

論文 2階建て RC 造建築物におけるコンクリートのひずみ挙動

鳴澤 岳*1・今本 啓一*2・本間 敏明*3・清原 千鶴*4

要旨： 本研究では、実構造物のコンクリートの収縮ひび割れ発生の予測を行うことを目的として、埋込型ひずみ計を用いて、施工時における実構造物の梁や壁部材のコンクリートのひずみ挙動および温度を測定した。その結果、実構造物のひずみと拘束によって発生する応力は上下層の影響を受けながら推移し、部材に発生する拘束応力は高い所で 0.8N/mm^2 に達する程度の値であった。これに対し、室内試験によって求められたコンクリートが破断する際の応力は 1.4N/mm^2 であったことから、実構造物にはひび割れが発生していないことを定量的に推測した。

キーワード： 乾燥収縮, ひび割れ, 実構造物, 拘束応力

1. はじめに

コンクリートに生じるひび割れは耐久力を損なうだけでなく、美観を損なう要因の一つとなっている。そのために、近年コンクリートの収縮ひび割れ制御への関心が高くなっている。しかしながら、現状 RC 造建築構造物のひずみ挙動や拘束度について不明な点が多い。コンクリートの収縮ひび割れは実構造物における部材間の収縮ひずみの差異による「拘束」によって引き起こされるので、実構造物の拘束度を適切に把握することは収縮ひび割れを制御するにあたって重要なもののひとつである。ここでは普通コンクリートを用いた実構造物における壁や梁部材のひずみ挙動について実測を行い、拘束度や拘束応力を算定し、ひび割れ発生の予測を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

計測を行った実構造物の地下の使用材料および調査計画を表-1 および表-2 に、また 1, 2F のものを表-3 および表-4 に示す。フレッシュ性状も併せて示す。

表-1 使用材料(地下)

水	W	上水道水・地下水
セメント	C	普通ポルトランドセメント (密度 3.21g/cm^3)
細骨材	S①	①石灰 砕砂(栃木県佐野市宮下町産 表乾密度 2.71g/cm^3 粗粒率 2.70%)
	S②	②石灰 砕砂(福岡県北九州市小倉南区産 表乾密度 2.69g/cm^3 粗粒率 2.50%)
粗骨材	G	石灰砕石(山口県美祢市秋芳町産 表乾密度 2.69g/cm^3 実績率 60.0%)
混和剤		AE減水剤(遅延型 I 種)

表-2 調査計画及びフレッシュ性状(地下)

W/C (%)	s/a (%)	単体量(kg/m ³)						混和剤 (kg/m ³)	スランブ (cm)	空気量 (%)
		C	W	S①	S②	G①	G②			
54.5	50.1	323	176	275	643	912	2.91	15.0	4.5	

表-3 使用材料(1, 2F)

水	W	工業用水
セメント	C	普通ポルトランドセメント (密度 3.15g/cm^3)
細骨材	S①	①陸砂(茨城県神栖市太田産 表乾密度 2.60g/cm^3 粗粒率 2.15%)
	S②	②砕砂(栃木県佐野市中町産 表乾密度 2.63g/cm^3 粗粒率 3.05%)
粗骨材	G①	砕石(栃木県佐野市仙波町産 表乾密度 2.70g/cm^3 実績率 61.0%)
	G②	砕石(栃木県佐野市会沢町産 表乾密度 2.70g/cm^3 実績率 61.0%)
混和剤		高性能AE減水剤(標準型 I 種)

表-4 調査計画及びフレッシュ性状(1, 2F)

W/C (%)	s/a (%)	単体量(kg/m ³)						混和剤 (C×%)	スランブ (cm)	空気量 (%)
		C	W	S①	S②	G①	G②			
60.0	48.0	292	175	429	434	675	289	2.92	18.0	4.5

2.2 現場計測

本研究は埋込型ひずみゲージ計を設置することにより、2階建て RC 造の実構造物の壁、梁部材のひずみおよびコンクリート温度を計測した。

実構造物の平面図、断面図および埋込型ひずみゲージの設置位置をそれぞれ図-1、図-2 に示す。また壁および梁の断面形状を表-5、表-6 に示す。

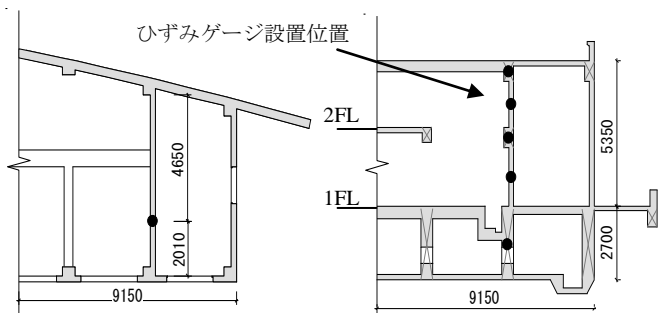


図-1 平面図

図-2 断面図

*1 東京理科大学大学院工学研究科建築学専攻 修士 (学生会員)

*2 東京理科大学工学部建築学科 准教授 工博 (正会員)

*3 東京理科大学工学部建築学科 助教 工修 (正会員)

*4 東京理科大学工学部建築学科 嘱託捕手 (正会員)

表-5 壁の断面形状

壁厚 (mm)	配筋	
	たて筋	よこ筋
220	D13 @200 ダブル	D13 @200 ダブル

表-6 梁の断面形状

梁厚 (mm)	配筋					
	上端筋		下端筋		あばら筋	腹筋
	両端部	中央部	両端部	中央部		
370	6-D22	4-D22	6-D22	8-D22	D13 @200	4-D13

埋込型ひずみゲージ計は図-1, 2において、平面上で同じ位置に、地下の壁, 1Fの壁および梁, 2Fの壁および梁の計5箇所に水平(軸)方向に設置し計測を行った。計測は2012年6月5日から開始し、現在も計測中である。また、現場における主な工程を表-7に示す。

表-7 計測の日程

4月6日	地中梁打設
6月5日	計測開始 1F打設
6月21日	1F型枠脱型
10月5日	2F打設
10月13日	2F型枠脱型

2.3 ダミー試験体の作製

現場計測を行うとともにダミー試験体の作製を行った。ダミー試験体とは実構造物を模した試験体であり、実構造物と同一の配筋を行っている。試験体概要を表-8および写真-1, 2に表す。1Fの壁および梁, 2Fの壁および梁の計4つのダミー試験体を作製し、それぞれの幅の長さは実構造物と同一の長さとしている。また、該当部材にあわせて同一コンクリートを打設し、現場付近の設置することによって同環境下で、実構造物と同様に埋込型ひずみゲージ計により、コンクリートのひずみおよび温度を計測した。また、2F梁のダミー試験体の鉄筋にはひずみゲージを設置し、5箇所の鉄筋のひずみの計測も併せて行い、鉄筋の付着が確保されていることを確認した。なお、地中梁についてはダミー試験体は作製していないが、このひずみは0と仮定している。



写真-1 打設前の様子



写真-2 打設後の様子

表-8 ダミー試験体概要

試験体名	寸法(mm)		
	幅	奥行	高さ
1F壁	220	300	600
1F梁	370	300	700
2F壁	220	300	600
2F梁	370	300	700

2.4 室内実験

現場計測に併せて室内実験用として強度試験用試験体, 乾燥収縮試験体および一軸拘束試験体を作製した。圧縮強度試験, 割裂引張強度試験の試験体は20±2℃, RH60±5%の恒温室内で封緘養生し, 各試験材齢において強度を測定した。また, 乾燥収縮試験はJISに準じて行った。

一軸拘束試験機の概要を図-3に示す。一軸拘束試験機は装置上部にあるスクリージャッキにより拘束収縮試験体中のひずみの増分を自動的に制御し, その拘束率を0~100%まで自由に設定し, 常に一定に維持した状態で計測できる。また, ロードセルによって試験体に作用している応力を直接測定することができる。また, 表-9にそれぞれの試験体の概要を示す。

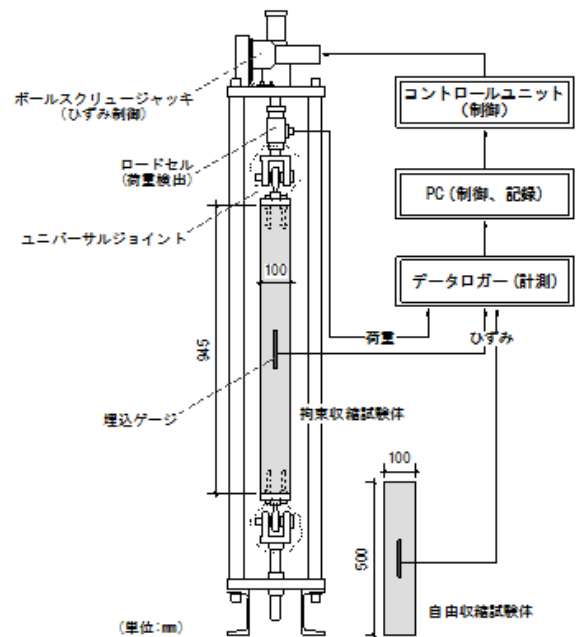


図-3 一軸拘束試験概要

表-9 室内試験体概要

試験項目	試験体個数	試験体寸法(mm)
圧縮強度試験	各12体	φ 100×200
割裂引張試験	3×4材齢	
乾燥収縮試験	2	100×100×400
クリープ試験	1	100×100×1000
一軸拘束試験	2	100×100×1000
	2	100×100×400

3. 実験結果・考察

3.1 室内実験

3.1.1 強度試験結果

圧縮強度試験結果、割裂引張強度試験結果およびその結果から JIS に基づいて求めたヤング係数を図-4、図-5 および図-6 に示す。圧縮強度は材齢 14 日で 30N/mm² に達し、以後は緩やかに上昇していく傾向を見せている。引張強度は材齢 28 日時点で 3N/mm² に達する結果となった。また、ヤング係数は材齢 14 日で 30kN/mm² に達し、以後は一定の値を示した。

3.1.2 自由収縮試験結果

自由収縮ひずみを図-7 に示す。自由収縮ひずみは材齢 80 日時点で約 700×10⁻⁶ まで達している。

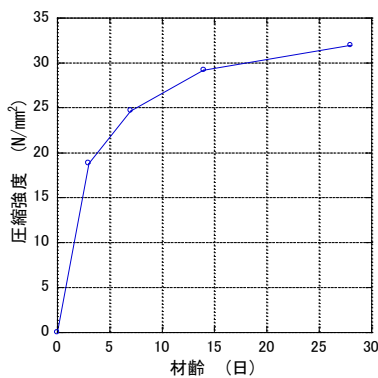


図-4 圧縮強度

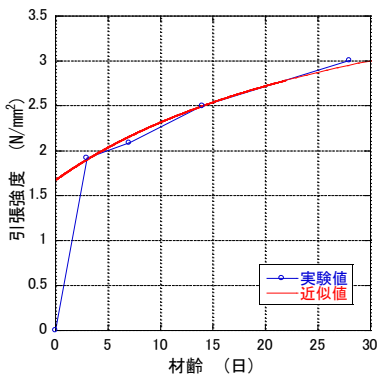


図-5 割裂引張強度

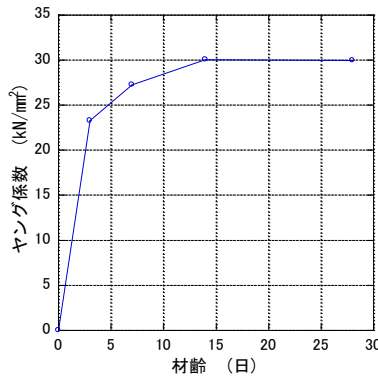


図-6 ヤング係数

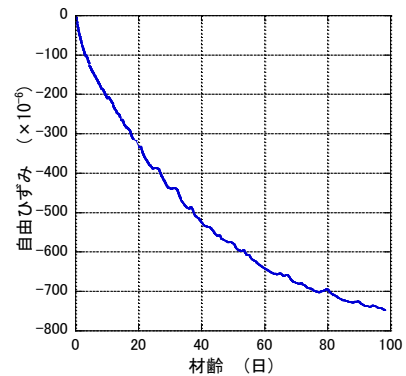


図-7 自由収縮ひずみ

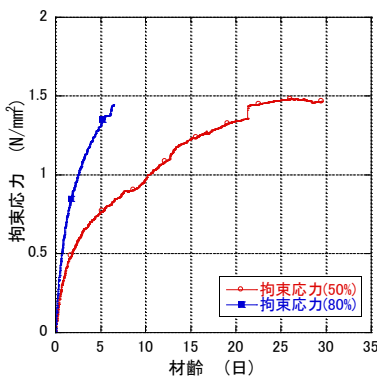


図-8 拘束応力

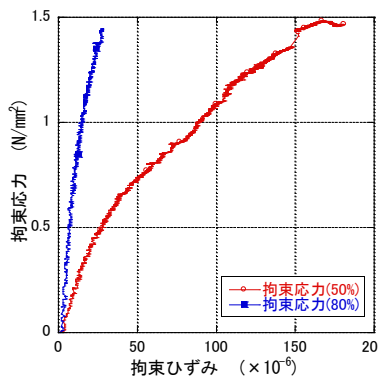


図-9 拘束ひずみ-拘束応力関係

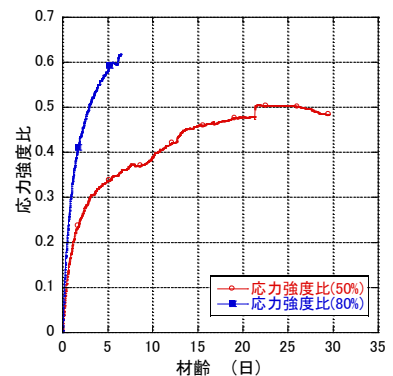


図-10 応力強度比の変化

3.1.3 一軸拘束試験結果

一軸拘束試験の各拘束率における収縮拘束応力の変化を図-8 に、拘束ひずみ-拘束応力関係を図-9 に示す。拘束率 50%の試験体は材齢 31 日で拘束応力 1.4 N/mm² に達し破断した。それに対して拘束率 80%の試験体は材齢 6 日の時点で拘束応力 1.5 N/mm² で破断した。よって拘束率が高くなっても破断する際の拘束応力はほとんど変わらないが、破断材齢は著しく短くなるのがわかる。

コンクリートのひび割れ発生の指標となる応力強度比は図-5 に示す近似式を用いて下式で求められる。算出結果を図-10 に示す。

$$\alpha = \frac{\sigma_s}{\sigma_t} \quad (1)$$

α : 応力強度比
 σ_s : 拘束応力(N/mm²)
 σ_t : 引張強度(N/mm²)

破断時の応力強度比は拘束率 80%の試験体の試験体においては 0.60、拘束率 50%の試験体においては 0.50 であった。よって破断時の拘束応力は拘束率による相違はみられないが、拘束率が高い試験体の方がひび割れの発生が早くなり、その結果応力強度比の大きさに相違が現れたと考えられる。

3.2. 実構造物計測

3.2.1 ひずみ・コンクリート温度

埋込型ひずみゲージ計によって計測した実構造物のコンクリートのひずみおよび温度の 1F 壁の挙動を図-11, 1F 梁の挙動を図-12, 地中梁の挙動を図-13, 2F 壁の挙動を図-14 そして 2F 梁の挙動を図-15 に示す。図のひずみは埋込型ひずみゲージ計により測定した実ひずみを示している。工程の都合上, 1F を打設した直後に計測を開始したため地中梁は打設後 61 日を原点としている。また, コンクリートの打設直後は水和反応による温度変化が大きかったため, 1F は材齢 2 日を, 2F は材齢 6 日を測定原点とした。また, 図-12 および図-13 には実構造物の建設状況も併せて示している。

図-12 および図-13 からコンクリートのひずみは細かく増減を繰り返していることがわかる。これは日間の温度変化によるものと考えられるが, このコンクリートの日間の温度変化は材齢約 100 日までは 10℃程度の増減を繰り返している。しかし, それ以降は徐々に振幅が低下してゆき, 材齢 140 日を越えた辺りでは 2℃程度の増減となり, それに伴ってひずみの増減も低下している。これは 120 日で 2F 部分の打設が行われていることから, 上層階が建ちあがり, 直射日光の影響を受けなくなることが原因と考えられる。また, 常に直射日光の影響を受けることのない地中梁は他と比べて温度の増減は著しく小さいことから, 地中材は温度および乾燥収縮による体積変化が著しく小さいことが分かる。

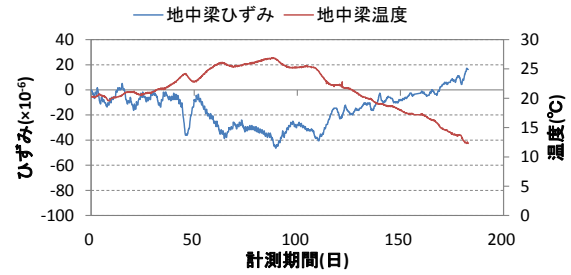


図-13 ひずみ・温度変化(地中梁)

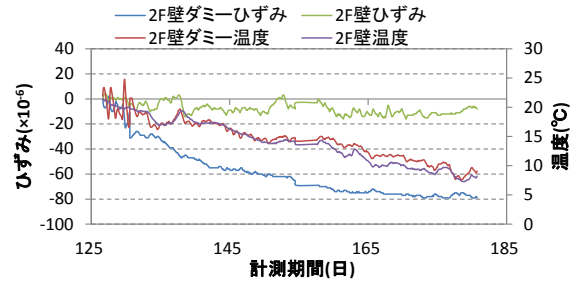


図-14 ひずみ・温度変化(2F 壁)

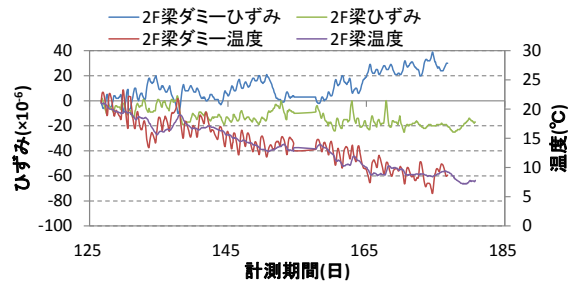


図-15 ひずみ・温度変化(2F 梁)

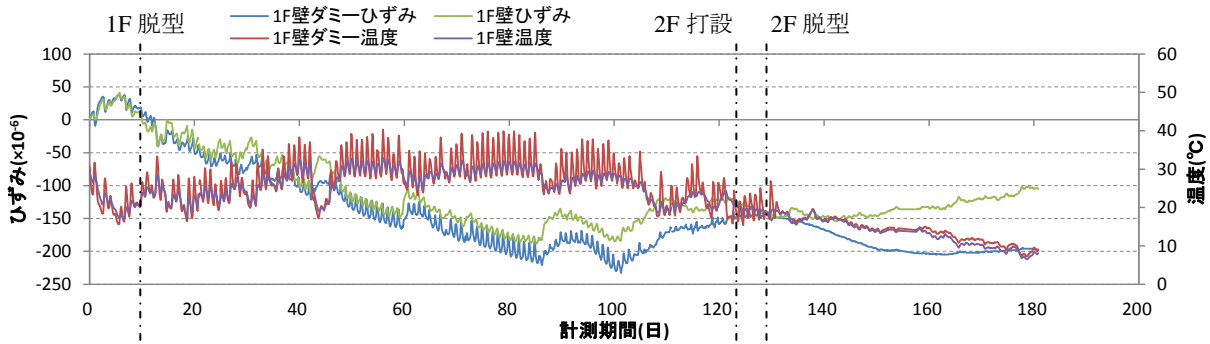


図-11 ひずみ・温度変化(1F 壁)

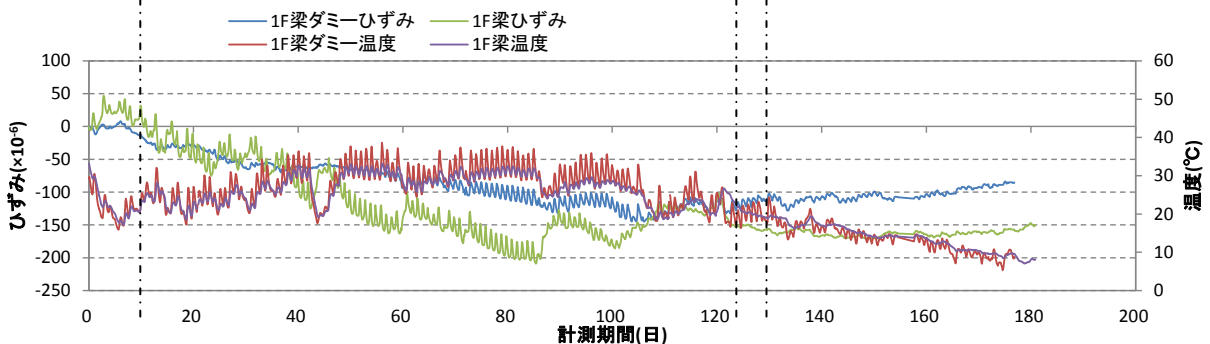


図-12 ひずみ・温度変化(1F 梁)

また、実構造物のひずみは 1F 部分では壁、梁ともに 100 日付近で最大で 200×10^{-6} 、2F 部分は 35 日付近で最大 20×10^{-6} 程度収縮しており、以後は収縮方向にひずみが進展する傾向はみられない。これは室内試験で行った自由収縮試験の結果と比べると小さい値であり、これは降雨や温度などの気象環境の影響を受けているためと思われる、今後の推移を見る必要がある。

次に、ダミー試験体と実構造物の差は、周辺部材による拘束の有無であることから、ダミー試験体のひずみから実構造物のひずみを引くことによって周辺部材による拘束ひずみを求めた。算出結果を図-16 に示す。拘束ひずみは 1F、2F ともに壁部材が収縮方向に進展し、梁部材が圧縮方向に進展している。厚さが小さく、乾燥収縮しやすい壁部材が梁部材によって拘束されていることが原因と考えられる。

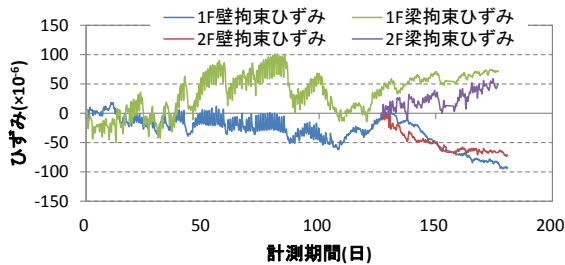


図-16 拘束ひずみ変化

3.2.2 鉄筋のひずみ

計測した 2F 梁のダミー試験体の鉄筋のひずみの変化を図-17 に示す。鉄筋のひずみは測定場所による相違は大きい所で 10×10^{-6} 程度の小さい値であり、鉄筋の付着が確保されていることを確認できる。また、中央部のひずみは材齢 10 日で 20×10^{-6} に達する程度であり、それ以降収縮方向に進展する傾向はみられない。

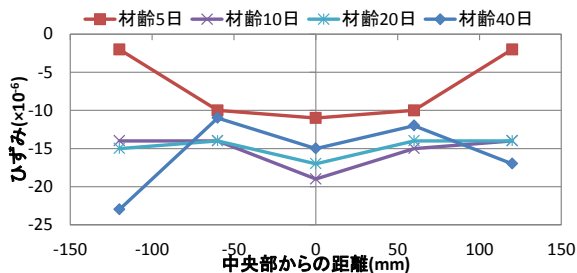


図-17 鉄筋ひずみ変化

3.2.3 拘束率

3.2.1 で示した実構造物のひずみおよびダミー試験体のひずみの計測結果から実構造物の拘束率を以下の通り算出した。算出結果を図 18 に示す。拘束率はひずみの増減に伴って、大きく増減を繰り返しているが、ある程度材齢が経過した後は定常となっている。1F 壁の拘束率は 20~40% 程度であり、2F 壁の拘束率は 80~90% であ

ることから、2F の方が周辺部材による拘束は大きい。

$$\lambda = \frac{\varepsilon_f - \varepsilon_m}{\varepsilon_f} \quad (2)$$

λ : 拘束率

ε_f : ダミー試験体のひずみ

ε_m : 実構造物のひずみ

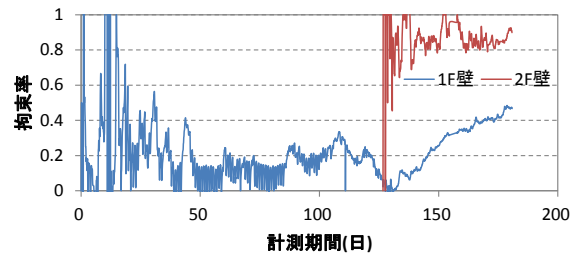


図-18 拘束率の変化

3.2.4 周辺部材による拘束応力

一軸拘束試験において得られた拘束応力-拘束ひずみ関係を基に、現場計測で得た結果から拘束応力の算出を行った。計算式を以下に示す。有効ヤング係数は実構造物が長期的に応力を受けていることを考慮して、3.1.3 の一軸拘束試験結果の拘束ひずみ-拘束応力関係(図-10)から求めた。

$$\sigma_s = (\varepsilon_f - \varepsilon_m) \cdot E_e \quad (3)$$

σ_s : 拘束応力(N/mm²)

E_e : 有効ヤング係数(N/mm²)

算出した拘束応力の 1F の変化を図-19 に、2F の変化を図-20 に示す。1F、2F 共に壁部材の拘束応力は引張方向に進展しているが、梁部材は圧縮方向に進展している。また、壁部材の拘束応力は 1F 部分で 1.0 N/mm²、2F 部分で 0.6 N/mm² 程度である。

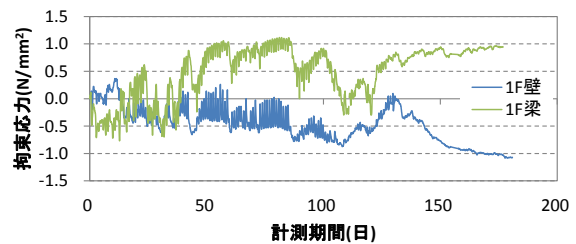


図-19 拘束応力変化(1F)

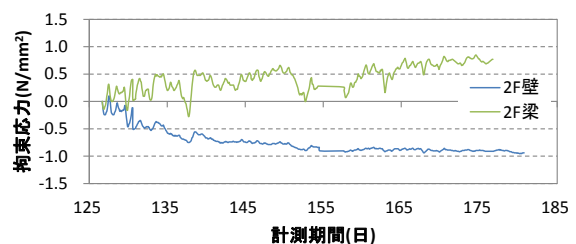


図-20 拘束応力変化(2F)

3.2.5 鉄筋による拘束応力

計測した鉄筋のひずみからコンクリートに生じる応力を、鉄筋とコンクリートに生じる荷重が釣り合う関係から算出を試みた。得られた結果、また 3.2.4 で求めた周辺部材による拘束応力も併せて図-21 に示す。鉄筋の拘束によるコンクリートの応力は引張方向に最大で 0.06 N/mm² 程度であり、周辺部材による拘束応力と比べて 1 割程度の小さい値であった。ここから、鉄筋による拘束は、周辺部材による拘束と比べて著しく小さいことがわかる。

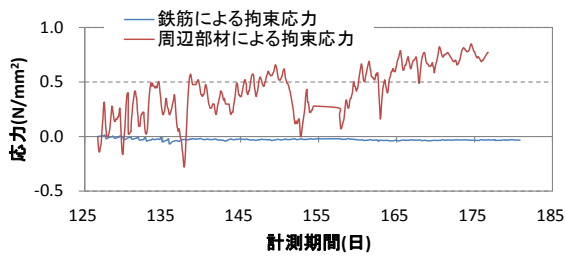


図-21 拘束応力変化

3.2.6 階層ごとのひずみ挙動

計測したひずみの 2 階の打設の影響を検討するために、2F 部分を打設した計測期間 130 日を原点とした階層ごとのひずみの挙動を図-22 に示す。地下および 1F 壁のひずみは計測期間が進むとともに膨張方向に進展したが、1F 梁、2F 壁および 2F 梁は収縮方向に進展している。部位によるひずみの差はみられるが、構造物としては各層のひずみの関係は線形であり、計測期間が進むにつれて階層ごとのひずみの差が大きくなる傾向を示した。

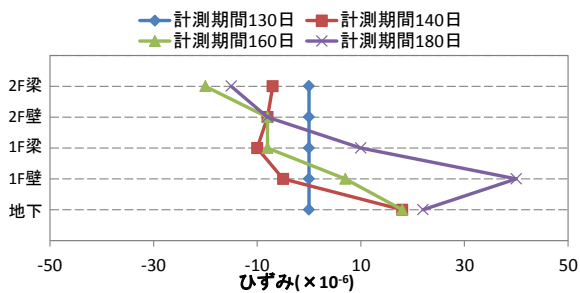


図-22 階層ごとのひずみの変化

3.2.7 応力強度比

ひび割れ発生の推測を行うために、応力強度比の算出を行った。鉄筋よりも周辺部材による拘束が著しく大きいことから、3.2.4 で算出した拘束応力を用いた。計算式(1)と同様であり、拘束応力を同材齢の強度試験によって算出した引張強度で除したものである。算出結果を図-23 に示す。

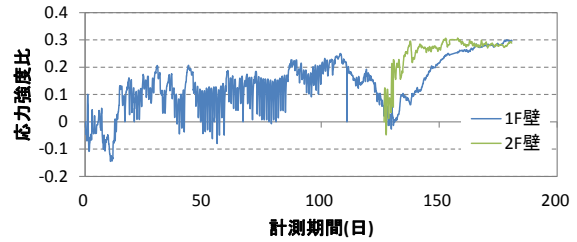


図-23 応力強度比変化

応力強度比は拘束応力が引張方向に進展している 1F および 2F の壁のものを算出した。両者とも応力強度比は 0.30 程度に達している程度である。これに対して、3.1.3 で求めた一軸拘束試験体が破断する際の応力強度比は 0.50 であり、その値には到達していないことから、計測を行っている壁部材にはひび割れが発生していないことが推測でき、実際に目視によって調査したところ、ひび割れは確認出来ず、推測した結果と同様であった。

4. まとめ

普通コンクリートを打設した実構造物の挙動の計測と室内試験によって、以下のことが明らかになった。

- 1) 実構造物の収縮ひずみは最大で 200×10^{-6} に達する程度で、これは室内試験の自由収縮ひずみに対して低い値である。
- 2) 実構造物に生じる拘束ひずみについて、壁部材は収縮方向、梁部材は膨張方向に進展している。これは 1F、2F ともに同じ傾向であり、壁部材の収縮挙動の影響を梁部材が受けているためであると思われる。
- 3) 拘束応力は周辺部材による拘束の影響が大きく、鉄筋の拘束による応力は、本 RC 構造物においてはその 1 割程度の低い値であった。
- 4) 実構造物の応力強度比は 0.30 に達する値であり、これはひび割れの発生に至るような値ではなく、測定を行った部材にはひび割れが発生していないことが定量的に推測でき、実際に目視を行ったところ、現時点でひび割れは生じていない。

謝辞

調査を実施するにあたり、セメント協会、大成建設株式会社の多大なるご助力を賜った。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 濱永康仁ほか：ひずみ制御機能を備えたコンクリートの収縮ひび割れ試験装置の開発, 日本建築学会構造系論文, No.616, 2007.6
- 2) 小川亜希子ほか：ひずみ制御型一軸拘束試験機を用いたコンクリートの収縮ひび割れ評価に関する研究