

論文 埋込み式基礎に対する照明柱のソケット式接合に関する実験的研究

角掛 久雄*1・菅 祐太朗*2・川満 逸雄*3

要旨：照明柱基部の腐食劣化により補修もしくは更新が必要となるものが多くみられる。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、基礎部とのソケット式接合による適用性検討および構造性能評価を載荷実験により行った。その時、鋼管径の組み合わせを2パターンとし、径の組み合わせによる影響も検討した。その結果、一定以上の埋め込み長が確保出来た場合、連結する内側の鋼管から外側の鋼管までスムーズに荷重を伝達し、合成鋼管として確実に機能出来ることが明らかとなり、連結時の埋め込み長について提案した。

キーワード：照明柱, ソケット式接合, モルタル充填二重鋼管, 曲げ挙動

1. はじめに

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。そこで、筆者らは埋め込み式基礎を有する照明柱の新たな更新方法としてモルタル充填二重鋼管構造による基礎との連結構造を提案し、その適用性について検討を行った^{1,2)}。この構造は、一般的に鋼管の腐食は主に地際付近で生じていることから、図-1の概念図の様に地際付近を切断し、LED化に伴い適用されるようになった一回り小径の鋼管を挿入し、外鋼管と内鋼管の間を部分的にモルタルで付着させるものである。この鋼管と鋼管の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³⁾。複合構造標準示方書³⁾に準じて接合部を評価すると中空管である本構造では、内鋼管径の1倍でも接合部の耐力は十分となる。しかし、降伏までで考えると、埋め込み長が短めの場合は内鋼管下端において、てこ作用による支圧により先行して降伏する場合があった²⁾。そのような現象は、交番载荷に対する接合部耐力の低下や柱としての残留変形が懸念される。

また、既設照明柱の外鋼管は基礎コンクリートに対する支圧の観点から900mm程度コンクリート内に埋め込まれているが^{4,5)}、基本として基礎表面から250~300mmに電源引き込み口があるため接合できる区間は、引き込み口から上部に限られる。一方、コンクリート基礎は当初のままであり、表面は経年劣化やひび割れの可能性がある。さらに、引き込み口の開口部からの水分により基礎内の既存柱内部がやや腐食している場合も見られる。外鋼管との接合耐力だけで考えると、局所的に外鋼管からコンクリート基礎への支圧が大きくなるような接合になる場合も考えられ、基礎コンクリートの支圧耐力が不

足する可能性がある。あくまで照明柱は既存の外鋼管によりコンクリート基礎の深部まで保持されていると考え、外鋼管に円滑に応力伝達するような接合の方が望ましいと考えられる。円滑に応力伝達する接合は接合部としても十分な耐力を有していると考えられる。以上より、様々な条件となることが考えられることから安全側の考えでコンクリート基礎を無視して、内外の鋼管の接続の安全性の検討を行うべきと考えた。

腐食していない既存鋼管(外鋼管)に対してCFTより曲げ剛性が低くなる中空鋼管を用いた既研究¹⁾では円滑な応力伝達をする場合は内鋼管径の1.75倍以上が望まれる結果となった。ただし、既存鋼管径に対して挿入する鋼管種類は1種類のみで検討しており、既存鋼管径と更新時の鋼管径の違いによる影響は明らかにされていない。そこで、4.5m程度のLEDタイプの実照明柱で用いられる鋼管径を踏まえ、本研究では文献1)より小さな径の鋼管を内鋼管として使い、かつ同様な実験を行い、鋼管径の組み合わせによる比較から、連結構造に及ぼす影響を明らかにするとともに、本構造における適切な最小埋め込み長を明らかにするため検討を行った。そのうえで、交番载荷により検証を行った。

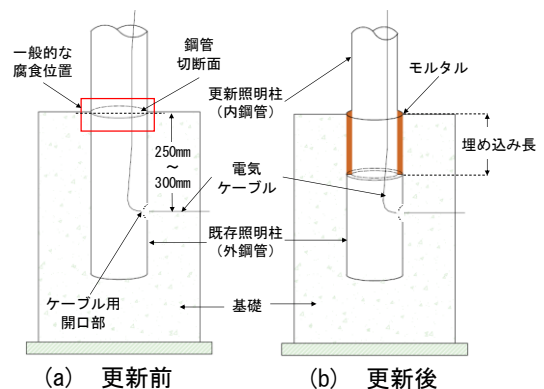


図-1 埋め込み式照明柱基礎の概念図

*1 大阪市立大学大学院 工学研究科都市系専攻准教授 博(工) (正会員)

*2 国土交通省(研究時 大阪市立大学大学院 工学研究科都市系専攻) 修(工)

*3 國陽電興(株) 博(工)

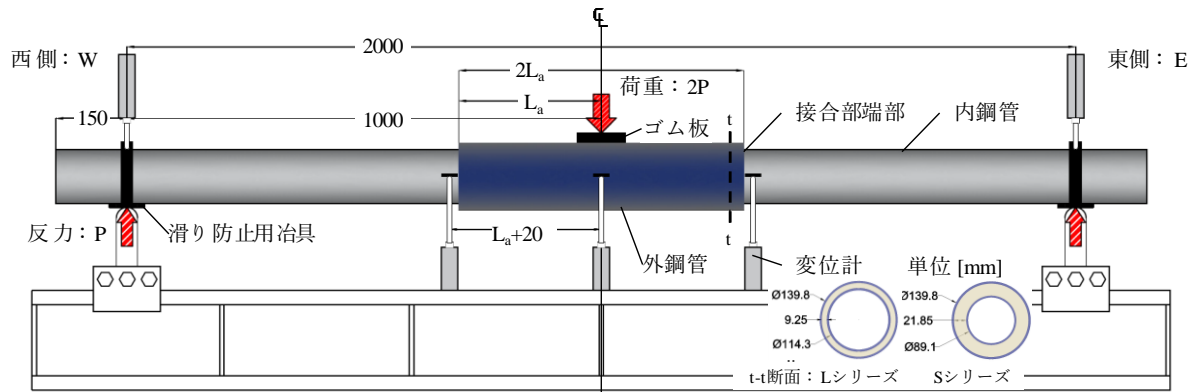


図-2 実験装置概観

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_{il}	Lシリーズ			
L-1.50							170	1.50 D_{il}				
L-1.75							200	1.75 D_{il}				
L-2.20							250	2.20 D_{il}				
L-2.60							300	2.60 D_{il}				
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}	

* $D_{il}=114.3\text{mm}$, $D_{is}=89.1\text{mm}$

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[N/mm ²]		372	364	359	383
弾性係数[kN/mm ²]		198	200	198	201
引張強度[N/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[N/mm ²]	49.9	55.5
弾性係数[kN/mm ²]	24.3	25.2
曲げ強度[N/mm ²]	6.9	7.5
ポアソン比[-]	-	0.25
膨張率 [※] [%]	0.1	

※製品規格値^①

2. 力学特性と必要埋め込み長に関する検討

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た梁としている。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^②を使用した。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。本研究では、文献1)の結果とも比較検討するため、それらをまとめて表-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、内鋼管に文献1)で実施した $\phi 114.3\text{mm}$ を使用したモデルをLシリーズ、本研究で新たに採用した径の小さな $\phi 89.1\text{mm}$ 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。そのことにより、モルタル厚がLシリーズ9.25mmに対してSシリーズが21.85mmと2倍以上厚くなっている。なお、電気ケーブルによる埋め

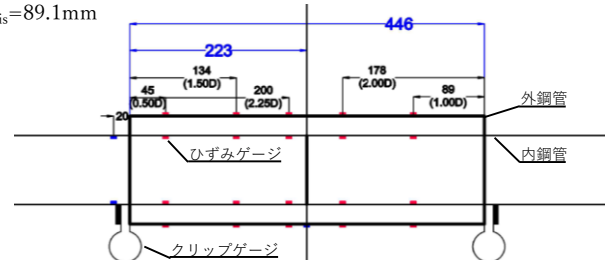


図-3 供試体寸法・計測位置図(例: S-2.50)

込み長の制約と、複合構造標準示方書³⁾で示されている内鋼管径の1.5倍の埋め込み長を考慮して内鋼管径に対する埋め込み長の比をパラメータに設定した。また、補強効果の確認のために内鋼管単体でも実施している。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。照明柱は設計風速60m/sec(暴風時)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。

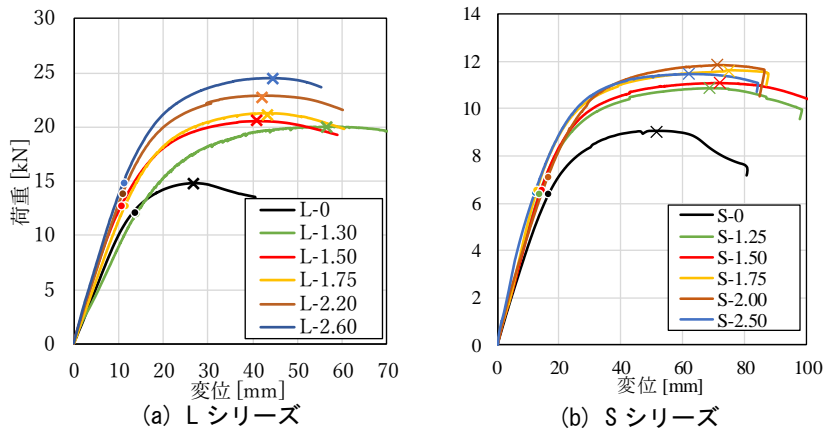


図-4 荷重変位関係



図-5 載荷後の鋼管(S-2.50)

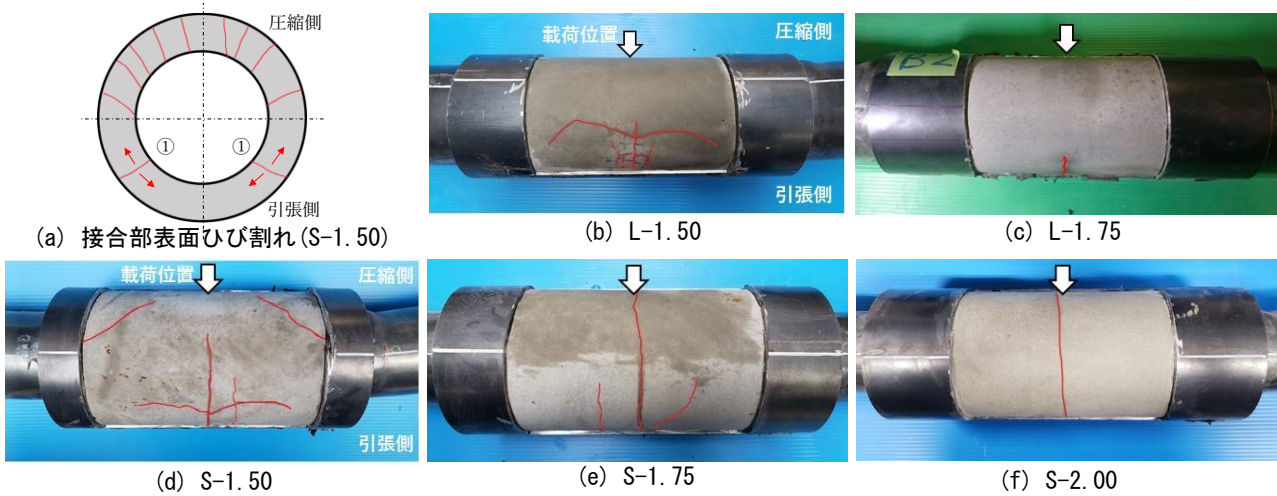


図-6 充填モルタルの様子

なお、想定する実構造と異なり、突合せをして供試体を作成していることから、外鋼管以外の部材での突合せ部における曲げ圧縮の伝達が懸念されるが、突合せを考慮しない3次元解析²⁾などから、曲げ引張側ではモルタルと内鋼管が離間し引張伝達領域が小さくなるため、引張側の影響が大きくなり、突合せ部の曲げ圧縮伝達の影響は小さいと判断している。

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。ただし、連結部のみの変形と傾向が類似していることもあり、スパンの条件が等しい載荷点変位を示す。また、荷重は照明柱1本当たりの荷重として反力 P の大きさで表している。図には、降伏荷重として計測時の内鋼管端部付近の計測軸ひずみが降伏ひずみに到達した点と最大荷重時を併せて示す。基本的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のみL-0よりも低い初期剛性を示しており、接合条件として不十分であったと考えられる。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。内鋼管の耐力・剛性が低くなっているため、短い接合長さでも満足していたと考えられる。

次に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、載荷後の鋼管状況例を図-5に示し、充填モルタルの状況例を図-6に示す。荷重が低下する最終的な要因は全てにおいて図-5に示す様な二重鋼管構造とした接合部端部における内鋼管の局部座屈であった。また、接合部端部の充填モルタルの表面では図-6(a)に例として示すような曲げ圧縮・引張側の両方に対し、放射状にひび割れのみが発生していることが確認された。充填モルタルは基本的に図-6(c), (f)のように突合せ部となる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図-6(b), (d), (e)のように複数のひび割れが確認出来る。特に内鋼管径の1.5倍以下では曲げ引張側で軸方向(図での水平方向)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、図-6(d)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-6(a)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に示すように内鋼管の曲げに伴い、軸方向の応力のみならず、軸直角方向に支圧力を受ける。埋め込み長が短いことから、大きな支圧力が作用しモルタルにひび割れが生じたと考えられる。接合構造としての

耐力を満たすためには、支圧によるひび割れが生じない条件が必要である。さらに、本構造の使用性を考慮すると、充填モルタルにより内鋼管から外鋼管に応力を伝達することから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。そのため、内鋼管の突合せ部だけにひび割れが生じた L-1.75 および S-2.00 以上の埋め込み長が望ましいと考えられる。

2.3 軸方向ひずみ分布による力学特性の検討

円滑に外鋼管に応力が流れている範囲においては、各供試体で同じ曲げモーメントの断面において、埋め込み長に関わらずひずみが同様な値を示していた事を踏まえり、L-1.50 を除く各供試体の内外鋼管共に計測した断面のひずみ分布を図-8 に示す。縦軸には鋼管中心からの高さを、横軸にはひずみ値を示しており、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（接合部端部からの距離）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（接合部からの距離が小さい順に埋め込み長が短い供試体が対応）である。

両シリーズとも 0.5Di 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

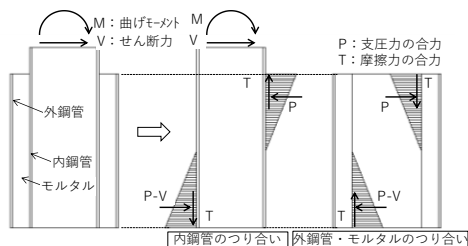


図-7 二重鋼管部分の耐荷機構 (1/2 モデル)³⁾

表-4 曲げ剛性

シリーズ	内鋼管	外鋼管	モルタル	曲げ剛性比	
	EI_i	EI_o	EI_m	EI_i/EI_o	$(EI_i + Eim)/EI_o$
	(kN・mm ²)				
L	374	696	163	0.537	0.772
S	160	696	307	0.229	0.670

が分かる。L シリーズでは 1.4Di 位置で平面保持の仮定のような直線的な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。さらに、1.8Di 位置では外鋼管で曲げに抵抗している。しかし、S シリーズにおいては 1.5Dis 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、2.0Dis 位置でその傾向は反転している。1.5~2.0Dis の間に平面保持の仮定が成立する様な断面が存在することが分かる。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内鋼管径に依存しないと考えられる。

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で、必要埋め込み長の検討を行うため、図-8 で示したひずみ値を用いて曲げモーメントの算出をした。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、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。

$$\overline{M_x} = \frac{M_x}{M_{total}} \quad (1)$$

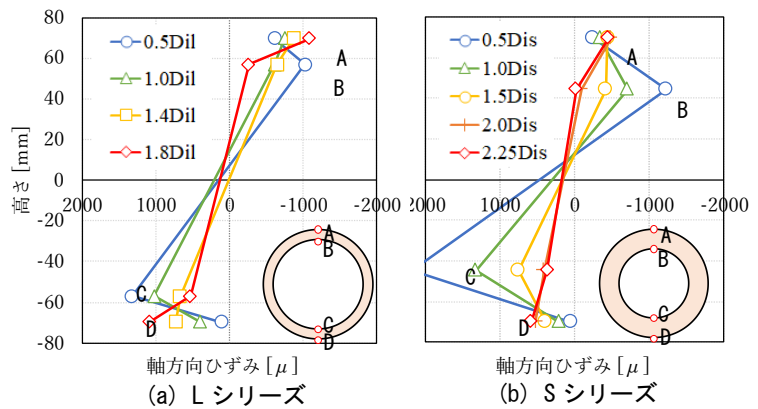
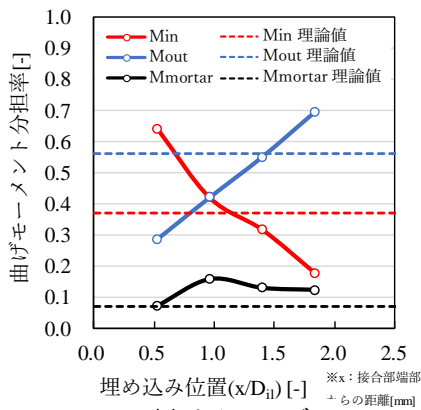
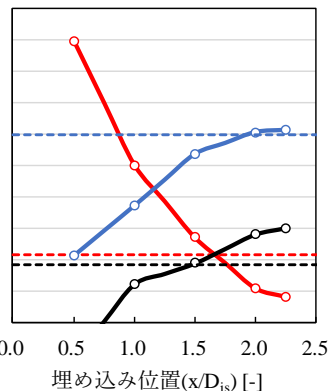


図-8 軸ひずみ分布



(a) L シリーズ



(b) S シリーズ

図-9 曲げモーメント分担率

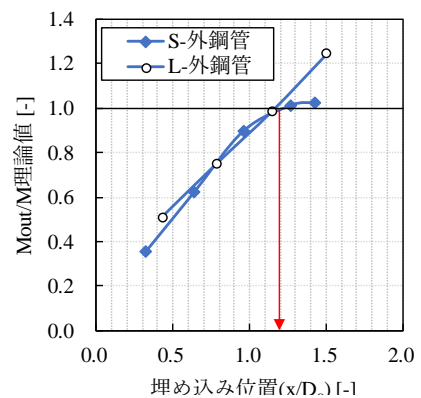


図-10 外鋼管曲げモーメント分担率の無次元化比較

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

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

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} : 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 (X は部材名称)。また、完全合成とした時の各部材のモーメント分担率の理論値も示す。あくまで、照明柱の設計範囲となる弾性範囲としての検討であり、突合せ部以外ひび割れが生じていないと考えて算出している。

図-9 に示すように、L、S シリーズそれぞれ内鋼管径の 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、埋め込み位置が長くなるにつれて外鋼管での抵抗が支配的になっていた。外鋼管において理論値と交差する値を確認すると、L、S シリーズそれぞれおよそ 1.4Dil 位置、1.8Dis 位置である。この要因として、モルタルの厚さ (剛性) の差異が影響するものと考えられる。結果として、モルタルの分担が 1.0Dis 以降で L シリーズは変化せず、S シリーズでは線形的に増加する結果となっていた。そこで曲げ剛性の一覧を表-4 に示す。モルタルは全断面有効として算出した。S シリーズでは、内鋼管の 2 倍程度、モルタルが剛性を有し、最終的にモルタルを介して外鋼管に応力を伝達するため、モルタルの影響を無視することが出来ないと思われる。また、L、S シリーズの内鋼管とモルタルの曲げ剛性を足し合わせた場合、1 割ほどしか差異が無い。これらの事からも内鋼管径基準での埋め込み長とするのは困難と考えられる。そこで、図-9 の横軸を外鋼管径 D_o 基準に変更して図-10 に両シリーズの外鋼管が分担する曲げモーメントを示す。縦軸は算出した外鋼管の曲げモーメント分担率を完全合成とした場合の外鋼管の理論上の分担率で除して無次元化した値である。その結果、対象とした鋼管の組み合わせでは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、170mm (1.2D_o) 程度となった。本構造としては、外鋼管単体に全てのモーメントを分担するように移行する区間も必要であるため、170mm+ α の長さが埋め込み長として必要なのは明らかである。図-6 を再度見てみると、埋め込み長 170mm 以下では、突合せ部以外でもひび割れが生じている。スムーズに内鋼管からモルタルを介して外鋼管に曲げモーメントの分担を移行するための定着長 (外鋼管への分担移行区間) も考慮すると、本研究で対象とした構造寸法レベルでは鋼管径の組み合わせによらず必要埋め込み長は 200mm (1.4D_o) 以上が好ましいと考えることが出来る。

3. 交番载荷による影響検討

3.1 実験条件

前章までにおいて、実験は 1 方向载荷のみの検討であった。そのため、交番载荷時の影響を検討するものとして、振動台を用いて地震波を作用させることで影響を検討することとした。供試体は、L、S の両シリーズについて共に 2.5m、埋め込み長は 200mm と統一した。図-11 に計測概要と実験状況を示す。計測は頂部加速度、接合部端部付近のひずみおよび変位 (ずれ) である。地震波はレベル II-I-1 (神戸海洋気象台観測波) を用いた。ただし、照明柱は地震時ではなく数十年に 1 度ある可能性の 60m の暴風時での設計となることから、暴風時の荷重相当の曲げモーメントが作用するように 1.5 倍 (最大加速度 1200gal) 程度となるようにして与え、余裕を見てこの地震波を 10 回繰返した。

3.2 実験結果

図-12 に S シリーズ供試体の 1 回目の時刻歴応答を例として示す。頂部の加速度と内鋼管のひずみは対応しているが、外鋼管のひずみは対応していないことが分かる。外鋼管のひずみは接合部付近であり、付着切れに伴い、引張ひずみが内鋼管から伝達していない形で振動していた。文献 2) の結果より内鋼管径程度の深さで付着切れが生じると想定される。その内鋼管との付着切れの影響で、振動方向の両側の外鋼管には 5 μ ほどの残留圧縮ひずみが生じた。そのため、接合部の外鋼管と内鋼管にも残留変位 (外鋼管と内鋼管のずれ変位) が僅かながら生じた。ただし、外鋼管が膨れた様なずれであり、目視で隙間が確認できるものではない。

次に各回の最大応答値として接合部付近の外鋼管ひずみ、接合部付近の内鋼管ひずみより算出した曲げモーメントを図-13 に示す。なお、S シリーズにおいて、2 回目の振動台の揺れが設定より小さくなってしまった。繰返し载荷によって 1 回目の値より両者とも増加傾向にあり、4,5 回で概ね安定した値となった。これは、内鋼管とモルタルの付着切れの範囲が安定した結果と考えられる。両者を比較すると S シリーズの方が、曲げモーメントは大きい、外鋼管に生じるひずみは小さく、モルタル厚の影響により外鋼管に生じる作用が小さくなったことが考えられる。また、対象とした 4.5 m の照明柱の L シリーズの暴風時の設計曲げモーメントは 3.1kNm である。結果として L シリーズの荷重は設計荷重よりやや小さな荷重であり、S シリーズは設計荷重より大きな荷重が作用することとなったが、安定した挙動であった。なお、頂部加速度から算出したパワースペクトルの最大振幅時の周期は S、L シリーズそれぞれ 0.320~0.325sec、0.233~0.238sec とほぼ変化はしていなかった。そこで、図-14 に 10 回载荷後の接合部状況を示す。目視上は試験前

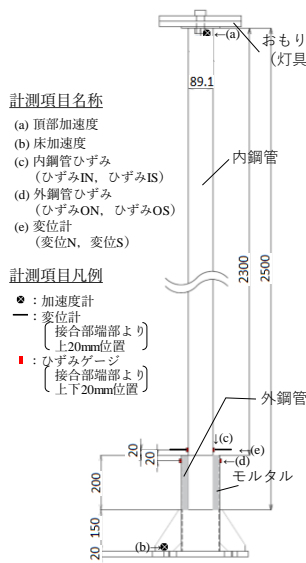


図-11 供試体概要

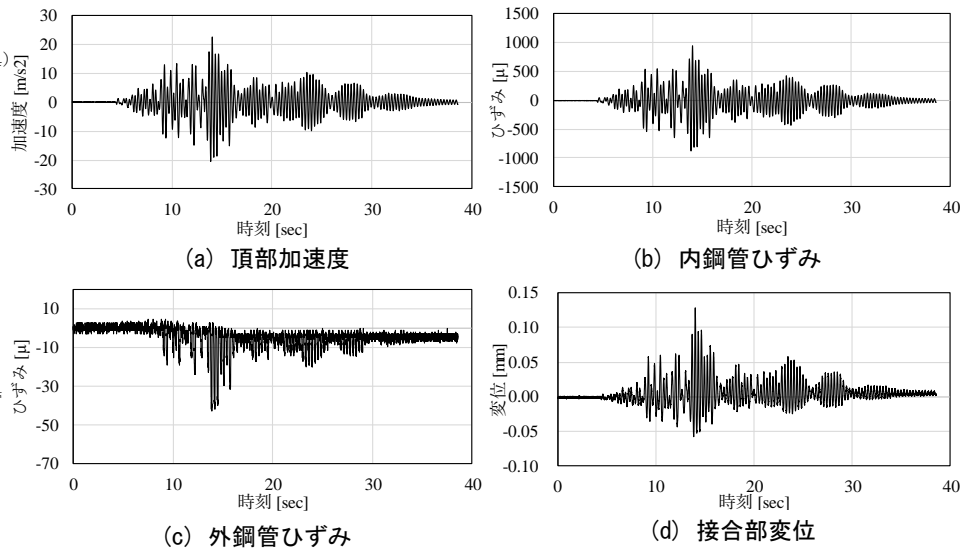


図-12 1回目Sシリーズ時刻歴応答

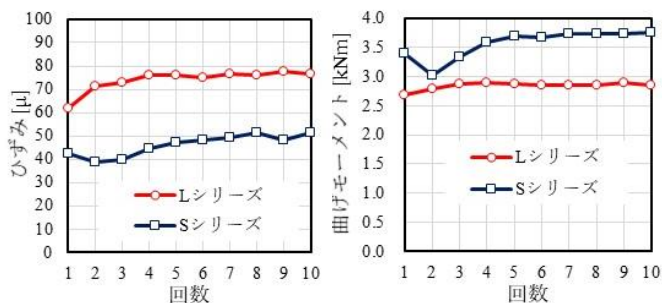


図-13 各回の最大応答値

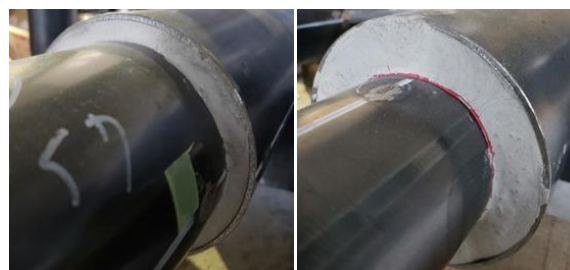


図-14 载荷終了後の接合部状況

と変化が見られず、接合部付近の残留ずれ変位においては0.01mm未満の値であり、本接合構造において、200mm程度の接合で問題ないことが確認できた。

行ったが、接合部の損傷や開きは確認できず、十分な接合性能であると確認できた。

4. まとめ

得られた結論を以下に記す。

- 鋼管径に関わらず、内鋼管の埋め込み長が長いほど、充填モルタルに発生するひび割れは少なくなる。突合せ部のみにひび割れが生じるのはL、Sシリーズそれぞれ内鋼管径の1.75倍、2.0倍以上となった。
- 鋼管径の組み合わせによって円滑に応力が伝達し平面保持の仮定が成立する位置は、充填モルタルの剛性も考慮する必要があると考えられ、単純に内鋼管径に依存しないと考えられる。
- 両シリーズとも合成鋼管として一体化する位置は、外鋼管径に対し、170mm(1.2D_o)程度となった。定着長(外鋼管への分担移行区間)も考慮すると、対象とした構造寸法レベルでは必要埋め込み長は200mm(1.4D_o)以上が好ましいと考えることができる。
- 埋め込み長200mmとして最大荷重が暴風時設計荷重付近となる繰返し載荷を両シリーズともに10回

謝辞:本研究はJSPS 科研費 JP18K04327 の助成を受けたものである。ここに謝意を表す。

参考文献

- 菅, 角掛, 川満, 塩津: 照明柱基礎へのモルタル充填二重鋼管構造の適用性に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 40, pp. 1177-1182, 2018
- 菅, 角掛, 川満, 塩津: モルタル充填二重鋼管構造とした照明柱基礎連結部に関する FEM 解析, 土木学会第 73 回年次学術講演概要集, CS6-040, 2018
- 土木学会: 複合構造標準施工方書 設計編, pp.476-481, 2014
- 日本照明工業会: 照明用ポール強度計算基準 (JIL1003), 2009.12
- 建設省土木研究所: 土木研究所資料第 1035 号ポール基礎の安定計算法, 1975
- 太平洋マテリアル(株): 太平洋プレニューロックススーパー技術資料, 2016