

(20) コンクリート充填鋼管柱(CFT)の強度および力学的特性に関する検討

A study on the strength and mechanical characteristics of Concrete-Filled steel Tube (CFT)

矢木誠一郎*、江上武史**、磯江暁***、大西悦郎****、吉川孝男*****、大南亮一*****

Seiichiro Yagi, Takeshi Egami, Akira Isoe, Etsuro Ohnishi, Takao Yoshikawa, Ryoichi Ohminami

- *工修 川崎重工業㈱ (〒673-8666 兵庫県明石市川崎町 1-1)
- **工修 川崎重工業㈱ (〒675-0155 兵庫県加古郡播磨町新島 8)
- ***工博 川崎重工業㈱ (〒278-8585 千葉県野田市二ツ塚 118)
- **** 川崎重工業㈱ (〒675-0155 兵庫県加古郡播磨町新島 8)
- ****工博 川崎重工業㈱ (〒673-8666 兵庫県明石市川崎町 1-1)
- *****工博 川崎重工業㈱ (〒673-8666 兵庫県明石市川崎町 1-1)

For the purpose of using concrete-filled steel tube (CFT) as a member of a bridge, experimental studies on the strength and mechanical characteristics of CFT were carried out. To verify the strength and mechanical characteristics of CFT, axial compression tests, autogenous shrinkage and drying shrinkage tests, and creep tests were performed. Conclusions obtained from these tests are shown in the following. The axial compressive strength of CFT was higher than simple accumulation strength of steel and concrete, and that initial cracks in filled-concrete does not cause the deduction of the axial compressive strength of CFT. Autogenous shrinkage of filled-concrete after the concrete stiffened causes strain to steel tube. The strain in steel tube is small in present test. We confirmed that autogenous shrinkage does not give a undesirable effect on the strength of CFT. The drying shrinkage of filled concrete in CFT is much smaller than in common concrete structures. Creep behavior of CFT can be predicted accurately by considering only the basic creep of the concrete.

Key Words: Concrete-Filled steel Tube (CFT), Axial compression strength, Autogenous shrinkage, Drying shrinkage, Creep,

まえがき

コンクリート充填鋼管柱(CFT)は、鋼単独またはコンクリート単独で設計された部材に比べ、以下に示す利点があることが知られた優れた構造部材である。

- ・累加強度以上の強度を有する。
 - ・優れた変形性能を有する。
 - ・剛性が高い。
 - ・鋼の局部座屈が充填コンクリートにより抑制される。
- また、以下に述べる理由により製作や建設コスト面でも有利な構造部材とされている。
- ・鋼の局部座屈がコンクリートにより拘束されるため鋼部材の補剛部材が簡素化される。
 - ・鋼管がコンクリートの型枠代わりとなる。

筆者らは、CFTを橋梁などの構造部材に適用すること

を前提として、CFTの強度および力学に関する種々の研究および調査を実施してきた。本論文ではそれらの中からCFTの軸圧縮試験、および充填コンクリートの自己収縮、乾燥収縮およびクリープが鋼管に及ぼす影響についての実験的研究より得られた知見を示す。

1 鋼コンクリート合成鋼管柱の軸圧縮強度特性¹⁾

(1) 試験の目的

CFTは、コンファインド効果により鋼管および充填コンクリート単体の耐荷力を足し合わせた単純累加強度以上の圧縮強度を有し、それに優れた変形性能を有する部材とされている。本研究ではCFTのコンファインド効果を確認することを目的に、CFTの軸圧縮試験を実施した。

また、地震、架設時などの一時的な荷重により充填コン

表 1 供試体諸元および軸圧縮試験結果

供試体	寸法				鋼材データ		コンクリートデータ		曲げ	鋼の	コンクリート	単純累加	軸圧縮強度	
	外径 (mm)	板厚 (mm)	長さ (mm)	径厚 比	材質	0.2%耐力 (MPa)	圧縮強度 (MPa)	材齢 (日)	モーメント (kN・m)	耐力 P _s (kN)	の耐力 P _c (kN)	強度 P _{s+c} (kN)	(試験結果)	
AXC-a	150	1.6	500	93.8	COR-TEN	408	64.6	56	-	304	1093	1397	1464	1.05
AXC-b	150	1.6	500	93.8	COR-TEN	408	64.4	55	-	304	1090	1394	1450	1.04
AXS-a	150	2.3	500	65.2	SM490A	323	64.2	54	-	344	1066	1410	1567	1.11
AXS-b	150	2.3	500	65.2	SM490A	323	64.2	54	-	344	1066	1410	1556	1.10
CRB-a	150	2.3	500	65.2	SM490A	323	65.4	60	9	344	1086	1430	1599	1.12
CRB-b	150	2.3	500	65.2	SM490A	323	64.8	57	12	344	1076	1420	1555	1.10
CRB-c	150	2.3	500	65.2	SM490A	323	67.2	69	24	344	1116	1460	1625	1.11

表 2 コンクリートの配合

Gmax (mm)	W/C (%)	S/a (%)	空気 量 (%)	単位量(kg/m ³)					高性能AE 減水剤
				W	C	S	G		
20	40	58	3.0	170	425	1,008	758		6.8

クリートに引張力が作用した場合、充填コンクリートにひび割れが発生することが予想される。そこで、充填コンクリートひび割れ後の CFT の軸圧縮性状についても調査するため、充填コンクリートに初期ひび割れを発生させた CFT の軸圧縮試験についても実施した。

(2) 試験概要および試験結果

表 1 に供試体の諸元および試験結果を示す。CFT の径厚比は 93.8(AXC シリーズ)と 65.2(AXS シリーズ)の二種類とし、充填コンクリートの初期ひび割れが CFT の軸圧縮性状に及ぼす影響は径厚比 65.2 の供試体(CRB シリーズ)で調査した。なお、充填コンクリートの初期ひび割れは CFT に 4 点曲げ載荷を行って発生させた。表 1 中に表示鋼材の 0.2%耐力は ASTM²⁾に準拠した圧縮試験結果である。鋼管の耐力の計算では、鋼材 SM490A に明瞭な降伏点が存在しなかったため、統一性を保つため SM490A および COR-TEN 共に 0.2%耐力を降伏応力とした。

コンクリートの配合は表 2 に示すとおりであり、セメントは高ビーライト系の低熱ポルトランドセメントを使用した。CFT の軸圧縮試験時におけるコンクリートの圧縮強度は封緘養生を施した材齢 28、56、および 91 日における圧縮強度試験結果より推定した。材齢 28、56、および 91 日における圧縮強度はそれぞれ、56.1、64.6、68.5MPa であった。

CFT の軸圧縮試験の計測項目は軸圧縮力、軸方向変形、および鋼管表面の軸方向ひずみ、周方向ひずみである。ここで、ひずみの計測位置は CFT 長さ方向 1/2 の位置において円周方向に 90° ピッチで 4 カ所である。初期ひび割れを発生させる 4 点曲げは両振りとし、その荷重(曲げモーメント)は表 1 に示すとおりである。なお、コンクリートの引張強度を無視した計算上の全塑性曲げモーメントは 19.7kN・m である。

表 1 に示すように CFT の耐力(圧縮強度)は単純累

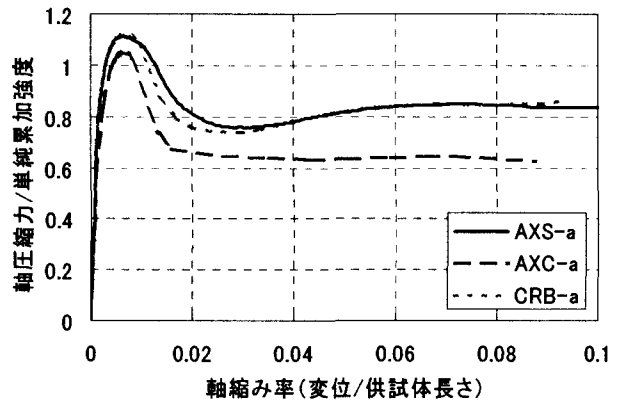


図 1 無次元化した荷重-変位関係

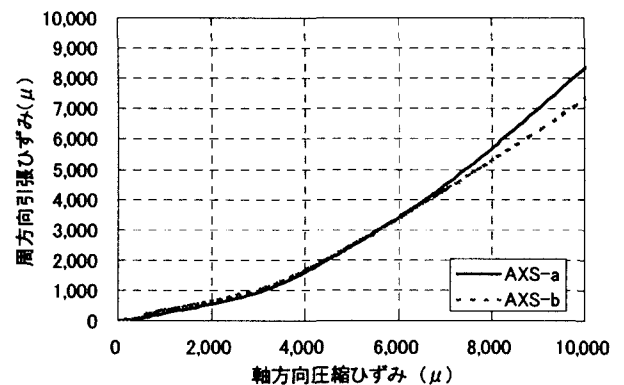


図 2 供試体 AXS シリーズ 軸方向-周方向ひずみ関係

加強度と比較し、AXC シリーズは約 5%、AXS シリーズは約 10%の上昇であった。また、コンクリートの初期ひび割れを発生させた CRB シリーズは健全な CFT と同等の圧縮強度を有していた。

図 1 に各シリーズの代表的な供試体の荷重-変位関係を示す。CFT は最大強度に到達直後、荷重の低下が見られるが、AXC-a では単純累加強度の 6~7 割、AXS-a および CRB-a は 7~8 割の荷重を維持しながら変形が大きく進んでいる。このことより CFT は優れたエネルギー吸収性能を有する耐震性に優れた部材であることがわかる。また、AXS-a および CRB-a の荷重-変位関係に大きな差は見られず、このことから、充填コンクリートの初期ひび割れ

は CFT の軸圧縮性状に悪影響を与えていないことが分かる。

また、CFT は最大荷重付近で鋼管に局部座屈が発生していた。これにより、充填コンクリートへの拘束効果がなくなり、充填コンクリートがせん断破壊し、荷重が低下したと推測できる。

図 2 に供試体 AXS シリーズの軸方向-周方向ひずみ関係を示す。鋼管の軸方向ひずみが 4000μ 程度から鋼管の周方向ひずみが軸方向ひずみに対して急激に増加している。軸方向ひずみ 4000μ は、図 1 に示す単純累加強度（軸圧縮力/単純累加強度=1）付近のひずみ量に対応している。すなわち、単純累加強度付近から充填コンクリートの塑性化が始まりポアソン比が上昇するため、充填コンクリートが周方向に拡がろうとし、鋼管の周方向ひずみが増大したことを示している。これにより、CFT のコンファインド効果による挙動を説明することができる。他の供試体においても同様の結果が得られた。

2 CFTにおけるコンクリートの自己収縮・乾燥収縮³⁾

(1) 試験の目的

充填コンクリートには自己充填型の高流動コンクリートの使用を前提として研究・開発を実施している。しかし、既往の研究⁴⁾によれば高流動コンクリートの自己収縮は、実用上無視できない場合があるとされている。よって、CFT において充填コンクリートの自己収縮が鋼管に及ぼす影響を調査するために試験を実施した。さらに、比較のためにコンクリート柱の自己収縮試験および乾燥収縮試験についても実施した。

(2) 試験概要および試験結果

CFT の自己収縮試験は CFT を密閉した状態で試験を実施した。供試体は軸圧縮試験に使用した表 1 に示す AXS シリーズと同様のものである。計測項目は、CFT の供試体長さ中央の位置において、充填コンクリート内部の軸方向ひずみと温度、および鋼管表面の円周方向に 90° ピッチの 4 箇所において軸および周方向ひずみを計測した。供試体数は 2 体である。

コンクリート柱の自己収縮試験も日本コンクリート工学会 (JCI) 「(仮称) 高流動コンクリートの自己収縮試験方法」に準拠し実施した。供試体数は 2 体である。全試験とも計測期間は 95 日であり、試験は室温 20°C 、湿度 60 % の部屋で実施した。

表 3 に材齢 95 日における試験結果を示す。CFT における充填コンクリートのひずみはコンクリート柱における自己収縮ひずみより大きかったが、これは供試体寸法の違いではないかと考えられる。

図 3、図 4 に CFT の自己収縮試験 (CFT-1,2) によるひずみの経時変化を示す。これより、材齢 0.5 日程度までに充填コンクリートのひずみが大きく変化しているが、この

とき鋼管にはひずみが発生しておらず充填コンクリートの自己収縮による影響はないことがわかる。これはまだ充填コンクリートが硬化していないためである。その後、材齢 1.5 日程度にかけてコンクリートの温度上昇により、充填コンクリートのは自己収縮と熱膨張が重なり合い、ひずみの変化に棚ができていく。このとき鋼管にも熱ひずみが発生している。充填コンクリートの温度上昇が収まった材齢 2 日以降は、充填コンクリートのひずみは緩やかに増加している。このとき鋼管との界面に付着力が作用し、コンクリートの自己収縮により鋼管にもひずみが発生している。鋼管のひずみ変化にはばらつきがあるが、充填コンクリートのひずみ変化と類似しており、充填コンクリートと鋼管とは一体となって収縮していることがわかる。鋼管のひずみは材齢 2 日から 20 日程度の間に増加し、材齢 20 日以降の変化はわずかであり、材齢 95 日において 30μ 程度であった。

また、同時に CFT の乾燥収縮試験についても自己収縮供試体と同様のものを用い、CFT 端部片側を開放することにより実施したが、鋼管に発生したひずみ増分は、自己

表 3 自己収縮試験結果 (材齢 95 日)

供試体	試験	ひずみの計測値(μ)			
		コンクリート	平均値	鋼管 最小値	鋼管 最大値
CFT-1	自己収縮	175	31	22	43
CFT-2	自己収縮	123	24	8	34
コンクリート柱-1	自己収縮	113	-	-	-
コンクリート柱-2	自己収縮	71	-	-	-

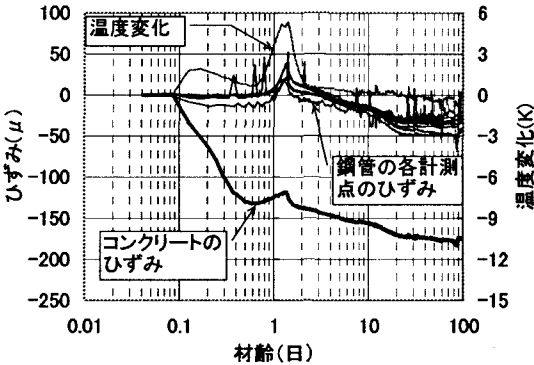


図 3 CFT-1 のひずみと温度の経時変化

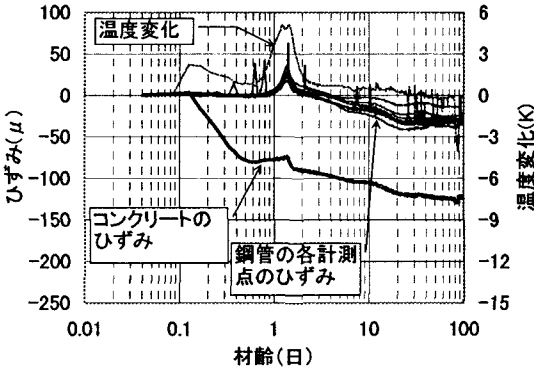


図 4 CFT-2 のひずみと温度の経時変化

収縮試験によるものとほぼ同様の量であった。この結果より、CFT における充填コンクリートの乾燥収縮は一般に言われているとおり、無視してよいことがわかる。CFT において乾燥収縮がほとんど起こらないのは、充填コンクリートが露出している面積が体積と比較し小さかったためである。

3 CFTにおけるコンクリートのクリープの影響

(1)試験目的

現行の指針⁵⁾では CFT における充填コンクリートのクリープ係数は通常のコンクリート部材におけるクリープ係数と同様の値が使用されている。しかし、コンクリートのクリープには基本クリープと乾燥クリープがあり⁶⁾、CFT においてはコンクリートが密閉された状態であるため、乾燥クリープを考慮する必要はないと考えられる。よって、CFT におけるコンクリートのクリープ挙動を予測するときのクリープ係数は、基本クリープのみを考慮したクリープ係数を使用するのが適切であると考えられる。

上記の説明の妥当性を確認するために、各種条件下におけるコンクリートのクリープ試験、および CFT のクリープ試験を実施した。

(2)試験概要および試験結果

表 4 に本試験に使用したコンクリートの配合を示す。セメントは高ビーライト系の低熱ポルトランドセメントを使用した。このコンクリートの圧縮強度は材齢 28 日において 60MPa であった。圧縮試験供試体の養生条件は CFT と同様の養生条件とするために材齢 28 日まで封緘養生とした。各種クリープ試験における載荷応力比（発生応力/圧縮強度）は材齢 28 日における圧縮強度を基準にして示した。

表 5 にコンクリートのクリープ試験体の一覧を示す。供試体の形状は 100×100×400mm の直方体である。供試体への荷重載荷は材齢 28 日である。標準試験は通常のクリープ試験のことであり、全クリープひずみの計測を目的としている。このとき、標準供試体には乾燥収縮ひずみも生じているため、計測されたひずみから乾燥収縮による成分を除去するために乾燥収縮試験も実施している。密閉試験は供試体にシールを施して実施したクリープ試験であり、基本クリープひずみの計測を目的としている。また、参考のために自己収縮試験についても実施している。

コンクリート供試体の載荷荷重は、載荷応力比が 20、25、30、35、40% となる荷重とした。各応力比でクリープ試験を実施した理由は以下のとおりである。CFT のクリープ試験において、充填コンクリートがクリープすると充填コンクリートが受け持っている圧縮力が減少する。CFT のクリープ挙動を予測する際にコンクリートのクリープが非線形性を有している場合には、各応力比に対するクリープ係数が必要となるためである。

表 6 に CFT のクリープ試験供試体の一覧を示す。供試体の寸法は、外径 100mm、長さ 400mm、鋼管板厚 1.6mm である。このとき供試体の径厚比は 62.5 である。載荷荷重は載荷時における充填コンクリートの応力比が 30%、および 40% となる荷重であり、載荷材齢は 28 日である。供試体数は各荷重ケース 3 体とした。CFT への持続荷重載荷は図 5 に示す PC 鋼棒式クリープ試験装置を使用した。CFT 両側の PC 鋼棒を緊張させ、載荷治具を介して載荷した。この方法では載荷荷重が減少するので、測定材齢ごとに PC 鋼棒のひずみを計測して載荷荷重を一定となるように、再載荷を行った。また、鋼管の軸方向ひずみは CFT 長さ方向 1/2 の位置において円周方向に 90° ピッチに 4 箇所計測した。

表 4 コンクリートの配合

Gmax (mm)	W/C (%)	S/a (%)	空気量 (%)	単位量(kg/m ³)				
				W	C	S	G	高性能AE 減水剤
20	32	51.4	4.5	165	516	839	826	7.74

表 5 コンクリートクリープ試験体一覧

供試体名	載荷応力比(%)	試験条件	計測項目
H-20	20	標準	全クリープ
H-25	25		
H-30	30		
H-35	35		
H-40	40		
M-20	20	密閉	基本クリープ
M-25	25		
M-30	30		
M-35	35		
M-40	40		

表 6 CFT クリープ試験体一覧

供試体名	載荷応力比(%)
CFT30-1～3	30
CFT40-1～3	40

注)ここでの載荷応力比は荷重載荷時における充填コンクリートの応力比である。

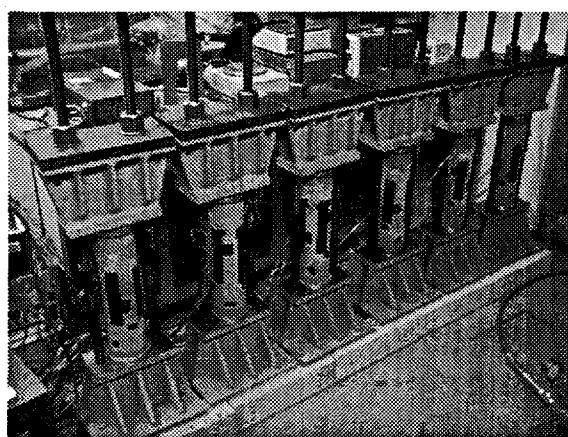


図 5 CFT 試験状況

全試験とも室温 20℃、湿度 60 %の部屋で実施した。

図 6、図 7 にコンクリートのクリープ試験から得られたひずみの経時変化を示す。ここで、図 6 に示す標準供試体のひずみは、乾燥収縮試験から得られた乾燥収縮ひずみを除去したひずみを示している。また、図 7 に示す密閉供試体のひずみは自己収縮を含んだひずみである。自己収縮を含めた理由は、CFT においても自己収縮ひずみは生じているため、CFT のクリープ挙動を予測する目的においては、材齢 28 日以降の自己収縮を基本クリープひずみに含めたほうが、両者を分離して評価するよりも簡単であるためである。また、図 8 に CFT クリープ試験から得られた鋼管のひずみ増分の経時変化を示す。

図 6～図 8 からわかるようコンクリートおよび CFT 鋼管のひずみは材齢 28 日から 42 日にかけて大きく増加し、その後、緩やかに増加している。コンクリートの各クリープ試験結果を比較するために、各供試体における材齢 119 日におけるクリープ係数を図 9 に示す。図 9 からわかるように、クリープ係数に若干のばらつきは見られるが、クリープ係数に明らかな非線形は見られない。よって、本試験におけるコンクリートのクリープは線形であると見なすことができるので、クリープ係数は各荷重レベルにおけるクリープ係数の平均値とする。このようにして得られた材齢 119 日におけるコンクリートの全クリープ係数は 0.86、基本クリープ係数は 0.56 である。また、基本クリープの全クリープに対する割合は 0.65 であった。参考までに、

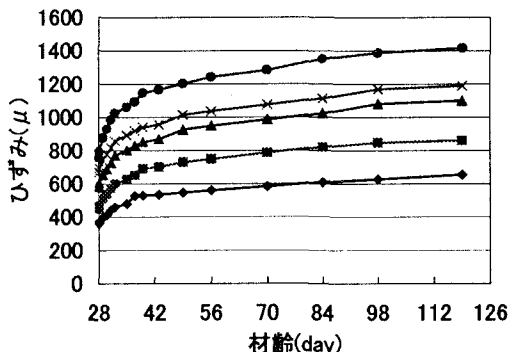


図 6 ひずみの経時変化
(標準供試体-全クリープ計測)

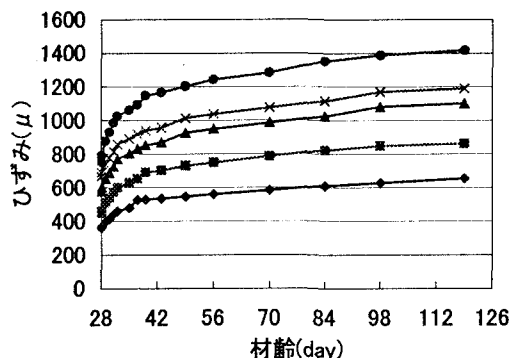


図 7 ひずみの経時変化
(密閉供試体-基本クリープ計測 自己収縮含む)

自己収縮試験より得られた収縮量を除去した場合の基本クリープ係数を計算すると 0.53 であった。

図 7 に示す CFT の鋼管におけるひずみ増分は CFT-30 シリーズにおいては各供試体に良い再現性がみられたが、CFT-40 シリーズにおいては材齢 70 日以降にばらつきがみられる。

表 7 に CFT のクリープ試験より得られた材齢 119 日における鋼管のひずみ増分、および文献(5)で採用されている換算弾性係数比を用いた方法(付録 1 参照)から計算される鋼管のひずみ増分を示す。このときクリープ係数は自己収縮を含む基本クリープ係数を使用した。鋼管のひずみ増分は各計測点における値の平均値である。

クリープ試験および換算弾性係数法から得られた鋼管

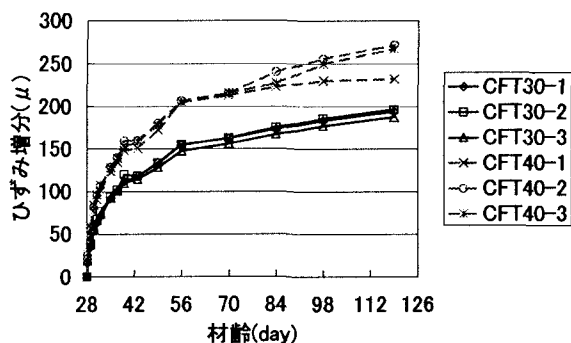


図 8 鋼管のひずみ増分の経時変化

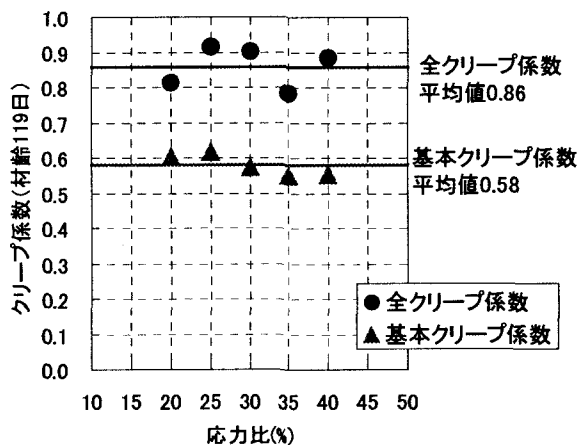


図 9 材齢 119 日におけるクリープ係数

表 7 CFT クリープ試験結果および
計算値(換算弾性係数法)との較

供試体名	鋼管のひずみ増分① (μ)	計算値(換算弾性係数法)② (μ)	誤差 (①-②)/② (%)
CFT30-1	194	189	3
CFT30-2	196		4
CFT30-3	188		-1
CFT40-1	232	252	-11
CFT40-2	272		11
CFT40-3	267		9

のひずみ増分は良い一致を示しており、計算値に対する実験値の誤差は、CFT-30 シリーズにおいて最大で 4%、CFT-40 シリーズにおいては最大で 11%であった。

本試験結果より CFT のクリープ挙動は、コンクリートのクリープとして基本クリープのみを考慮すれば精度の良い予測結果が得られることが明らかとなった。

5.まとめ

CFT の軸圧縮試験、自己収縮・乾燥収縮試験、およびクリープ試験を実施することにより得られた結論を以下に示す。

(1)CFT の軸圧縮性状

- ・CFT はコンファインド効果により単純累加強度以上の強度があることが確認できた。
- ・充填コンクリートの初期ひび割れは CFT の軸圧縮性状に悪影響を及ぼさない。

(2)CFT における充填コンクリートの自己収縮、乾燥収縮

- ・コンクリート硬化後の自己収縮は鋼管にひずみを生じさせるので、自己収縮が大きいコンクリートを使用するときには注意が必要であるが、今回の試験では鋼管のひずみの増加が 30μ 程度と小さく、問題となる値ではなかった。
- ・CFT では充填コンクリートに乾燥収縮がほとんど起こらないことが確認できた。

(3)CFT のクリープ挙動

- ・コンクリートのクリープを基本クリープと乾燥クリープに分離し、基本クリープのみを考慮したクリープ係数を使用すれば、CFT のクリープ予測式により、CFT のクリープ挙動を精度良く計算できる。

あとがき

CFT を用いた構造物を設計・施工するために、CFT に関する基礎的な力学的性質について実験的な研究および調査を行い、その強度特性に充填コンクリートの初期ひび割れが及ぼす影響や充填コンクリートの乾燥収縮、自己収縮およびクリープが鋼管に及ぼす影響を明らかにした。現在、CFT を用いた橋梁⁷⁾ (CFT アーチ、CFT ガータ、吊橋や斜張橋などの CFT 主塔) などの実構造物への適用化を検討している。

終わりに、本研究を行うにあたり、コンクリートの配合設計および試験に関し、川重工事㈱、㈱中研コンサルタントにご助言、ご協力いただきましたことに深く感謝いたします。

付録 1 換算弾性係数比

コンクリートのクリープを考慮した鋼とコンクリートの換算弾性係数比は以下の式で与えられる。

$$n(\phi) = n\{\exp(\alpha\phi) + (\alpha - 1)\} / \alpha$$

$$\text{ここで、} \alpha = \frac{A_s I_s}{A_v I_v} \quad n = \frac{E_s}{E_c}$$

ϕ : クリープ係数

E_s, E_c : それぞれ鋼およびコンクリートのヤング率

A_s, I_s : それぞれ鋼管の断面積および断面二次モーメント

A_v, I_v : それぞれ n を用いて鋼材に換算した CFT の断面積および断面二次モーメント

参考文献

- 1) 矢木誠一郎、大南亮一、江上武史、岸田和人：“鋼・コンクリート合成鋼管柱の軸圧縮強度に及ぼす初期ひび割れの影響について”、土木学会第 53 回年次講演会論文集第 1 部門 A, pp.600~601 (1998)
- 2) 1996 ANNUAL BOOK of ASTM STANDARDS VOLUME 03.01
- 3) 岸田和人、矢木誠一郎、吉川孝男、山田正年：“鋼・コンクリート合成鋼管柱の自己収縮・乾燥収縮について”、土木学会第 53 回年次講演会論文集第 1 部門 A, pp.606~607 (1998)
- 4) (社) 日本コンクリート工学協会：“自己収縮研究委員会報告書”, pp.8~12, (1996)
- 5) 土木学会鋼構造委員会、鋼構造終局強度研究小委員会、合成構造物の終局強度分科会 (主査, 中井博)：“鋼構造物設計指針 PART B 合成構造物”, pp.122~123, (1997)
- 6) 例えば、坂田憲次：“コンクリートの乾燥収縮およびクリープの予測” コンクリート工学 Vol.31, No.2, 1993.2
- 7) 山本龍哉、江上武史、橋本靖智、大西悦郎、矢木誠一郎、大南亮一 “コンクリート充填鋼管 (CFT) を用いた桁橋 (CFT ガーダー) に関する提案と基礎的検討”、第 4 回複合構造の活用に関するシンポジウム論文集、投稿中(1999)