

(12) 鉄筋コンクリート充填鋼管の曲げ耐力試験

長谷川 明¹・塩井 幸武²・工藤 浩³・鈴木 拓也⁴

¹正会員 八戸工業大学 (〒031-8501 青森県八戸市妙字大開88-1)

E-mail: hasegawa@hi-tech.ac.jp

²正会員 日本鋼構造協会 (〒160-0004 東京都新宿区四谷3-2-1)

E-mail: y.shioi@jssc.or.jp

³正会員 (株)長大 (〒305-0812 茨城県つくば市東平塚730)

E-mail: kudou-h@chodai.co.jp

⁴正会員 (株)コサカ技研 (〒039-1103 青森県八戸市大字長苗代字碓田56-2)

E-mail: suzuki0229@kosakagiken.co.jp

鋼管にコンクリートを充填したコンクリート充填鋼管(CFT)は、鋼管の充填コンクリートへの拘束効果による強度増加や、充填コンクリートによる鋼管の座屈補剛効果などによって、高い耐力と変形性能を有している。このため、耐震性を高めたり断面を縮小することが可能となり、土木や建築構造物への適用が始まっている。このCFTに鉄筋を挿入し鉄筋コンクリート充填鋼管(RCFT)とすると、内部コンクリートの一体性が向上し、とくにせん断破壊に対する抵抗性が向上することから、CFTを超える耐力や変形性能が期待できる。そこで、RCFTに関する曲げ試験を実施した。本論文では、CFTとRCFT、円形および角形の鋼管断面、鋼管板厚、鉄筋配置あるいは充填コンクリート強度による相違などについて述べる。

Key Words : Concrete filled tube, CFT, bending test, Reinforced concrete filled tube, RCFT

1. はじめに

鋼管にコンクリートを充填させたコンクリート充填鋼管構造(CFT)は、鋼管の充填コンクリートへの拘束効果による強度増加や、充填コンクリートによる鋼管の座屈防止効果などによって、高い耐荷力や靱性、変形性能など優れた力学的特性を有する。このため、耐震性能を向上させたり、断面縮小が可能となるなどから土木や建築構造物への適用研究とともに具体的な成果が生まれている^{1)~6)}。

このCFTに鉄筋を挿入させた鉄筋コンクリート充填鋼管(RCFT)とすれば、内部コンクリートの一体性が向上し、特にせん断破壊に対する抵抗性が向上することから、CFT以上の性能が期待される。そこで本研究では、鉄筋コンクリート充填鋼管(RCFT)試験体を作成し、RCFTの曲げ特性を解明するために曲げ試験を行った。特に、鋼管の板厚、コンクリート強度、鉄筋配置および鋼管断面形状(円形、角形)について述べる。

2. 円形鋼管曲げ実験

(1) 試験体

試験体寸法を図-1に示す。外径200mm、部材長2000mmである。鋼管はSTK400を使用し、厚さ3.2mm(N32)、4.5mm(N45)および6.0mm(N60)の普通鋼管(Nシリーズ)と、5.8mm(R60)のリブ付き鋼管(Rシリーズ)を使用した。なお、リブは高さ4mmの台形状をなすもので、円周方向に36mm間隔で取り付けられている。図-2にその形状を示す。充填した鉄筋は、主鉄筋にSR295φ6、帯鉄筋にSR295φ3を使用し、鉄筋配置としては、かぶりの小さいタイプ、かぶりの大きいタイプおよびこれらを二重に配筋したものの3種を使用した。充填コンクリートには、高性能AE減水材と増粘剤を使用し、コンクリートの圧縮強度は、高強度で42.5kN/cm²、低強度で21.6kN/cm²であった。

(2) 試験方法

試験は最大2940kNまで荷重可能な試験装置を使用し実施した。荷重は荷重制御で行い、CFTとRCFTでは荷重速度を2.94kN/sec(0.3tf/sec)、荷重増分を98kN(10tf)とし、ひずみが塑性域に入った後は3回の繰り返し荷重とした。また、中空鋼管では、荷重速度を2.94kN/sec(0.3tf/sec)、荷重増分を49kN(5tf)とした。測定項目は、荷重、試験体中央部鉛直変位のそれぞれ1点、

鋼管表面ひずみ 24 点、および充填コンクリートの中心におけるひずみ 4 点で、計 30 点である。試験の安全性を考慮し最大荷重到達後、試験体の曲げ耐力が最大荷重の 80%を下回るか、変位が 80mm を示したときに試験を終了した。載荷方法および試験状況を図-3と図-4に示す。

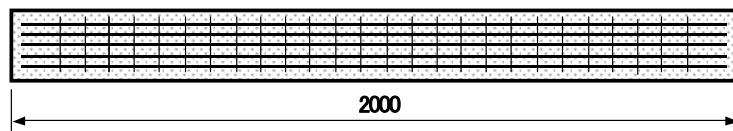
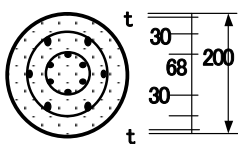


図-1 円形鋼管試験体寸法



図-2 リブ取り付け状況

(3) 試験結果と考察

a) 強度増大率（合成効果）、靱性率

表-1に曲げ試験の試験結果を示す。表には、充填状況、試験体記号(No)、発生した最大曲げモーメント、中空鋼管の最大曲げモーメントに対する比、および靱性率を示す。表中、強度増大率は、RCのみ試験体の最大曲げモーメントが極めて低いことを考えれば、合成によって発生している効果と考えることができる。試験体番号のNはリブ無し鋼管、Rはリブ付き鋼管を示す。また、CHは、中空鋼管、Hは高強度Lは低強度コンクリート充填を、Mは無筋を、Bはかぶり小鉄筋、Sはかぶり大鉄筋、Wは二重配筋を示す。靱性率は、最大耐荷力時の変位を降伏時の変位で除したものとした。この表から次のようなことが言える。

- ① CFT の低強度と高強度では、強度増大率では高強度の方が大きい、靱性率では低強度の方が大きい。
- ② CFT と RCFT を比較すると、鉄筋を挿入することによって最大曲げモーメントが増大していることがわかる。鉄筋配置では、二重配筋 RCFT 試験体が最も優れた曲げモーメントを有した。このことから、鉄筋を挿入することで曲げモーメントが向上することが示された。
- ③ 中空鋼管に対する強度増大率を鋼管の板厚と比較すると、最小厚さ $t=3.2\text{mm}$ 鋼管の強度増大率は 2.2~2.4

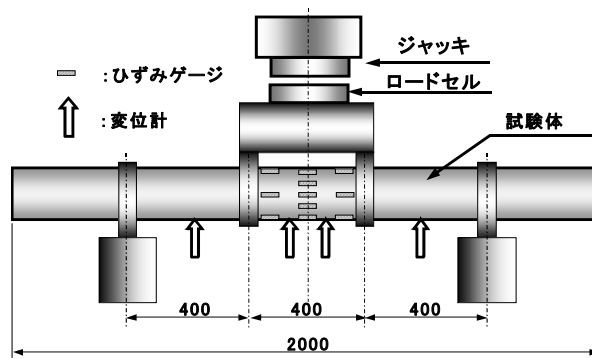


図-3 試験体と計測機器設置状況

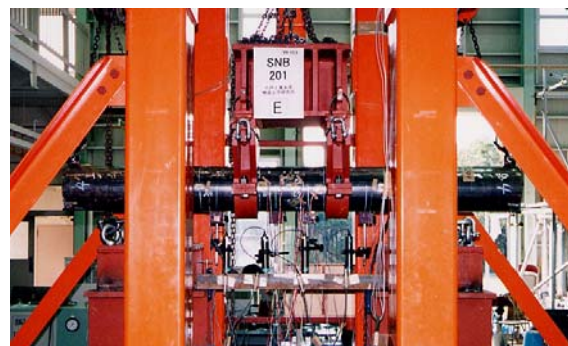


図-4 試験状況

表-1 円形鋼管曲げ試験結果

試験体		最大曲げモーメント (kN・m)	中空鋼管に対する強度増大率	靱性率	試験体		最大曲げモーメント (kN・m)	中空鋼管に対する強度増大率	靱性率
充填状況	No.				充填状況	No.			
中空	N32CH-B	36.9	-	2.5	かぶり小	N32LB-B	82.3	2.23	5.8
	N45CH-B	63.2	-	2.0		N45LB-B	110.9	1.75	4.7
	N60CH-B	92.2	-	4.1		N60LB-B	144.4	1.57	7.6
	R60CH-B	80.1	-	5.5		R60LB-B	129.2	1.61	8.1
高強度	N32HM-B	87.3	2.37	8.4	かぶり大	N32LS-B	80.6	2.18	5.3
	N45HM-B	120.5	1.91	4.3		N45LS-B	116.7	1.85	5.3
	N60HM-B	152.6	1.66	8.6		N60LS-B	143.3	1.55	6.4
	R60HM-B	131.0	1.64	6.8		R60LS-B	127.4	1.59	10.3
低強度	N32LM-B	80.7	2.19	11.7	二重配筋	N32LW-B	89.9	2.44	7.5
	N45LM-B	110.6	1.75	6.4		N45LW-B	118.8	1.88	5.9
	N60LM-B	140.1	1.52	9.2		N60LW-B	148.6	1.61	7.7
	R60LM-B	122.9	1.53	8.2		R60LW-B	131.7	1.64	9.8

と最も向上していることから、鋼管の板厚が薄いもののほどコンクリートを充填することによって座屈補剛効果が大きくなることが示されている。

- ④ リブに関して比較すると、CFT 試験体では N シリーズより R シリーズが劣る。リブ位置でひび割れが進行したためと考えられる。RCFT 試験体では、強度増加や靱性率の向上が見られ、鉄筋を挿入することでひび割れの進行が抑制されたと考えられる。

b) モーメント-曲率曲線

図-5 に板厚 $t=4.5\text{mm}$ 試験体のモーメント-曲率曲線を示す。コンクリートの挿入が大きく耐力を向上させ、変形が大きいにも関わらず強度の低下が見られないことが示されている。

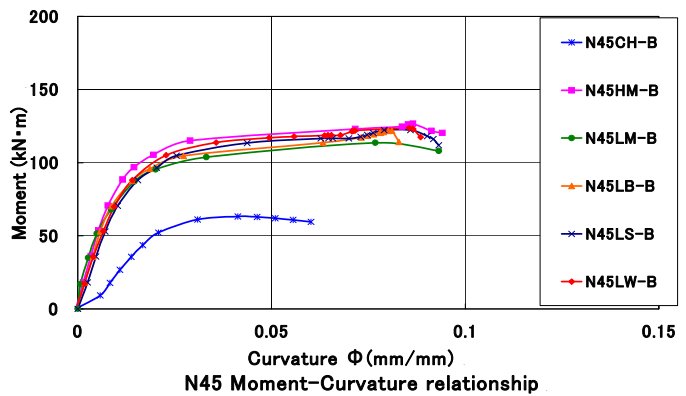


図-5 モーメント・曲率曲線 (N45 シリーズ)

c) ひずみ

図-6 に示す位置においてひずみを測定した。鋼管表面に 8 カ所、充填コンクリート内に 2 枚のモールドゲージを軸方向に取り付けて調査した。図-7、図-8 は普通鋼管使用 RCFT 梁とリブ付き鋼管 RCFT 梁の荷重-ひずみ関係を示している。リブ付き鋼管使用タイプは普通鋼管使用タイプに比べてひずみの伸びが大きい。特に引張側のひずみの伸びが著しく、これが靱性増大の要因の一つと考えられる。図-9 はリブ付きかぶり大 RCFT 梁の断面内におけるひずみ分布を示したものである。これによると約 $20\text{kN}\cdot\text{m}$ 時にすでに中立軸の圧縮側へのシフトが見られている。圧縮側においては鋼管と充填コンクリートのひずみ分布がほぼ一致していたが、引張側では約 $120\text{kN}\cdot\text{m}$ からコンクリートひずみがほとんど増大していない。これは引張側コンクリートにひび割れが発生し、測定点のひずみが増大しなかったためと考えられる。図中、引っ張り側で直線性を乱している位置は、コンクリートモールドゲージのひずみである。コンクリートがひび割れて、一定のひずみで留まっている。

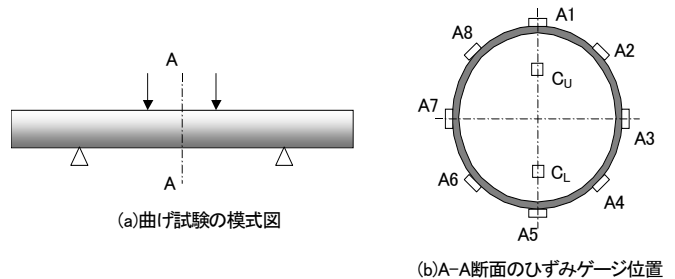


図-6 ひずみゲージ取り付け位置

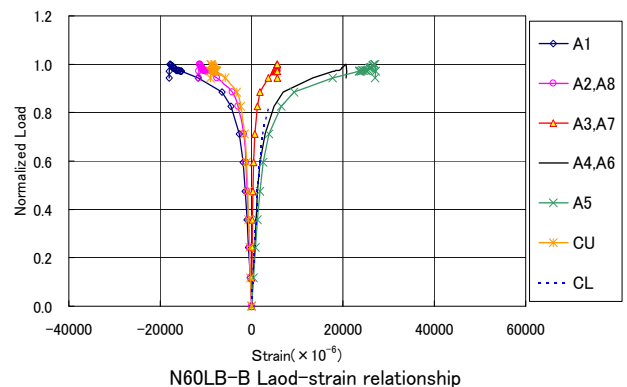


図-7 荷重とひずみ (普通鋼管 RCFT, N60LB-B)

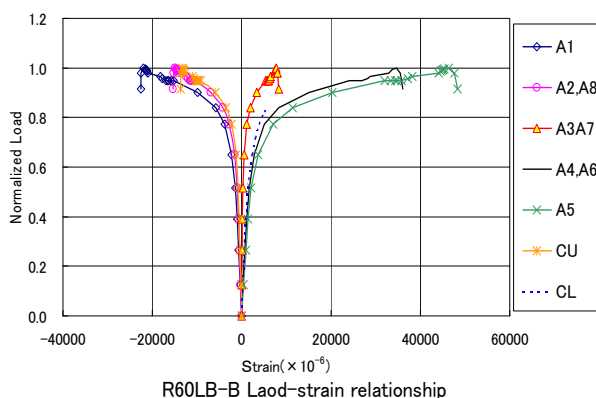


図-8 荷重とひずみ (リブ付き鋼管 RCFT, R60LB-B)

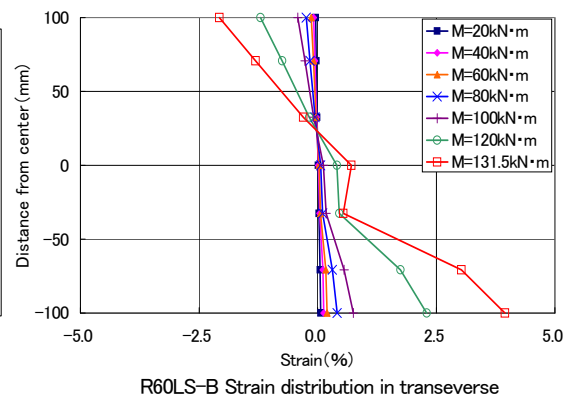


図-9 A 断面ひずみ分布 (R60LS-B)

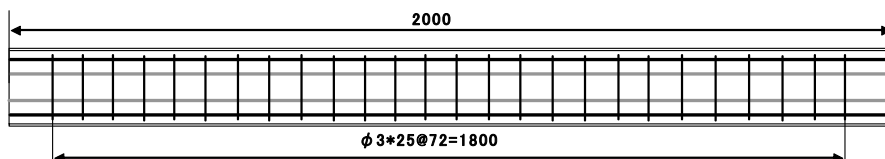
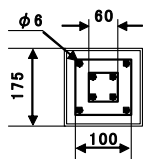
d) 充填コンクリートの破壊状況

載荷試験終了後、鋼管を剥離し内部コンクリートの破壊状況を調査した。図-10 に、リブ付き鋼管厚 5.8mm の CFT、鋼管厚 3.2mm の CFT および RCFT の試験体例を示す。CFT では、大きな破断が見られるが、RCFT では、小さなひび割れを観察できるが、CFT のような破断は見られなかった。内部鉄筋が、大きな変形にも関わらず鉄筋コンクリートとして一体化して抵抗していたと考えられる。

(4) 試験結果と考察

円形鋼管を使用した RCFT 曲げ試験について、その結果をまとめる。

- ① CFT の低強度と高強度では、強度増大率では高強度の方が、靱性率では低強度の方が大きい。
- ② 鉄筋は内部コンクリートの破断を防止させる効果がある。これによって、耐力と靱性を向上させる効果があると考えられる。
- ③ 強度増大率は薄肉鋼管ほど高い。鋼管が薄いほどコンクリートによる座屈補剛効果が大きくなるため合成効果は高くなる。
- ④ リブは鋼管とコンクリートを一体化させ強度・合成効果を向上させるが、曲げを受ける場合、圧縮側では一体化され合成効果が高まる一方で、引張側ではリブがひび割れを促進して強度を低下させる可能性がある。



3. 角形鋼管曲げ実験

円形鋼管試験体と同様な実験を角形鋼管に対して実施した。実験概要、実験結果および考察について述べる。

(1) 試験概要

曲げ試験に用いた試験体寸法を図-11に示す。試験体は175mmの正方形断面で、長さ2000mmである。鋼管厚、および鋼管内の充填状況は中空、コンクリート、鉄筋コンクリート(RC)のかぶり小、かぶり大、二重配筋の5種類で、円形断面と同様である。内部充填コンクリートの強度は高強度コンクリート43.4N/mm²、低強度コンクリート28.0N/mm²である。試験方法は円形鋼管試験と同様である。

(2) 試験結果と考察

a) 強度増大率、靱性率

表-2に各試験体の充填状況、試験体記号、最大曲げモーメント、強度増大率及び靱性率を示す。いずれも、円形断面時の表-1と同様な表現である。この表から次のことが示されている。

- ① 低強度CFTと高強度CFTの比較では、コンクリート強度が大きく異なっているにも関わらず、最大曲げモーメントに大きな変化が見られない。

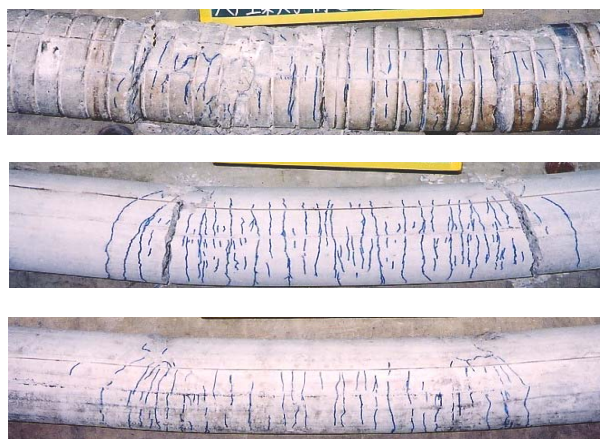


図-10 充填コンクリートの破壊状況（上から、リブ付き鋼管、鋼管厚 3.2mm の CFT と RCFT）

図-11 角形鋼管試験体寸法

表-2 角形鋼管試験体曲げ試験結果

充填状況	断面	試験体記号	最大曲げモーメント (kN・m)	強度増大率 Mup	靱性率 (δ_r / δ_y)
中空鋼管		32CH-SB	21.71	-	1.08
		45CH-SB	42.66	-	1.37
		60CH-SB	56.87	-	2.16
低強度CFT		32LM-SB	64.93	2.99	5.09
		45LM-SB	106.23	2.49	5.42
		60LM-SB	129.56	2.28	5.16
高強度CFT		32HM-SB	61.67	2.84	2.50
		45HM-SB	109.12	2.56	5.64
		60HM-SB	129.00	2.27	5.04
かぶり小RCFT		32HB-SB	75.21	3.46	5.53
		45HB-SB	108.39	2.54	5.90
		60HB-SB	132.26	2.33	5.11
かぶり大RCFT		32HS-SB	68.72	3.17	3.05
		45HS-SB	113.04	2.65	5.64
		60HS-SB	133.64	2.35	5.21
二重配筋RCFT		32HW-SB	75.29	3.47	5.38
		45HW-SB	116.06	2.72	5.86
		60HW-SB	137.14	2.41	5.22

- ② 鋼管厚で強度増大率を比較すると、強度増大率は、3.2mm のタイプが最も大きな値を示している。これは強度増大率の計算式の分母側となる中空鋼管の最大曲げモーメントの実験値が特に小さいためと考えられる。また、鋼管が薄いほど座屈に対する抵抗性が低いため、そこにコンクリート及び鉄筋を充填することで座屈補剛効果が生まれ、強度増大率が増大したためと考えられる。
- ③ 強度増大率を、円形断面と比べると、円形では1.55～2.44 倍であったのに対し、角形では2.27 から3.47 倍となっており、角形鋼管の強度増大率が高い。これは中空断面が局部座屈などによって小さいことから、充填コンクリートの座屈補剛効果が高くなったと考えられる。
- ④ 一方、靱性率は鋼管厚での傾向は明確ではない。

b) 充填コンクリートの破壊状況

図-12 に CFT 梁、RCFT 梁の破壊状況の一例を示す。CFT 試験体の充填コンクリートが載荷点で破断しているのに対し、RCFT 試験体ではひび割れが確認できるが、破断まで至っていない。これにより、曲げ部材では鉄筋を入れることにより、弾性領域での初期の段階でのひび割れ、塑性領域での破断を抑制するため、CFT より高い強度、靱性を期待できる。

4. 結論

本実験は、耐力や靱性に優れている CFT に鉄筋を挿入させた鉄筋コンクリート充填鋼管 (RCFT) について、RCFT の曲げ特性を解明するために、鉄筋コンクリート充填鋼管 (RCFT) 試験体を作成し、鋼管の板厚、コンクリート強度、鉄筋配置および鋼管断面がどのような影響を与えるか実験したものである。本実験によって得られた結論を述べる。

- ① CFT および RCFT の強度は、中空鋼管に比べ大きく向上する。これは、充填コンクリートによって鋼管の座屈が抑制されることによる効果が大きい。
- ② 鉄筋を挿入させることによって、強度増大率を向上させることができる。充填コンクリートの破断が防止される効果が大きい。このため、靱性率を向上させることにも役立つものと推測される。
- ③ 強度増大率は、薄肉鋼管の方が大きい。これは、鋼管の厚い試験体では充填コンクリートの曲げ耐力が、鋼管だけの曲げ耐力との比較で相対的に小さくなること、鋼管とコンクリートの剥離による座屈抑制効果が



図-12 角形鋼管試験体、充填コンクリート破壊状況：上が CFT (45HM-SB), 下が RCFT (60HW-SB)

減少するためと考えられる。また、薄肉鋼管の中空鋼管強度が、局部座屈によって小さく評価されることも影響している。

- ④ 角形鋼管の強度増大率は、円形鋼管のそれに比べ大きい。これは、中空鋼管と使用したときの耐力が、局部座屈などの発生によって小さいことが理由として考えられる。
- ⑤ 鋼管内のリブについては、引っ張り側で初期ひび割れを推進してしまう側面があるが、鉄筋の挿入によって耐力の改善ができる。

以上によって、RCFT は優れた力学特性を有する構造要素であって、今後、耐震性の向上、大規模構造物への適用、あるいは都市内空間の有効活用などに活用される期待があるため、実用的構造物への適用など研究活動継続していくことが重要と考えている。なお、本論文で求めた靱性率については、荷重変位曲線から弾性限度を特定しているため、低く評価されていると考えている。継続して検討する。

謝辞：本論文は、八戸工業大学において実施された実験に基づいて成果をとりまとめたものである。実験に関わった多くの卒業生に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 松井千秋:コンクリート充填鋼管構造の構造性能と設計, 鋼構造論文集, 第1巻第2号, 1994. 6
- 2) 最相元雄、岡部猛、光成和昭:高強度コンクリート充填鋼管短柱の拘束効果と終局耐力 に関する実験的研究, 構造工学論文集, vol. 42B, pp. 351-359, 1996. 3
- 3) 唐嘉琳、日野伸一、黒田一郎、太田俊昭:コンクリート充填円形鋼管柱を対象とした鋼管とコンクリートの応

カーひずみ関係のモデル化, 鋼構造論文集, 第 3 巻第 11 号, 1996. 9

4) 村田清満、安原真人、渡辺忠朋、木下雅敬：コンクリート充填円形鋼管柱の耐力と変形性能の評価, 構造工学論文集, Vol. 44A, 土木学会, pp. 1555-1564, 1998. 3

5) 中井博、北田俊行、吉川紀、村上脩二、桜本洋一：曲げとねじりを受けるコンクリート充填円形断面鋼管

の実験的研究, 土木学会論文集, No. 612/I-46, pp. 85-97, 1999. 1

6) 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

BENDING STRENGTH TEST OF REINFORCED CONCRETE FILLED TUBE

Akira HASEGAWA, Yukitake SHIOI, Hiroshi KUDOH and Takuya SUZUKI

Concrete filled tubes (CFT) have high strength and ductility because concrete has higher strength by constrained effect and buckling of steel tubes is prevented by concrete infilled. By this reasons, CFT is effective for earthquake- resistance and section-reduction of structures, CFT are appricated to structures in architectures and civil engineering. If reinforcements are installed in CFT, unification of the infilled concrete should be imploved, higher performance tha CFT shoud be expected. Thefore, the author excuted bending test of RCFT. In this paper, outline of the tests, difference on the characteristics of CFT and RCFT by tube section, thickness, concrete-strength and arrangement of reinforcements are described.