CFT 柱における充填コンクリートの収縮挙動に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ABOUT THE SHRINKAGE BEHAVIOR OF THE FILLING CONCRETE OF CFT-COLUMNS

西澤崇雄 ——— * 1 大野富男 ——— * 2
飛田 潤 ——— * 3 福和伸夫 ——— * 4

Takao NISHIZAWA ——— * 1 Tomio OHNO ——— * 2
Jun TOBITA ——— * 3 Nobuo FUKUWA ——— * 4

キーワード：
CFT 柱, 光ファイバセンサ, コンクリート収縮, 載荷試験,
構造ヘルスマニタリング

Keywords:
CFT Columns, Optical fiber sensor, Shrinkage of concrete, Loading
test, Structural health monitoring

We measure an axial strain of CFT columns of real buildings by optical fiber sensor, and compare an analysis result with a measurement result and analyze it. It was comparatively good about the dynamic axial strain of small amplitude, but it was difficult as a result of past examination. Evaluation of the influence such as the shrinkage behavior of the filling concrete of CFT columns was always hindrances of the conversion to column axial force from column axial strain by the dead load. We performed an experiment to grasp shrinkage behavior of the filling concrete of CFT columns from such a background. Furthermore, We performed loading test and considered influence of the shrinkage of the filling concrete.

1. はじめに

実際の高層建物の構造性能を把握・検証することを目的として、筆者らは、静的及び動的変形を計測可能な光ファイバセンサを用いて、柱の軸変形の計測を実施し、建設時から竣工後までの継続的な変化を、計測結果と 3 次元構造解析モデルに基づいて分析することを行ってきた。近年の超高層建物の構造形式は、柱をコンクリート充填鋼管柱（以下 CFT 柱と略す）とした鉄骨造が採用されることも多く、筆者らが計測対象とした超高層建物も、柱を CFT とした鉄骨造建物として設計している。

これまでの計測結果と 3 次元構造解析モデルによる解析結果の比較では、小振幅時の動的変動軸力については比較的良く一致するものの¹⁾、自重など常時荷重による静的な柱軸力については、CFT 柱の充填コンクリートの収縮挙動などの影響の評価が難しく、柱軸力から柱軸力への換算の支障となり適切な比較が困難であった²⁾。CFT 柱の充填コンクリートの収縮状況を報告する既往の研究はほとんどなく、文献³⁾でも今後実験試料の蓄積が望まれるとしている。さらに近年の超高層建物に採用される CFT 柱の充填コンクリートの強度は、指針類^{3), 4)}の適用範囲となる 60N/mm²を超える高強度のものが採用される場合も多く、計測対象とした建物でも設計基準強度が 80N/mm²である。これは主に、より大きな軸力を充填コンクリートに負担させることで柱断面を小さくする、あるいは鋼管厚を薄くすることを設計上意図したものである。高強度コンクリートの収縮では、乾燥収縮だけでなく自己収縮が無視できない場合があることが知られており⁵⁾、高強度コンクリートを用いた充填コンクリートの評価のために、収縮挙

動の把握が求められる。

このような背景から本報告では、CFT 柱の充填コンクリートの収縮挙動を把握する実験を計画し、実験結果の分析から実建物における収縮挙動を評価し、充填コンクリートの収縮が鋼管に与える影響を検討した。さらに同試験体を用いた載荷試験を行い、CFT 柱の鋼管とコンクリートの一体挙動に関する分析を行った。また、充填コンクリート打設時にテストピースを採取し若材齢から 1 年までの強度試験、ヤング係数を算出した。以上の結果は、文献²⁾で適切に評価できなかった柱軸力への換算の基礎資料としての意味を持っている。

2. 実験及び実験装置の概要

2.1 実験装置の概要

実験装置を図 1、図 2 に示す。実験は、直径 500mm、厚さ 28mm、長さ 2m の鋼管にコンクリートを充填後放置して、充填コンクリートの収縮歪み及び、充填コンクリートと鋼管との付着により発生する鋼管の歪みを計測することで行う。試験体の柱寸法は、計測した実建物の柱（内周柱、直径 800mm・厚さ 25mm、外周柱、直径 500mm・厚さ 28mm）に対して、外周柱と同じ断面寸法、直径 500mm・厚さ 28mm、全長は充填コンクリートと鋼管の付着を介して伝達される応力状況を把握するためある程度細長いことが望ましく、一般的な階高の 1/2 程度、鋼管径の約 4 倍にあたる 2m の試験体とした。

鋼管と充填コンクリートの機械的性質、コンクリートの調合を表 1、表 2 に示す。実建物では柱の上下端に蒸気孔、直径 20mm が上下各 2 個設けられておりここから充填コンクリートの水分の蒸散が可能で

¹⁾ ㈱日建設計構造設計部門 主管・博士（工学）
（〒460-0008 名古屋市中区栄 4-15-32）

²⁾ ㈱日建設計構造設計部門 技師長・工修

³⁾ 名古屋大学災害対策室 教授・工博

⁴⁾ 名古屋大学大学院環境学研究科 教授・工博

¹⁾ Structural Engineering Dept., NIKKEN SEKKEI, Dr. Eng.

²⁾ Structural Engineering Dept., NIKKEN SEKKEI, M. Eng.

³⁾ Prof., Disaster Management Office, Nagoya Univ., Dr. Eng.

⁴⁾ Prof., Graduate School of Environmental Studies, Nagoya Univ., Dr. Eng.

また、試験体とは別に、充填したコンクリートの材齢毎の強度とヤング係数を特定するためのテストピースを作成した。テストピースは1, 3, 7, 28, 56, 91, 182, 365 日の各材齢に対してそれぞれ3個ずつ作成した。また乾燥収縮の程度を把握するための試験体として100mm×100mm×400mm のテストピース中央に材軸方向に埋込歪計を

鉄骨	鋼管	P500×28
	鉄骨断面積(mm ²)	41519
	鉄骨	
	ヤング係数E(N/mm ²)	205000
コンクリート	コンクリート断面積(mm ²)	154830
	設計強度(N/mm ²)	80
	呼び強度(N/mm ²)	87
	セメントの種類	中層熱ポルトランドセメント
	スラブフロー(cm)	65
	混和剤	高性能AF減水剤

配合表		(kg/m ³)				
	水セメント比 (%)	水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
	25	170	680	714	846	6.12

大局的に見た場合鋼管は、材齢 14 日頃まで収縮挙動を示すが、14

日頃にスリップするように収縮が緩和された後、徐々に収縮挙動が緩和され鋼管中央付近のひずみは $5\mu\sim 10\mu$ 程度の収縮量に漸近する傾向を示している。これらの傾向は2本の測線とともに同様であるが、若干 S19～S36 の測線の方が計測値のばらつきが大きい。詳細にみると、再下端の歪みゲージのみ極若齢期に伸張挙動を示す。鋼管の曲げ変形によるものでないことは、2つの測線が部材心に対して対称に配置されているため明らかで、後述する載荷試験においても載荷初期段階において最下端の歪みゲージのみは伸張挙動を示すことから、鋼管下端が溶接で鉄板に拘束されていることにより、鋼管下端部が局部的にちょうちん状にふくらむ挙動をしたのではないかと推測する。

図6は鋼管外側の高さの中央付近に対称に設置した2つの光ファイバセンサ及び同じ位置付近の歪みゲージの歪み変化を示している。いずれも温度補正済みの歪みである。大局的にみれば、初期の収縮挙動、14～15日のスリップ、その後の収縮挙動など概ねの傾向は一致している。明らかに異なるのは1～2日の若材齢期の光ファイバセンサの伸張挙動である。これは温度変化が大きく光ファイバセンサの固定状況を考慮した見かけの線膨張係数を修正する必要があるためであると考えられる。図8は鋼管温度が外気温と概ね等しくなったときの、そして図9は0.4～2日付近の温度-光ファイバ計測変位の関係を示す。センサ長が300mmであることから十分時間が経過すれば、光ファイバセンサの見かけの線膨張係数は、既に論文²⁾で公表しているとおり、 10×10^{-6} として良いが、若材齢の温度変化が大きい期間は 7×10^{-6} となっている。弱材齢期の温度変化が最大 10°C 程度であるため、この間の光ファイバは 30μ 程度大きめに歪みを評価しており、これを考慮すると若齢期の光ファイバの挙動が理解できる。歪みゲージの結果から鋼管に歪みが生じるのは0.4日以後であり、この時期ようやくコンクリートが固化したものと判断できる。なお、光ファイバセンサ、埋込歪み計ともに端部の金物が固定されてはじめて歪みの計測が可能で、コンクリートの歪み計測ではコンクリートが固化する以前については、いずれのセンサとも適切に歪みを計測することが困難であることが示されており^{6),7)}、本実験結果においてもコンクリートが固化する0.4日以前の若材齢の挙動は適切に計測出来ていない。

図8 材齢100～145日における光ファイバセンサの見かけの線膨張係数

図9 材齢0.4～2日における光ファイバセンサの見かけの線膨張係数

図3 鋼管に設置した歪みゲージの計測歪(測線S1～S18)

図4 鋼管に設置した歪みゲージの計測歪(測線S19～S36)

図5 熱電対の計測結果

図6 鋼管に設置した光ファイバセンサ及び歪みゲージの計測結果

図7 鋼管に設置した光ファイバセンサ及び歪みゲージ(若材齢拡大)

3.2 充填コンクリートの計測結果

図 10 に充填コンクリート試験時の充填コンクリートに設置した光ファイバセンサ (SF-C-1, SF-C-2) 及び埋込歪計 (KM-2~KM-5) による部材軸方向の収縮変位の材齢変化を示す。KMTP1、KMTP2 は乾燥収縮の程度を把握するための試験体として 100mm×100mm×400mm のテストピースの中央に埋め込んだ埋込歪計で、KMTP1 が打設後 1 日で脱型し、乾燥及び自己収縮させたピースであり、KMTP2 が打設後すぐに封かんして乾燥しないようにし、自己収縮のみをさせたピースである。CFT 試験体の上面は透明なアクリルプレートであり、目視により内部の状況が確認できる。実験終了時点までアクリルプレート内側には水滴が付着した湿潤状態を保持しており、乾燥収縮はなく、充填コンクリートは自己収縮のみをしているものと考えられる。図より埋込歪計と光ファイバセンサ、テストピースはいずれも材齢の経過とともに収縮挙動を示し、一定時間経過すれば収縮挙動が収束する傾向を示す。しかし、収縮量はそれぞれ異なる。

図 11 に 0~2 日の部分を拡大して示す。コンクリートが固化するのは前節の結果より 0.4 日程度であり、この期間の計測歪みはいずれも無視すべきドリフト量である。埋込歪計では 1 日程度経過以後でみれば KM2~5 の変化はほぼ同様な挙動を示しており、若材齢のドリフトが結果に影響していると考えられる。埋込歪計と光ファイバの挙動は 20 日程度まで大きく収縮しており、1 日程度のドリフトを考慮しても挙動は重ならない。この原因は不明だが、光ファイバがロングゲージのため、より広い範囲でコンクリートの収縮挙動を把握していると推測できる。

以上の通り CFT 柱内の充填コンクリートの収縮挙動は埋込歪計と光ファイバセンサの挙動に若干の違いが見られるなど評価が難しいが、材齢が 30 日程度を過ぎれば、それ以後の収縮は 20~30 μ 程度の小さな歪に収まっているのは充填コンクリート内に配したセンサの共通した特徴である。実際の施工においては、CFT 柱に荷重が開始されるのは、1 月以上後になる。建物の 3 層程度を 1 節として、最上部 3 層が建方作業のとき、直下の 3 層がデッキプレートと敷並べるような作業をしている。1 節の作業は概ね 1 月程度の工程が見込まれ、このため、ある柱が建方されてから鉄骨床梁とデッキプレート程度の小さな荷重を負担するのが 1 ヶ月程度後になるのである。結果 CFT コンクリートの充填コンクリートは若齢期の大きな収縮はほとんど荷重を受けない時期に終了しており荷重が開始されて以後のコンクリートの自己収縮量は 20~30 μ 程度の小さい収縮のみと判断してよい。

テストピースとの収縮挙動を比較すると、テストピースが単調に収縮するのに対して、KM2~5、光ファイバはいずれも 1~2 日の間に収縮が緩和される挙動をしており、CFT 柱では鋼管の拘束が充填コンクリートの収縮に影響しているものと考えられる。図 12 に示すようにコンクリートのテストピースではコンクリートのボリュームが小さく、若材齢で充填コンクリートほど大きな温度変化を受けないこともその後の歪み変化に多少の影響している可能性もある。

図 13、図 14 は水平方向に配置した埋込歪計 (KM1, KM6) の収縮歪の材齢変化をテストピースの結果とあわせて示している。水平方向の埋込歪計の計測値は鉛直方向のものより大きな歪みとなるが、テストピースの歪みよりも小さい。また鉛直方向と同じく 1~2 日の間に収縮が緩和される挙動を示している。

図 10 充填コンクリートに設置した光ファイバセンサ及び埋込歪計の計測結果

図 11 充填コンクリートに設置した光ファイバセンサ及び埋込歪計の計測結果 (若材齢の拡大)

図 12 埋込歪計の温度計測結果 (若材齢の拡大)

図 13 水平方向及びテストピースの埋込歪計の計測結果

図 14 水平方向及びテストピースの埋込歪計の計測結果 (若材齢の拡大)

4. 載荷試験結果

4.1 載荷試験の計測結果と考察

載荷試験は充填コンクリートの収縮試験終了後の試験体を用いて行う。載荷試験当日にアクリルプレートを取り除いたのち試験体の上下に厚 25mm 程度の鋼板を 2 枚はさみ、下部には H 型鋼はばすき間なく敷き並べた上に厚 25mm 程度の鋼板をはさみ、CFT 部材心に設置したジャッキで上方から載荷を行った。載荷は 1 ステップを 50kN とし 32 ステップ、最大 1600 kN までの静的載荷を約 1 時間かけて実施した。後述するように鋼管の最大歪みが 170 μ 程度の載荷試験であり、鉄骨の長期許容応力度に対する歪みが 1000 μ 程度であることを考慮すると、実験における鋼管の最大歪みは、鉄骨の長期許容応力度に対する歪みの 17% 程度の載荷である。図 15 に載荷試験状況写真に解説を付記して示す。

図 16 図 17 に鋼管の載荷力-歪み関係図を示す。鋼管中間部以下（最下端を除く）に設置した歪みゲージ（S5～S17, S23～S35）と光ファイバの計測値は良い一致を示している。鋼管最下端付近に設置した歪みゲージ S18, S36 のみは他のセンサと大きく異なる挙動を示し、載荷初期段階において伸張側に挙動する。これは 3.1 節で考察したように鋼管下端が溶接で拘束されていることによるものではないかと考えられる。一方中間より上部（S1～S4, S19～S22）ではやや歪みが小さめである傾向がある。中央部の鋼管歪みが 170 μ であるのに対してこの間は 120 μ 程度の歪みとなっており、この間は付着を介して充填コンクリートに力が流れ、下部で鋼管に戻っているものと考えられる。

図 18 に充填コンクリートの載荷力-歪み関係図を示す。鉛直方向の埋込歪計（KM2～KM5）と光ファイバセンサは同様に荷重の増加に伴い収縮する傾向を示し、最大載荷時の歪みは 8～24 μ 程度となり鋼管歪みよりも小さい。水平方向の埋込歪計（KM1, KM6）はいずれもわずかながら伸張傾向を示しており、充填コンクリートのポアソン比によって横方向に伸張しているものと考えられる。

図 15 載荷試験装置の状況写真

図 16 載荷試験での鋼管歪みの計測結果

図 17 載荷試験での鋼管歪みの計測結果

図 18 載荷試験での充填コンクリートの歪み計測結果

図 19 載荷試験での光ファイバセンサの計測結果

図 20 載荷試験での光ファイバセンサの計測結果
(加力開始時の拡大)

図 19 に鋼管及び充填コンクリートに設置した光ファイバセンサの結果を併せて示す。図 20 は 500 kN までの拡大図である。図 18 より充填コンクリートに設置した光ファイバセンサの計測値はばらつきが大きい。埋込歪計の値も含めて考察すると、最初のステップ 50kN 歪みで 10 μ 弱程度の範囲は鋼管とコンクリートが一体的に挙動している可能性があるが、その後は付着があまり働かず、ほぼ別々の収縮挙動をしていると考えられる。したがって、CFT 柱では、ダイアフラムなどの突起物など鋼管と充填コンクリートの軸方向挙動を一体化させるのに有効なものが無い場合には、鉄骨の長期許容応力度に対する歪みの 1%に相当する 10 μ 程度の小さな歪みレベルでは軸方向の挙動が一体的である可能性があるが、鉄骨の歪み 30 μ 程度では明らかに挙動が異なることが分かった。

4.2 強度試験、ヤング係数試験結果

充填コンクリートの収縮試験では、強度試験のためのテストピースを採取して、実際に CFT 柱に打設される充填コンクリートの若材齢期における圧縮強度とヤング係数を測定した。結果を表 3 に示す。

表 3 充填コンクリートの各材齢での強度、ヤング係数

材 齢	試験日	No.	圧縮強度 (N/mm ²)		ヤング係数 (10 ⁴ N/mm ²)	
			試験値	平均	試験値	平均
1 日	10月7日	1	28.7	29.2	24.6	24.8
		2	29.5		24.1	
		3	29.3		25.7	
3 日	10月9日	1	60.4	59.6	37.3	35.6
		2	58.6		35.1	
		3	59.8		34.3	
7 日	10月13日	1	81.8	80.9	36.5	38.0
		2	81.0		38.6	
		3	80.0		38.8	
28 日	11月3日	1	98.7	99.1	42.6	42.1
		2	99.1		41.8	
		3	99.4		41.8	
56 日	12月1日	1	109.1	108.2	43.7	43.5
		2	109.6		43.0	
		3	109.9		43.7	
91 日	1月5日	1	115.9	116.2	44.3	44.1
		2	116.7		44.8	
		3	116.1		43.1	
182 日	4月6日	1	114.2	114.3	43.2	44.1
		2	114.9		44.7	
		3	113.8		44.5	
365 日	10月6日	1	115.0	120.6	47.2	45.9
		2	125.4		46.1	
		3	121.3		44.5	

5. まとめ

筆者らが実施している光ファイバセンサを用いた構造モニタリング(例えば 1),2)では CFT 柱の鋼管及び充填コンクリートの軸方向歪みの計測・分析を行っており、その結果の解釈において CFT 柱の充填コンクリートの収縮挙動の解明が不可欠である。このため、充填コンクリートの収縮挙動を明らかにすることを目的として実物大の CFT 柱試験体を作成し、CFT 柱の充填コンクリートおよび鋼管の収縮・伸張挙動の計測を行った。また材齢が 140 日以上経過し、充填コンクリートの収縮挙動に変化が見られなくなった後、同試験体を用いた載荷試験を行い、鋼管及び充填コンクリートの一体的挙動について実験による確認を行った。実験の結果及び考察を以下にまとめる。

- (1) コンクリートを充填して放置した CFT 柱の充填コンクリートの収縮歪は、170 μ 程度である。但し CFT 柱の建物自重による軸歪を評価する場合、自重が載荷される以前の収縮量は評価の対象とならない。実際の施工では CFT 柱に建物重量が載荷される時期が鋼管にコンクリート充填が施工された 1 月程度後であり、重量による軸歪の評価に関係する 1 月以後の充填コンクリートの収縮歪は 20~30 μ 程度である。従って、重量による軸歪を評価する場合、計測される充填コンクリートの収縮歪からコンクリートの収

縮歪 20~30 μ を差し引いて評価すれば良い。

- (2) 充填コンクリートの打設後、0.4 日程度でコンクリートが固化し、その後コンクリートの収縮に伴い、付着を介して鋼管に収縮歪が発生する。コンクリートの収縮は半径方向にも進行し、14~15 日でスリップして鋼管の収縮が緩和される。その後さらにコンクリートの収縮が進行し、鋼管の収縮は次第に緩和され、材齢 140 日程度では、鋼管中央付近のひずみは 5 μ ~10 μ 程度の収縮量に漸近する傾向を示す。このことから充填コンクリートと鋼管は載荷がなく放置された状態では肌別れする傾向があることがわかる。
- (3) 収縮挙動把握後の材齢が経過した試験体を用いて CFT 柱の鋼管への載荷を行い、鋼管と充填コンクリートの挙動の確認を行った結果、鉄骨の長期許容応力度に対する歪みの 1%に相当する 10 μ 程度の小さな歪みレベルまで一体的に挙動している可能性があるが、鉄骨の歪 30 μ 程度では、充填コンクリートの歪は鋼管の歪よりも小さく、一体的には挙動しないことがわかった。

以上、実大の CFT 柱試験体を用いた充填コンクリートの収縮挙動に関する試験の結果をまとめた。本試験体は鋼管内側に突起物などのない単純な形状の CFT 柱での試験である。実際の CFT 柱の多くは、柱梁接合部においてダイアフラムが貫通し支圧板として機能するなど、より複雑な挙動をしているものと考えられ、これらを複合した挙動の分析は今後の課題である。

謝辞

本論文での考察に関して名古屋大学大学院 勅使川原正臣教授に、また試験の計画や試験体の制作に関して丸山一平准教授に多くの助言をいただきました。また (株) IHI 検査計測の三上隆男博士、河野豊氏には実験の実施に関して多大な協力をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 西澤崇雄, 大野富男, 飛田潤, 福和伸夫: 設計から竣工後までの長期的な品質確保のための光ファイバセンサによる高層建物の構造性能把握に関する研究, 日本建築学会構造系論文集 No.658, pp.2247~2255, 2010.12
- 2) 西澤崇雄, 大野富男, 飛田潤, 福和伸夫: 光ファイバセンサによる高層建築物建設時の柱軸力変化の計測, 日本建築学会技術報告集, 第 15 巻第 3 1 号, pp751~756, 2009.10
- 3) 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
- 4) 社団法人新都市ハウジング協会: CFT 構造技術指針・同解説 構造設計耐火設計 施工, 1999
- 5) 土木学会: 2007 年制定コンクリート標準示方書 (設計編: 本編), 2007
- 6) B.Glisic and N.Simon: Monitoring of concrete at very early age using stiff SOFO sensor, Cement & Concrete Composites 22, pp.115-119, 2000.
- 7) M.Viviani B.Glisic and I.F.C.Smith: Separation of thermal and autogenous deformation at varying temperatures using optical fiber sensor, Cement & Concrete Composites 29, pp.435-447, 2007.

[2011 年 6 月 3 日原稿受理 2011 年 8 月 9 日採用決定]