

生産性の向上を目的とした地下空間用新型鋼管柱の開発と実用化

鋼製積層型支承板鋼管柱「マイエスタス[®]」の開発

岡ノ谷 圭 亮

鋼管柱は限られた空間を有効利用できることから、旅客が往来する地下駅のコンコースやホーム階に適用されている。従来、地下駅箱型トンネルの鋼管柱の支承板には、鋳鋼製朝顔形支承板を多用してきた。今後の大型プロジェクト等において大量の鋼管柱が必要になると、製造工場の生産能力等の確保の観点から、鋳鋼製朝顔形支承板に準じた品質の支承板を調達することが困難になるリスクが想定される。

そのため、鋳鋼製朝顔形支承板に代わり、鋼板を積層した鋼製積層型支承板の開発実験を行い、従来の支承板と同等の安全性を確認することができた。開発した支承板は、JIS規格鋼板を切断加工するのみで製作できるため汎用性、調達性に優れ、生産性の向上が期待できる。

キーワード：鋼管柱、支承板、鋳鋼、鋼製、積層、鋼板、地下空間

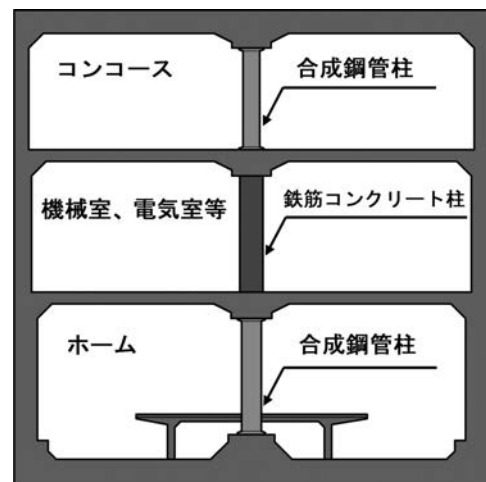
1. はじめに

東京メトロでは、長きにわたり地下駅箱型トンネルの合成鋼管柱の支承板として鋳鋼製朝顔形支承板（以下、朝顔形支承板）を多用してきた（図—1、写真—1）^{1),2)}。しかし、調達先の大手鋳造メーカーが撤退し、今後の新線建設等の大型プロジェクトにおいて大量の合成鋼管柱が必要になると、製造工場の能力や性能確保の観点から、朝顔形支承板に準じた品質の支承板を調達することが困難になるリスクが想定された。このような状況も踏まえて筆者らは、朝顔形支承板に代えてドーナツ型の鋼製円盤（以下、鋼製円盤）を積層した鋼製積層型支承板（以下、積層型支承板）の開発を行った³⁾。開発した支承板は、JIS規格鋼板を切断加工するのみで製作できるため汎用性、調達性に優れ、生産性の向上が期待できる。本稿では、新たに開発した積層型支承板を用いた合成鋼管柱の開発実験と現場への実用化について述べる。

2. 合成鋼管柱の仕様

(1) 開発要素

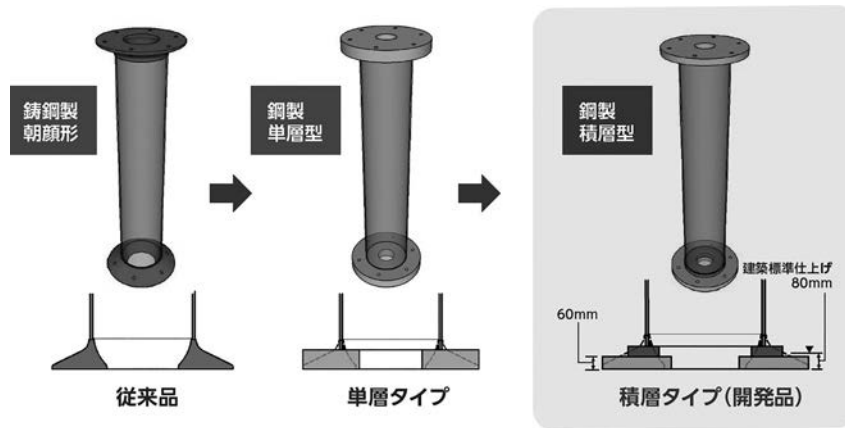
鋼板を一枚使用した単層タイプでは、設計軸力の増加傾向により鋳鋼製支承板に対して重量化が課題となった。そのため、本開発では、鋳鋼製支承板に近い支圧伝達特性を実現できる構造として、重量を抑えながら鋼板を複数積層した鋼製支承板を目指した（図—2）。



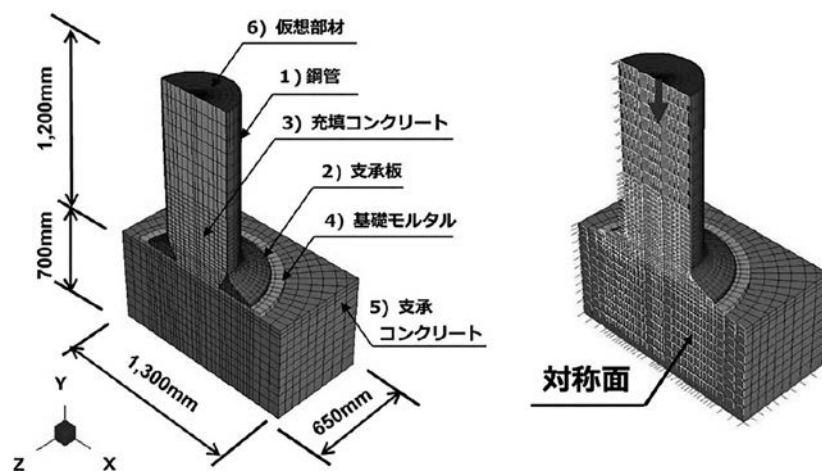
図—1 合成鋼管柱の適用例



写真—1 合成鋼管柱の設置状況



図一2 開発要素



図一3 3次元FEM解析モデル図



写真一2 実物大の荷重実験状況

よび支承コンクリートのひずみ分布および応力度の測定結果を数値解析結果と比較検討し、整合性を確認した上で鋼製支承板が鋳鋼製支承板と同等の性能を有していることを確認できた³⁾。

(3) 開発の効果

新型の支承板は、製作過程において、鋳型が不要となり、従来型より納期短縮が可能となった。また、鋼板を切断加工して溶接接合するため、製作の効率性が向上した。さらには、材質が鋼板（SM材）であり、かつ既存のJIS規格鋼板を使用しているため、効率的に製作できるとともに、鋼管柱の安定調達が図れる（写真一3、4）。

(2) 開発実験

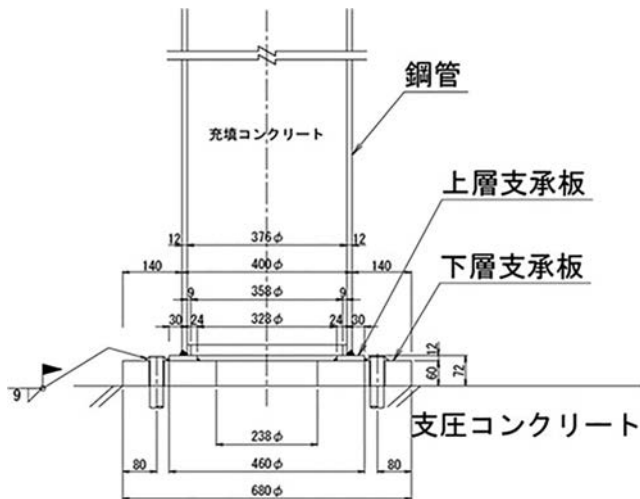
鋼製支承板が鋳鋼製支承板と同等の性能を具備するために必要な設計・施工上の条件を数値解析および実物大の荷重試験に基づいて検討した（図一3、写真一2）。荷重実験では、両支承板を製作して、支承板お

(4) 構造仕様および材質

今回開発した積層型支承板を用いた合成鋼管柱の構造仕様は図一4に示す通りで、開発要素としては、形状を朝顔形に近似すべく設計板厚と外径を変化させた2枚の鋼製円盤を積層し、作用軸力の円滑な伝達を

表一 設計諸条件

設計軸力 N (kN)	偏心量 e (mm)	鋼管外径 φD1 (mm)	積層型支承板 SM490B		鋼材の引張降伏強度の特性値 f_{syk} (N/mm ²)	支圧コンクリートの設計基準強度 f'_{ck} (N/mm ²)	支圧分布面積における桁幅 B (m)	
			外径 φD (mm)	設計板厚 (mm)				
3.500	20	400	上層板 460	鋼管基部の積層支承板厚 H2	72	295	24	1.050
			下層板 680	段落ち部の支承板厚 T1	60			
構造解析係数 γ_a	部材係数 γ_b	コンクリートの材料係数 γ_c	鋼材の材料係数 γ_s	構造物係数 γ_i				
1.0	1.1	1.3	1.05	1.2				



図一 積層型支承板の形状寸法

$$\gamma_i \cdot \sigma_c / \sigma_{ad} \leq 1.0 \tag{1}$$

ここで、支圧応力度 σ_c は、支圧応力度 W1 と W2 の合力である ($\sigma_c = W1 + W2$)。また、設計支圧強度 σ_{ad} は、コンクリート面の支圧分布面積を考慮した割増係数 η を用いて、設計基準強度 f'_{ck} から支圧強度を求め、コンクリートの材料係数 γ_c (=1.3) および部材係数 γ_b (=1.1) で除したものであり式 (2) の通りとなる。

$$\sigma_{ad} = \eta \cdot f'_{ck} / \gamma_c / \gamma_b \tag{2}$$

(3) 支承板の応力度照査

照査では、終局限界状態に対して構造物係数 γ_i を 1.2 として支承板に作用する設計曲げモーメント M_r が設計曲げ耐力 M_{ud} 以下であることを式 (3) により確認

する。

$$\gamma_a \cdot \gamma_b \cdot \gamma_i \cdot (M_r / M_{ud}) \leq 1.0 \tag{3}$$

ここで、 M_r は、コンクリートの支圧応力度 σ_c (= W1 + W2)、支承板の半径 R、支承板照査位置の半径 r との関係から式 (4) により定式化されている⁴⁾。

$$M_r = \pi / 3 (W1 + W2) (2R^3 - 3R^2r + r^3) \tag{4}$$

また、 M_{ud} は、鋼材の引張降伏強度 f_{syk} 、半径 r の位置の支承板厚 T との関係から式 (5) により定式化されている⁴⁾。

$$M_{ud} = f_{syk} \cdot \pi \cdot r \cdot T^2 / (3 \cdot \gamma_s) \tag{5}$$

今回の支承板では、鋼製円盤を 2 枚積層しているため、照査では鋼管基部の積層支承板総厚 H2 (2 枚分の積層厚 T1 + T2) および段落ち部の支承板厚 T1 (下層板厚) のそれぞれで M_r および M_{ud} を算出する。

(4) 照査結果

照査結果を表一 2 に示す。支圧コンクリートの照査結果には、やや余裕を残しているが、積層型支承板全体としては、合理的な諸元を得られているといえる。なお積層型支承板の開発意図は、朝顔形支承板に準じた作用軸力の伝達特性の確保にあるので、支承板厚 T1 における照査結果が支承板厚 H2 における照査結果を上回らないように支承板厚を設定するものとした⁵⁾。

表一 2 照査結果

支圧コンクリートの支圧応力度 σ_c (N/mm ²)	支圧コンクリートの設計支圧強度 σ_{ad} (N/mm ²)	支圧コンクリートの照査結果 ($\gamma_i \cdot \sigma_c / \sigma_{ad} \leq 1.0$)	支承板種別と厚さの呼称	積層型支承板の設計曲げモーメント M_r (kN・m)	積層型支承板の設計曲げ耐力 M_{ud} (kN・m)	積層型支承板の照査結果 ($\gamma_a \cdot \gamma_b \cdot \gamma_i \cdot (M_r / M_{ud}) \leq 1.0$)
11.91	28.43	0.55	鋼管基部の積層支承板厚 H2	215.0	305.0	0.93
			段落ち部の支承板厚 T1	137.3	243.6	0.74

表一 3 寸法精度

項目	寸法許容誤差		摘要
鋼管の外径	鑄放し部	+1%, 0%	SCW 490-CF の場合, 管端部および中央部で直交する二直線を測定する。
	端部	±0.5%	
	中央部	±1.0%	STK 490, SM 490B の場合, 管端部および中央部で直交する二直線を測定する。
鋼管の厚さ	加工部	+規定せず, -0.5 mm	SCW 490-CF の場合
	鑄放し部	+規定せず, -0 mm	
		+規定せず, -0.6 mm	STK 490, SM 490B の場合
鋼管の長さ	±3 mm		
鋼管の曲がり	長さの 1/2,000 以内		SCW 490-CF の場合
	長さの 1/2,000 以内		STK 490, SM 490B の場合
支承板の外径	鑄放し部 または 鋼板部	+1%, -0 mm	板の直交する二直線を測定する。SM 490B の場合, 各層ごとに測定する。
支承板の厚さ	+規定せず, -0 mm		SM 490B の場合, 各層ごとに測定する。
鋼管柱の長さ	+10 mm, -0 mm		
管端の直角度	±2 mm		柱軸心を基準とする。



写真一 5 鋼管



写真一 6 ドーナツ型の鋼製円盤

4. 工場製作

(1) 寸法精度

鋼管および支承板, またこれを接合した鋼管柱は工場製作となるため, 表一 3 に示す通り, 東京メトロで規定する寸法精度に基づき製作した(写真一 5 ~ 8)。



写真一 7 鋼製積層型支承板



写真一 8 鋼管柱

(2) 検査および試験

(a) 材料試験

製作した支承板の材質が SM490B, 鋼管は SM490B であるため, 材料試験は JIS に基づく化学成分および機械的性質をミルシートにて確認し, 合格とした。

(b) 溶接部試験

鋼管の溶部は, 超音波探傷試験を行い, JIS Z 3060 「鋼溶接部の超音波探傷試験方法」の付属書 7 (試験結果の分類方法) の L 検出レベルの 2 類以上の分類を確認し, 合格とした。

支承板 (SM490B) のすみ肉溶接 (積層部) は, 全線において JIS Z 2343-1 「非破壊試験-浸透探傷試験-第 1 部: 一般通則: 浸透探傷試験方法及び浸透指示模様分類」により試験を行い, 欠陥指示模様のないことを確認した。

また, 鋼管と支承板取付けの全溶接部は, 鋼管の溶接部と同様に超音波探傷試験を行い, 欠陥のないことを確認し, 合格とした (写真一 9)。

(c) 外観および形状寸法検査

外観検査は, 溶接部表面の仕上がり程度および有害な欠陥の有無について検査した。形状寸法検査は, 表一 3 に示す寸法精度を項目ごとに確認し, 合格とした (写真一 10 ~ 12)。

(3) 塗装

塗装は, 素地調整により表面の錆, 油分, 黒皮等を



写真一〇 超音波探傷試験状況



写真一一 支承板の厚さ測定状況



写真一二 鋼管柱の長さ測定状況



写真一三 管端の直角度測定状況

十分に除去し、下塗り・上塗りの順に行った。下塗りは、素地調整後3時間以内に鋼管柱とコンクリートの接触面を除き JIS K5633「エッチングプライマー」を1回（膜厚 15 μm ）、1時間以上経過後、上塗りとして JIS Z 5674「鉛・クロムフリーさび止めペイント」を1回（膜厚 35 μm ）塗布し、所定の膜厚を確認し、合格とした。

5. 実施工

今回製作した鋼管柱は、既設躯体上床版の上に築造する連絡通路の中に設置するものである。そこで、鋼管柱の設置に先立ち、柱脚部では既設上床版の研り込みを行って、均しモルタルによる不陸整正するとともに柱頭部と柱脚部に固定用アンカーボルト設置穴を削孔した。鋼管柱の建込み後、固定用アンカーボルトを挿入して支承板と現場溶接し、鋼管内に中詰コンクリートを現場打設後、柱頭部と連絡通路上床版との間に無収縮モルタルを充填し建込みを完了した（写真一3、14）。



写真一四 鋼管柱設置完了



写真一五 鋼管柱建築仕上げ完了

6. おわりに

新たに開発した積層型支承板を用いた合成鋼管柱は、載荷実験や数値解析により、従来型の合成鋼管柱と同等の性能を有していることを確認できた。また、実用化に向けた実施設計を行い、建設工事へ初適用することができた。今後は、国内外の大型プロジェクトに向けた適用を推進し、建設工事における生産性の向上への寄与を期待したい。

J C M A

《参考文献》

- 1) 東京地下鉄(株)：一般設計図並びに標準図，2021.7.
- 2) 渡邊健，木川富男，森崎充：新しい地下構造用合成鋼管柱の開発，土木学会論文集，No.480/VI-21，pp.43-52，1993.12.
- 3) 岡ノ谷圭亮，大石敬司，大塚努，高橋正也，前島稔，岩橋正佳，新井泰：鋳鋼製朝顔形支承板に代わる鋼製積層型支承板を用いた地下空間用合成鋼管柱の開発，土木学会論文集 F2（地下空間研究），Vol.78，No.1，pp.33-50，2022.
- 4) 土木学会：2016年制定 トンネル標準示方書・同解説，開削工法編，2016.8.
- 5) 岡ノ谷圭亮，橋口弘明，大塚努，岩橋正佳，前島稔，新井泰：鋼製積層型支承板を用いた地下空間用合成鋼管柱の現場への初適用に向けた実施設計，令和5年度土木学会全国大会第78回年次学術講演会，VI-360，2023年9月.

【筆者紹介】

岡ノ谷 圭亮（おかのや けいすけ）
東京地下鉄(株)
改良建設部 設計第一課
副主任

