

鉄筋の拘束作用により版部材に生じる初期ひび割れに関する 実験的研究

Experimental Study on the Occurrence of Initial Cracking in Concrete Slabs caused by the Restraint Action of Reinforcing Bars

玉置 一清 KAZUKIYO TAMAKI
三加 崇 TAKASHI SANGA
浅井 洋 HIROSHI ASAI
藤田 学 MANABU FUJITA

コンクリート部材の初期ひび割れは、比較的若材齢時の収縮が拘束を受けることによって生じる場合が多いが、その評価手法は明確ではない。本報告は、鉄筋量を変化させた実物大供試体を1年間暴露して、内部に蓄積される引張応力の経時変化を観測した結果をとりまとめたものである。PC部材の鉄筋比1%程度では0.5N/mm²の引張応力程度であるが、鉄筋比7%で配置すると1年足らずで初期ひび割れが生じる結果となった。
キーワード：初期ひび割れ、収縮、鉄筋拘束、若材齢、鉄筋比

The method of evaluating initial cracking caused by contraction of early-aged concrete members and comparative restraint has not been clarified.

This paper describes the results of exposure experiments conducted over a one year period to investigate changes in the tensile stress of full-scale floor slab specimens with varied reinforcement content. Initial cracks were observed by accumulating the tensile stress of 2.5N/mm² in specimens with 7% of the reinforcement ratio, which was a little greater than the PRC members, though a tensile stress of 0.5N/mm² was generated in specimens with 1% of the reinforcement ratio corresponding to PC members.

Key Words: Initial Crack, Contraction, Restraint of Steel Bar, Early aged Concrete, Reinforcement Ratio

1. はじめに

コンクリート部材の初期ひび割れは、凝結過程を含む比較的若材齢時の収縮挙動がなんらかの拘束を受けることによって、コンクリート内部に引張応力が蓄積され、これがある限界（引張強度の50%程度の場合もある）に達したときに生じる。実構造物の設計計算において、外的な拘束に起因するこの種の引張応力については、収縮挙動が明確になりさえすれば、ある程度の検討を実施することが可能になってきたが、コンクリート内部に配置された鉄筋拘束による影響については、その評価手法は未だ明確であるとは言いがたい。従来、PC部材で配置されるような疎な鉄筋量であれば、これら鉄筋拘束による影響は無視できる程度であると考えられてきた。しかし、鉄筋量が富であるPRC部材では、見かけ上は収縮量が小さくなり外部拘束による影響の方は小さくなるが、配置鉄筋がコンクリートの収縮を拘束する反作用とし

て、コンクリート内部に残留する引張応力は大きくなる。ひび割れを許容するPRC部材では、ひび割れの発生確率および発生時期、さらにひび割れ発生後のひび割れ幅を精度よく推定する上で、鉄筋拘束力の評価手法の確立が重要になるものと考えられる。

また、初期ひび割れの発生には施工的な要因が大きいことがよく知られており、コールドジョイントや不十分な打ち継ぎ目など施工の欠陥の存在は、その発生確率を著しく高くするものと誰もが認識している。工事計画では、これら施工的要因を極力排除することが第一の目的ではあるが、設計的には、施工的要因を見込んだ評価手法も、構造物の性能評価を実施する上で準備しておく必要があるものと考えられる。

本報告は、打ち継ぎ目を有する実物大床版模型を、鉄筋比をパラメータとして4体作製し、無応力状態で1年間屋外環境に暴露し、内部に蓄積される引張応力の経時変化を観測した結果をとりまとめたものである。また、

初期ひび割れを研究する上で標準的に実施されてきた JCI 自己収縮試験等も同時に実施し、実物大模型との対比を行った。

2. 実験概要

(1) 供試体および施工方法

図-1、図-2に供試体寸法および鉄筋配置を示す。供試体は、一般的な PC 箱桁から厚さ200mmの床版部材を一部(幅 550mm)切り出したと想定したものである。両側面にはシールを施し、乾燥は上下面からのみとした。

case0 は無筋の供試体で、case1 が一般的な PC 部材を想定して鉄筋径 D13 で鉄筋比 1.2 %、case2 が現行の PRC 部材を想定して鉄筋径 D25 で鉄筋比 4.6% を配置した。case3 は比較用として鉄筋を過剰配置したものであるが、図-3(a) に示す JCI 自己収縮応力試験供試体¹⁾と同じ鉄筋径 D32 で鉄筋比 7.2 % を配置したもので、この供試体を10個束ねたものとして比較することができる。

本実験結果と既往の研究成果との関係を比較するため、標準的に実施されている図-3に示す JCI 自己収縮応力試験体 (case4-1, 4-2) および JIS 供試体 (case5-1 ~ 5-3) を2回目のコンクリートと同時に作製し、表-1に示す環境下で約1年間暴露を実施している。

また、打ち継ぎ目の影響を把握するため、供試体の半分の 1500mm(1次コンクリート)を打設し、翌日に鉛直打ち継ぎ目を入念にチップング処理し、1週間の材齢差で残りの 1500mm(2次コンクリート)を打設している。

写真-1、写真-2に配筋状況および打ち継ぎ目処理状況を示す。図-4に計測器の配置状況を示す。端部から800mm区間は鉄筋の定着区間とし、その内側の鉄筋ひずみ分布を計測した。一部、コンクリート中心部にもコンクリート埋込みゲージを配置している。

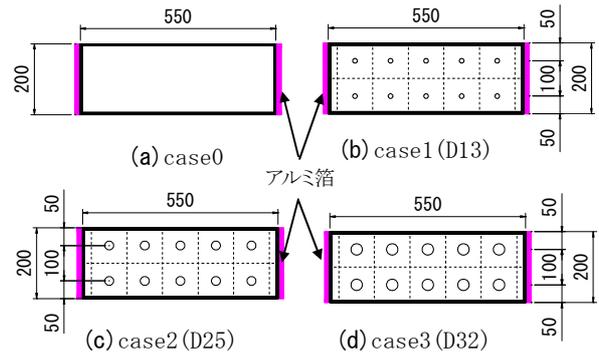


図-2 供試体断面図

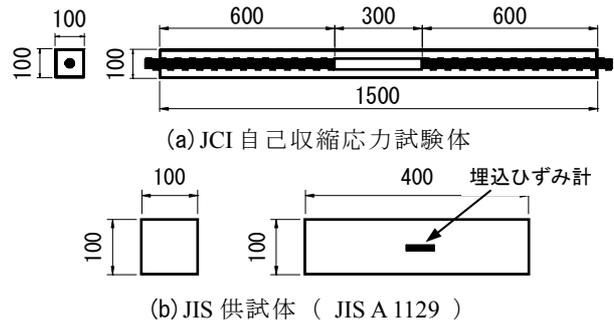


図-3 JIS 供試体および JCI 自己収縮応力試験体



写真-1 配筋状況



写真-2 打ち継ぎ目処理

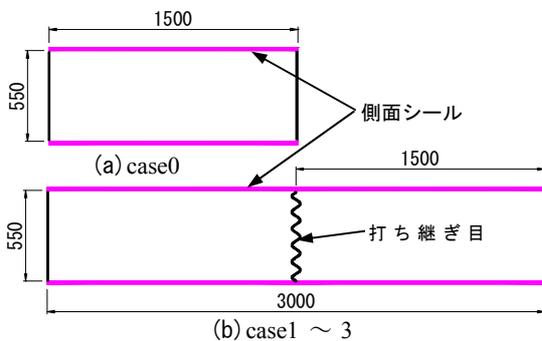


図-1 供試体平面図

表-1 暴露試験環境

試験体	寸法			鉄筋径	鉄筋比	環境	備考	収縮ひずみ	
	幅 (mm)	高さ (mm)	長さ (mm)					自己収縮	乾燥収縮
JCI case4-1	100	100	1500	D32	7.94%	恒温恒湿室	全面シール	○	—
JCI case4-2	—	—	—	—	—	—	—	—	○
JIS case5-1	100	100	400	—	—	恒温恒湿室	全面シール	○	—
JIS case5-2	—	—	—	—	—	—	—	—	○
JIS case5-3	—	—	—	—	—	現場	—	—	○

(2) コンクリートの配合およびコンクリートの品質

表-2に、コンクリートの示方配合を示す。一般的なPC部材を想定して、設計基準強度を40N/mm²とし、早強セメントを使用している。表-3に打設時の品質管理試験結果を示す。図-5～図-7に、テストピースによる強度試験およびヤング係数試験結果を示す。参考までに、単位水量試験を現在推奨されている3つの方法で実施した結果を表-4に示す。スランブは管理値中心付近であったにも関わらず、いずれの試験方法においても単位水量が設計値よりも1割以上多いことを示している。図-5に示す圧縮強度は、比較的若材齢で目標強度を大幅に上回っており、単位水量の過多による強度低下は特に認められない。今後、単位水量試験により品質評価を実施する場合、試験時のサンプリング方法などに課題があるものと考えられる。

(3) 暴露環境および気温、湿度

近年、日照による輻射熱が初期ひび割れの発生に影響を及ぼすとの報告が見られる。しかし、今回の試験では検討要因が複雑となりすぎることから、日照の影響は今後の課題とするものとし、供試体は大型の屋根空間下の日陰に設置した。ただし、側方の防護は設置しておらず、多少の日照および横風時の降雨は経験している。図-8、図-9に、供試体周辺（栃木県河内郡）で観測した気温、湿度を示す。観測期間の平均気温は17.8℃、平均湿度は69.8%であり、一般的に設計計算で想定されているものとはほぼ同程度の環境であった。

3. 実験結果

(1) 計測ひずみの整理方法

コンクリート部材外に配置された拘束鋼部材については、線膨張係数はコンクリートとほぼ同じであるが、熱

表-2 コンクリートの示方配合

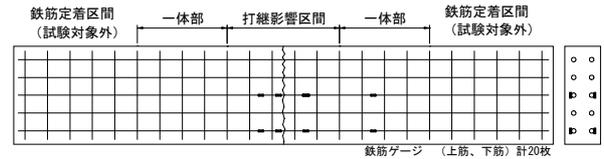
W/C	S/a	スランブ	空気量	セメント種類
39.5%	40.0%	8.0cm	2.0%	早強
単位量(kg/m ³)				混和剤
セメント	水	細骨材	粗骨材	
400	158	726	1094	減水剤

表-3 品質管理試験結果

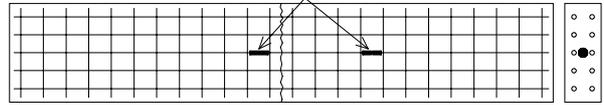
	スランブ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)	外気温 (°C)
1次コンクリート	8.5	1.6	12.0	10.0
2次コンクリート	8.5	3.6	14.5	9.5

表-4 単位水量試験結果

	単位水量(kg/m ³)			
	設計値	静電容量法 (kett製)	高周波加熱法 (電子レンジ)	エアメータ法
1次コンクリート		181.8	168.6	175.4
2次コンクリート	158.0	181.4	174.9	165.4



(a) 鉄筋ひずみ計測位置



(b) 埋込みひずみ計設置位置

図-4 計測器配置状況

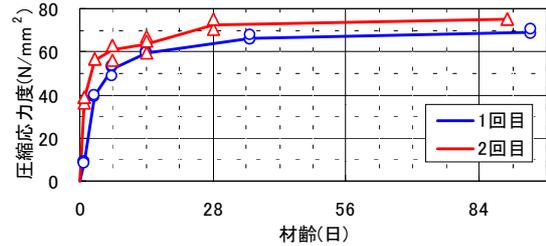


図-5 圧縮強度

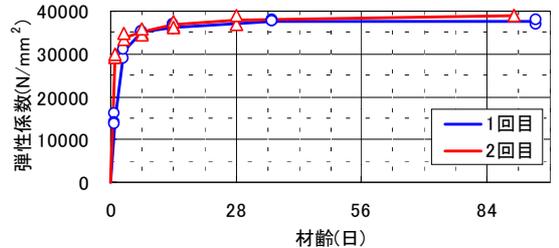


図-6 弾性係数

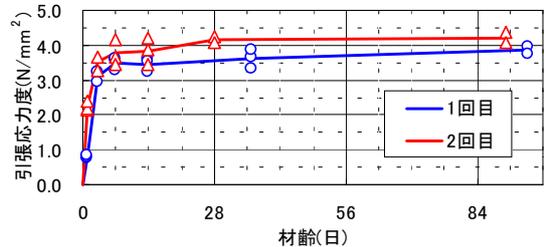


図-7 引張強度

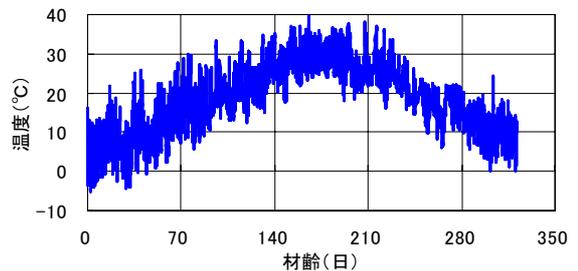


図-8 暴露環境 (温度)

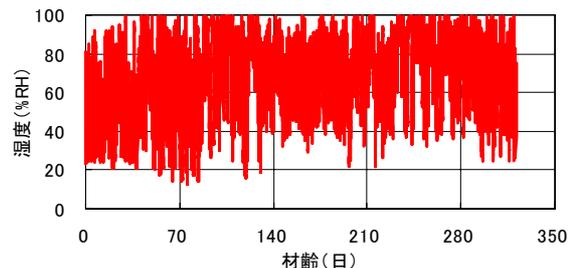


図-9 暴露環境 (湿度)

伝導率の相違により短期間の温度上昇・下降（日気温変化など）にタイムラグが生じ、それが深刻なコンクリート応力発生 の要因となり得る。しかし、コンクリート内部に配置された鉄筋は、ほとんどタイムラグなしにコンクリートと同温度になるものと考えられるため、線膨張ひずみは、コンクリート応力とは無関係のものであると考えることができる。そこで、ひずみのデータ整理では、実ひずみ $(\epsilon_i + C_b \times \Delta t_i)$ から線膨張ひずみ $(\alpha \times \Delta t_i)$ を控除した式 (1) のものを計測ひずみ ϵ_t として示すものとする。

$$\epsilon_t = \epsilon_i + (C_b - \alpha) \times \Delta t_i \quad (1)$$

ここに、 ϵ_i : 測定ひずみ

C_b : 計器の温度補正係数

α : コンクリートの線膨張係数

Δt_i : 温度変化量

図-10、図-11に、打ち込み直後の水和発熱時と材齢43日後の日気温変化時における線膨張係数を示す。水和発熱時の線膨張係数が見かけ上小さくなるのは、自己収縮の影響によると考えることができる。したがって、材齢43日後の線膨張係数を用いて補正することにより、 ϵ_t は自己収縮を含んだものと考えられることができる。

次に、JIS試験体に比べて寸法の大きい case0 の線膨張係数が見かけ上小さくなるのは、中心部で圧縮方向に働く温度応力ひずみの影響ではないかと考えたが、表面と中心部で温度差はほとんど生じておらず、温度解析の結果とも矛盾した。乾燥収縮の内外ひずみ差によって生じる想定外の応力の存在が考えられ、興味深いテーマではあるが、これを検証するには今回は供試体数も少なく、今後の議論とすることとした。今回は同じコンクリートではあるが、各々の供試体ごとに材齢43日で線膨張係数を算出し、補正を加えるものとした。

また、鉄筋との付着が完全でない凝結開始前のコンクリートひずみも応力とは無関係である。したがって、ひずみの初期値は凝結始発である打ち込み6時間後とした。

(2) 無筋コンクリートの収縮ひずみ

図-12に恒温恒湿室（湿度60%）で測定した JIS 試験体の収縮ひずみ計測値を示す。また、2002年土木学会コンクリート標準示方書 [構造性能照査編]²⁾（以下、コン示）に示される収縮予測式（解3.2.3式）、圧縮強度 55N/mm²以上で自己収縮の影響を考慮したひずみ予測式（解3.2.6式）、および道路橋示方書³⁾に示される Rusch 式を併せて示す。体積表面比 V/S=22mm となる JIS 供試体はコン示の適用範囲外であるが、計測値は予測値と比較的よく一致している。Rusch 式は実測値に比べ小さ

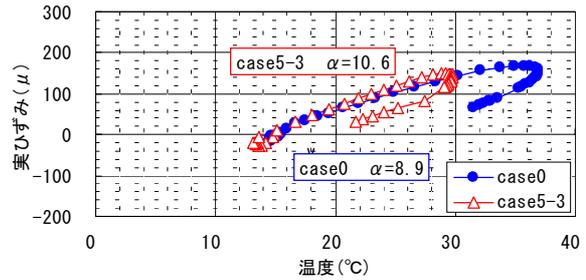


図-10 水和発熱時の温度と実ひずみ

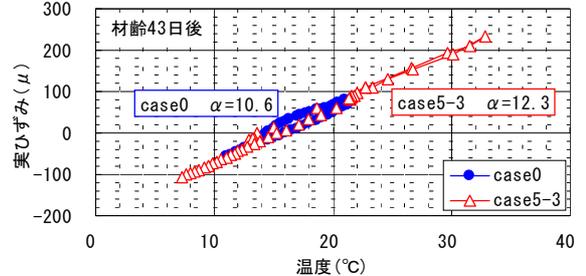


図-11 材齢43日後の温度と実ひずみ

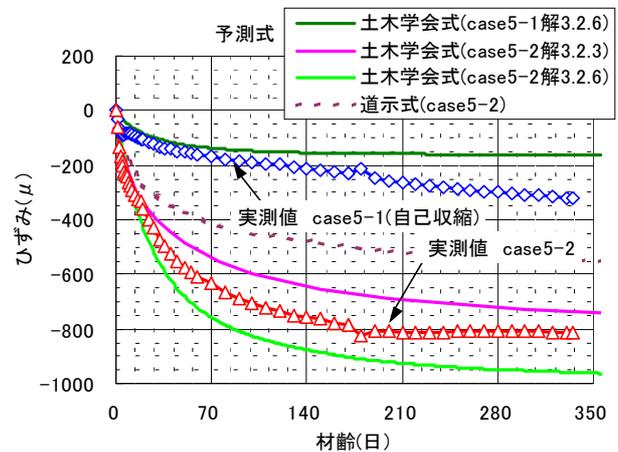


図-12 無筋コンクリートの収縮ひずみ（恒温室）

く、若材齢では設計的に危険側の予測式となっている。図-13、14に現場環境下（平均湿度69.8%）における収縮ひずみの計測値を示す。屋外環境下では、湿度の想定が大きな課題であるが、コン示予測式は無筋コンクリートに関しては比較的精度の高いものであると言える。

(3) 鉄筋コンクリートの収縮ひずみ

図-15に鉄筋比の相違によるコンクリート収縮ひずみ（埋込みひずみ計）の比較を示す。図-16は鉄筋比を横軸として収縮ひずみを整理したものである。材齢が進むにつれ、無筋と鉄筋比1%の差が大きくなっているが、鉄筋を配置したものだけで比較すると、ひずみ値は鉄筋比の増加につれておおむね線形的に小さくなる。この鉄筋拘束による収縮ひずみの低減を考慮することにより、部材外部からの拘束に対して合理的な設計が可能となるが、その反面、次項で示すコンクリート内部に蓄積される引張応力も同時に考慮しなければ大きな矛盾となることに注意が必要である。

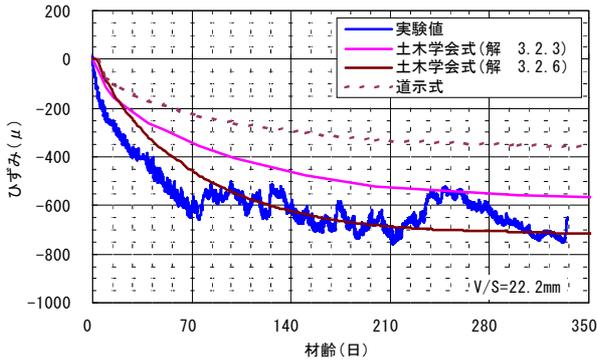


図-13 現場環境下における収縮ひずみ(case5-3)

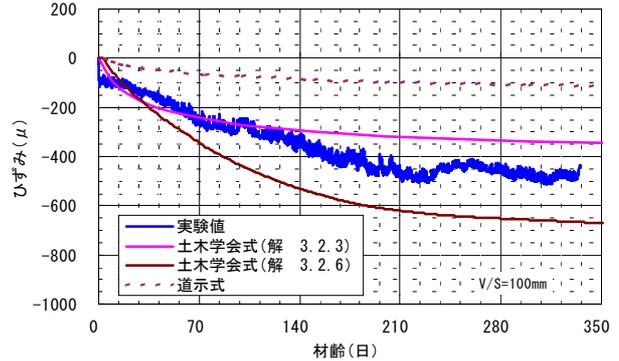


図-14 現場環境下における収縮ひずみ(case0)

(4) 鉄筋拘束により生じるコンクリート引張応力

コンクリートの若材齢時応力を計測する方法として、①有効応力計による方法、②コンクリートひずみから有効ヤング係数(クリープの近似解法)を用いて算出するコン示[施工編]⁴⁾の方法、③鉄筋圧縮力(ひずみ)を測定し、コンクリート引張力との釣合い条件から算定する方法の3つが考えられる。現時点では決定的なものではなく、初期ひび割れ研究の大きな課題の一つであるが、ここでは、一つの目安として、③の鉄筋ひずみから釣合い条件にて算定した応力を用いて検証を試みる。

図-17に鉄筋比を変化させた実物大床版模型を1年間暴露したコンクリート応力経時履歴を示す。鉄筋比

7.9%のcase3では、材齢220日からコンクリート応力の低下が生じている。この時点のひずみ計測データを見ると、コンクリートと鉄筋の付着破壊が生じ始めていることがわかり、引張軟化の初期段階である微細なひび割れ状態が試験体全域に広がっていることが想定される。微細ひび割れの発生時応力 2.2N/mm^2 は、テストピースによる割裂強度 4N/mm^2 の約55%程度である。鉄筋比

4.9%のcase2には、次項で示す打ち継ぎ目以外には微細なひび割れも認められなかったが、残留引張応力は約 2.0N/mm^2 弱で、この後、わずかな荷重載荷によっても即ひび割れが生じる状態であると考えられる。case1のように鉄筋比1%程度であれば、収縮ひずみの低減率は大きい、それによりコンクリート内部に蓄積される引張応力は 0.5N/mm^2 であり、従来から考えられていたとおり鉄筋拘束の影響はほとんど無視できる程度であると考えられる。

図-18に図-3(a)で示したJCI自己収縮ひび割れ試験供試体を本試験体と同時に製作し、シーンを施さずに恒温室(温度 20°C 、湿度60%一定)で暴露したものと、case3を比較したものを示す。鉄筋比は同程度であるが、乾燥表面積の相違により、JCI試験体の方が収縮ひずみが卓越し、材齢50日で 0.1mm 程度の可視ひび割れが生じた。このときのコンクリート応力度は 2.6N/mm^2 で、テストピースによる割裂強度の65%であった。一般

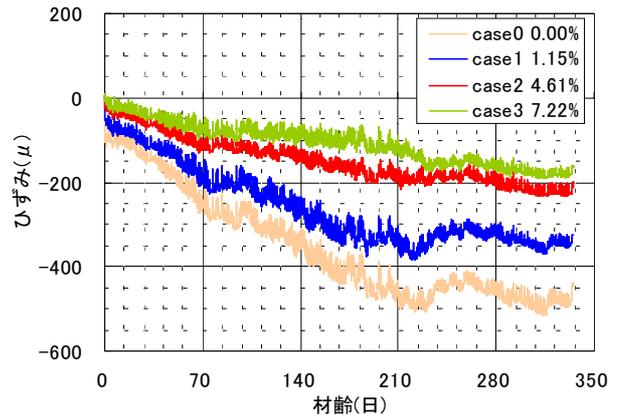


図-15 コンクリートひずみの経時変化

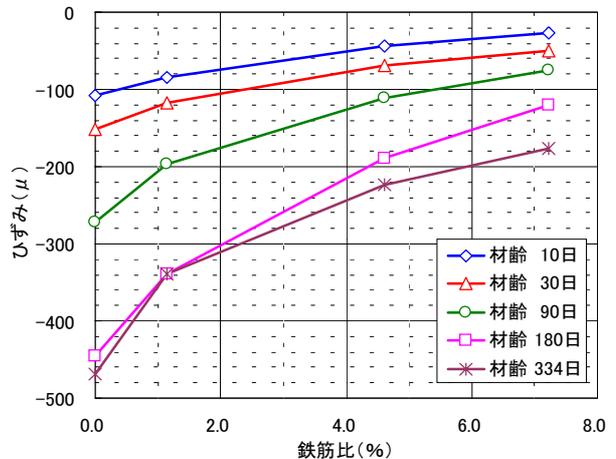


図-16 鉄筋比の違いとコンクリートひずみ

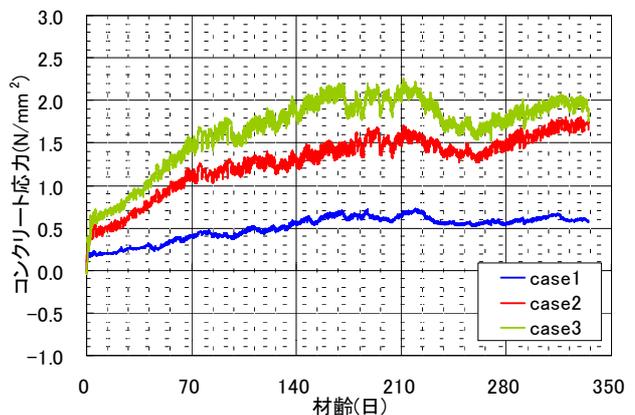


図-17 鉄筋ひずみから算定したコンクリート応力

に、外力に対するひび割れ発生は、引張強度に寸法効果の影響を考慮したものとして理解されているが、収縮によるひび割れの場合、小さな部材であっても引張強度の40~90%の範囲で生じていることが報告されている⁵⁾。その要因として、極めて緩慢なひずみ速度の影響、断面内での不均一な収縮による影響などが報告されているが、いまだ完全に解明されているとは言い難いのが現状である。既往の研究報告や今回の実験結果から工学的に判断すると、割裂強度の50%程度の引張応力が蓄積される鉄筋比5%以上では、初期ひび割れ発生の確率は非常に高いものと考えねばならない。

(5) 打ち継ぎ目の影響

図-19~図-21に、材齢ごとの鉄筋ひずみ(=コンクリートひずみ)分布の変化を示す。case1では打ち継ぎ目部でのひずみ変化は見られなかった。すなわち、打ち継ぎ目が初期ひび割れに対する弱点とはならず連続性を維持していることがわかる。case2では30日程度から打ち継ぎ目近傍でひずみが解放され始め、緩やかにひび割れが進行したことがわかる。材齢180日で目視でも確認できる目開きとなった。case3では材齢10日の時点で既に鉄筋ひずみが解放され、0.1mm程度の目開きとなったが、その後は特に進行せず、ひび割れ幅は収束したようである。

このように、打ち継ぎ目は、現行規準に従い入念に施工をしても、初期ひび割れに対して弱点となる可能性が高く、これらの影響を考慮した性能照査手法の確立が必要であると考えられる。

4. まとめ

本研究において鉄筋比と拘束応力および初期ひび割れとの関係について、得られた知見を以下に示す。

- 1) 無筋コンクリートの収縮ひずみについては、屋外環境下では、湿度の設定に課題はあるが、土木学会コン式により比較的精度よく予測できることを確認した。
- 2) 鉄筋を配置することにより収縮ひずみは低減され、その低減率は鉄筋比とおおむね線形関係を示す。
- 3) 乾燥収縮を鉄筋が拘束することによる影響は、鉄筋比1%程度であれば無視できる程度であると考えられるが、鉄筋比5%以上になると打ち継ぎ目には早期にひび割れが発生し、部材全体に引張強度の50%程度の引張応力が蓄積される結果となった。

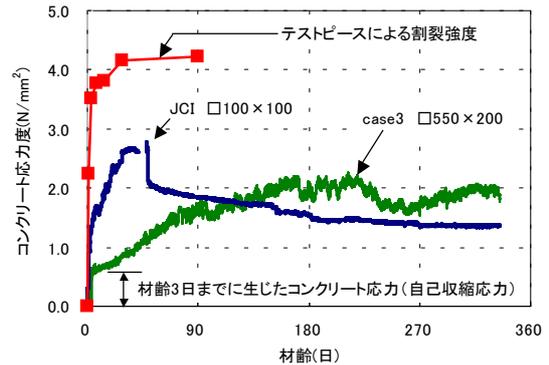


図-18 JCI 自己収縮試験と case3 の比較

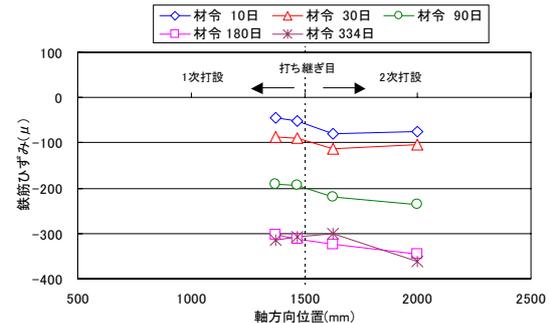


図-19 鉄筋ひずみ分布(case1)

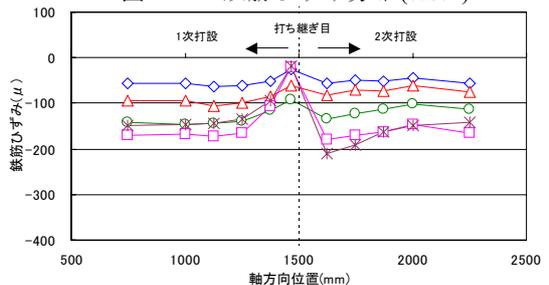


図-20 鉄筋ひずみ分布(case2)

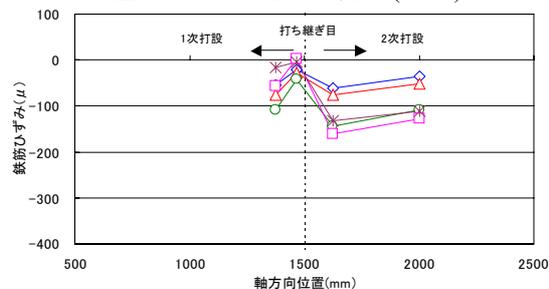


図-21 鉄筋ひずみ分布(case3)

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：コンクリートの自己収縮研究委員会報告書， pp.58-60， 2002.9
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書 [構造的な性能照査編]， pp.30-33， 2002.3
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書 (I 共通編・III コンクリート橋編)・同解説， pp.32-36， 2002.3
- 4) 土木学会：コンクリート標準示方書 [施工編]， pp.52-53， 2002.3
- 5) 閑田 徹志：ひび割れ発生条件， コンクリート工学， Vol.43, No.5, pp.60-65， 2005.5