIS K 6353（水道用ゴム）の IV 類で規定され（硬さ Hs : 50 ± 5、引張強さ : 880N/cm² 以上）、その形状および寸法は JHPAS（日本ヒューム管協会）に定められている。その形状は特殊で変形しやすい工夫がされている。本研究ではカラーに生じる力と変形の関係が明確となるように、図-2に示すような矩形断面を有するゴム輪を使用した。また、ゴム輪の圧縮試験結果については後述する。また、このゴム輪は、実施工時には必要に応じてカラー先端位置に 1 本設置するか間隔を置いて 2 本設置している。本実験においても、図-2に示すようにゴム輪位置を、カラー先端から 10mm の位置（①）と、その①の位置より 10mm 間隔をおいた位置（②）とした。また、実験におけるゴム輪の位置は表-1のように①の位置にゴム輪を 1 本設置する場合と①および②の両方にゴム輪を設置する 2 水準とした。なおゴム輪位置の影響に関する実験はカラー厚が 1.6mm の場合について行った。

2.5 測定方法

カラーに生じる管軸方向（推進管長手方向）および管

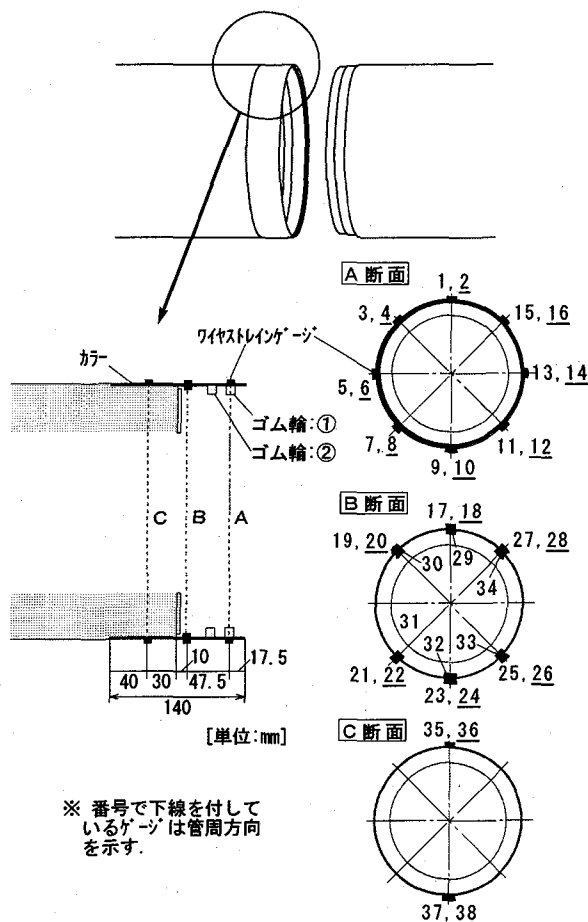


図-3 ワイヤストレーンゲージ貼付位置

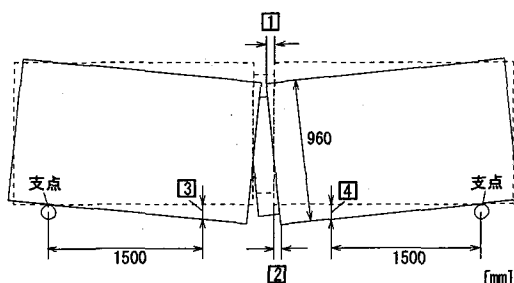


図-4 変位計設置位置

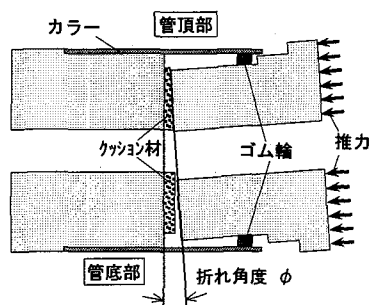


図-5 曲線推進時の接合部の状態

周方向のひずみは、図-3に示すように管の頂・底部を重点的にワイヤストレーンゲージ（ゲージレンジ 5mm）にて測定した。また、図-3に示すように B 断面ではカラー内面にも管軸方向にゲージを貼付した。

曲げ実験時には、図-4に示すように①～④の位置に変位計を設置し、曲げ変形による管の沈み込み量と抜け出し量を計測した。それぞれの測定された変位量から式-1および式-2を用いて折れ角度を算定した。両者の方法から求まる角度はほぼ一致しており、両者の平均を折れ角度 ϕ として整理した。

$$\phi_A = \tan^{-1} \frac{\delta_3}{1500} + \tan^{-1} \frac{\delta_4}{1500} \quad (1)$$

$$\phi_B = \sin^{-1} \frac{\delta_1 + \delta_2}{960} \quad (2)$$

ここに、 ϕ_A ：沈み込みによる折れ角度

ϕ_B ：抜け出しによる折れ角度

δ_i ：各変位計による測定値（mm）（ $i = 1, 2, 3, 4$ ）

なお、接合時の挙動と曲げ変形時の挙動を明確にするために、接合を行い軸力を作用させるまでの測定後、その状態を保持したまま測定値を 0 として曲げ荷重を作用させ曲げ変形時の測定を行った。

3. 実験結果

3.1 カラーの応力の発生過程

受入側推進管の端部には、管体と一体化したカラーがあり、その内面にゴム輪が取り付けられている。また、管と管との接合面には推力を均等に伝達するためにクッション材が配置されている。接合時、ゴム輪は挿入側推進管の挿入に伴い放射方向に圧縮され、ゴム輪が取り付けられているカラーに応力が生じる。直線部施工においては、そのゴム輪は接合時の圧縮状態を保持し続けるだけだが、継手部が曲線部に達すると、図-5に示すように折れ角度が生じ、圧縮側にあるゴム輪は、より圧縮される。また、反対側においては管の抜け出しが生じるとともにゴム輪は接合時に生じていた圧縮量が減少する。本文では以後、実験の配置にならない曲線推進時においてカーブ内側に当たるカラー位置を管頂部、カーブ外側を管底部と表記する。

3.2 カラーに生じる応力の算定方法

図-3のように、実験では管軸方向および管周方向のひずみを計測した。このひずみよりカラーに生じる応力を 2 軸弾性応力状態であることを考え、式-3および式-4により管軸方向応力 σ_a および管周方向応力 σ_r を求めた。

$$\sigma_a = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [(1-\nu)\varepsilon_a + \nu\varepsilon_r] \quad (3)$$

$$\sigma_r = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [\nu\varepsilon_a + (1-\nu)\varepsilon_r] \quad (4)$$

ここに σ_a ：管軸方向応力 (MPa)

σ_r ：管周方向応力 (MPa)

E ：カラーの弾性係数（ $= 2.0 \times 10^5$ MPa）

ν ：カラーのポアソン比（ $= 0.300$ ）

ε_a ：管軸方向ひずみ

ε_r ：管周方向ひずみ

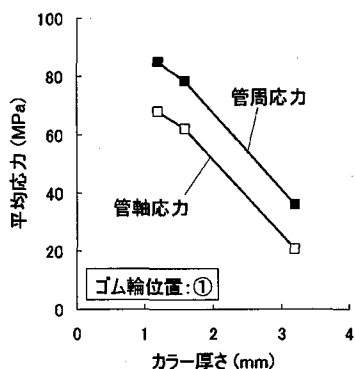


図-6 接合時カー応力に及ぼすカー厚さの影響

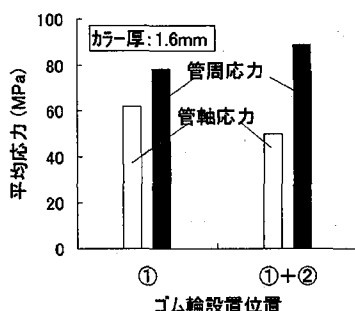


図-7 接合時カー応力に及ぼすゴム輪位置の影響

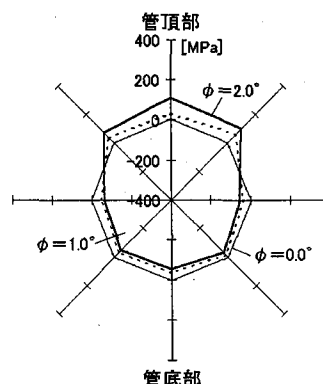
3.3 接合時のカラーに生じる応力

接合した後、200kN の軸力を与えた場合のゴム輪位置①付近に生じる管軸方向および管周方向応力の実験結果を、図-6に示す。図に示す応力は、A 断面に設置した 8 点の管軸方向および管周方向の応力の平均値である。図から分かるように両方向ともに引張応力となり、カラーが厚くなるにしたがって、応力はほぼ直線的に減少する。また、管周方向応力の方が、管軸方向に比べ大きい値となっている。なお、軸力が 200kN までの範囲では、その軸力を変化させてもカラーに発生する応力に変化はなかった。これは、軸力はクッション材を介して後方管から前方管に伝達するものでありゴム輪の反発力に左右されるカラーの応力には直接的に影響しないためである。

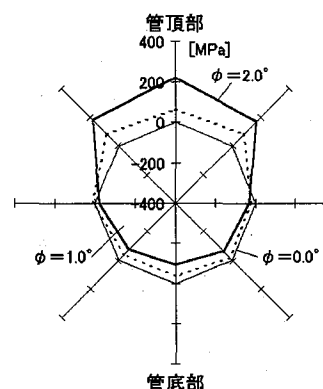
図-7に、ゴム輪を①に設置する場合と①+②に設置する場合について、①付近における接合時のカラーの応力の比較を示す。図から分かるようにゴム輪の設置本数の違いによりカラーに生じる応力はそれほど大きく変化しない。カラーの奥側(②)に設置されたゴム輪は、図-2に示すように挿入管の継手部のテーパの影響が少なく圧縮率が小さいため、ゴム輪 1 本設置の場合と 2 本設置の場合に大きな差が生じない結果となったのであろう。ただ、ゴム輪の設置本数が増加すると管周応力は増加し、管軸応力は減少する傾向が確認される。これは、②のゴム輪を設置することで、よりカラーが押し広げられるとともに、ゴム輪による曲げの影響が緩和されるためと考えられる。

3.4 曲げ変形によるカラーの応力

(a) カラーの応力分布の変化



(a) 管軸方向応力



(b) 管周方向応力

図-8 曲げ変形によるカーの応力分布 (ゴム輪位置①)

図-8に、カラー厚が 1.6mm、ゴム輪位置①の曲げ変形実験にて折れ角度 ϕ が 1.0° および 2.0° の時点でのカラーに生じる応力分布を示す。なお、後述するが呼び径 2600 の推進管の許容折れ角度は、 $1^\circ 08'$ である。図から分かるように、管軸方向および管周方向応力ともに管頂部にて最大の引張応力が生じ、管底部では最大の圧縮応力の発生が確認できる。この傾向は、他の実験結果についても言える。これは、3.1で述べたように折れ角度が生じるとゴム輪が圧縮され、図-5の模式図に示すように管頂部ではカラー内面よりゴム輪が突き上げるので全方向に引張が生じる。それに対し管底部では接合時のゴム輪の圧縮が緩和され、そこに生じていた引張応力が緩和され小さくなるため、両方向にその変化分となる圧縮応力が生じる。

(b) 軸力の影響

図-9に、継手部に折れ角度が増すときのカラーに生じる応力変化の軸力による影響を示す。なお、ゴム輪位置①の場合であり、応力は断面 A のカラー管頂部における結果である。実験では、軸力を 4 水準変化させて行ったが、図から分かるように折れ角度 ϕ とカラーに生じる応力との関係は、接合時と同様に軸力の大きさによる変化は見られない。これは、曲げ変形が加わっても軸力は管と管との接合面に設置されているクッション材を介して作用するものであり、ゴム輪の圧縮変形に大きく影響

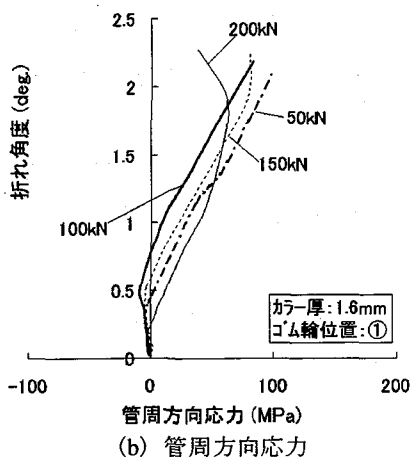
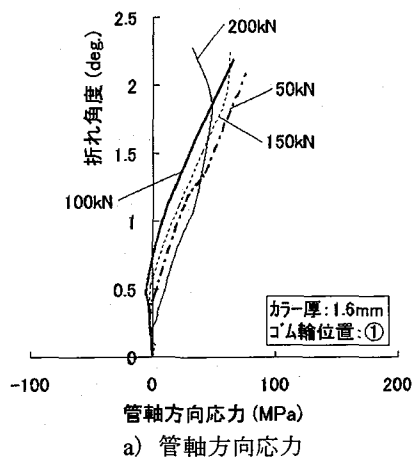


図-9 軸力が曲げ変形によるカラーの応力に及ぼす影響

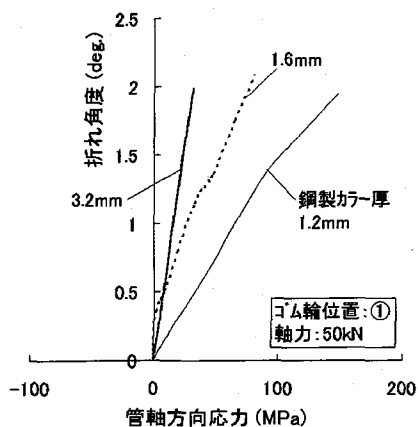


図-10 カラーの厚さが曲げ変形による管軸方向応力に及ぼす影響

を受けるカラーとは独立な関係となるため、軸力の影響が小さいものと考えられる。

(c) カラー厚の影響

図-10にカラー厚を変化させるときのカラー管頂部における管軸方向応力の変化量と折れ角度との関係を示す。図から分かるようにカラー厚が薄いほど折れ角度の増加に伴う引張応力の増加量が大きい。とくに、カラー厚 1.2mm の場合は他に比べ大きな応力が発生している。

表-2 解析における材料特性値

	弾性係数 (MPa)	ポアソン比
カラー	200000	0.300
ゴム輪	9.6	0.250
推進管	35000	0.167
クッション材	7000	0.200
薄層	0.01	0.250

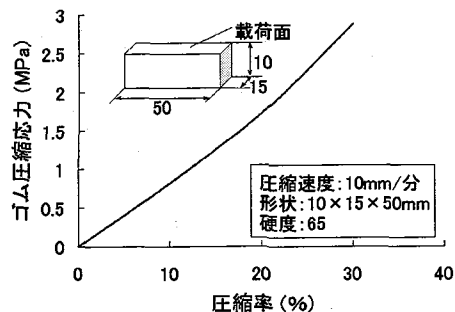


図-11 ゴム輪の圧縮実験

4. 有限要素法によるカラーの力学的挙動の再現

4.1 解析概要

曲線推進時のカラーの力学的挙動は、接合時の挙動と曲げ変形による挙動に分けて実験を行った。本研究では、有限要素法 (FEM) 解析においても両者を分けて解析を行い、解析によって得られた応力を加え合わせることで曲げ変形時の挙動として整理した。

解析に用いた材料特性値を表-2に示す。解析モデルは弾性モデルとした。これは、①曲線推進時にはカラーの応力は弾性範囲になければならないこと、②ゴム輪は図-11に示すゴム輪の圧縮実験結果より、ほぼ弾性的な挙動を示していること、③クッション材は、塑性変形するもののカラーの挙動に直接的な影響を与えないことを考慮したためである。モデルには 8 節点アイソパラメトリック固体要素 (SOLID 要素) を用いた。また、解析には汎用プログラム COSMOS/M Ver 2.0 を使用した。

4.2 接合時の解析

接合時の解析には、推進管本体はモデル化せずにカラーおよびゴム輪のみをモデル化した。解析モデルの要素分割図を図-12に示すとともに、拘束および荷重条件を図-13に示す。解析では、あらかじめ挿入側推進管およびカラーの寸法から、接合時のゴム輪の圧縮率を算定しておき、その圧縮率に応じた変形量をゴム輪に作用させることとした。

図-14に解析より得られたカラーの変形状態を示す。ゴム輪位置①の場合の変形状態を示しているが①+②の場合についてもほぼ同様な状態である。実際の変形量は小さいため、この図では放射方向の変形を変形量の 200 倍として表示している。図-14の手前側半分までのカラーは推進管に取り付け固定されていることから変形はほとんど生じていないが、ゴム輪が設置されている付近のカラーにはゴム輪の設置位置からラップ状に膨らんだ変

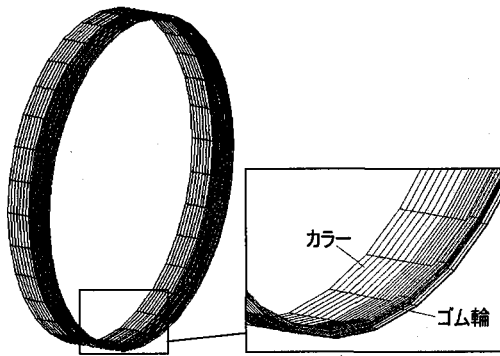


図-12 要素分割図 (接合時 FEM 解析)

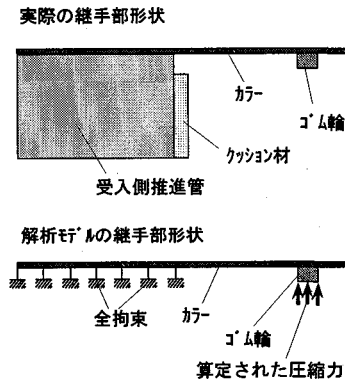


図-13 接合時の解析モデル

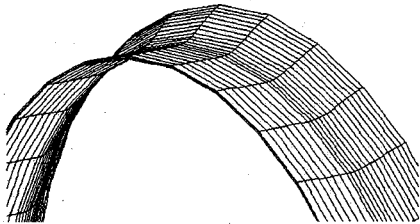


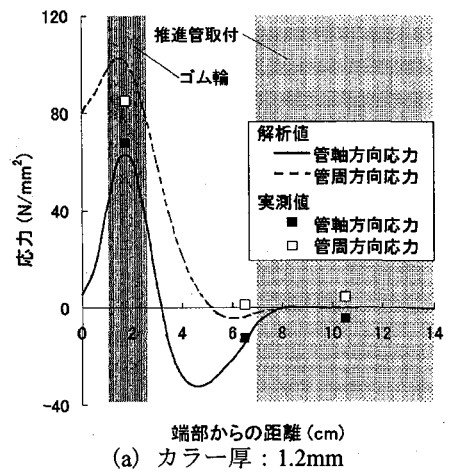
図-14 カラーの変形状態 (ゴム輪位置①, 変形倍率×200)

形を生じることが確認される。

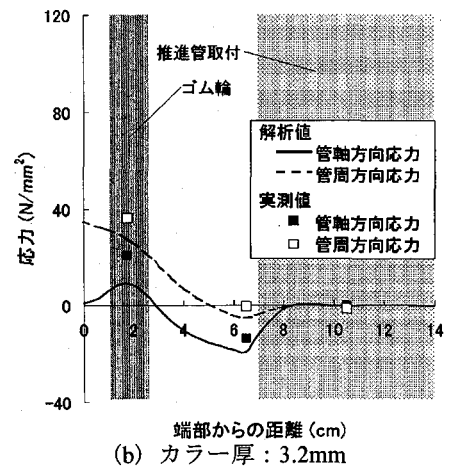
図-15に、カラーに生じる応力の解析値と実測値との比較の例を示す。図の横軸にはカラー端部からの距離を示し、縦軸に管軸方向および管周方向応力を示している。図に示すように、ゴム輪位置にて両方向とも応力が増加する。(a) はカラー厚 1.2mm の場合を、(b) はカラー厚 3.2mm の場合を示しているが、カラーが厚くなることにより応力が小さくなるのが分かる。また、解析値と実測値は、ほぼ一致しており、ここで述べた FEM 解析により実際の挙動を再現できるといえよう。また、ここでは示さないが他の解析結果についても同様の解析結果の適合性を確認した。

4.3 曲げ変形の解析

図-16に曲げ変形の FEM 解析に用いた要素分割図を示す。図-17に示すようにモデルでは受入側推進管の端面を全方向に拘束し、挿入側推進管の端部の下側より上方に集中力を作用する片持ち梁方式のモデルとした。なお、図-17に示すように受入側推進管については、カラ



(a) カラー厚 : 1.2mm



(b) カラー厚 : 3.2mm

図-15 接合による応力の比較 (管頂部)

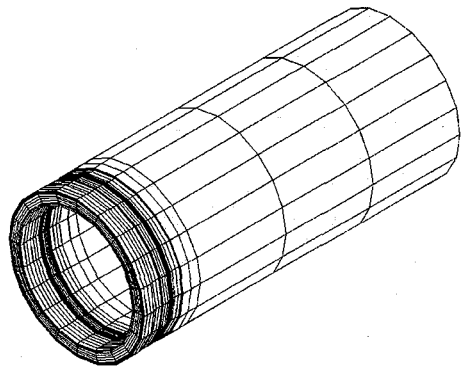


図-16 要素分割図 (曲げ変形 FEM 解析)

ー付近のみをモデル化した。図中には接合部の詳細形状についても併せて示す。ゴム輪と挿入側推進管との境界ならびにクッション材とそれに接する挿入側推進管との境界には弾性係数を 0.01MPa と非常に小さく設定した薄層を設定し³⁾、この部分で挿入側推進管の移動が拘束を受けないように配慮した。薄層の厚さは、既往の研究^{3), 4)}と同様に接触対象物 (ここでは、ゴム輪およびクッション材) の厚さのそれぞれ 3% として与えた。前述の曲げ変形実験と同様に、解析では軸力を一定に設定し、曲げ荷重を増加させながら 2 体の管に曲げ変形・折れ角

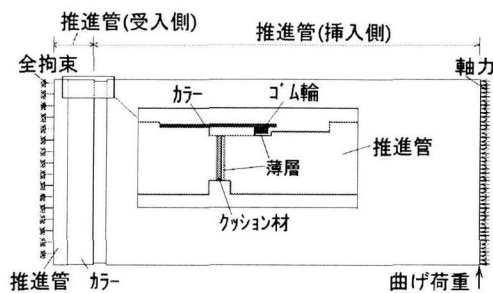


図-17 解析モデルの拘束および荷重条件

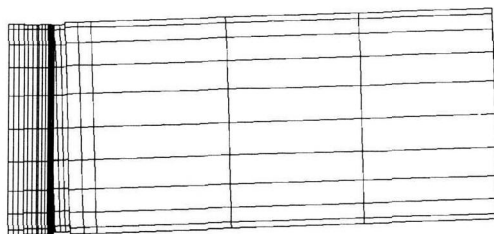


図-18 変形状態 (折れ角度: 2°, 変形倍率× 1)

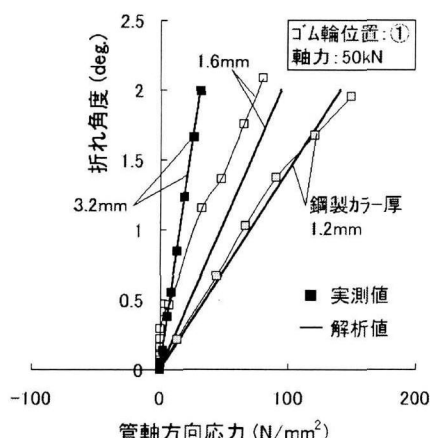
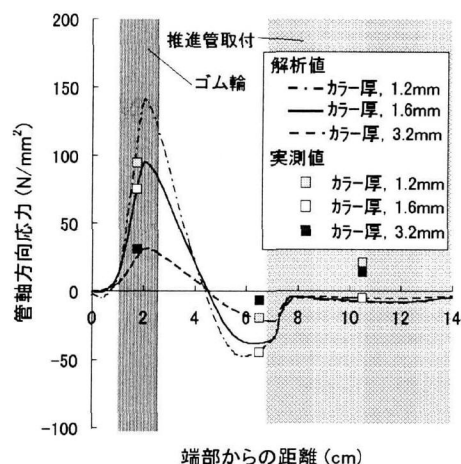


図-19 折れ角度が増加するときの比較 (管頂部)

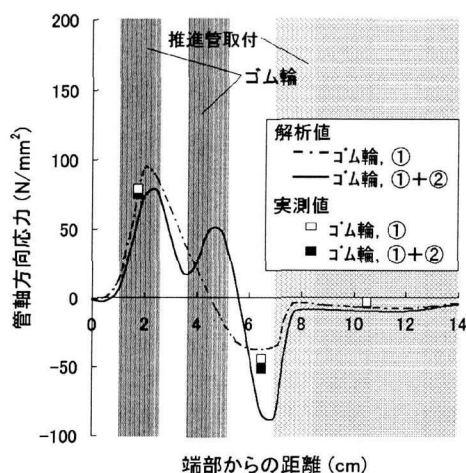
度を生じさせた。

図-18に折れ角度が2° 00' のときの変形状態を示す。図から分かるように、挿入側推進管が底部で抜け出ようとする挙動が確認できる。図-19に、解析により得られた折れ角度 ϕ とカラーの応力との関係を示す。図-19には実測値も併せて示しているが、本研究による FEM 解析による再現性が示される。

カラー端部からの距離とそこに生じる応力の関係について実測値と解析値との比較を図-20に示す。(a)は、カラー応力に及ぼすカラー厚の影響を示し、(b)は、ゴム輪位置の影響を示している。図に示すように、この場合も FEM 解析は実測値の傾向を表現できることが分かる。図では管軸方向応力のみを示しているが、管周方向応力についても解析の適応性を確認している。図-20より、カラー厚が薄くなるにつれ、ゴム輪の位置における発生応力が増加する傾向が確認できる。また(b)よりゴム輪本数により応力分布が異なることが確認される。



(a) カラー厚の影響 (ゴム輪位置, ①)



(b) ゴム輪位置の影響 (カラー厚, 1.6mm)

図-20 曲げ変形時の比較 (管頂部, 折れ角度 2°)

5. カラーの厚さの提案

5.1 カラーの評価式

4.において、FEM 解析により曲げ荷重を受けるときのカラーの挙動を再現できることを示した。ここでは前述の解析方法と呼び径の異なる推進管に適用し、各呼び径ごとのカラー厚の提案を行う。前述のように、カラーの応力は2軸応力の状態であり2軸応力下の降伏条件に基づいてカラー厚を決定する必要がある。本研究では、カラーを完全弾塑性体と考え、式-5に示す多軸応力下の Von-Mises の降伏基準によるものとした⁵⁾。

$$\sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} = F \quad (5)$$

ここに、 σ_i : 主応力 ($i=1,2,3$)

F : 材料強度の規格値 (降伏強度)

式-5の σ_1 を管軸方向応力 σ_a ， σ_2 を管周方向応力 σ_r

表-3 各呼び径のカラー寸法

呼び径	カラー厚 (mm)	許容折れ角度
800	4.5	3° 40'
900		3° 15'
1000		2° 55'
1100		2° 40'
1200		2° 26'
1350	6.0	2° 11'
1500		1° 58'
1650		1° 47'
1800		1° 38'
2000		1° 29'
2200	9.0	1° 21'
2400		1° 15'
2600		1° 08'
2800		1° 03'
3000		0° 59'

表-4 各解析モデルにおけるカラー厚

呼び径	カラー厚 (mm)			
	規格厚	4 割減	6 割減	8 割減
800	4.5	2.7	1.8	0.9
1200				
1350				
2200	6.0	3.6	2.4	1.2
2400				
3000	9.0	5.4	3.6	1.8

および $\sigma_3 = 0$ として、左辺を 2 軸応力下のカラーの評価応力 S として整理すると式-6 になる⁶⁾。

$$S = \sqrt{\sigma_a^2 - \sigma_a \sigma_r + \sigma_r^2} \quad (6)$$

ここに、 σ_a : 管軸方向応力 (MPa)
 σ_r : 管周方向応力 (MPa)
 S : 2 軸応力下のカラーの評価応力 (MPa)

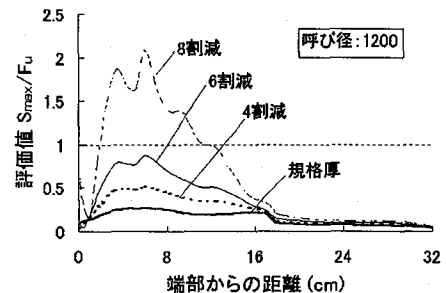
曲線推進時に生じる応力は、直線推進時の応力に加えて曲げの影響が加わる。よって、カラー厚さの提案においては、曲線推進時の応力がカラーの降伏応力に達しないように定めればよい。そこで、①推進管は許容折れ角度を超えないように施工する、②土木学会・鋼構造物指針（平成 9 年度制定）⁷⁾ では設計基準強度 F_u は、材料強度の規格値 F に試験法係数 ϕ_t を乗じた値としている、および③同指針より一時的な主荷重を受ける場合は部材強度係数を 1.0 としていることを考慮すると、許容折れ角度時のカラーの応力は式-7 を満足すれば安全と考えられる。

$$\frac{S_{\max}}{F_u} \leq 1.0 \quad (7)$$

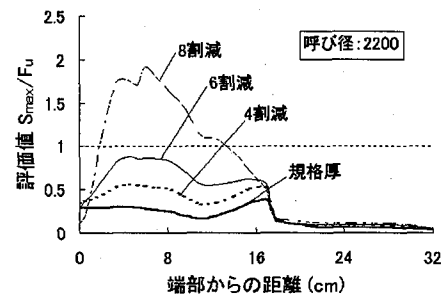
ここに、 $S_{\max}$: 許容曲げ角度時の評価応力の最大値 (MPa)
 F_u : 設計基準強度 ($= \phi_t F$, MPa)
 ϕ_t : 試験法係数 ($= 0.92$)
 F : 材料強度の規格値 ($= 235$ MPa)

5.2 解析を行った推進管

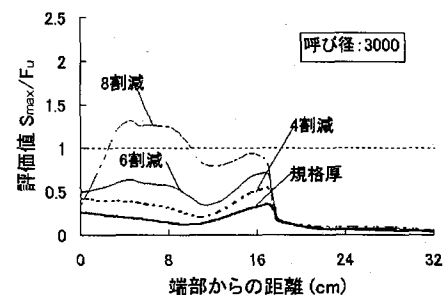
表-3 に、JSWAS-A-2 に規定される推進管のカラーおよび許容折れ角度の規定値を示す。表から分かるように、呼び径 800 から 3000 の管に対してカラーの厚さは、4.5mm、6.0mm および 9.0mm の 3 水準のみで設定されている。各カラー厚において呼び径の上限および下限とな



(a) 呼び径 1200



(b) 呼び径 2200



(c) 呼び径 3000

図-21 各呼び径におけるカラーの提案

る表-3 のハッチで示す推進管について解析を行った。

5.3 解析方法

ゴム輪は 2 本設置するものとし、解析モデルは既存推進管の形状を忠実に再現するものとした。表-4 に各解析モデルにおけるカラーの厚さを示す。表に示すように、規格厚の 4 割減、6 割減および 8 割減のカラー厚とし、表-3 に示す許容折れ角度を生じさせるとした解析結果より得られる応力および接合時の解析結果より得られる応力を加え合わせた応力より、式-7 に示すカラーの厚さの評価式に適用し、左辺の値を求めた。

5.4 カラー厚の提案および考察

図-21 に式-7 の左辺の値（以下、評価値という）を呼

表-5 評価値 S_{max}/F_u の最大値

呼び径	規定厚	4 割減	6 割減	8 割減
800	0.196	0.376	0.688	1.726
1200	0.267	0.514	0.880	2.078
1350	0.213	0.384	0.644	1.577
2200	0.378	0.557	0.897	1.917
2400	0.294	0.455	0.591	1.252
3000	0.347	0.538	0.706	1.310

* 1 未満にてカラーは安全と評価される

び径 1200, 2200 および 3000 の 3 種類の推進管について示す。前章までの結果から、接合を行った後、曲げ変形を受ける場合には管頂部に最大引張応力が生じるので、図-21ではカラー管頂部の結果を示した。また、表-5に各呼び径における評価値の最大値を示す。図-21および表-5から分かるように、カラー厚を 8 割減とした推進管では、いずれの結果も評価値が 1.0 を超えてしまっているが、6 割減では 1.0 を下回る。このことより、許容曲げ角度を超えないように施工することで、カラー厚は現規定の 6 割減まで薄くすることが可能であるといえる。また、本研究では図-2に示すようにゴム輪形状を矩形断面とした。実際のゴム輪は後方推進管を接合しやすいように、その断面は中空部を有する構造となっており解析に用いたゴム輪性状より柔らかい特性を示す。このことから、本研究による結果が、より安全側の提案であるといえよう。

前述までの提案は、曲線推進部に位置したときのカラーの力学的挙動から算出された評価である。しかしながら、実際の鋼製カラーは供用期間中に腐食して漏水等の構造上の欠陥が生じないだけの腐食代や搬出入時に容易に変形しない厚さが求められる。これについては、別途検討するものとし、本研究の範囲外とした。

6. 結論

曲線推進に用いる推進工法用コンクリート管のカラーの力学的挙動に関する実験および解析の結果から次のことがいえよう。

- 1) 推進管の接合に伴い、止水用ゴム輪は圧縮される。カラーはゴム輪の反発力を受け、そのゴム輪位置において軸方向および周方向ともに最大の引張応力を生じる。これらの応力は、カラーの厚さに関係しカラーが厚くなるにしたがって応力はほぼ直線的に減少する。
- 2) 曲げ変形を受ける場合、カーブ内側においては、曲げ変形に伴う折れ角度に比例した引張応力が、軸方向および周方向ともにカラーに生じる。カーブ外側においては、反対に軸方向および周方向ともに接合時に生じていた引張応力が緩和される挙動を示す。なお、折れ角度の増加に伴う応力の増加はカラーの厚い方が小さい。

3) 接合時および曲げ変形を受ける場合、軸力がカラーの応力に及ぼす影響は小さい。軸力は、クッション材を介して推進管から推進管に伝達されるのみで、カラーとは独立な関係であるためと考えられる。

4) カラーとゴム輪の部分のみを解析対象とし、ゴム輪に予想される圧縮変形量を与えるモデルを用いて、接合時の FEM 解析を行った。また、カラーを含む継手部および挿入側の管をほぼ実際の形状に再現したモデルを用いて曲げ変形を受ける場合の解析を行った。解析上、挿入側推進管の端部より曲げ荷重を作用させて、継手部に曲げ変形を生じさせた。それらの結果より、接合時および曲げ変形を受ける場合の解析とともに実際のカラーに生じる力学的挙動をほぼ再現できる。

5) 鋼材は Von-Mises の降伏基準に従い、施工時には許容折れ角度を超えないという条件で 4) で述べた解析方法を用いてカラー厚を算定した。その結果、中・大口径推進管である呼び径 800 から 3000 の推進管では、カラーの厚さを現規格の 4 割まで減らすことができる。

謝辞

本研究における実験は、全国ヒューム管協会技術委員会推進管開発調査小委員会により中川ヒューム管工業(株)の施設を用いて実施された。また、解析方法について貴重な助言を茨城大学の沼尾達弥助教授および呉智深助教授より頂いた。小委員会委員の方々、中川ヒューム管工業(株)生産技術部の方々および両先生に深甚なる謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 建設省都市局下水道部監修：日本の下水道（平成 9 年），1997。
- 2) 中本至：最新の推進工法のすべて，理工図書，1986。
- 3) 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性状，土木学会論文集，No.433，V-15，pp.167-176，1991。
- 4) 三井雅一，福澤公夫，沼尾達弥，服部恵光：アスファルト舗装下に設置された矩形管の力学的挙動，コンクリート工学論文報告集，Vol.19，No.2，pp.483-488，1997。
- 5) Y.C.ファン：固体の力学／理論，培風館，1970。
- 6) 富井政英，崎野健治：充填コンクリート鋼管構造に関する研究の現状 その 1 部材の弾塑性性状，コンクリート工学，Vol.13，No.2，pp.26-41，1975-2。
- 7) 土木学会編：鋼構造物設計指針 PartA 一般構造物，1997。

(1999 年 9 月 17 日受付)