
地下鉄用鋼管柱リバーコラム（Iタイプ）の開発
River Column (I-type) for Subway Tube Column

菊川 春三(Shunso Kikukawa) 高橋 千代丸(Chiyomaru Takahashi) 根井 基雄
(Motoo Nei) 村田 勝弘(Katsuhiko Murata)

要旨：

冷間加工した鋼管の両端に支承部コンクリートへの応力伝達用支圧板を溶接した地下鉄用鋼管柱“リバーコラム（Iタイプ）”を開発した。本鋼管柱の特徴と調査・研究の結果、明らかにし得た事項は次のとおりである。(1) 冷間加工により、強度は上昇するが靱性は低下する。伸びと絞りの変化は少ない。(2) 靱性の劣化は素材の材質設計で十分補い得るため、本鋼管柱では製品を用いた機械的性質の品質保証を行っている。(3) 冷間加工や溶接による残留応力は鋼管柱の座屈強度に悪影響を及ぼさない。(4) コンクリートの支圧応力度は均等分布しない。実際の応力分布に近似した分布形状下で設計すれば、製品重量を5～10%低減し得る。

Synopsis：

Engineering Division recently developed "River Column (I-type)" composed of one fabricated pipe and two base plates for subway tube columns. Features and clarified facts of this column are as follows: (1) The strength of fabricated pipes goes up but the toughness goes down by cold forming process. The changes of the elongation and the reduction of area are little. (2) The drop of toughness of fabricated pipes can be prevented by adequate choices of materials. The quality assurance of "River Column (I-type)" is made on the basis of mechanical properties of finished goods. (3) Cold forming process and the residual stress by welds have no mal-effect on the buckling strength of fabricated pipes. (4) Bearing stresses of concrete are not uniform. New design method which simulates the real distribution pattern of these stresses can save 5 to 10% of the weight of products as compared with the conventional method.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

地下鉄用鋼管柱リバーコラム (I タイプ) の開発

River Column (I-type) for Subway Tube Column

菊 川 春 三*
Shunso Kikukawa

高 橋 千代丸**
Chiyomaru Takahashi

根 井 基 雄***
Motoo Nei

村 田 勝 弘***
Katsuhiro Murata

Synopsis:

Engineering Division recently developed "River Column (I-type)" composed of one fabricated pipe and two base plates for subway tube columns. Features and clarified facts of this column are as follows:

- (1) The strength of fabricated pipes goes up but the toughness goes down by cold forming process. The changes of the elongation and the reduction of area are little.
- (2) The drop of toughness of fabricated pipes can be prevented by adequate choices of materials. The quality assurance of "River Column (I-type)" is made on the basis of mechanical properties of finished goods.
- (3) Cold forming process and the residual stress by welds have no mal-effect on the buckling strength of fabricated pipes.
- (4) Bearing stresses of concrete are not uniform. New design method which simulates the real distribution pattern of these stresses can save 5 to 10% of the weight of products as compared with the conventional method.

1. ま え が き

我が国において、地下鉄用支柱に鋼管柱が使用されて以来、約 20 年が経過したが、この間、コンクリートとの合成鋼管柱を除き、主として遠心鋳造製品が使われて来た。これは厚板を冷間加工するプレス機が数量、能力ともに乏しかったこと、および、厚肉部材に対する需要が旺盛ではなかった当時としては、こうした厚肉鋼管柱の製造コストが高いものについたこと等の理由が考えられる。

ところが、近年、大型化学プラント、石油開発プロジェクト、海洋構造物等の分野で大径または厚肉鋼管の使用が多くなった結果、厚板を素材と

する構造部材用厚肉鋼管の造管技術が進歩したと同時に、これを低廉かつ安定供給する体制が整備されるに至った。

厚肉鋼管に対する以上の生産供給背景をもとに、エンジニアリング事業部ではこの種の鋼管の利用技術開発を進めて来たが、まず第 1 歩として、地下鉄や高架橋用支柱を対象とした製品“リバーコラム (I タイプ)”を開発したので、ここに報告する。

2. リバーコラム (I タイプ) の製造

鋼管用素材の材質は JIS G 3106 に規定する SM 50 B を標準とする。造管は特殊サイズを除き

* エンジニアリング事業部構造技術研究所構造研究室
主任研究員(掛長待遇)

*** エンジニアリング事業部土木技術部土木技術室
主査(課長待遇)

[昭和55年9月12日原稿受付]

** エンジニアリング事業部ハイブライン・海洋技術部
ハイブライン・水道技術室主査(課長待遇)

一般的には UOE プレスやベンディングプレスを用いた冷間曲げ加工を行う。Fig. 1 に、ベンディングプレスによる造管工程を、また、Fig. 2 に当社で可能な造管範囲を示す。

地下鉄用鋼管柱はケーソン内での建込みを原則としており、経済的見地から小径のものが好まれるところから、外径が 400~800mm の範囲が多い。一方、鋼管柱は大きな土圧に抗すべく、厚肉のものが要求され、外径 D_p と肉厚 t_p の比で $D_p/t_p \leq 40$ が一般的である。また、柱長は 4 000mm 前後であり、かつ、鉛直荷重のみを伝達し、曲げモーメントを負担しない構造がほとんどであるところから、地下鉄用鋼管柱は通常、柱両端でピン支持の短柱として設計される。

したがって、概観を Fig. 3 に示すように、リバーコラム (I タイプ) は板巻鋼管と上下端に取付けた 2 枚の支圧板とから構成されている。これらの組立ては Fig. 1 に示すとおりであるが、鋼管縦シーム部は内外面からサブマージアーク溶接し、支圧板と鋼管の T 継手については CO_2 もしくはサブマージアーク溶接を行っている。Photo. 1, 2 はこ

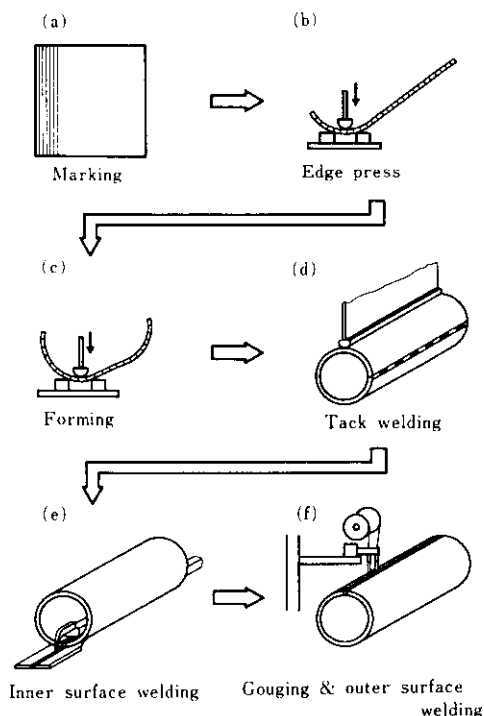


Fig. 1 Making process of fabricated pipe

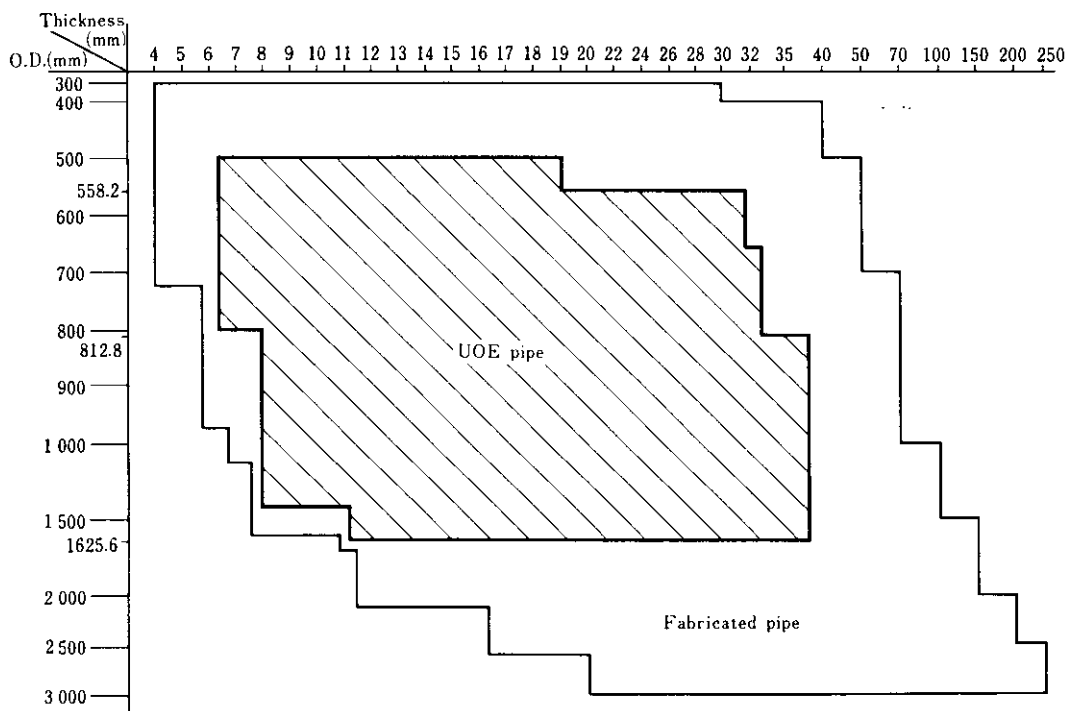
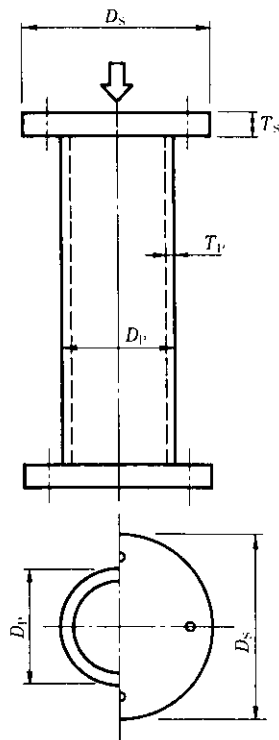


Fig. 2 Available sizes for UOE and fabricated pipes



D_S : Diameter of base plate
 T_S : Thickness of base plate
 D_{TC} : Diameter of tube column
 T_{TC} : Thickness of tube column

Fig. 3 A general view of "River Column (I-type)"

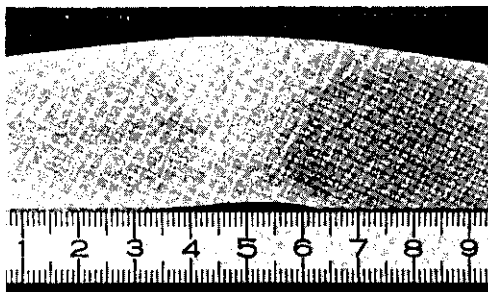


Photo. 1 Macrostructure of seam weld of tube column

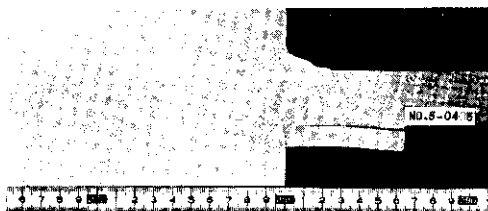


Photo. 2 Macrostructure of joint part between tube column and base plate

れら継手断面のマクロ写真例である。

3. リバーコラム (I タイプ) の構造性能

3.1 冷間加工の機械的性質に対する影響

リバーコラム (I タイプ) は冷間成形加工を原則としており、鋼管表面には数%程度の塑性ひずみが発生する。この結果、降伏点や引張強さは上昇するものの、伸びや靱性は劣化することが危惧される。また、ベンディングプレスを用いる場合、素材となる厚板は一樣曲げを受けず、局部的な折曲げ加工を受けて成形されるため、管の周方向で機械的性質が大幅に変化することも考えられる。

上記の諸懸念に対し、Table 1 に示す化学成分と機械的性質を有する SM 50 B、板厚 30mm の厚板をベンディングプレスを用いて冷間曲げ加工した外径 600mm の鋼管を対象に、鋼管断面の硬度分布を求めた。Fig. 4 はその結果であるが、鋼管の外表面 (Face) と内表面 (Root) 硬度が肉厚中心部 (Center) より 10% 程度高い値を示した。一方、断面周方向での硬度分布は Face, Center, Root とも、溶接部を除いてほぼ一樣な結果を得ており、周方向の機械的性質は均質と判断された。

Fig. 5 は Fig. 4 で硬度分布を調査した 30 個の供試片から抽出した 4 個の供試片について硬度試験と同様、Face, Center, Root の各位置から JIS Z 3111 A2 号試験片を採取し、降伏点、引張強さ、伸び等を調査した結果である。本図からも明らかなように、降伏点や引張強さは溶接部を除いて、周方向では変化せず、板厚方向に変化することがわかる。しかし、伸びや絞りについては、顕著な差異が認められなかった。

靱性の劣化に関してはシャルピー衝撃試験片を鋼管の外側表面 2mm、内側表面 2mm、および中心部から採取して影響を調査した。試験は造管後 6 箇月を経て実施したが、結果は Table 2 に示すとおり、0°C における吸収エネルギーは加工前の母材 (L 方向) に比して L 方向で約 $\frac{1}{2}$ 、C 方向で約 $\frac{1}{3}$ に低下した。これらの試験結果は道路橋示方書¹⁾に記述されている実験データと同様の低下傾向を示しており、冷間加工が材料の靱性に強く影

Table 1 Mechanical properties and chemical composition of material tested

Mechanical properties				Chemical composition (wt.%)				
Y.P. (kgf/mm ²)	T.S. (kgf/mm ²)	Elongation (%)	$\sqrt{E_0}$ (kgf·m)	C	Si	Ma	P	S
35	54	25	12.0	0.16	0.37	1.39	0.020	0.010

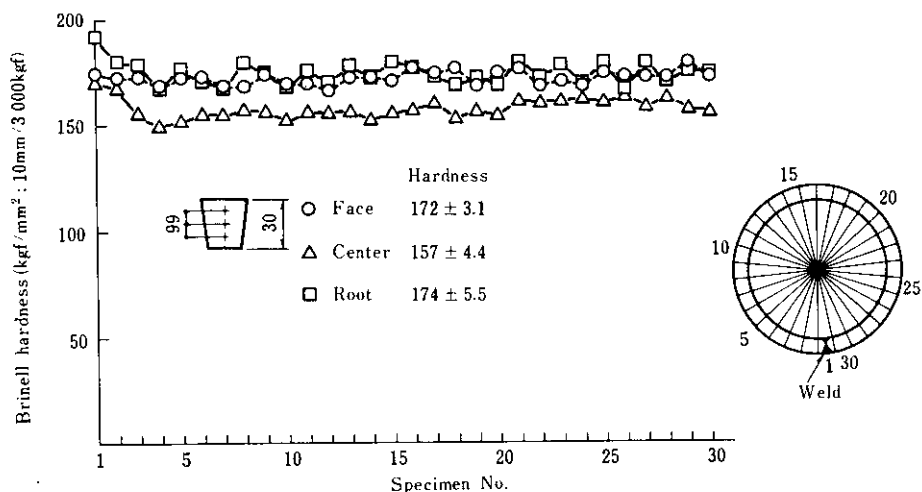


Fig. 4 Hardness distribution of tube column

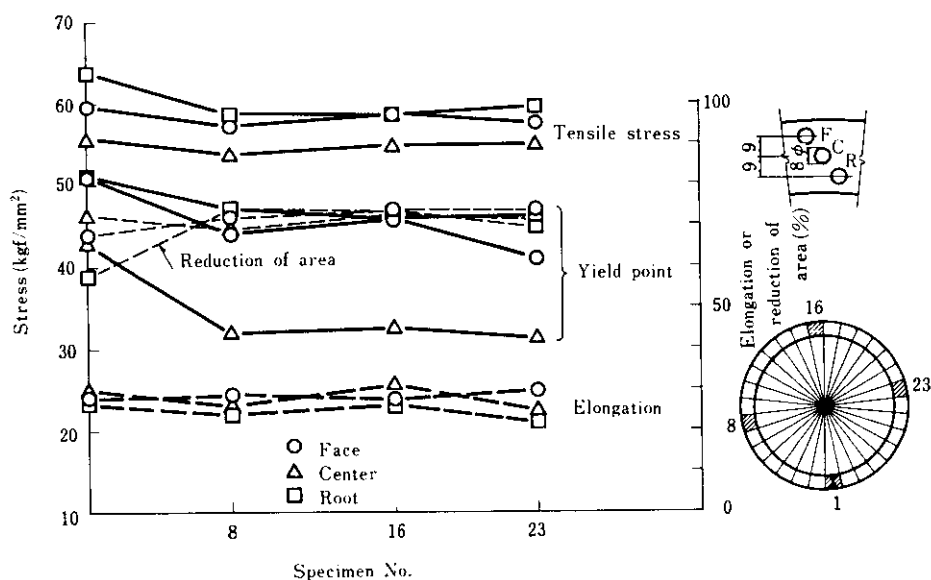


Fig. 5 Distribution of mechanical properties of tube column

Table 2 Reduction of toughness after cold forming of pipe

Specimen		Impact value at 0°C (kgf·m)	
		L-direction	C-direction
Plate		12.0	—
Pipe	F	6.6	4.5
	C	8.9	4.3
	R	6.9	4.8

F: Tested to outer surface of pipe

C: Tested to center of pipe thickness

R: Tested to inner surface of pipe

響することがわかる。

一方、堀川ら²⁾の実験結果では、素材の化学成分を工夫することや熱処理を施すことで、靱性劣化を防止し得ることが示されている。リバーコラム(Iタイプ)の製造に際しては、以上の諸事実を踏まえ、適切な材質設計によって、製品で所定靱性値の保証を行っている。例えば、50kgf/mm²(490MPa)級鋼を使用するとき、リバーコラム(Iタイプ)では0°Cでの吸収エネルギーとして、2.8kgf·m(27.5J)を保証している。

3・2 実大鋼管柱の耐荷力試験

塑性域にわたる加工を受けたり、残留応力が存在する鋼管の応力-伸び特性曲線は明瞭な降伏現象を示さないRound House型となることはよく知られている。このように、ひずみ硬化が顕著な材料からなる短柱を圧縮試験すると、鋼管柱が局部座屈を生じて崩壊に至るまでに、いったん降伏してから耐荷力が再び上昇することが加藤ら³⁾によって明らかにされている。したがって、地下鉄用鋼管柱を設計するにあたり、利用頻度が高い開削トンネル指針⁴⁾や鋼鉄道橋設計標準⁵⁾の規程に従って弾性限度内の設計を行う限り、リバーコラム(Iタイプ)は設計値に対して十分の安全率を有していることから、本形式の鋼管柱の安全性については何ら不安がないといえるが、新製品の材質や製作精度等を総合的に検証する目的で実大鋼管柱の耐荷力試験を実施した。供試鋼管柱は外径600mm、肉厚30mm、柱長3300mm、支柱板径960mm、板厚150mmを用いた。実験前、定盤とレベル等を組合わせて測定した本鋼管柱の精度は

以下のとおりであった。

鋼管長さ: 2996mm(支圧板間距離)

鋼管直径: 599.5mm(外周長からの換算値)

管厚: 30.1mm

柱の倒れ: 1.1mm(柱長の0.04%)

実験は開削トンネル指針による設計荷重 $P_d = 913.3t(8956kN)$ の約 $\frac{1}{2}$ 、500t(4903kN)まで予備載荷して、鋼管柱中央部に貼付した4点のひずみゲージを用いて偏心が平均値に対し $\pm 5\%$ となるよう調整後単調載荷し、適宜、鋼管柱の鉛直ならびに水平方向変位や局部変形等をダイヤルゲージやひずみゲージにより測定して局部座屈を検出した。

Fig. 6は本試験の結果得られた、荷重と鋼管柱の鉛直方向変位の関係であるが、鋼管柱の最大耐荷力は設計値を3倍以上も上回ったことから、本鋼管柱は耐荷力に関して十分なる安全率を有すると判断される。

供試鋼管柱の局部座屈はPhoto. 3に示すとおり、鋼管と支圧板の接合部近傍に生じたが、溶接部、鋼管の一般部ともに割れの発生は認められず、健全な状態にあることがわかる。また、最大荷重時の鋼管柱の鉛直方向変形量は、Fig. 6より、柱長を測定長とした0.2%オフセットで定義した降伏荷重に対応する変形量の8.7倍あったことから、本鋼管柱の変形能は実用上十分であると判断した。

以上のことから、本鋼管柱の実際使用状態を考えると、強度や変形能等の構造性能に関し、冷間加工や溶接残留応力の悪影響は皆無と結論付けられる。

3・3 支圧板の設計

地下鉄用鋼管柱は大きな鉛直荷重を支承部のコンクリートに伝えるため、上下端に厚肉の支圧板が取付けられている。開削トンネル指針では、支圧板の設計法として、支承部コンクリートの支圧応力度を均等分布と仮定することにより、支圧板の必要寸法を決定する方法を採用している。すなわち、支圧板を鋼管外壁位置で固定と仮定した片持梁と仮定し、均等支圧応力度を反力として与えた際の許容曲げ応力度から支圧板の必要板厚を決定するのである。また、類似の方法ではあるが、鋳鋼製の支圧板を対象として、光弾性実験によっ

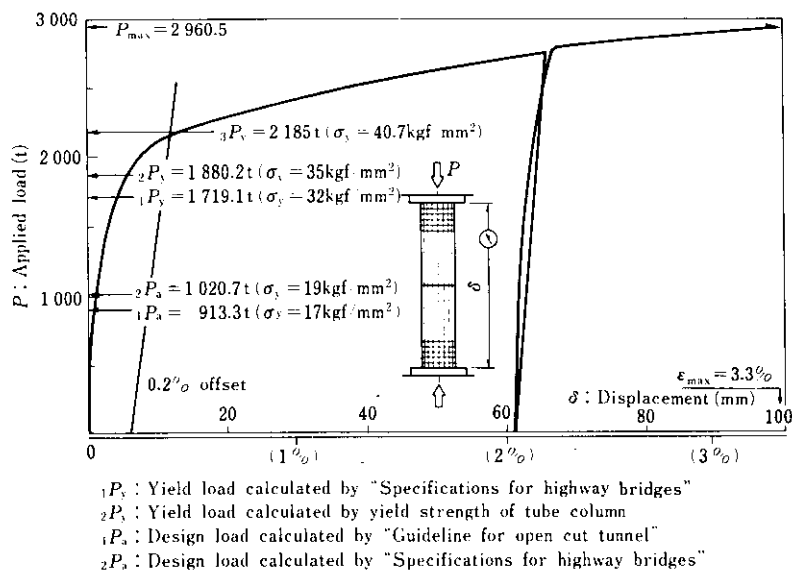


Fig. 6 Buckling test results of tube column



Photo. 3 Joint part of tube column and base plate after buckling test

て求めた支圧応力度分布に基づいて設計する方法もある⁶⁾。

以上の設計法は実績があり、安全側の設計値を与えると推察されるが、リバーコラム (I タイプ) の支圧板設計を行うに際し、実情をよく反映した支圧応力度分布形状を取入れることを目的として次の調査を行った。

まず、鋼管外径に対する支圧板の径や板厚比、鋼とコンクリートのヤング係数比等をパラメータとして有限要素法を用いた軸対称 3 次元応力解析を行った。次に、2 次元および 3 次元光弾性実験法⁷⁾による実験も行い、解析値と比較した。

実験と解析の結果、得られた支圧応力度分布を Fig. 7 で比較したが、本図はコンクリート表面での応力の乱れの影響を排除するため、コンクリート表面から内部にやや入った位置での応力状態を示した。なお、実験の都合上、2 次元光弾性実験

では鋼とコンクリートのヤング係数比 $E_s/E_c = 7.7$ 、3 次元の実験では $E_s/E_c = 2.0$ で実施した。一方、有限要素法解析では、2 次元モデルの E_s/E_c がより実情に近いと考えられたことから、同モデルと同じく、 $E_s/E_c = 7.7$ とした。

Fig. 7 の実験結果は、上述したヤング係数比の相違のため、3 次元実験結果が他の実験および解

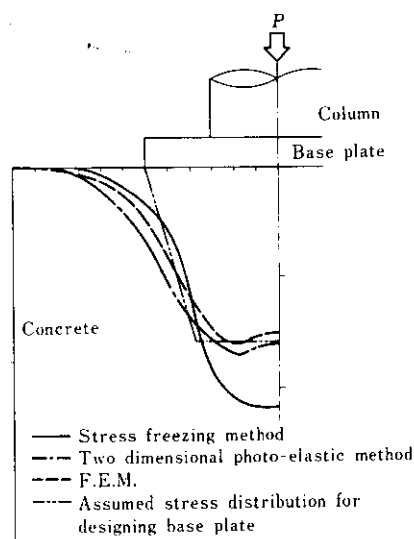


Fig. 7 Bearing stress distribution of concrete under the base plate of tube column

析結果と異なった応力分布傾向を示すことになったと推察されるが、いずれの場合も、支圧応力度は従来の支圧板設計法⁴⁾で仮定していた均等分布ではなく、放物線状分布となることがわかる。

そこで、支圧応力度の分布形状を Fig. 7 中二点鎖線で示した截頭円錐台に仮定して支圧板形状を決定すれば、より合理的な設計が可能である。また、支圧板の力学的挙動は梁よりも板に近いと考えられるため、これを弾性円板として設計すれば、さらに構造体の実情に対応した設計となり得る。リバーコラム(Iタイプ)については、このような考え方にに基づき、支圧板を円板として設計することを基本としているが、本設計法に従えば、支圧板重量を従来より5~10%程度軽減し得るので、一般的に経済的な設計が可能である。

4. あとがき

従来、電縫鋼管や冷間成形加工した角鋼管を柱材として用いた例は数多くあるが、加工による靱性劣化のため、構造性能に支障をきたした例は皆無と推察される。しかし、外径に比して肉厚が従来品よりも厚くなる傾向にあるリバーコラム(Iタイプ)では、より大きな塑性ひずみを受けざるを得ないため、材質設計により、一定水準の靱性値を保証しているわけである。この措置により、溶接や機械加工等については、一般の厚板と同様の

処理をして何ら問題がないことになる。

一方、残留応力や鋼管柱製作時の誤差の影響は実際の試作鋼管柱を座屈試験に供することで、問題ないことを明らかにし得た。また、ベンディングプレスによる造管方式でも、断面周方向の鋼管の機械的性質は変化しないことも実証し得た。

さらに、数値実験と光弾性実験からコンクリートの支圧応力度分布は截頭円錐台に仮定する方法が鋼管部分で最大応力となり、実情をより反映しており、合理的であるとの知見を得た。ただし、リバーコラムの実施設計に際しては、従来法による設計も可能であることは勿論である。いずれの設計法に従うにせよ、支圧板の設計は支承部コンクリートの許容支圧応力度に強く影響される。今のところ、許容支圧応力度はコンクリート標準示方書⁸⁾に準拠して決定しているが、今後、さらに経済設計を行うため、可能な範囲で許容応力度を高めるとすれば、支圧板の板厚との関連をも含めて支圧に対する実験的検討がなされ、許容されるべき支圧応力度を定めることが必要であり、鋭意、その作業を進めている。

なお、リバーコラムの開発に際しては京都大学小西一郎名誉教授をはじめ、北海道大学藤田嘉夫教授、大阪市立大学中井博教授ならびに西堀忠信助教授の御懇篤なる御指導をいただいた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本道路協会：「道路橋示方書・同解説(II鋼橋編)」，(1980)，〔丸善〕
- 2) 田中康浩，工藤純一，堀川浩甫：「土木構造用鋼材におけるひずみ時効と許容曲げ加工量」，土木学会第33回年次学術講演会講演概要集，(1978)，I 330
- 3) 加藤勉：「軸圧縮力を受ける鋼管の塑性局部座屈耐力」，日本建築学会論文報告集，(1973) 204
- 4) 土木学会：「開削トンネル指針」，(1977)，〔土木学会〕
- 5) 土木学会：「鋼鉄道橋設計標準解説，1974年改訂版」，(1974)，〔土木学会〕
- 6) 渡辺健：「地下鉄シールド駅の構造設計に関する研究」，(1973)，〔東京大学学位論文〕
- 7) 西田正孝ほか：「光弾性実験法」，(1970)，〔日刊工業新聞社〕
- 8) 土木学会：「コンクリート標準示方書」，(1974)，〔土木学会〕