

論文 デッキプレートを用いた軽量コンクリート床スラブの実環境下における収縮挙動

本間 敏明*1・今本 啓一*2・小川 亜希子*3・石川 寛範*4

要旨: 実環境下における高層建築物の軽量コンクリート床スラブにおいて伸縮ひずみを測定し、変動する環境作用を受けるコンクリートスラブの収縮性状を把握するとともに、現場で採取したコンクリートを用いて一軸拘束試験を実施し、実験から得られた物性値を使用して収縮ひび割れ発生状況を検討した。その結果、床スラブの伸縮ひずみは環境作用および建設工事に伴う種々の外力等の影響を直接または間接的に受けて大きく変動したが、床スラブ内部の拘束応力の経時変化を概ね推測することができた。

キーワード: 実環境, 軽量コンクリート, 床スラブ, 一軸拘束試験装置

1. はじめに

従来、コンクリートの収縮ひび割れの研究は、ほとんどが温度、湿度等の環境作用を制御した条件下で実施されており、日射、降雨、風等の環境作用の影響を受け温度および湿度が変動する実環境下における収縮ひび割れの研究は少ない。また、実構造物の収縮を測定した例も少なく、特に収縮ひび割れの発生しやすい部位である壁および床スラブを対象とした収縮測定の実験例はほとんど見られない。したがって、実構造物の収縮ひび割れ制御および対策を講じる場合、実験室レベルでの収縮ひび割れに関する多くの知見や研究成果をどの程度適用可能であるかは明確でなく課題となっている。

本研究では、大阪市内のターミナルビル整備事業のうち高層タワー館(地上60階)新築工事において14階床スラブ内にひずみゲージを埋設し、伸縮ひずみを測定する機会を得たのでその結果を報告し、実構造物における収縮性状を把握すること、ならびに現場で作成した試験体を用いて一軸拘束ひび割れ試験を実施し、収縮ひび割れ性状を検討した。ひずみ計測期間は3ヶ月以上実施したが、本報告では2011年7月21日～2011年10月13日の約2ヶ月半の結果である。また、一軸拘束ひび割れ試験においては、拘束度を一定に制御可能な一軸拘束ひび割れ試験装置によってコンクリートの収縮ひび割れ発生性状へ及ぼす影響を実験的に検討し、得られた物性値から実構造物の床スラブに生ずる内部応力の推定を試み、ひび割れ発生状況を検討した。

2. 2. 実験概要

2. 1 使用材料・調合表および試験項目

コンクリートの使用材料を表-1, レディミクスト

表-1 使用材料

W	水	回収水
C	セメント	普通ポルトランドセメント 密度3.16g/cm ³
G	粗骨材	膨張頁岩系人工軽量骨材, 粗粒率6.31 絶乾密度1.27g/m ³ , 吸水率(24時間)10.5%,
S	細骨材	小川沖島産砂 絶乾密度2.55g/m ³ , 吸水率1.44% 砕砂(亀岡産) 絶乾密度2.61g/m ³ , 吸水率1.63%
SRA	混和剤	高性能AE減水剤(標準型) (ポリカルボン酸系化合物)

表-2 レディミクストコンクリート調合表

コンクリート種類	呼び強度 (cm)	スランプ (cm)	粗骨材最大寸法 (mm)	セメントの種類	単位容積質量 (kg/m ³)	空気量 (%)
軽量1種	27	23	15	N	1850	
W/C (%)	単位量(kg/m ³)					空気量 (%)
	W	C	G	S	Ad	
50	185	370	388	525 360	3.85	5.0

表-3 試験項目

現場実験	床スラブ収縮ひずみ (測温機能付埋込み型ひずみゲージ)
	ダミー試験体収縮ひずみ(有筋・無筋) (測温機能付埋込み型ひずみゲージ)
室内実験	圧縮強度(JIS A 1108)(気中養生)
	割裂引張強度(JIS A 1113)(気中養生)
	静弾性係数(JIS A 1149)
	自由収縮ひずみ(埋込み型ひずみゲージ) 拘束収縮ひずみ(埋込み型ひずみゲージ) 収縮拘束荷重(ロードセル)

*1 東京理科大学助教 工学部建築学科 工修 (正会員)

*2 東京理科大学准教授 工学部建築学科 博士(工学) (正会員)

*3 東京理科大学大学院 工学研究科建築学専攻 (正会員)

*4 ALA協会(正会員)

コンクリート調合表を表-2、試験項目を表-3に示す。コンクリート種類は軽量1種、混和剤は高性能AE減水剤を使用した。床スラブはスラブ厚130mmのコンクリートとデッキプレートとの合成スラブ構造である。現場実験においては、配筋による補強筋の内部拘束の影響を検討するため、乾燥面が1000×800mm、スラブ厚130mmの有筋および無筋の合成スラブを模擬した供試体(以下、ダミー試験体という)をそれぞれ作成した(写真-1)。なお、無筋のダミー試験体はデッキプレート上に透明ビニルシートを敷いて打設し、コンクリートと型枠との付着を防ぎ、無拘束の自由収縮試験体として作成した。

床スラブのひずみ測定位置を図-1、図-2に、ひずみゲージ設置状況を写真-2に示す。ひずみゲージの深さ方向の設置位置はコンクリート表面下35~40mm程度とし、鋼梁沿いに梁方向に対して平行方向(GBH1)および垂直方向(GBV2)の2箇所、床スラブ中央付近に梁方向に対して平行方向(GCH3)および垂直方向(GCV4)の2箇所とした。なお、ゲージ測定器はひずみと温度が同時に計測できる測温機能付きのゲージをそれぞれ使用した。ダミー試験体のひずみゲージ設置位置は、中央付近にそれぞれ1箇所とした。

ひずみの測定は打設後6時間経過後に自動計測で実施し、2時間間隔で計測した。

2.2 一軸収縮拘束試験、自由収縮試験および強度試験

打設時に表-3に示す室内実験で使用する各供試体を作成した。供試体は打設後ビニルシートで覆い封緘養生とし、打設翌日に実験室へ運搬し、乾燥開始材齢である7日後に脱型し試験に供した。乾燥収縮試験および拘束収縮試験は、恒温恒湿室内(温度 20 ± 1 ℃、湿度 60 ± 5 %)で行った。拘束収縮試験は、図-3に示す一軸拘束ひび割れ試験装置を使用した。この装置は、自由収縮ひずみに対する拘束ひずみの比率として定義される拘束度を0~100%の範囲で継続して制御が可能で、ロードセルにより試験体の引張荷重を直接測定することができる。

拘束度は、80%とした。



写真-1 ダミー試験体用型枠(無筋・有筋)

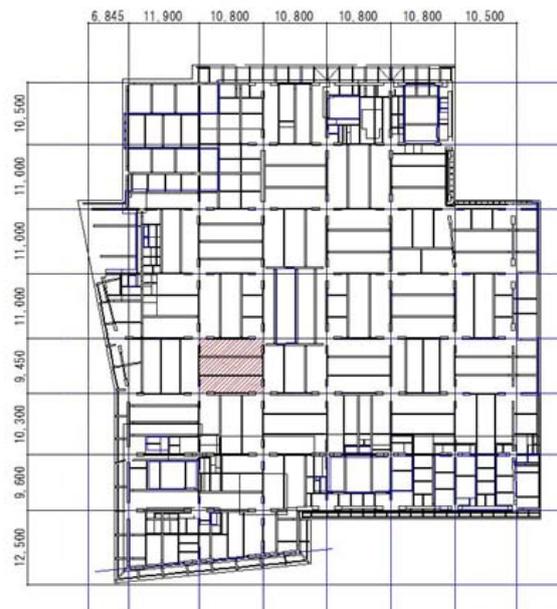


図-1 床スラブの測定位置



鋼梁沿：平行方向(GBH1)

垂直方向(GBV2)

スラブ中央：平行方向(GCH3)

垂直方向(GCV4)

写真-2 ゲージ設置状況

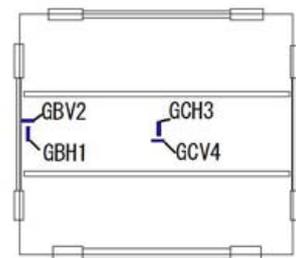


図-2 ハンチング部分の拡大図
(ゲージ設置位置)

拘束収縮供試体は945×100×100mmの角柱供試体,自由収縮供試体は,JIS標準供試体の長さ(400mm)を考慮して,500×100×100mmの角柱供試体とした。ひずみ測定は,自由収縮供試体および拘束収縮供試体の内部中央に埋込ゲージを埋設して行った。拘束供試体は1体,自由収縮供試体は2体とした。自由収縮ひずみ,拘束収縮ひずみおよび収縮を拘束する引張力としての拘束収縮荷重を30分間隔で自動計測した。強度試験は経時変化の影響を検討するために,脱型後,恒温恒湿室内に保存し材齢7,14,28,56日に実施し各3体とした。圧縮強度試験,割裂引張強度試験および圧縮静弾性係数試験は,φ100×200mmの円柱供試体を使用しJIS A 1108, JIS A 1113およびJIS A 1149に準拠して実施した。

3. 室内実験結果及び考察

3.1 強度および静弾性係数

表-4に圧縮強度,割裂引張強度および静弾性係数試験の各結果(平均値)を示す。圧縮強度は材齢の経過に伴って増加しており,材齢56日においては材齢7日強度に比べて約30%高い。一方,割裂引張強度の7~28日強度はいずれの材齢においてもほぼ同等であるが,材齢56日においては14%程度増加した。静弾性係数は材齢28日迄は材齢の経過に伴って増大したが,材齢56日においては増大傾向は見られなかった。

3.2 拘束収縮および自由収縮試験

表-5にひび割れ発生時の拘束収縮試験結果を示す。表中には,既往の実験結果(拘束度80%)¹⁾も示している。載荷期間32.6日でひび割れが発生し,既往の研究結果と比較すると載荷時材齢(7日と3日)およびW/C(50%と45%)に違いはあるが,ひびわれ発生日数は長くなり,ひびわれ発生時の拘束ひずみおよび拘束引張応力は大差ない結果となった。

図-4に自由収縮ひずみ(2体の平均値)の経時変化を示す。図中には既往の実験結果(1種軽量コンクリート)¹⁾も示している。乾燥開始材齢およびW/Cに相違はあるが,乾燥期間35日の収縮ひずみを比較すると,本実験結果が45%程度低い結果となった。

3.3 拘束ひずみおよび引張クリープひずみ

図-5に拘束ひずみおよび引張クリープひずみの結果を示す。なお自由収縮ひずみと拘束状態の収縮ひずみの差で算出される拘束ひずみは,ひび割れ発生までの結果を示している。引張クリープひずみは,拘束ひずみから引張弾性ひずみを差し引いて算出した推定値であり,引張弾性ひずみは拘束引張応力を圧縮静弾性係数で除して算出した。なお,経時変化する弾性係数の実験値が無い場合は補間して求めた。図中には既往の研究結果(拘束度80%)¹⁾も示している。ひび割れ発生時(最大応力時)の拘

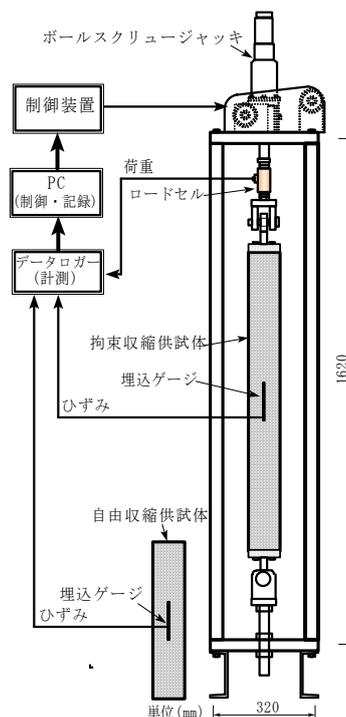


図-3 一軸拘束ひび割れ試験装置

表-4 強度試験結果

材齢	7日	14日	28日	56日
圧縮 [N/mm ²]	34.8	39.7	42.6	46.0
割裂引張 [N/mm ²]	2.92	2.93	2.86	3.26
静弾性係数 [kN/mm ²]	19.9	22.2	24.4	24.0

表-5 拘束収縮・自由収縮試験結果

拘束度 (%)	載荷開始材齢 (日)	ひび割れ発生時						備考
		実測拘束度 (%)	ひび割れ発生日数 (日)	自由収縮歪 (μ)	拘束収縮歪 (μ)	拘束歪* (μ)	拘束引張応力 (N/mm ²)	
80	7	80	32.6	-214	-41	173	1.03	
80	3	82	12.2	-184	-34	150	0.90	文献 ¹⁾

*:拘束歪=拘束収縮歪-自由収縮歪

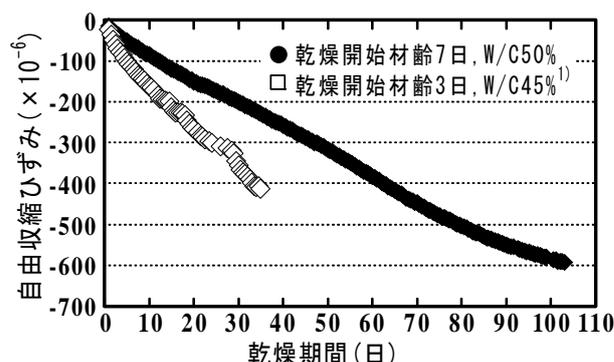


図-4 自由収縮ひずみの経時変化

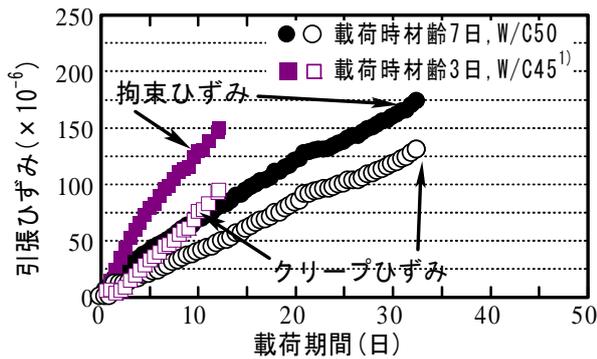


図-5 拘束ひずみ・引張クリープひずみの経時変化

束ひずみは、既往の結果(拘束度80~60%)¹⁾においては150~170 μ 、本実験の拘束ひずみは173 μ で同程度となった。引張クリープひずみは、拘束ひずみにおけるひずみ構成成分の大半を示しており、本実験においては約75%が引張クリープひずみであった。ひび割れ発生時の引張クリープひずみは既往の結果より43%大きい。これより、ひび割れ発生日数が12.2日から32.6日に延びたのは、乾燥開始材齢が遅かったため乾燥収縮速度が遅く、引張クリープひずみが穏やかに増大することによって応力の増進が緩和されたと考えられる。

3.4 拘束引張応力と拘束ひずみの関係

図-6に拘束引張応力と拘束ひずみの関係を示す。図中には拘束度80%の既往の結果¹⁾も示しており、本研究結果と概ね一致している。拘束度80%の拘束ひずみと拘束応力の関係は、式(1)の回帰式で概ね近似できる。構造体コンクリートの収縮拘束応力を予測する手法の一つに有効ヤング係数法がある。有効ヤング係数は拘束引張応力-拘束ひずみ関係より得られる直線の傾きで算定される。すなわち、実構造物において拘束ひずみが得られれば有効ヤング係数によって内部応力の推定が可能となるが、本研究においては式(1)によって応力を算定した。

$$Y = 4.83 \times 10^3 \cdot X^{1.1} \quad (1)$$

ここに Y=拘束応力(N/mm²)、X=拘束ひずみ(μ)

3.5 応力強度比

図-7にひび割れ発生強度を割裂引張強度を基準とした場合の応力強度比(引張強度に対する同材齢時の収縮拘束応力の比。以下 σ/F_t とする)の経時変化を示す。なお、経時変化する引張強度の実験値が無い場合は補間して求めた。拘束度80%のひび割れ発生時の σ/F_t は、0.34と低く、同じ拘束度80%の既往の結果¹⁾である0.55より低かった。これは、載荷時材齢およびW/Cの違いが少なからず影響していると考えられるが、収縮ひび割れ発生条件が応力基準のみで決まるのではなく、限界引張ひずみすなわち引張伸び能力も影響していると考えられる。

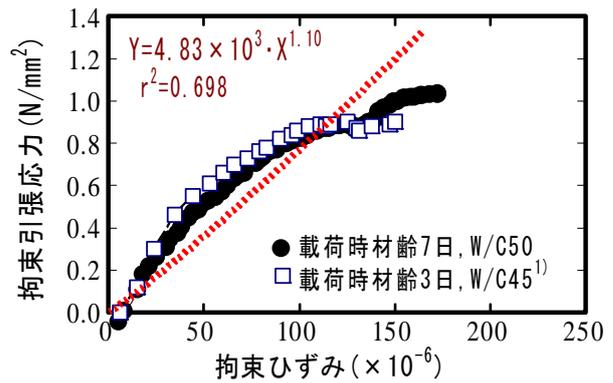


図-6 拘束引張応力と拘束ひずみの関係

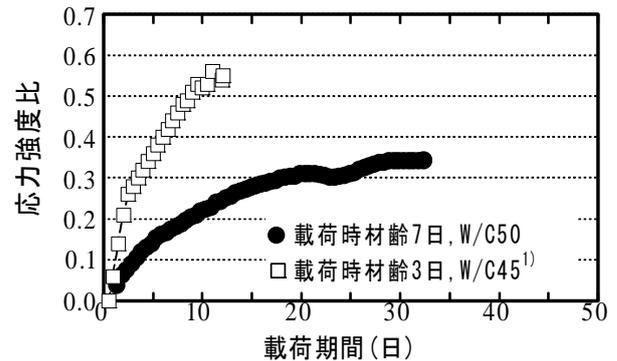


図-7 応力強度比の経時変化

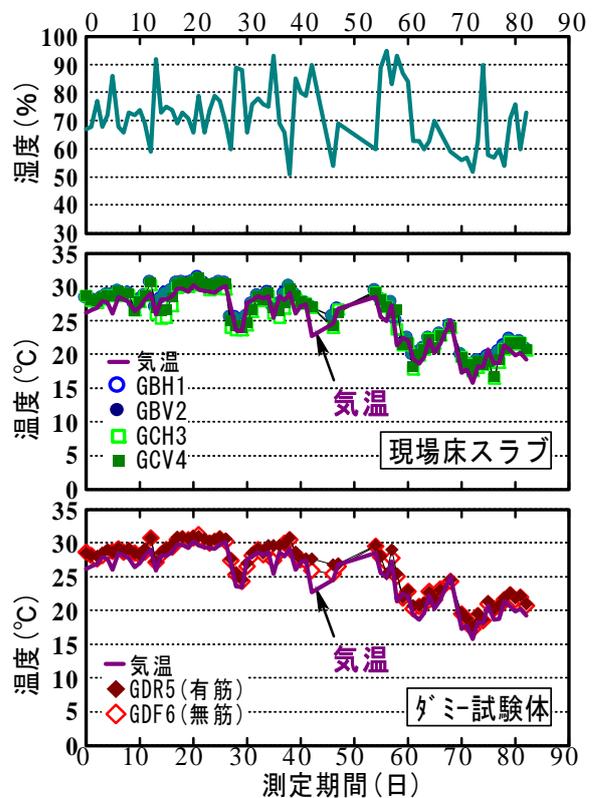


図-8 気温・湿度および部材温度の経時変化

4. 床スラブの現場計測結果

図-8にひずみ測定期間中の気温、湿度および床スラブコンクリートの内部温度(以下、部材温度とする)の計測結果を示す。気象データは大阪市の観測データである。測定期間中の平均気温、平均湿度、および平均部材温度はそれぞれ25℃、72%、25~26℃であった。部材温度は、いずれも気温とほぼ一致して変動しており、各計測地点間の温度差は見られなかった。

4.1 コンクリートスラブの計測ひずみ

図-9に床スラブおよびダミー試験体各測定点のそれぞれのひずみの経時変化を示す。床スラブおよびダミー試験体各測定点のひずみの基点は、打設後の水和熱によるコンクリート温度の上昇および工事作業によるひずみ計測への影響を考慮して、計測開始から2日後の23時とし、24時間毎の経時変化を表示している。

図-8で示したとおり、部材の温度変化により測定されたひずみには温度ひずみが含まれている。本実験で使用したひずみ計は、線膨張係数が普通コンクリートに近似した自己温度補償型である。したがって、軽量コンクリートの線膨張係数が $6\sim 8\times 10^{-6}$ 程度²⁾であることから使用したコンクリートの線膨張係数を 8×10^{-6} として、計測基点時の温度(28.3~28.6℃)相当に温度補正したコンクリートひずみを算出した。また、拘束部材である鉄筋、梁、デッキプレートの線膨張係数が $11\sim 12\times 10^{-6}$ 程度であるので、コンクリートとこれら鋼材とは僅かな温度ひずみ差が生じていることが想定される。

床スラブの各ひずみは、測定開始直後からひずみの経時変化の変動が大きく、梁際およびスラブ中央の直交方向に設置した各測定間には明確な差異は見られず、梁の拘束および計測方向の違いによる影響は確認できなかった。このような変動は温度、湿度等の実環境作用および工事に伴う振動および外力等が直接あるいは間接に影響していると考えられる。4測定点においては、収縮ひずみは小さく引張ひずみも生じている。引張ひずみへの変化は、外力の作用を受けスラブが上に凸に曲げられて生じた可能性が考えられる。

一方、ダミー試験体の有筋(GDR5)および無筋(GDF6)のひずみ変化は、床スラブの4測定値の場合に比べて変動幅は小さく、GDR5の収縮ひずみは床スラブの4測定値より幾分か大きい。スラブの自由収縮を想定したGDF6の収縮ひずみは、測定期間82日において 100μ 程度を示し、自由収縮試験で得られた乾燥期間82日の収縮ひずみ 510μ の約20%と顕著に小さい。これは、部材形状寸法、気温・湿度環境、一面乾燥等の条件の差異が影響を及ぼしていると考えられる。すなわち、標準試験で得られた乾燥収縮データから実構造物における乾燥収縮量を予測する場合の課題となることを示唆している。

4.2 拘束度の経時変化

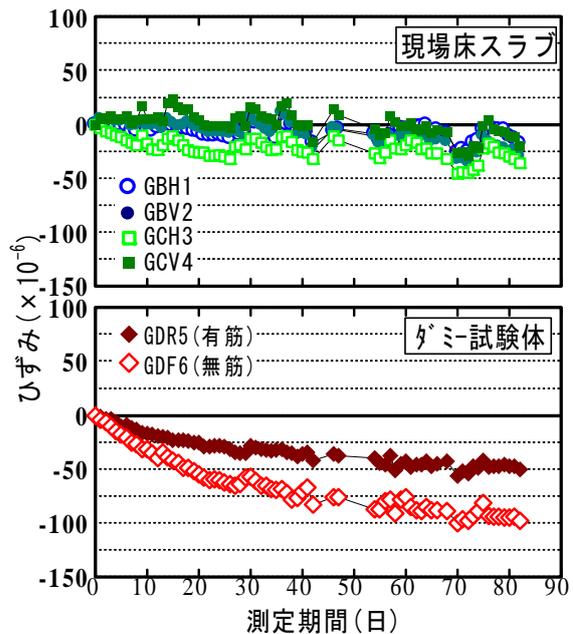


図-9 収縮ひずみの経時変化

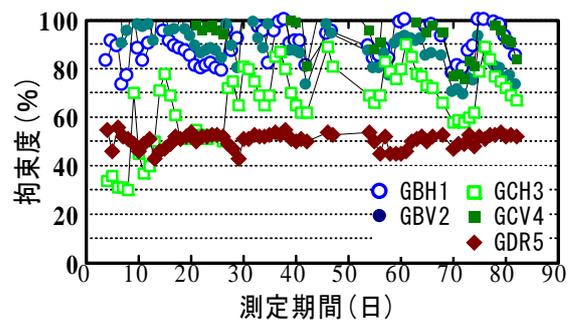


図-10 拘束度の経時変化

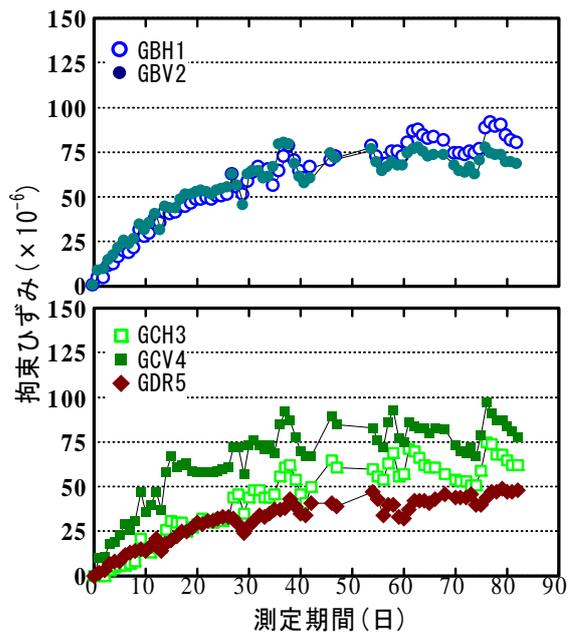


図-11 拘束ひずみの経時変化

図-10に床スラブおよびダミー試験体各測定点のそれぞれの拘束度の経時変化を示す。拘束度は、GDF6の自由収縮ひずみに対する拘束ひずみの比として算定した。なお、算定結果が100%を超えた場合は、除外し100%以下のデータを表示した。ダミー試験体のGDR5の拘束度は僅かな変動はみられるが、概ね一定値で推移しており平均50%であった。

一方、床スラブの4測定値はいずれも高い拘束度(概ね70%以上)で大きく変動している。特にスラブ中央のGC H3の測定期間30日程度までの変動が大きく、30日以降においては他の3測定値より幾分低い拘束度を示している。これは、梁による梁と平行方向の拘束の影響が幾分小さいと考えられる。

4.3 拘束ひずみおよび内部応力の算定

図-11に拘束ひずみの経時変化を示す。拘束ひずみは、GDF6の自由収縮ひずみと各計測ひずみとの差を算定した。梁際のGBH1およびGBV2の拘束ひずみは比較的小幅な変動で、ほぼ一致して増大しており、ひずみ計測方向の違いは認められなかった。スラブ中央のGCH3およびGCV4の拘束ひずみは幾分変動は大きく、GCV4のひずみはGBH1およびGBV2の場合と概ね同程度のひずみ値を示し増進しているが、GCH3は幾分小さい。

一方、GDR5の拘束ひずみは現場床スラブの各ひずみの60%程度の値で変化している。これは補強筋の配筋の大きさが1000×800mmと小さく、実構造物の配筋状況に比べて拘束度が低いことに起因している。

図-12にスラブ内部に発生する拘束応力の推定値を示す。内部応力は、3.4で示した式(1)によって算定した。図中には、一軸拘束試験で得られた拘束度80%の拘束応力の経時変化を併示している。なお床スラブおよびダミー試験体は、計測期間中いずれもひび割れは発生していない。現場床スラブ4計測点およびGDR5の内部応力は、材齢の経過とともに増大しており、一軸拘束試験のひび割れ発生日数である30日程度までは、拘束度80%の拘束応力を下回っている。

30日以降においても、床スラブ4計測点の内部応力は幾分増大傾向は見られるが、0.8N/mm²以下を示している。GDR5の拘束応力は拘束度が低かったため最も低く、80日においても0.4N/mm²を下回っている。

図-13に3.5で示した算定方法を利用して得られた応力強度比(以下 σ/F_0 とする)の経時変化を示す。引張強度は現場養生の供試体を作成していないので、室内実験で実施した割裂引張強度試験結果を使用した。図より、床スラブ4計測点の σ/F_0 は、いずれも0.25程度以下で推移している。40日程度以降においては、 σ/F_0 の経時変化はいずれも僅かな増大傾向となっている。

以上の結果から、スラブの各 σ/F_0 は一軸拘束試験にお

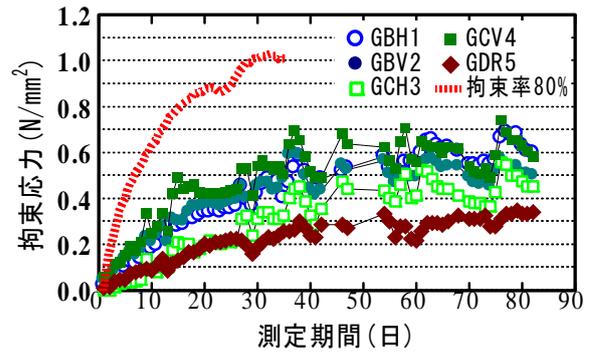


図-12 拘束応力の経時変化

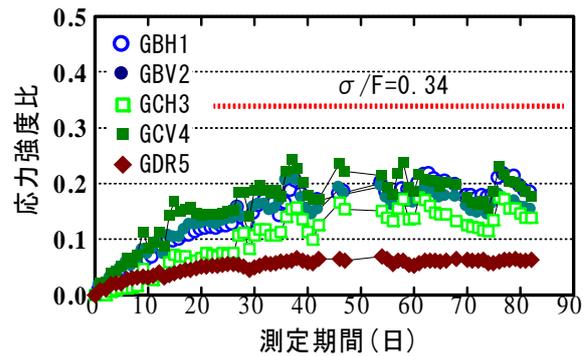


図-13 応力強度比の経時変化

けるひび割れ発生時の σ/F_0 0.34以下であること、およびスラブにはひび割れの発生が確認されていないことから、内部収縮応力の推定値は概ね妥当と考えられる。

5. まとめ

デッキプレートを用いた合成スラブ構造に軽量コンクリートを用いた床スラブの収縮性状を実環境下において検討した結果、本研究の範囲内で以下の知見が得られた。(1) 一軸拘束ひび割れ試験においては、拘束度80%ではひび割れが発生し、ひび割れ発生時の σ/F_0 は著しく低く0.34であった。

(2) 実環境下の軽量コンクリート床スラブのひずみは、環境作用以外に、工事に伴う種々の外力の影響を受け、計測ひずみは大きな変動を示す。

(3) 一軸拘束ひび割れ試験の結果から得られた物性値によって、実環境下のコンクリートスラブ内部に発生する収縮応力の経時変化を概ね推定できる。

参考文献

- 1) 本間敏明ほか：一軸拘束試験機によるコンクリートの収縮ひび割れ発生性状の研究 コンクリート工学年次講演会論文集 Vol. 31, No. 1, pp. 637~642 2009
- 2) セメント協会：コンクリートパンフレット 第79号 人工軽量骨材コンクリート pp. 51~52 昭和49年