

コンクリート充填鋼管柱の開発

Concrete Filled Tube Column

志村保美^{*⁽¹⁾} 山口種美^{*⁽²⁾} 岡田忠義^{*⁽³⁾}
 Yasumi SHIMURA Tanemi YAMAGUCHI Tadayoshi OKADA

抄録

コンクリート充填鋼管(CFT)は、鋼とコンクリートの合成効果による優れた性能を有し設計の自由度も高く合理的な部材であり、近年、建築構造物に利用されるケースが増大してきている。ただし、コンクリート充填鋼管(円形)は、柱梁接合部の設計が煩雑で、また加工の難易度も高い。そこで、柱梁接合部に必要となるダイアフラムを所定の位置に取り付けた中間部材としての“仕口付き円形鋼管部材(NSコラム)”が開発され、既に一般認定を取得している。仕口付き円形鋼管部材(NSコラム)の概要と開発にあたり実施した実大規模の接合部性能に関する調査結果を報告した。

Abstract

The concrete-filled tube(CFT) is a rational material which excels in performance resulting from a synthetic effect of steel with concrete and high versatility in designing, which has been being employed for more and more constructions recently. However, with the concrete-filled tube(column), designing the joint part of a column with a beam is a troublesome and processing it is difficult too. Therefore, the steel tube column with diaphragms(NS column) has been developed as an intermediate part member which the diaphragms required for the joint part of a column with a beam are fitted to the designated positions. This steel tube column with diaphragms has already obtained the general approval. This report describes the summary of the steel tube column with diaphragms and the performance research results for the joint part to the actual scale that was conducted prior to developing.

1. はじめに

建築構造分野におけるコンクリート充填鋼管(CFT)構造に関する研究は古くから行われており、それらの研究成果を踏まえて1967年に建築学会より“鋼管コンクリート構造設計規準・同解説”が出版されている。しかし、それ以降1990年頃まではコンクリート充填鋼管構造の実際の建築構造物への適用は限られたものとなっていた。その理由は、この構造特有の性能を反映した設計法が必ずしも確立されていなかったことや、充填用コンクリートの調合と施工品質管理の難易度が高かったことなどが考えられる。

これに対して、継続して行われた研究の成果に基づき設計規準の見直しも進み^{1,2)}、またコンクリート品質が飛躍的に改善されてきている。さらに、新都市ハウジング協会がコンクリート充填鋼管に関して一般認定を取得するに至っている。これらの動向を踏まえ、近年になりコンクリート充填鋼管構造を適用する建築構造物は着実に増加してきている。国外においても高層ビルあるいは超高層ビルに対して、コンクリート充填鋼管構造が採用されるケースが多くなってきている。

2. コンクリート充填鋼管構造の特徴

コンクリート充填鋼管構造は、鋼部材の弱点である圧縮応力時における局部座屈が充填コンクリートにより拘束されることからその耐荷性能が優れている。この特徴は鋼とコンクリートとの合成構造において共通で得られるメリットであり力学的に優れた点である。さらに、コンクリート充填鋼管構造は、繰り返し荷重などの耐震性能に関しても優れた性能を有している。一方、コンクリート充填鋼管では、そのコンクリート充填施工において型枠も必要なく鋼管が型枠を兼用することが可能なことから施工上のコストメリットを享受することも可能である。

コンクリート充填鋼管が主に使用される柱材や圧縮部材においては、次の点が具体的なメリットとして挙げられる²⁾。

- 1) 中空鋼管に比べて幅厚比の制限が緩和される。
- 2) 充填コンクリートは3軸応力状態となり圧縮強度が増加する。特に、円形鋼管の場合はその効果が大きい。
- 3) 充填コンクリートの存在により部材の耐火性能が向上し、鋼構造部材の場合よりも耐火被覆を減らしたり無被覆の設計が可能となる。

*⁽¹⁾ 建材開発技術部 マネジャー
 東京都千代田区大手町2-6-3 ☎100-8071 ☎(03)3275-6720

*⁽²⁾ 建材開発技術部 グループリーダー

*⁽³⁾ 鉄鋼研究所 鋼構造研究開発センター 主任研究員

4) 充填コンクリートにより接合部におけるダイアフラムの寸法を小さくできる。

これらのメリットについては、これまでの研究結果を踏まえ、日本建築学会編“コンクリート充填鋼管構造設計施工指針”³⁾あるいは新都市ハウジング協会編“CFT構造技術指針・同解説”において、具体的に反映されている。

3. NSコラム

コンクリート充填鋼管は、上述の通り合理的な部材設計が可能となっており、近年その適用例も増加している。ただし、円形鋼管を柱部材に使用する場合、梁部材との接合部仕口にはダイアフラムによる補強が不可欠である。このダイアフラムについては、コンクリート充填性を考慮しつつ鋼管径ごとに合理的なダイアフラム形状を設計することでかなり煩雑となる。また、その加工においては、部材が円形鋼管のため専用設備を保有しない場合には加工の難易度が高くなる。そこで、新日本製鐵では、図1のように鋼管部材

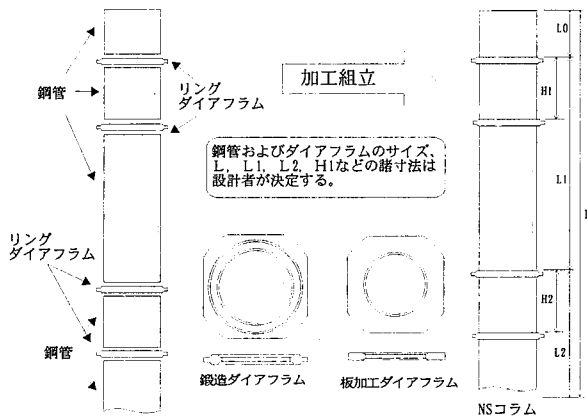


図1 NSコラムの概要

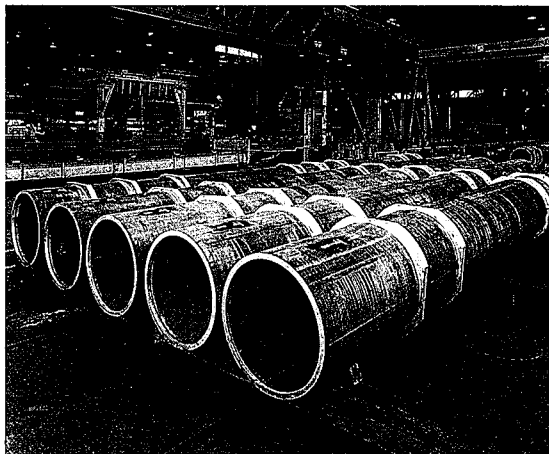


写真1 NSコラム製品

に設計で決定された所定の位置(梁接合位置)にダイアフラムを予め溶接接合した部材“NSコラム”の開発を完了し商品化している(写真1参照)。

このNSコラムは、近年のコンクリート充填鋼管構造の市場動向を踏まえ、鋼管の材質並びにサイズとしては表1に示す範囲を対象としている。また、接合部仕口に用いるダイアフラムは図1、表2に示すようにTMC P鋼板(BT325)あるいは鍛造品を用いている。さらに、円形鋼管とダイアフラムは専用ラインをもつ特定の工場で溶接し、溶接部の品質確保を図っている。

以下では、このリング状のダイアフラムを有する接合部仕口の力学的特性、鋼管とダイアフラムの溶接接合部の品質、コンクリートの充填性について、実大で行った性能試験結果を報告する。

3.1 仕口付き円形鋼管の力学特性

円形鋼管に接合部仕口用のダイアフラムを設ける場合、鋼管内部へのコンクリート充填性を確保するために、中央部に開口を有するリング状のダイアフラムとする必要がある。一方、柱梁仕口部は建物が耐震性能を発揮する上で最も重要な役割を担っている部位であり、その接合性能の良否は建造物の耐震性能を左右する。柱梁仕口部の基本的な性能は、接合部耐力および接合部剛性であり、ここでは、これらの接合性能について実大の仕口引張試験を通じて得られた知見を紹介する。なお、接合部仕口の性能評価にあたっては、コンクリート充填鋼管のみならず中空鋼管の場合についても対象としている⁴⁾。

3.1.1 試験計画

1) 試験体

試験体の種類は表3に示すように、鋼管径が900mmで、中空鋼管とコンクリートを充填したものの場合およびダイアフラムの種類(鋼板から切り出したものと鍛造によるもの)を組み合わせ全4種類である。試験体は図2に示す形状で、使用したダイアフラムの形状を図3に示す。試験体を使用した素材の引張試験結果を表4に示す。鋼管の長さは、試験機の制約から1,700mm(鋼管径Dに対して2D程度、図2参照)とし、梁フランジに該当する部分の平行部長さについても、やはり試験機の制約から350mm(梁フランジ幅Wに対して1W)としている。なお、フランジに使用した鋼材は、この試験がダイアフラムの耐力評価を目的としたことから、780N/mm²級の鋼材としている。溶接材料も同鋼材用のものである。

表2 ダイアフラム用材料

種類	規格番号	種類の記号
板加工品	JIS G 3136	SN400B, SN490B
	JIS G 3106	SM400B, SM490B
	BCJ-S954	BT-HT325B, BT-HT325C
鍛造品	BCJ-S1737	STR-SN490C

表1 鋼管の材質および寸法

材質	一般構造用炭素鋼管		JIS G 3444 STK400 STK490
	建築構造用炭素鋼管		JIS G 3475 STKN400W, B STKN490B
	プレスバンド鋼管 (素材材質)	溶接構造用圧延鋼材	JIS G 3106 SM400A, B, C SM490A, B, C
		建築構造用圧延鋼材	JIS G 3136 SN400B, C SN490B, C
寸法	鋼管外径(D): 300mm ≤ D ≤ 1524mm		
	鋼管板厚(t _p): 6mm ≤ t _p ≤ 40mm		

表3 試験体一覧

(mm)

記号	鋼管			リング		フランジ		
	材質	寸法(径×厚)	D/t _p	材質	厚さ	材質	寸法(厚×幅)	
中空鋼管	RGS-S	SM490A	900×36	25	鍛造*1	65	SHY685NS (80kgf/mm ² 級鋼)	40×350
	PLS-S				鋼板*2			
CFT	RGS-C	SM490A	900×19	47.4	鍛造*1	65	SHY685NS (80kgf/mm ² 級鋼)	40×350
	PLS-C				鋼板*2			

備考1) *1 SM490B相当, *2 BT-H325B (TMCP)

2) 充填コンクリート強度: F_c=360kgf/cm²

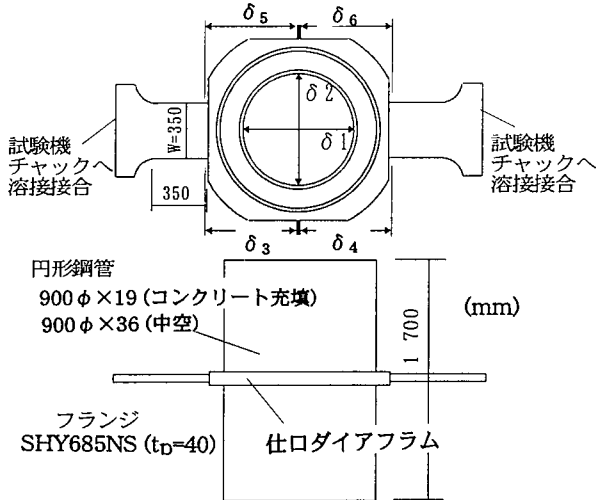


図2 試験体形状

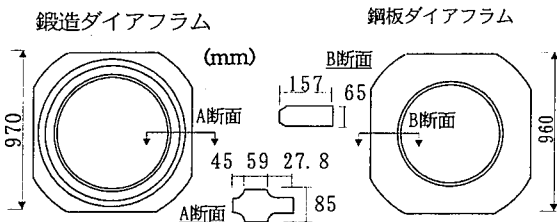


図3 仕口ダイヤフラム形状

表4 使用素材の引張試験結果

部位	材質	厚さ (mm)	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)	備考
900φ×19	SM490A	19	382	546	45.5*1	造管後引張
900φ×36	SM490A	36	462	550	50.9*1	造管後引張
鍛造ダイヤフラム	SM490B相当	65	434	571	34*2	引張値
鍛造ダイヤフラム	BT-HT325B	65	376	524	36*2	引張値
フランジ	SHY685NS	40	813	855	24*2	引張値

*1 JIS5号試験片(造管後試験), *2 JIS4号試験片(引張値)

2) 測定及び荷重方法

接合部仕口の引張試験は、写真2に示すように4000tonの水平型引張試験装置に試験体をセットアップし、両側から引張荷重を与えた。荷重は緩やかな速度で行い、破断に至るまで荷重を続けた。引張試験における変位測定箇所を図2に示す。両側に付けたフランジ間の距離の変化をそれぞれ測定した。なお、中空鋼管の場合は鋼管内部の変形量も測定した。

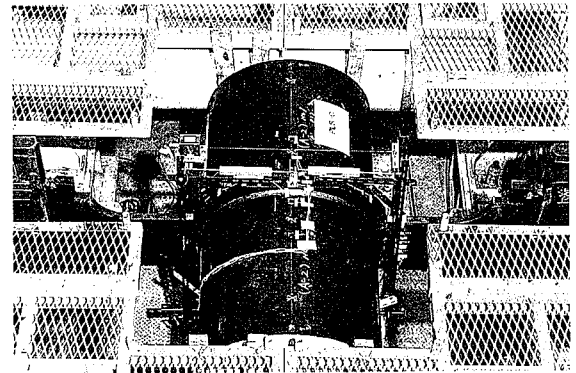


写真2 試験体セットアップ状況

3.1.2 試験結果

接合部仕口の引張試験結果を、素材引張試験結果(表4)を用いて算定した各試験体の計算耐力と比較して表5に、中空鋼管とコンクリート充填鋼管(CFT)の試験体ごとの荷重-変形関係を図4、5にそれぞれ示す。ここで、実験結果の降伏耐力は、荷重変形関係における接線勾配が初期勾配の1/3となる点により評価した。また、計算耐力P_aは建築学会“鋼管構造設計施工指針”による下式を用いた。式中A_rはリング断面積、F₁、F₂はダイヤフラム及び鋼管の降伏強度、B_rはフランジ幅、Dは鋼管径、t_pは鋼管板厚、αはリング最小断面位置となる部分の中心角を表す。なお、中空鋼管の場合の耐力評価については、これまでの実験的研究で構築した“リング耐力式”による評価も行っており、併せて表に示している。

中空鋼管の場合

$$P_a = \left(3.28 \frac{B_r}{D} + 1.43 \right) \cdot t_p \cdot \sqrt{A_r} \cdot F \quad (1)$$

t: 鋼管板厚, F: 鋼管の降伏強度

CFTの場合

$$P_a = 1.24 \sqrt{2 \sin^2 \alpha + 1} A_r \cdot F_1 + 2.16 \sin \alpha \left\{ \left(0.63 + 0.88 \frac{B_r}{D} \right) \sqrt{D \cdot t_p} \right\} t_p \cdot F_2 \quad (2)$$

表5より、コンクリート充填鋼管の試験結果はいずれも実験値が計算値を上回っており、鋼管径が900mmの場合については、学会式は仕口耐力を安全側に評価できることが判る。一方、中空鋼管の場合は、実験値が計算値を大幅に下回っている。これに対してこれまでの実験から導いた“リング耐力式”によれば、実験値を良好に評価できることが判る。

鋼板ダイヤフラムを使用した試験体の最終段階における破断状況の例を写真3、4に示す。すべての試験体でダイヤフラムと梁フラ

表5 仕口引張試験結果

記号	リング種類	降伏耐力(短期) σ_y			最大耐力(終局)			破断 ^{*2} 位置
		実験値 ^{*1}	計算値	実験値/計算値	実験値	計算値	実験値/計算値	
中空鋼管	RGS-S 鍛造 (リング耐力式) ^{*3}	370	517	0.72	509	778	0.65	R
	PLS-S 鋼板 (リング耐力式) ^{*3}	—	306	1.21	—	492	1.03	
CFT	RGS-C 鍛造	670	666	1.00	985	882	1.12	R
	PLS-C 鋼板	680	675	1.01	1057	934	1.13	R

備考 ^{*1} 降伏耐力の実験値は、初期勾配の1/3勾配の接点荷重を採用する。

^{*2} 破断位置のRはリング、Fはフランジを表す。

^{*3} 中空鋼管の耐力評価計算値の下段は“リング耐力式”による。

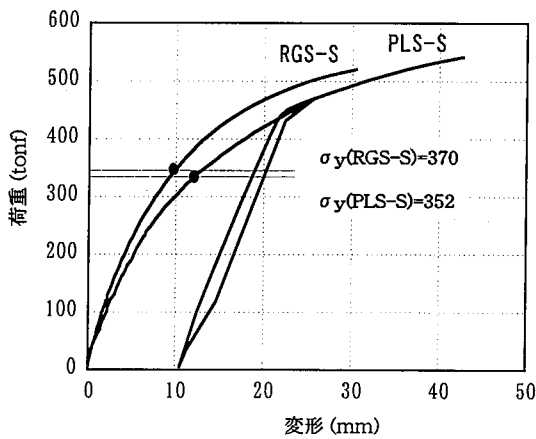


図4 荷重変形関係(中空鋼管)

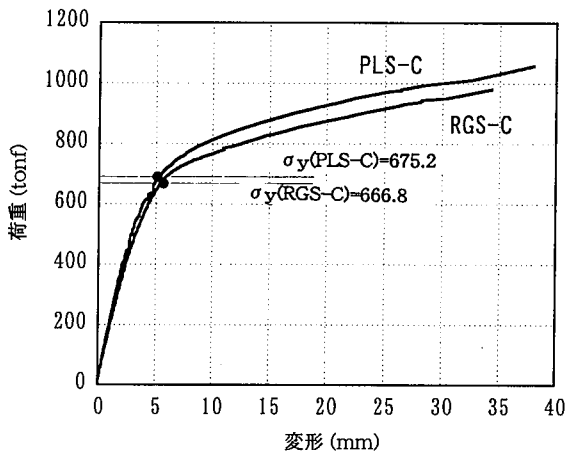


図5 荷重変形関係(コンクリート充填鋼管)

ンジの溶接端部から亀裂が発生し、亀裂はダイアフラム内を進展した。ダイアフラム板厚がほぼ一定の鋼板ダイアフラムの場合は鋼管の中心に向かって約45度方向に亀裂が進展したが、変断面である鍛造ダイアフラムの場合は、ダイアフラムの板厚の変化が少ない方向(フランジ溶接線に平行に近い方向)に進展したのも見られた。いずれの試験体でもダイアフラムはかなり塑性化しており、板厚の減少が観察された。

次に、中空鋼管の場合について、フランジ間の変形量 $(\delta_3 + \delta_4 + \delta_5 + \delta_6)/2$ と鋼管内部の変形量 (δ_1, δ_2) を比較して図6に示す。鋼管内部で計測した引張方向変位 (δ_1) と引張に直交方向の変位 (δ_2) は

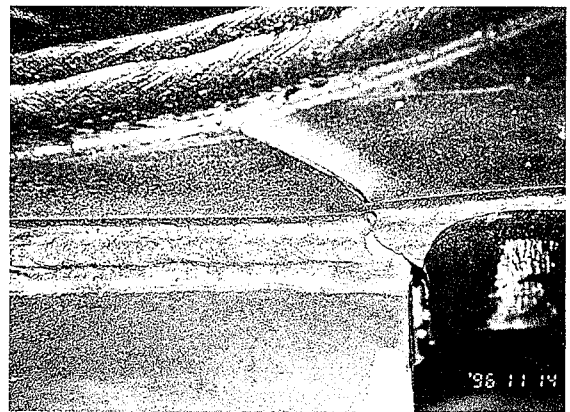


写真3 試験体破断状況(PLS-S)

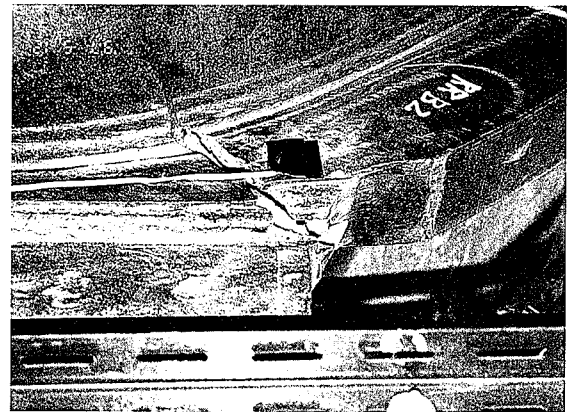


写真4 試験体破断状況(PLS-C)

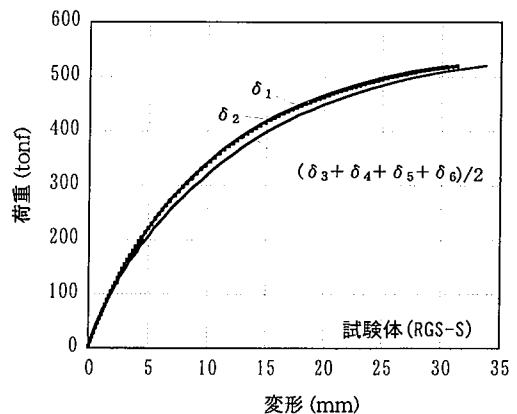


図6 荷重変形関係(鋼管内部とフランジ)

ほとんど同じ値を示すことが判る。また、フランジ間変形量は鋼管内部の変形量に対してダイアフラム及びフランジ部分の変形が含まれており、その量は10%程度であることが判る。

3.2 仕口付き円形鋼管の溶接部性能試験

円形鋼管とダイアフラムの溶接接合は、専用のラインで自動溶接により組み立てられる。その状況を写真5、6に示す。ここでは、この製造ラインで組み立てられたNSコラムのダイアフラムと鋼管の溶接部品質に関して行った調査試験結果を報告する。

3.2.1 試験計画

900φ×36の鋼管とダイアフラムを溶接した図7に示す試験体を製作し、継手引張強度、衝撃特性値などの性能調査を行った。なお、溶接部の開先形状を図7に、溶接条件を表6に示す。性能調査のための各試験項目に対応する試験片形状を図8に示す。

3.2.2 試験結果

(1) 平形引張試験

鋼管-ダイアフラム溶接部の平形試験片は、図8(a)に示すJIS Z 3121“突合せ溶接継手の引張試験方法”による4号試験片とし、鋼板ダイアフラムと鍛造ダイアフラムのそれぞれについて各2体行った。その試験結果を表7に示す。いずれの試験結果も鋼管母材で破断しており、健全な溶接継手性能が得られている。

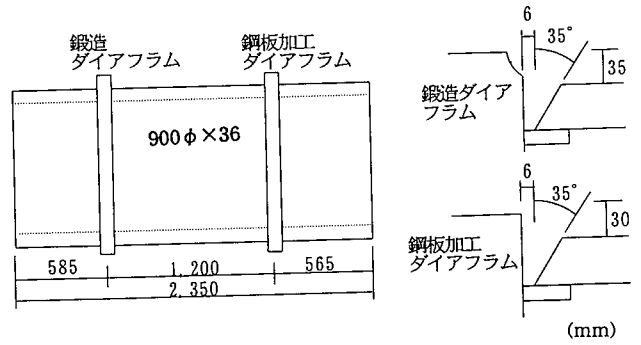
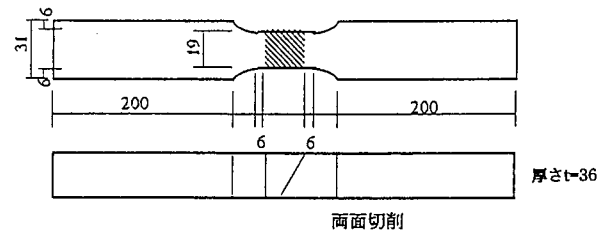


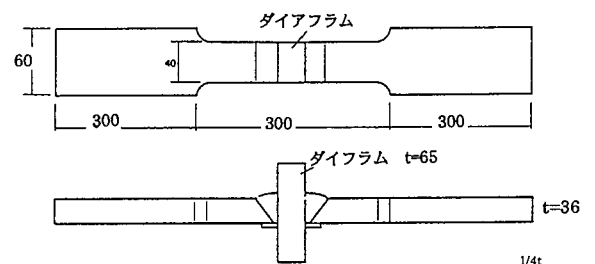
図7 溶接確性試験体

表6 溶接条件

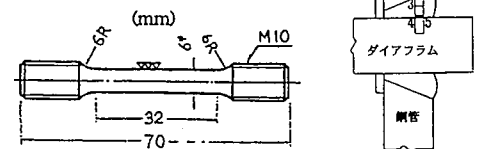
溶接ワイヤ	YM-26(JIS Z 3312-YGW11), 1.6mm φ
電流	380A
電圧	36V
入熱	24~37kJ/cm



(a) 平形引張試験片形状



(b) 十字引張試験片形状



(c) A2号引張試験片形状

(d) 試験片採取位置

図8 溶接部試験片

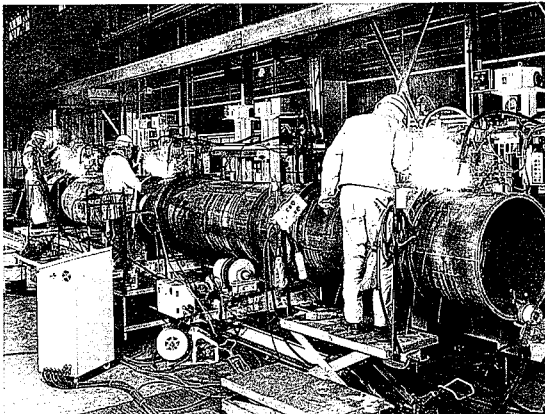


写真5 ダイアフラム溶接状況(その1)

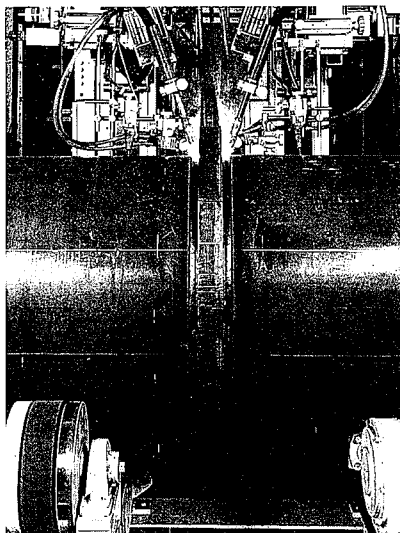


写真6 ダイアフラム溶接状況(その2)

表7 平形引張試験結果

ダイアフラム	試験片記号	0.2%耐力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	破断位置
鍛造	TA-1	433	556	鋼管母材
	TA-2	431	552	鋼管母材
板加工	PA-1	436	568	鋼管母材
	PA-2	442	568	鋼管母材

GL = 50mm

(2)十字引張試験

鋼管-ダイアフラム-鋼管溶接部の十字引張試験片は、JIS Z 2201 “金属材料引張試験片”の1A号試験片を修正した図8(b)に示す形状とし、鋼板ダイアフラムと鍛造ダイアフラムそれぞれについて2体行った。試験結果を表8に示す。いずれの試験結果も鋼管母材で破断しており、健全な溶接継手性能が得られている。

(3)全溶着金属引張試験

鋼管-ダイアフラムの溶接部から図8(c)に示す形状の全溶着金属引張試験片を切り出し、引張試験を行った。試験片数は鋼板ダイアフラムと鍛造ダイアフラムそれぞれ2体である。試験結果を表9に示す。いずれも母材規格値を上回った良好な性能を示している。

(4)シャルピー衝撃試験

シャルピー衝撃試験は、図8(d)に示すように鋼管の表面から板厚の1/4の位置で試験片を切り出し衝撃試験を行った。なお、試験温度は0℃で繰返し数は3である。試験結果より得られる吸収エネルギーと脆性破面率を表10に示す。衝撃値はいずれも27Jを上回る値が得られている。

表8 十字引張試験結果

ダイアフラム	試験片記号	0.2%耐力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	破断位置
鍛造	TB-1	398	532	鋼管母材
	TB-2	393	530	鋼管母材
板加工	PB-1	381	528	鋼管母材
	PB-2	384	527	鋼管母材

GL = 200mm

表9 溶着金属引張試験結果

ダイアフラム	試験片記号	0.2%耐力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	絞り (%)
鍛造	TC-1	499	588	71
	TC-2	481	571	71
板加工	PC-1	476	571	65
	PC-2	516	604	68

GL = 24mm

(5)ピッカース硬さ試験

鋼管-ダイアフラム溶接部のピッカース硬さ試験は、図9に示すように鋼管の表裏面から2mmの位置および板厚中心の位置で行った。試験荷重は98Nで、測定間隔は溶接熱影響部(HAZ)、ボンド部分で0.5mm、その他は1mmとした。試験結果を図9に示す。最高硬さは各測定位置ともに主にHAZ部に現れているが、その値は250~260程度である。また、軟化部は見られない。

(6)マクロ写真

鋼管-ダイアフラム溶接部の断面マクロを写真7に示す。良好な溶接部が得られている。

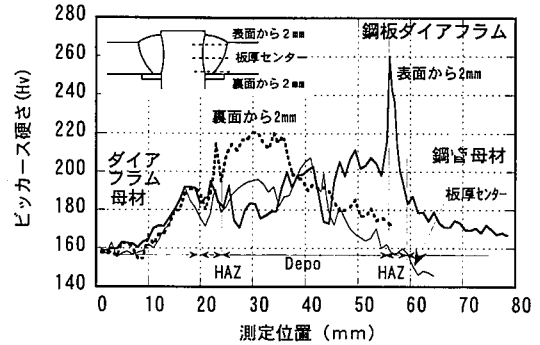


図9 ピッカース試験結果

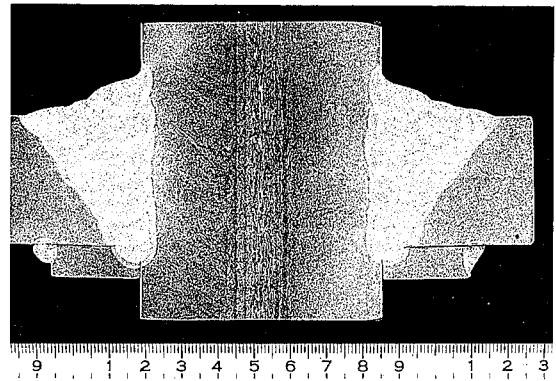


写真7 溶接部断面マクロ組織

表10 シャルピー衝撃試験結果(0℃)

ダイアフラム	試験片記号	切欠き位置*	吸収エネルギー(J)				脆性破面率(%)			
			①	②	③	平均	①	②	③	平均
鍛造	TS1	鋼管側HAZ	107	132	129	123	45	40	50	45
	TS2	鋼管側ボンド	105	148	128	127	50	30	30	55
	TS3	溶着金属	64	33	65	54	60	60	70	63
	TS4	ダイアフラム側ボンド	82	72	74	76	60	60	50	57
	TS5	ダイアフラム側HAZ	116	64	92	91	25	55	50	43
板加工	PS1	鋼管側HAZ	118	133	140	130	50	35	40	42
	PS2	鋼管側ボンド	57	47	69	58	60	55	55	57
	PS3	溶着金属	29	49	30	36	65	65	60	63
	PS4	ダイアフラム側ボンド	101	123	87	104	45	30	55	43
	PS5	ダイアフラム側HAZ	233	230	235	233	0	0	0	0

*図8(d)の位置に対応

3.3 コンクリート充填性試験

鋼管内部に突出するリング状のダイアフラムを用いるNSコラムについて、コンクリートの充填性を確認するために、図10に示すような径600mmの鋼管に各種ダイアフラムを設けた試験体を製作し、コンクリート圧入試験を行った。試験に用いたコンクリートの調合を表11に示す。

コンクリート打設一週間後にダイアフラム近傍の鋼管とダイアフラムを外してコンクリートの充填状況を確認した。充填状況を写真8、9に示す。コンクリート充填用のダイアフラムで、内部孔のテーパ有無に対しては、いずれの場合もコンクリートの充填性は良好でそれらの差は見られない。また、ダイアフラム間が250mmと近接する場合においても良好な充填性が確保されている。

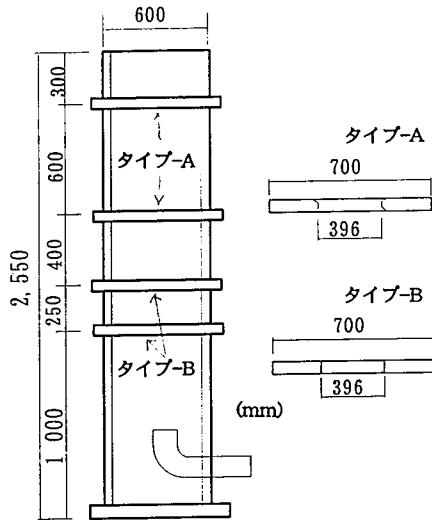


図10 コンクリート充填性試験体

表11 コンクリート調合表

W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	W/C	S (kg/m ³)	G (kg/m ³)	S/a	高性能AE減水剤 C×(%)	増粘剤 (kg/m ³)
185	463	40	798	861	50	1.5	0.3

備考1) 打設時スランプフロー 41×41cm

2) スランプ 23.5cm

3) 空気量 1.6%

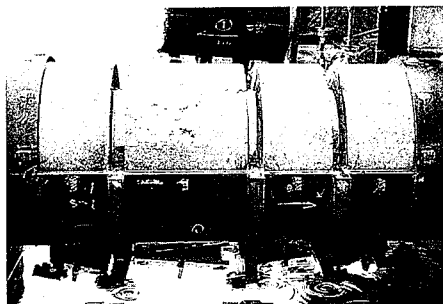


写真8 コンクリート充填状況
(1、2段目がタイプB、3段目がタイプA)

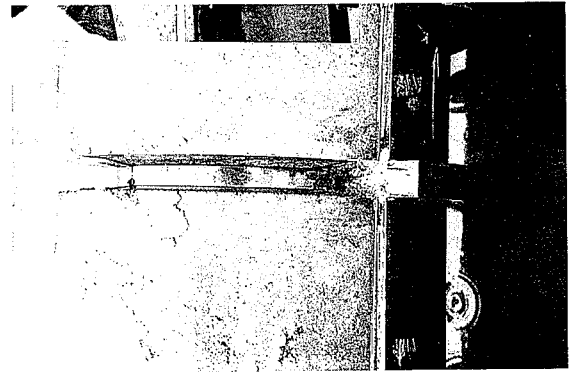


写真9 タイプBダイアフラム近傍の充填状況

3.4 施工例

NSコラムは、既に複数のプロジェクトに採用されており、その中の一例を写真10、11に示す。この例では、1117.6mmφ×22mmの鋼管が使用されており、仕口部分には板加工ダイアフラムを用いている。

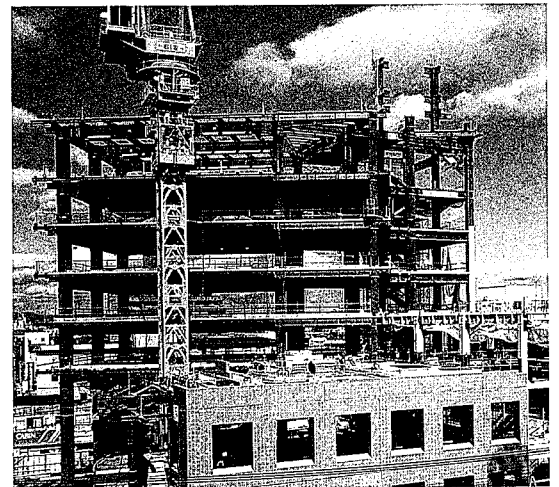


写真10 施工例(さとうベネック本社屋)

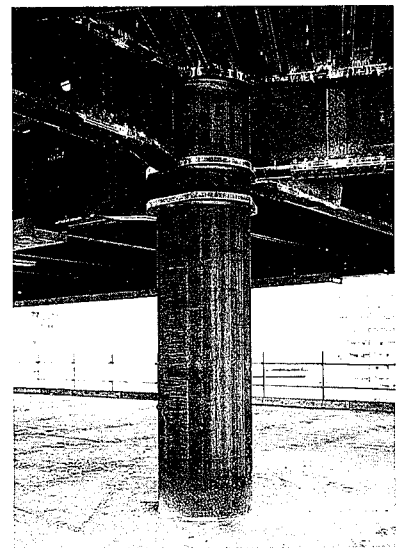


写真11 施工例

4. おわりに

コンクリート充填鋼管は、鋼管とコンクリートを合理的に組み合わせた部材であるとともに、設計面でも平面計画の自由度が大きくなるなどのメリットもある。そのため、近年ではコンクリート充填鋼管構造は着実に増加している。設計者が柱に円形鋼管を採用する場合、梁部材との組み合わせで仕口ダイヤフラムが標準化されているNSコラムは、設計の簡略化を図ることも可能であり、専用設備により鋼管とダイヤフラムを溶接していることから安定した溶接品質も確保できる商品である。“仕口付き円形鋼管部材(NSコラム)”は、本報で述べた各種性能試験データに基づき、鍛造ダイヤフラムの使用並びに溶接部品質に関して日本建築センターの評定を経て建設大臣による一般認定を取得している。

参考文献

- 1)日本建築学会：鋼管コンクリート構造計算規準同解説. 第2版. 1980.2
- 2)日本建築学会：コンクリート充填鋼管構造設計施工指針. 1997
- 3)新都市ハウジング協会：CFT構造技術指針・同解説. 1997
- 4)伏見光雅ほか：鍛造リングを用いた鋼管柱はり接合部の性能に関する研究その1～3. 日本建築学会学術講演梗概集C-1,1995