

連結構造としてのモルタル充填二重鋼管の適用性検討と性能評価

STUDY ON THE APPLICABILITY AND PERFORMANCE EVALUATION OF MORTAR FILLED DOUBLE STEEL TUBULAR MEMBERS AS THE CONNECTION STRUCTURE

構造及びコンクリート工学分野 菅 祐太郎
Structural and Concrete Engineering Yutaro SUGA

近年、照明柱基部の腐食劣化が問題となっている。そこで、本研究では埋め込み式照明柱の新たな更新方法として中空式のモルタル充填二重鋼管に着目し、基礎部での連結構造としての適用性検討および構造性能評価を行った。その結果、一定以上の埋め込み長が確保出来た場合、モルタルに影響を及ぼさずに外鋼管まで荷重を伝達し、合成鋼管として確実に機能出来ることが明らかとなった。さらに、埋め込み長による影響を解析的に検討することで、本構造の曲げ耐荷機構の違いについて言及した。

At the lighting poles, the corrosion of the foundation which occurs mainly close to the ground becomes the problem. In this study, Mortar Filled Double Steel Tubular members was focused on as a new update method of implanted basic lighting poles and examined the applicability of connection structure. Experiments of three-point bending tests showed the range which can function surely as composite structure when it has implantation length above a certain level. Moreover, FEM analysis was conducted to examine influence of implantation length, and as a result, the difference of bending load bearing mechanism of this structure became clear.

1. はじめに

昨今、社会基盤施設の老朽化に伴い、道路附属物も老朽化が進行している現状がある。特に本研究で対象とする照明柱に関しては、毎年のように倒壊事故が起こり、中には人的被害を引き起こした事例も存在している。大阪府の試算によると平成 30~32 年に更新が必要となる照明柱の数は年間 1000~1500 本程度と推定され¹⁾、安価かつ短期間という省施工な更新方法が望まれている。しかしながら、埋め込み式照明柱の工期短縮や経費削減などを踏まえた更新方法の開発は進んでいない。

以上の背景から、筆者は埋め込み式照明柱の新たな更新方法を提案するため、検討を行った。一般的に鋼管の腐食は主に地際付近で生じている。そこで新たな更新方法として、図-1 の概念図の様に地際付近を切断して一回り小径の鋼管を挿入し、外鋼管と内鋼管の間をコンクリートで付着させるといった、いわゆる中空式のコンクリート充填二重鋼管を局部的に連結構造として適用しようと試みた。なお、現在、照明柱灯具の LED 化が進み安定器が不要になったため、既存の柱よりも小径の鋼管が適用可能となったことを利用するものであり、鋼管間が狭いため充填材料はモルタルとする。このように、一部をモルタル充填二重鋼管とした連結構造はソケット式接合法²⁾と呼ばれるが、条件として、内鋼管を CFT (コンクリート充填鋼管) としたうえで埋め込み長は内

鋼管径の 1.5 倍以上と定義されている。

しかし、対象とした照明柱では図の様に地下 300mm 位置に電気ケーブルが通っているという長さの制約があり、さらに既存照明柱の地中部においても腐食による減肉が生じている可能性も考えられる。そこで本研究では、中空式モルタル充填二重鋼管とした連結構造が合成鋼管として機能するための必要埋め込み長の提言や、埋め込み長の違いによる力学特性への影響を評価し、本構造の適用性を検討することを目的とする。ただし、基礎地盤、基礎コンクリートによる影響は考慮せず、安全側の考えとして検討を進めた。なお、本構造が適用可能となれば、基礎の解体・新設が不要で数時間で施工が完了するため、省工期かつ省コストな更新が可能となる。

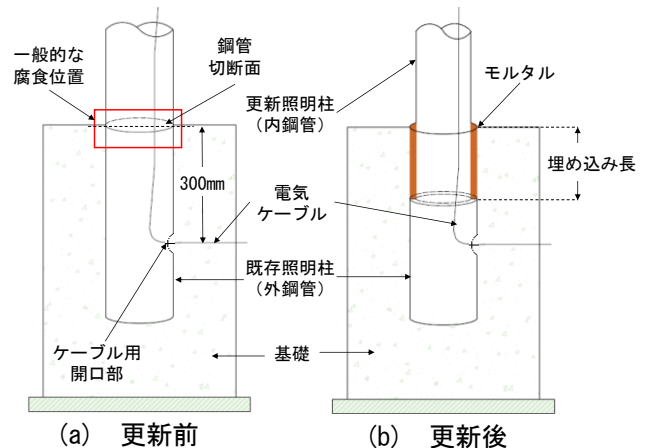


図-1 埋め込み式照明柱基礎の概念図

2. 力学特性と必要埋め込み長に関する実験的検討

2.1 実験概要

本構造における力学特性と必要埋め込み長を検討するため、静的曲げ実験を行った。本来、照明柱は片持ち梁構造であるが、作用モーメントを合わせる形として図-2に示すような中央部分が二重鋼管の連結構造からなる単純梁とし、3点曲げ実験とした。供試体は長さ1150mmの内鋼管2本をスパン中央で突合せ、外鋼管とモルタルで連結させ全長2300mmの部材とした。使用したモルタルは、実施工時に短期間で行えることを想定して無収縮の超速硬高流動モルタルを使用した。なお、0.1%の体積膨張が発生することが特徴である³⁾。鋼管は内鋼管と外鋼管ともにSTK-400の既成鋼管を用いた。4.5m程度の一般的な照明柱(水銀灯タイプとLEDタイプ)の大きさに合わせた断面寸法とし、外鋼管の長さの半分を埋め込み長 L_a と定義している。表-1に供試体一覧を示す。外鋼管径は $\phi 139.8\text{mm}$ で一定とし、内鋼管に径が大きい $\phi 114.3\text{mm}$ を使用したモデルをLシリーズ、 $\phi 89.1\text{mm}$ を使用したモデルをSシリーズと呼称し、各シリーズに対して5体ずつ用意した。なお、限界埋め込み長が300mmという制約と、複合構造標準示方書で示されている内鋼管径の1.50倍の埋め込み長²⁾を考慮してパラメータを設定しており、補強効果の確認のために内鋼管単体のものをそれぞれ1体ずつ用意している。表-2、3に使用した鋼管とモルタルの材料特性を、表-4にモルタルの配合を示す。鋼管については明確な降伏棚が表れなかったため、降伏強度を0.2%オフセット耐力として算出した。

次に計測項目について示す。変位計は載荷点直下に1か所、支点と鋼管同士の接合部端部にそれぞれ1か所ずつ設置した。さらに、図-3にはS-2.50を例として供試

体寸法やひずみゲージの貼り付け位置を示す。赤色の計測点は、供試体ごとで距離を変化させ両鋼管の同距離同断面位置の圧縮・引張縁でひずみを計測した。内鋼管が抜け出すことも考えられたため、鋼管の接合部端部にクリップゲージを設置してずれ変位量も計測している。

照明柱は設計風速60m/secでも降伏させないことから、降伏荷重までが使用範囲であるが、連結構造としての性能評価も行うべく終局まで一方向漸増載荷で実施した。

2.2 実験結果

図-4に得られた荷重変位関係について示す。基本的

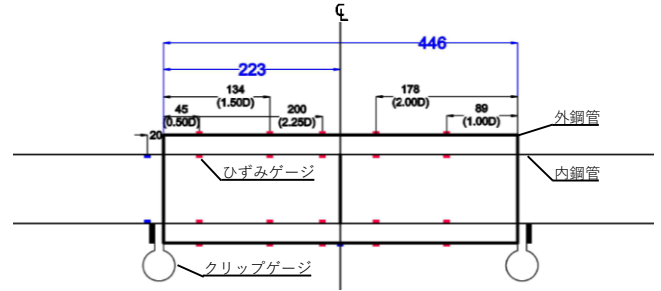


図-3 供試体寸法・計測位置図(例:S-2.50)

表-1 供試体一覧

供試体名称	内鋼管			外鋼管			埋め込み長		分類			
	外径 D_i [mm]	鋼管厚 t_i [mm]	径厚比 D_i/t_i [-]	外径 D_o [mm]	鋼管厚 t_o [mm]	径厚比 D_o/t_o [-]	L_a [mm]	倍数 表記				
L-0	114.3	3.5	33	-	-	-	-	-	単体			
S-0	89.1	3.2	28	-	-	-	-	-				
L-1.30	114.3	3.5	33	139.8	3.5	40	150	1.30 D_{i1}	Lシリーズ			
L-1.50							170	1.50 D_{i1}				
L-1.75							200	1.75 D_{i1}				
L-2.20							250	2.20 D_{i1}				
L-2.60							300	2.60 D_{i1}				
S-1.25	89.1	3.2	28				139.8	3.5	40	111	1.25 D_{is}	Sシリーズ
S-1.50										134	1.50 D_{is}	
S-1.75										156	1.75 D_{is}	
S-2.00										178	2.00 D_{is}	
S-2.50										223	2.50 D_{is}	

※ $D_{i1}=114.3\text{mm}$, $D_{is}=89.1\text{mm}$

表-2 鋼管(STK-400)材料特性

シリーズ	L		S		
鋼管種	径[mm]	139.8	114.3	139.8	89.1
	板厚[mm]	3.5	3.5	3.5	3.2
	降伏強度 $[\text{N}/\text{mm}^2]$	372	364	359	383
	弾性係数 $[\text{kN}/\text{mm}^2]$	198	200	198	201
	引張強度 $[\text{N}/\text{mm}^2]$	453	443	450	469
	ポアソン比[-]	0.28	0.29	0.28	0.28

表-3 モルタル材料特性

シリーズ	L	S
圧縮強度 $[\text{N}/\text{mm}^2]$	48.8	55.5
弾性係数 $[\text{kN}/\text{mm}^2]$	23.6	25.2
曲げ強度 $[\text{N}/\text{mm}^2]$	6.5	7.5
ポアソン比[-]	-	0.25
膨張率 $[\%]$	0.1	

※製品規格値³⁾

表-4 モルタル配合

水セメント比 [%]	単位量 $[\text{kg}/\text{m}^3]$	
	セメント	水
18	1925	339

※製品規格値³⁾

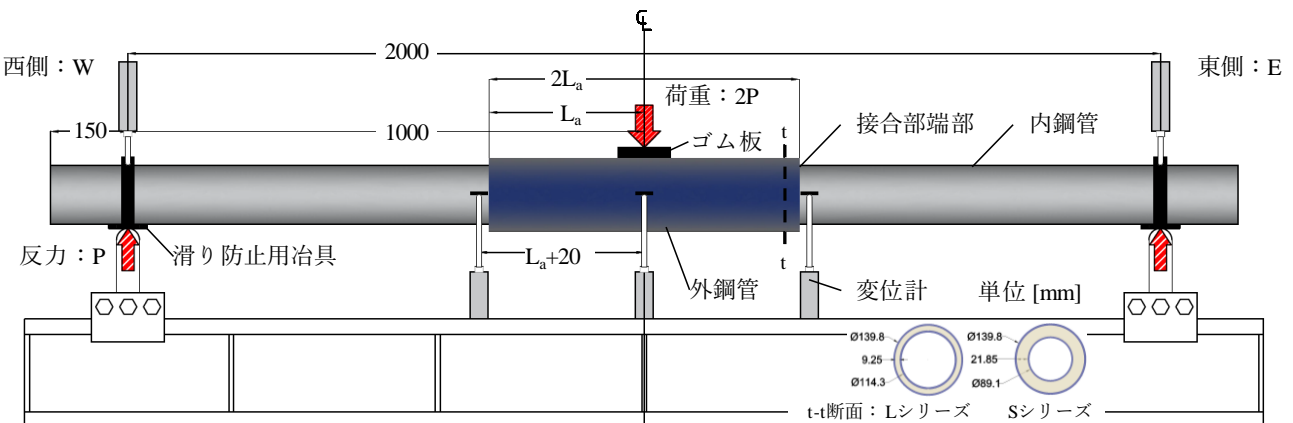


図-2 実験装置概観

には両シリーズともに無補強体と比較して、埋め込み長が長いほど初期剛性・最大荷重ともに上昇傾向にあることが示された。しかし、L-1.30ではL-0よりも低い初期剛性を示しており、合成鋼管として機能できていないと考えられる。一方でSシリーズでは供試体による差は顕著に表れない結果となった。

続いて、載荷後における供試体の破壊性状について示す。まず例として、終局時の様子を図-5に示す。最終的な破壊性状は(a)に示すように、二重鋼管構造とした全供試体の接合部端部において内鋼管の局部座屈であった。また、充填モルタルの表面で支圧破壊を起こす可能性があると思定されたが、(b)に例として示すように曲げ圧縮・引張側の両方に対し、放射状にひび割れが発生していることが確認された。続いて、図-6に載荷後の充填モルタルの様子を示す。基本的には(c)、(f)のように載荷点直下に曲げひび割れが発生しているが、埋め込み長がより短くなると(a)、(b)、(d)、(e)のように複数のひび割れが確認出来る。特にLシリーズでは曲げ引張側で軸方向にひび割れが生じていること、Sシリーズではそれに加えて、曲げ圧縮側で載荷位置に向かって斜め方向にひび割れが生じていることが顕著に表れた。なお、(d)S-1.50において端部から載荷位置に向かって斜めに生じたひび割れは、図-5(b)①のひび割れと同一の

ものである。二重鋼管部分では図-7に示すように曲げ圧縮側では多軸圧縮状態に、曲げ引張側では内鋼管が引き抜けようとする挙動に対し摩擦力が働いて荷重抵抗をしていると考えられる。しかし、埋め込み長の不足により過大な支圧力が作用することや、曲げ引張側で軸方向に作用する摩擦力の不足が理由となり、特異なひび割れが生じたと考えられる。また、L-1.30では荷重変位関係の結果を裏付けるように特異なひび割れを示したが、基本的にはひび割れ性状と荷重変位関係に相関性は見られないことが明らかとなった。本構造の使用性を考慮すると、充填モルタルは損傷することなく荷重に抵抗することが望ましいが、荷重変位関係と充填モルタルの関係からは判断が難しく、必要埋め込み長の定量的な評価も難しいことが示された。

2.3 軸方向ひずみ分布による力学特性の検討

そこで、図-8に示した軸方向のひずみ分布より本構造の力学特性について検討する。縦軸には二重鋼管中心からの高さを、横軸にはひずみ計測値を示しており、着目点は各供試体において接合部端部の内鋼管に降伏曲げモーメント (M_y) が作用した場合としている。また、凡例はひずみの計測位置(埋め込み位置)を内鋼管径の倍数表記で示しており、各シリーズの代表値をプロットして

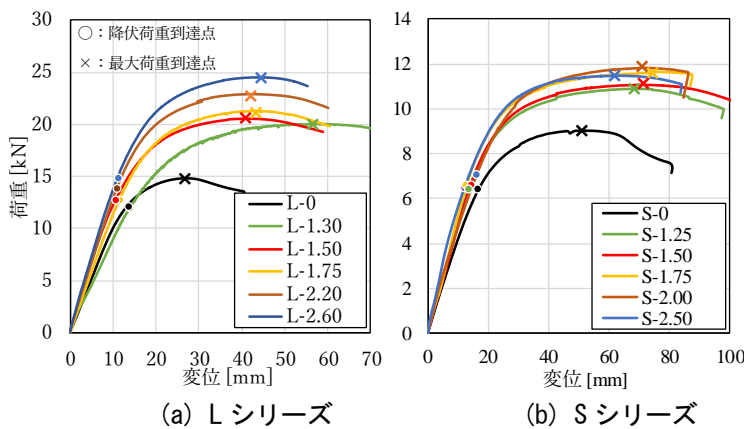


図-4 荷重変位関係

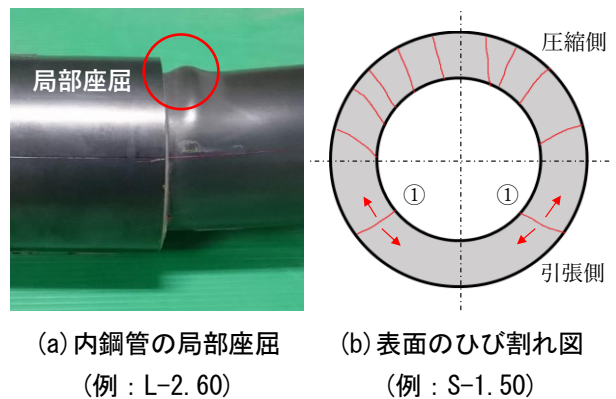


図-5 終局時の様子

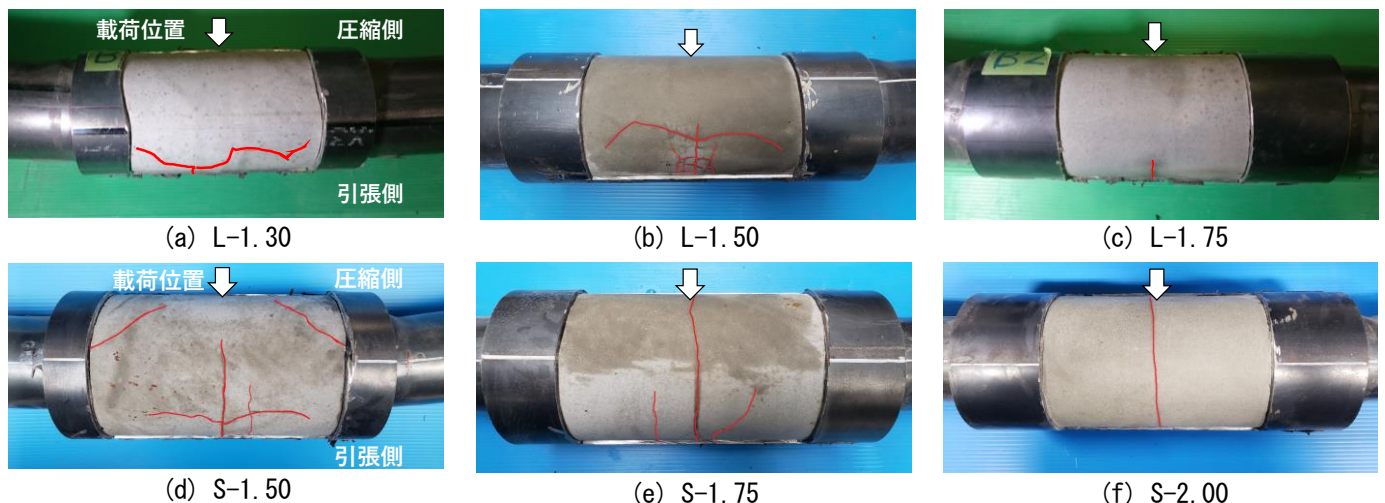


図-6 充填モルタルの様子

いる。まずLシリーズにおいて0.50D_{il}位置では外鋼管ひずみに比べ内鋼管ひずみの値が比較的大きいが、埋め込み位置が長くなるにつれて内鋼管ひずみの値が小さくなっていることが分かる。1.40D_{il}位置では平面保持の仮定が成立しているような直線系のひずみ分布を成しているため、この位置で合成鋼管としての一体性が確保されたものと考えられる。しかしながら、1.80D_{il}位置のように長くなればなるほど鋼管とモルタルが一体挙動しているわけでもなく、傾向としては主に外鋼管で曲げに抵抗していることが明らかとなった。これはSシリーズにおいても同様の傾向ではあるが、1.50D_{is}位置においても未だ内鋼管ひずみの方が大きく平面保持の仮定が成立するような分布になっておらず、2.00D_{is}位置でその傾向は反転している。このことから、鋼管径の組み合わせによって合成鋼管として一体化する位置は異なると考えられる。

2.4 曲げモーメント分担率による必要埋め込み長の検討

各部材が埋め込み位置ごとに受け持つ曲げモーメントの分担率を算出することで、必要埋め込み長の検討を行った。図-9に曲げモーメント分担率と埋め込み位置の関係を示しており、着目点は図-8と同じ条件で接合部端部の内鋼管に理論上の降伏曲げモーメントが作用した場合である。

図中縦軸の曲げモーメント分担率は式(1)で算出した。なお、内・外鋼管に実際に作用したと考えられる曲げモーメントは式(2)で算出したが、モルタルのひずみは計測していないことから、モルタルは全断面有効と仮定して式(3)で分担率を算出している。

$$\overline{M}_X = \frac{M_X}{M_{total}} \quad (1)$$

$$M_X = EZ_X \epsilon_X \quad (2)$$

$$\overline{M}_{mortar} = 1 - \overline{M}_{in} - \overline{M}_{out} \quad (3)$$

ここに、

\overline{M}_X : 部材ごとの曲げモーメント分担率、

M_X : 部材ごとに作用した曲げモーメント、

M_{total} : 載荷荷重より換算した作用曲げモーメント、

E : 弾性係数、 Z_X : 断面係数、

ϵ_X : 圧縮・引張縁ひずみの絶対量の平均値、

である。(ただし x は部材名称)

図-9に示すように、両シリーズともに内鋼管径の1.0~1.2倍程度の埋め込み位置で内鋼管と外鋼管の分担率が入れ替わり、埋め込み位置が深くなるにつれて外鋼管での曲げモーメントへの抵抗が支配的になることが明らかとなった。しかし、外鋼管において理論値と交差する値を確認すると、Lシリーズではおよそ1.40D_{il}位置、

表-5 各シリーズの曲げ剛性比

曲げ剛性比: $EI = EI_{in}/EI_{out}$

シリーズ	内鋼管 径×板厚(mm)	外鋼管 径×板厚(mm)	EI [-]
L	114.3×3.5	139.8×3.5	0.54
S	89.1×3.2	139.8×3.5	0.23

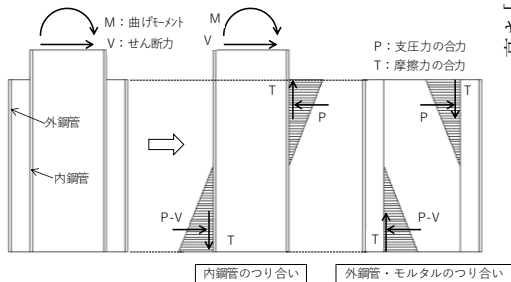
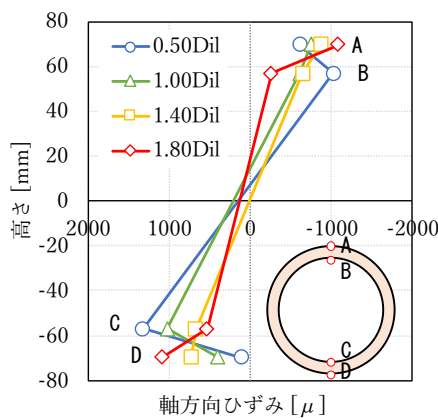
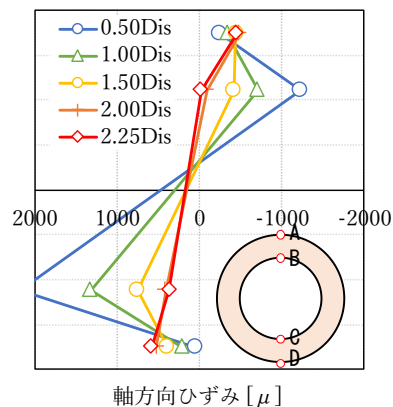


図-7 二重鋼管部分の耐荷機構 (1/2モデル)

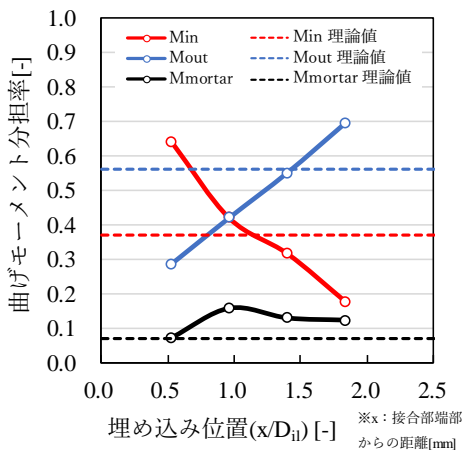


(a) Lシリーズ

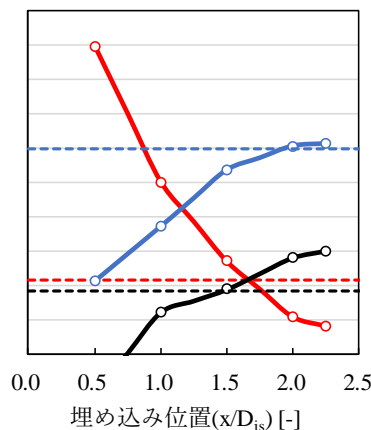


(b) Sシリーズ

図-8 軸ひずみ分布



(a) Lシリーズ



(b) Sシリーズ

図-9 曲げモーメント分担率

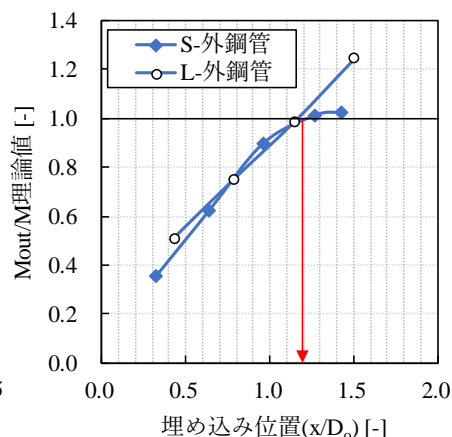


図-10 外鋼管曲げモーメント分担率の無次元化比較

S シリーズではおよそ $1.80D_{is}$ 位置である。つまり、ソケット式接合法と同様な内鋼管径基準での評価の場合は、鋼管径の組み合わせによって必要埋め込み長の考え方が異なり、両者の相関性は示されていない。

そこで図-10 に外鋼管の曲げモーメント分担率を無次元化した値を示す。縦軸は算出した外鋼管の曲げモーメント分担率を理論上の分担率で除した値である。その結果、外鋼管へ曲げモーメントを理論通り確実に伝えようとした場合における必要最低限の埋め込み長は、 $170\text{mm}(1.21D_o)$ となることが明らかとなった。しかし、図-6 より (b) $L-1.50(L_a=170\text{mm})$ ではモルタルに軸方向へのひび割れが発生しているが (c) $L-1.75(L_a=200\text{mm})$ では損傷はない。本構造においては充填モルタルを損傷させることなく、いかに外鋼管へ荷重を伝達させるかが重要であると考えられるため、定着長(外鋼管への分担移行)も考慮すると、鋼管径の組み合わせによらず必要埋め込み長は $200\text{mm}(1.43D_o)$ であると提言することが出来る。なお、表-5 に示すように曲げ剛性比: \bar{EI} (内鋼管の曲げ剛性に対する外鋼管の曲げ剛性の比) が $0.23 \leq \bar{EI} \leq 0.54$ となる範囲が本構造における適用条件である。

3. 埋め込み長と曲げ耐荷機構に関する解析的検討

3.1 解析条件

埋め込み長と鋼管径の組み合わせに着目したパラメトリック解析を行うことで、本構造の力学特性についての検討を行った。検討には汎用構造解析プログラム Abaqus6.14 を用い、3 次元弾塑性 FEM 解析とした。解析モデルは図-11 に示した実際の照明柱の 1/2 モデル (2 章の供試体基準では 1/4 モデル) である。そして、内鋼管端部一点に X 軸方向の一樣強制変位を与え変位制御とした。境界条件は対称性を考慮して定め、外鋼管の端部円周上を並進回転全拘束、対称面全断面を Z 並進拘束として扱った。モルタルと内鋼管との付着をモデル化すべく、先行実験で得られた摩擦係数 0.72 を導入し界面の特性を考慮した。

材料特性を表-6, 7 に示す。鋼管はシェル要素、モルタルはソリッド要素を用いた。2 章で述べた通り鋼管は降伏棚を示さない応力ひずみ関係が得られたため、マルチリニアの材料構成則とした。また、 200mm の埋め込み長を有している場合、モルタルにはひび割れ等の損傷はみられなかったため弾性材料として扱った。

次に解析パラメーター一覧を表-8 に示す。今回は L シリーズに着目し、実験でのパラメータを参考にして埋め込み長を変化させた解析モデルを 4 体作成した。

3.2 モデルの妥当性の検証

図-12 に解析で得られた荷重変位関係について示す。L-1.75-Re($L_a=200\text{mm}$)に着目し解析結果と実験結果を比

較すると、最大荷重や降伏後の挙動に差が生じていることが示されている。しかしながら、初期剛性はほぼ一致しているような挙動を示しており、概ね精度よく解析モデルは作成され、妥当性は確保出来ていると考えられる。

3.3 二重鋼管部分の付着特性

埋め込み長の違いによる二重鋼管部分の付着特性を明らかにするために、埋め込み位置と離間距離の関係について検討を行った。ここでの離間距離とは図-13 に示したように、二重鋼管領域における内鋼管引張縁とモルタル引張縁の相対変位である。つまり、正值の場合は付着切れが生じてモルタルと内鋼管は離れていることを

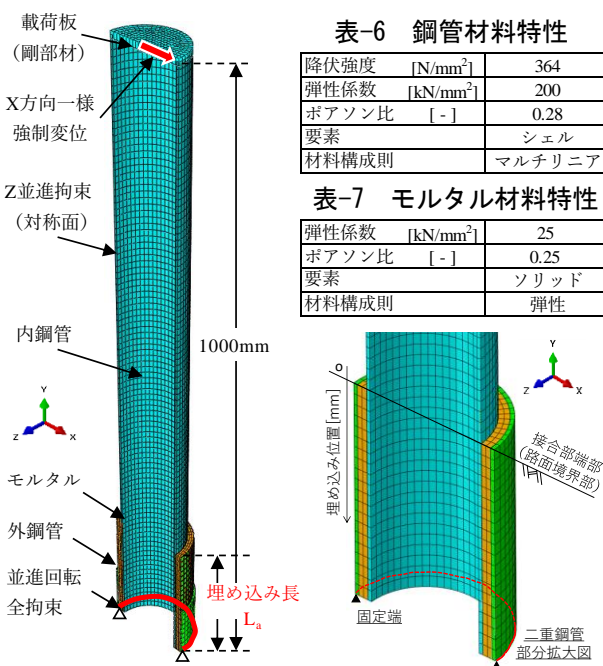


図-11 解析モデル

表-8 解析パラメーター一覧

解析モデル名	内鋼管		外鋼管		埋め込み長		分類名
	外径 D_i [mm]	鋼管厚 t_i [mm]	外径 D_o [mm]	鋼管厚 t_o [mm]	L_a [mm]	倍数 表記	
L-1.30-Re	114.3	3.5	139.8	3.5	150	$1.30D_{ii}$	Lシリーズ
L-1.75-Re					200	$1.75D_{ii}$	
L-2.20-Re					250	$2.20D_{ii}$	
L-2.60-Re					300	$2.60D_{ii}$	

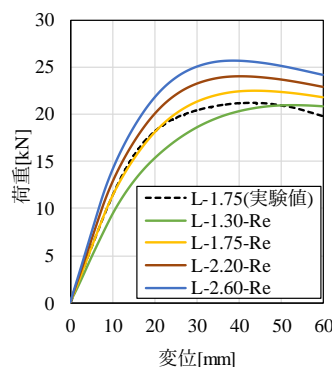


図-12 荷重変位関係

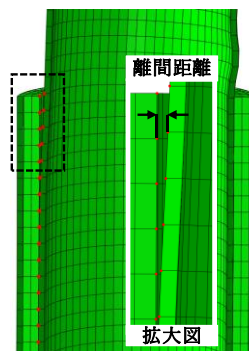


図-13 離間距離イメージ

表-6 鋼管材料特性

降伏強度 $[\text{N}/\text{mm}^2]$	364
弾性係数 $[\text{kN}/\text{mm}^2]$	200
ポアソン比 [-]	0.28
要素	シェル
材料構成則	マルチリニア

表-7 モルタル材料特性

弾性係数 $[\text{kN}/\text{mm}^2]$	25
ポアソン比 [-]	0.25
要素	ソリッド
材料構成則	弾性

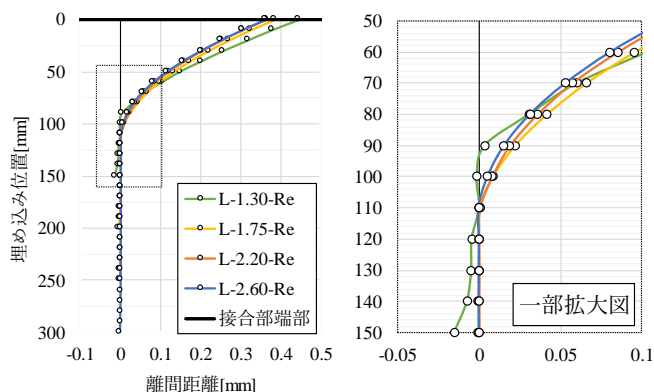


図-14 埋め込み位置－離間距離の関係

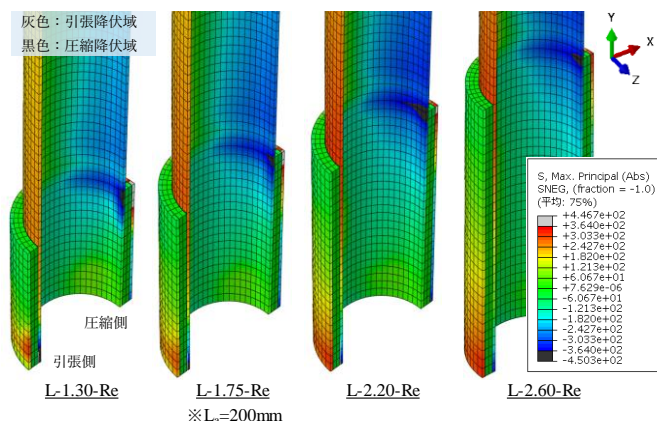


図-15 主応力カウンター図

示している。得られた埋め込み位置と離間距離の関係を図-14に示す。なお、グラフは接合部端部にて理論上の降伏曲げモーメントが作用した時の条件で統一している。図より、埋め込み長が短くなるにつれて離間距離が増加していることが示されており、基本的には内鋼管径(約114mm)と同程度の位置で離間距離は零値をとっている。また、それよりも深い位置では付着が確保され、浅い位置では付着が切れていることから、図-7で示した曲げ圧縮側に作用する支圧力は埋め込み長に依存せず、内鋼管径の1倍の範囲であると考えられる。しかしながら、L-1.30-Reに関しては90mm位置付近で線形が急激に変化し、鋼管端部にかけて離間距離が負値を示すなど他の供試体と比較して異なる挙動が確認されており、端部では強い支圧力が作用していると想定される。

3.4 曲げ耐力機構への影響

埋め込み長による曲げ耐力機構への影響を検討するために、図-15に各モデルの主応力カウンター図を示す。なお、この図も離間距離の結果と同じ条件でカウンター図を統一している。まず、全モデルにおいて内鋼管では固定端側よりも接合部端部で高い応力が生じていることが確認された。特に、内鋼管圧縮側ではモルタルや外鋼管に抵抗して応力集中が発生している。埋め込み長が200mm以上のモデルの外鋼管引張側では、埋め込み位置が長くなるに従って徐々に引張応力も増加する分布

を示しているが、埋め込み長が200mmに満たないL-1.30-Reでは固定端より少し上の一部で局部的に応力が作用しており、応力分布や集中箇所には差異があることが明らかとなった。さらに、接合部端部における内鋼管圧縮側、および固定端における内鋼管引張側でも局部的に応力集中が生じている。つまり、200mmよりも短い条件では、付着面積の不足によって力の伝達が十分に行われず、テコ作用による曲げへの抵抗が支配的であると考えられる。なお、埋め込み長が200mmよりも長い条件においても固定端付近では内鋼管引張側に支圧力が作用しているため、当然ながらテコ作用の影響も多少は受けている。しかしながら、モルタルを介して内鋼管から外鋼管へと連続的に応力が伝達していることがコンター図より示されており、二重鋼管が一体となって曲げに抵抗している挙動が支配的であるとされる。

4. まとめ

中空式のモルタル充填二重鋼管とした連結構造を既存照明柱の新たな更新方法として適用させるため、実験的、解析的に検討を行った。得られた結論を以下に記す。

- 1) 荷重変位関係と充填モルタルの様子には明らかな相関性は見受けられない傾向にあるが、埋め込み長が不足していると充填モルタルには局部的に損傷が生じることが明らかとなった。
- 2) 内鋼管の組み合わせによって合成鋼管として一体化する埋め込み位置は異なり、平面保持の仮定が成立する位置よりも深い場所においては外鋼管ひずみの値が支配的であることが示された。
- 3) 終局時まで曲げモーメントを確実に基礎構造に伝え、かつモルタルに大きな損傷が生じない構造にするためには、曲げ剛性比が $0.23 \leq \bar{EI} \leq 0.54$ となる条件において、内鋼管径によらず必要埋め込み長は200mm(1.43D_o)であると提言出来る。
- 4) 内鋼管径程度の埋め込み位置以降で、内鋼管とモルタルとの付着は確保されることが示された。
- 5) 埋め込み長が200mmに満たない条件では、二重鋼管部分が一体となって曲げに抵抗するよりも、付着面積の不足によってテコ作用による曲げへの抵抗が支配的となり、合成鋼管として機能していないと考えられる。
- 6) 総じて、本構造は条件を満たす限り力学的には担保されており、照明柱の新たな更新方法としての適用可能性は高いと考えられる。

参考文献

- 1) 大阪府都市基盤施設維持管理技術審議会：平成28年度第3回道路・橋梁等部会，資料4，2016
- 2) 土木学会：複合構造標準示方書 設計編，pp.476-481，2014
- 3) 太平洋マテリアル(株)：太平洋プレユーロックススーパー技術資料，2016