

鉄筋が乾燥収縮を拘束することによって生じる初期ひび割れに関する基礎的研究

三井住友建設(株)	技術研究所	正会員	工修	○玉置	一清
同上		正会員	工修		三加 崇
同上		正会員			浅井 洋
同上		正会員	博(工)		藤田 学

1. まえがき

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)に達しときに生じる。実構造物の設計計算においては、外的な拘束に起因するこの種の引張応力については、FEM等により、ある程度詳細な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が収縮を拘束する影響については、その評価手法は未だ明確であるとは言いがたい。従来のPC部材で配置されるような少量な鉄筋量であれば、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、鉄筋量が密であるPRC部材では、配置鉄筋がコンクリートの収縮を拘束することにより見かけ上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、その反面、一見すると何も外部拘束を受けていない部材内に大きな引張応力が蓄積されることになる。ひび割れを許容するPRC部材では、ひび割れの発生時期または発生確率、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、これらの評価手法の確立が重要になるものと考えられる。

本報告は、鉄筋比をパラメータとした実物大床版模型を、外部からの拘束が無い状態で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ものである。また、収縮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

2.1 供試体概要

図-1に、供試体断面図および鉄筋配置を示す。供試体長さは、十分な鉄筋付着長を確保するため長さ1500mmとした。供試体は、一般的なPC箱桁の厚さ200mmの下床版から一部(幅550mm)を切り出したと想定したものであり、両側面にはシールを施し、乾燥は上下面からのみとしている。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%としたもの、case2が現行のPRC部材を想定して鉄筋径D25で鉄筋比4.6%を配置したものである。case3は比較用として鉄筋を過剰配置したものであるが、図-2に示すJCI自己収縮応力試験供試体とほぼ同じ鉄筋比7.2%である。

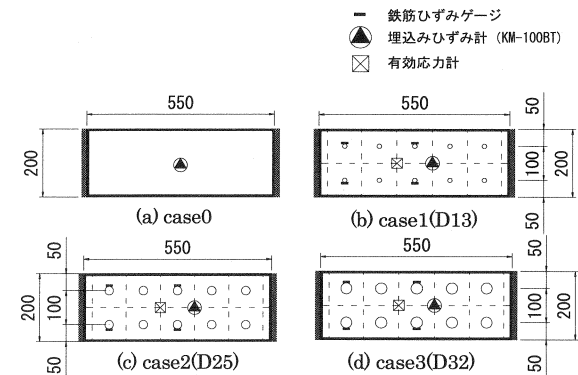


図-1 供試体断面図

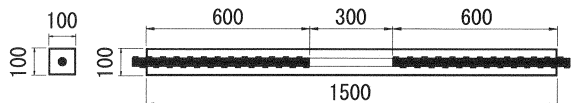


図-2 JCI 自己収縮応力試験

本実験では、打継ぎ目の影響を把握する目的で、1500mmの供試体作成後、小口を入念にチップング処理を施し、1週間の材齢差で、さらに1500mmの試験体を打継ぎ全長3mの試験体としている。打継ぎ目の影響については、現在データを整理中であり、別の機会に報告する所存である。

2.2 コンクリートの配合および品質

表-1 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、設計基準強度を 40N/mm² とし、早強セメントを使用している。図-3 に、テストピースによる強度試験及びヤング係数試験結果を示す。試験材齢は、1, 3, 7, 14, 28, 90 日である。

表-1 コンクリートの示方配合

W/C	S/a	スランプ	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

2.3 暴露環境

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¹⁾が見られるが、これを含めると検討要因が複雑となりすぎることから、今回の試験では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-4 及び 5 に、供試体周辺(栃木県河内郡)で観測した気温、湿度を示す。試験期間中の平均気温は 17.8℃、平均湿度は 69.8% であり、設計計算で一般的に想定されているものとほぼ同程度の環境であった。部材中心部で測定したコンクリート温度を図-4 に併せて示す。鉄筋の上下段位置でも温度を測定したが、部材厚が小さいため、水和発熱時を含め断面内に温度差はほとんど生じておらず、温度応力の影響はほぼ無視できるものとする。

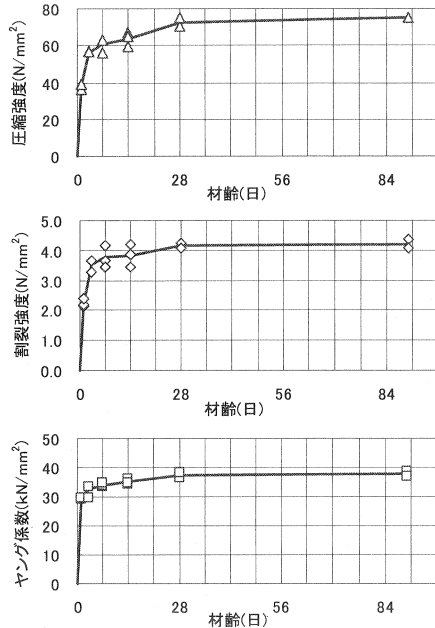


図-3 テストピースによる品質試験

2.4 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は、熱伝導率の相違により、日気温変化などの短期間の温度上昇下降時に対して温度差が生じ、一時的に深刻なコンクリート応力となり得る。しかし、コンクリート内部に配置された鉄筋は、ほとんど時間差無しにコンクリートと同温度になるため、温度変化による線膨張ひずみは、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、本報告におけるコンクリートひずみ計測値 ϵ_t 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(2.1)として示すものとする。

$$\epsilon_t = \epsilon_i + (C_b - \alpha) \times \Delta t_i \quad \text{式(2.1)}$$

ここに、 ϵ_i : 測定ひずみ

C_b : 計器の温度補正係数 (線膨張係数)

α : コンクリートの線膨張係数

Δt_i : 温度変化量

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。

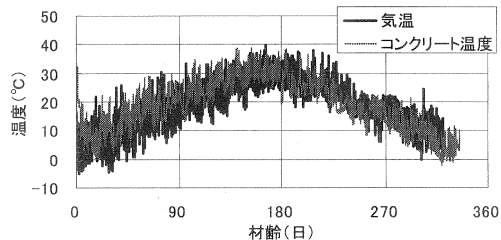


図-4 気温及びコンクリート温度

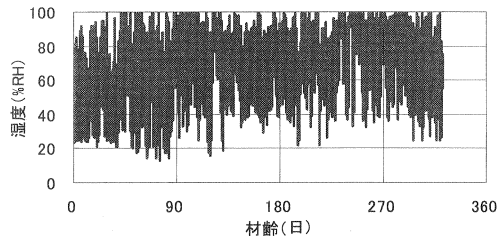


図-5 暴露環境における湿度

3. 提案式と実験結果による検証

3.1 無筋コンクリートの収縮ひずみ ϵ_{cs}

図-6に, case0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]に示される収縮予測式(解3.2.3式) (以下, コン示式)を示す。予測式の算定においては, 湿度は観測期間の平均湿度70%で一定として用いたが, 温度変化に関してはコンクリート温度実測値を一日平均して, 有効材齢を考慮している。

コン示式は, 乾燥開始材時(本実験では材齢3日)からの収縮ひずみを表しているが, 打込み24時間の時点で既に自己収縮と考えられる収縮ひずみが115 μ 生じている。そこで, コン示式に自己収縮ひずみ115 μ を足し合わせて比較すると, 1年後では収縮ひずみ値は予測値とよく一致する結果となったが, その経時履歴まで完全に整合するものではない。しかしながら, 現場環境下においては湿度の設定などに難はあるが, この結果を見る限り, 無筋コンクリートの収縮ひずみは, コン示式により, ある程度の精度で予測可能であるものと考えられる。参考までに, 道路橋示方書に示されるRush式を併せて示す。無筋コンクリートの収縮ひずみ予測には, 適用が困難と思われる。

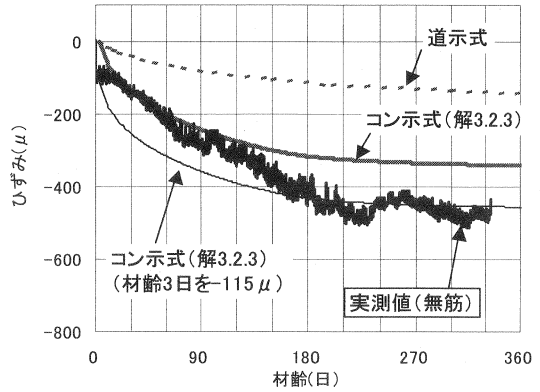


図-6 case0 (無筋コンクリート) の収縮ひずみ

3.2 鉄筋コンクリートの収縮ひずみ $\epsilon_{cs,s}$

鉄筋コンクリートでは, コンクリート内に配置された鉄筋の拘束作用によって自由収縮ひずみ (=無筋コンクリートの収縮ひずみ) は低減され, 同時に鉄筋には圧縮ひずみが生じる。この時, 鉄筋には圧縮力が生じ, この反力としてコンクリートには引張力が作用する。この鉄筋圧縮力とコンクリートに蓄積される引張力が釣合うという条件から式(3.1)が成立する。右辺が鉄筋に生じる圧縮力で, 左辺がコンクリートに生じる引張力であり, 時間ごとに変化するヤング係数とクリープを考慮しなければならない。

$$\int_0^t \frac{E_c(t)}{1+\phi(t)} \{ \epsilon_{cs}(t) - \epsilon_{cs,s}(t) \} dt \cdot A_c = E_s \cdot \epsilon_s(t) \cdot \sum A_s \quad \text{式 (3.1)}$$

- ここで, $E_c(t)$: 材齢 t 日におけるコンクリートのヤング係数
- $\phi(t)$: 材齢 t 日におけるコンクリートのクリープ係数
- $\epsilon_{cs}(t)$: 無筋コンクリートの収縮ひずみ
- $\epsilon_{cs,s}(t)$: 鉄筋コンクリートの収縮ひずみ
- $\epsilon_s(t)$: 鉄筋ひずみの平均値
- A_c : コンクリートの断面積
- E_s : 鉄筋のヤング係数, $\sum A_s$: 鉄筋の断面積合計

ここで, 鉄筋とコンクリートの付着が完全であると仮定し, コンクリートひずみ $\epsilon_{cs,s}(t)$ と鉄筋ひずみ $\epsilon_s(t)$ が等しいものとして, 式(3.1)を展開すると, 鉄筋コンクリートの収縮ひずみは式(3.2)として求まる。

$$\epsilon_{cs,s}(t) = \frac{\epsilon_{cs}(t)}{1 + \int \frac{E_s}{E_c(t)} \cdot (1+\phi(t)) dt \cdot \rho_s} \quad \text{式 (3.2)}$$

ここで, ρ_s : 鉄筋比 = $\sum A_s / A_c$

式(3.2)を求める場合、打ち込み直後において劇的に変化するヤング係数とクリープ係数の設定が問題となるが、乾燥開始材齢である材齢3日以後に関しては、図-3からも明らかなようにヤング係数 $E_c(t)$ は一定として取扱うことができる。また、クリープ係数 $\phi(t)$ に関しては、PCの設計で一般的に用いられている平均クリープ係数の考え方を導入すると、材齢3日以降に生じる鉄筋コンクリートの収縮ひずみは、無筋コンクリートの収縮ひずみ予測式と鉄筋比の関数として、式(3.3)から容易に求めることができる。

$$\varepsilon_{cs,s}(t-t_0) = \frac{\varepsilon_{cs}(t-t_0)}{1+n \cdot (1+\phi_c) \cdot \rho_s} \quad \text{式(3.3)}$$

ここで、 t_0 : 乾燥収縮開始材齢、 $n=E_s/E_c$: 材齢3日以降におけるヤング係数比
 ϕ_c : 乾燥開始材齢以後の平均クリープ係数

図-7に、鉄筋比を変化させた場合のコンクリート収縮ひずみを、部材中心部に配置したコンクリート埋込みひずみ計(KM-100BT)で計測した結果を示す。図-7は、打ち込み6時間後からの全収縮ひずみを示している。

図-8は、図-7から材齢3日までの自己収縮ひずみを控除した乾燥収縮ひずみ量と、式(3.3)を比較したものである。材齢3日以後の平均クリープ係数としてコンシ表3.2.3を参考に $\phi=2.7$ として式(3.3)で計算した場合、鉄筋コンクリートの収縮ひずみ予測値は、材齢335日における鉄筋コンクリートの収縮ひずみ実測値と比較するとほぼ一致する結果となった。しかし、式(3.3)の精度は、無筋コンクリートの収縮(ε_{cs})予測式の精度に依存するため、その予測が十分にされていない材齢180日以降(図-6参照)では2倍近い誤差が生じている。図-9に、無筋コンクリートの収縮ひずみに対する鉄筋コンクリートの収縮ひずみの低減率と鉄筋比の関係を示す。計算値と実測値はいずれの材齢においてもほぼ一致しており、鉄筋拘束による収縮ひずみの低減率については、本式の妥当性が確認できたものとする。ここで、鉄筋拘束による収縮ひずみの低減は、部材外部からの拘束に対しては有利な設計が可能となるが、この時、次項で示すコンクリート内部に蓄積される引張応力を考慮しなければならないことに注意が必要である。

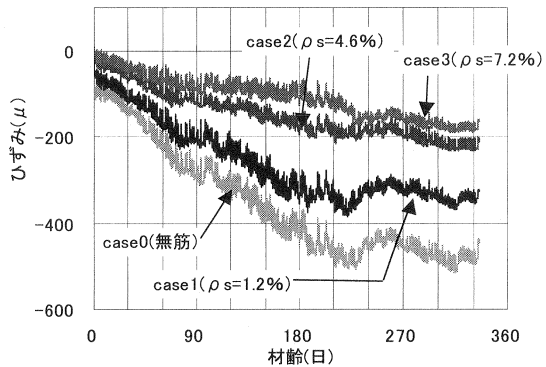


図-7 鉄筋コンクリートの収縮ひずみ

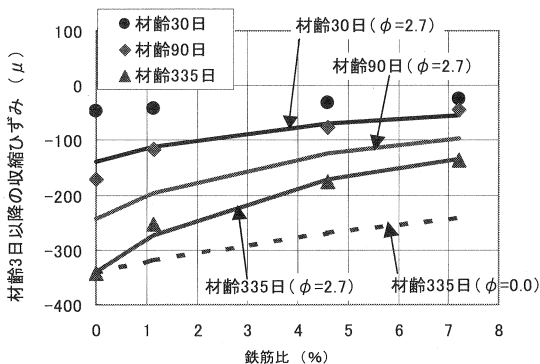


図-8 材齢3日以後の収縮ひずみと鉄筋比の関係

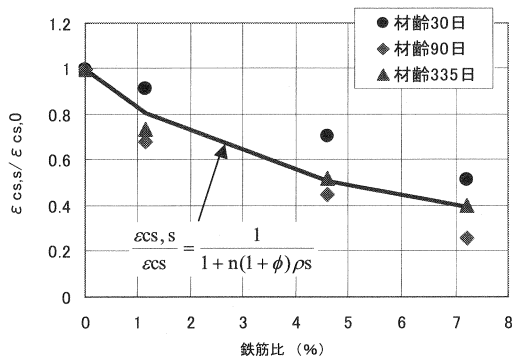


図-9 $\varepsilon_{cs,s}/\varepsilon_{cs,0}$ と鉄筋比の関係

3.3 鉄筋拘束によりコンクリートに生じる引張応力

材齢3日以降に生じるコンクリートの乾燥収縮を鉄筋が拘束することによって、コンクリートに蓄積される引張応力は、式(3.3)を用いて式(3.4)として予測することができる。

$$\sigma_{cs,s}(t-t_0) = \frac{E_c}{1+\phi_c} \{ \varepsilon_{cs}(t-t_0) - \varepsilon_{cs,s}(t-t_0) \} = \frac{E_s \cdot \varepsilon_s(t-t_0) \cdot \rho_s}{1+n(1+\phi_c) \cdot \rho_s} \quad \text{式(3.4)}$$

式(3.4)を検証するため、鉄筋拘束によって蓄積されるコンクリート応力を計測する方法として、有効力計の配置を検討したが、試験体内の配置スペースの問題や、器械固有の誤差の補正など、十分な検証をするに至らなかった。ここでは、鉄筋ひずみ ε_s を測定することによって、クリープ係数の仮定を用いずに、式(3.1)の右辺を A_c で除した、式(3.5)によりコンクリート応力値を求める方法を用いた。

$$\sigma_{cs,s}(t-t_0) = E_s \cdot \varepsilon_s(t-t_0) \cdot \sum A_s / A_c = E_s \cdot \varepsilon_s(t-t_0) \cdot \rho_s \quad \text{式(3.5)}$$

図-10に、式(3.4)によるコンクリート応力計算値と、式(3.5)による鉄筋ひずみ実測値から算定したコンクリート応力値の比較を示す。 ε_{cs} の予測誤差により、両者に相違が生じているが、材齢とともに、コンクリート内部に引張応力が蓄積される傾向は、定性的、定量的に概ね評価できている。

式(3.4)は、乾燥収縮による初期ひび割れを検討するための一つの目安として有用であると考えられる。

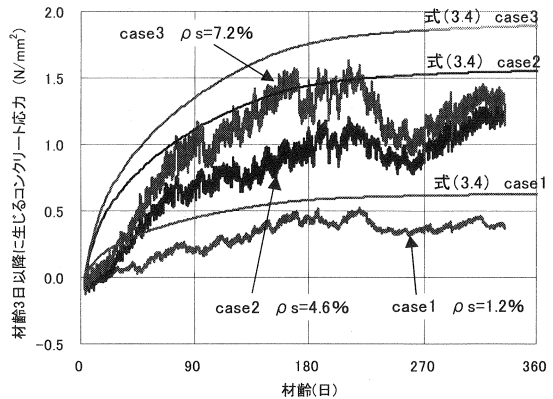


図-10 材齢とコンクリート引張応力の関係

3.4 収縮ひび割れの発生条件

本実験では、いずれの試験体においても試験期間中を通じて、目視ではひび割れの発生を確認することはできなかった。図-7より、部材の収縮度が、材齢220日付近から1ヶ月程度、膨張に転じている期間があり、その原因についてはデータを分析中であるが、図-10を見ると、この間のcase3の応力緩和が著しく生じている。このことに着目して、初期ひび割れの発生条件について若干の考察を行う。

図-11に、case3のコンクリート埋込みゲージおよび鉄筋ひずみゲージの履歴を示す。先に図-7に示したコンクリート埋込みゲージによる収縮量と、鉄筋ゲージによる圧縮ひずみ量は、case1, case2においては、試験全期間において仮定の通りほぼ一致した挙動を示しているが、case3のみが材齢220日付近から、鉄筋ひずみがとコンクリートひずみに相違が生じ始めている。鉄筋ひずみゲージは、上段下段に4枚配置しているが、全て同じ値であり、曲げの影響は否定される。つまり、コンクリートと鉄筋のひずみの連続性が成立しておらず、鉄筋の付着が阻害されたことを意味する。

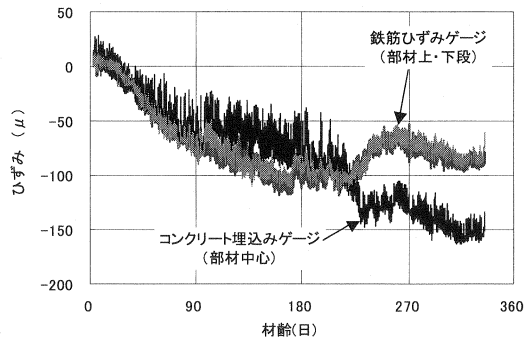


図-11 case3におけるひずみ履歴

図-12に引張軟化の概念図²⁾を示す。コンクリートの

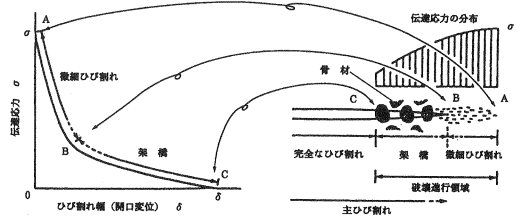


図-12 ひび割れの進展と引張軟化曲線²⁾

伝達応力は、A 点で可視不可能な微細ひび割れ発生から急激に応力軟化が生じ始め、B 点以降の架橋領域でひび割れとして検出されるものと考えられている。case3 は、緩やかな応力増加により、試験体全域が図-12 に示す A B 区間に相当する領域に留まっているものと考えことができ、この場合、case3 の A 点の応力は 1.5N/mm^2 に材齢 3 日までの自己収縮応力を加えたものと推察される。図-13 に、図-2 で示した JCI の自己収縮応力試験体を本試験体と同時に作成し、シーンを施さないで、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。ここでは、図-10 に示したものは異なり、打ち込み直後からの鉄筋ひずみ計測値を用いて、コンクリート応力を算定している。体積表面積の相違により、JCI 試験の方が収縮ひずみが卓越し、材齢 50 日ですら可視ひび割れが生じた。この時のコンクリート応力は、 2.6N/mm^2 で、テストピースによる割裂強度の 62% であった。一般に、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、引張強度の $40\sim 90\%$ の範囲で生じることが報告されている²⁾。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がたいのが現状である。

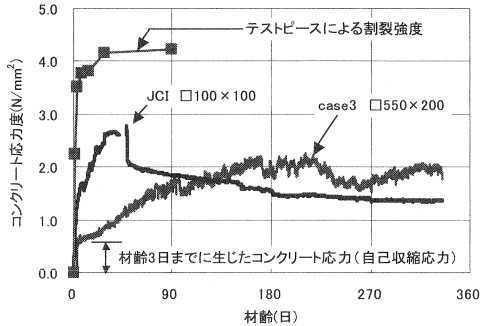


図-13 JCI 自己収縮試験と case3 の比較

3.5 鉄筋比と収縮ひび割れの関係

図-14 に、式 (3.4) により、材齢 3 日以後の乾燥収縮を鉄筋が拘束することによって生じる応力予測値を示す。算定条件は、単位水量 165kg/cm^3 、平均湿度 70% の場合である。初期ひび割れの発生予測を行うには、今回の提案に加え、材齢 3 日までに生じる自己収縮応力の定量化、収縮ひび割れの発生条件が今後の重要な課題ではあるが、ここでは既往の研究報告等から工学的に判断して、割裂強度の 60% を初期ひび割れ発生の境界と考えると、部材厚 200mm では鉄筋比 4% 、部材厚 300mm では鉄筋比 8% 以上配置すると要注意と考えられる。

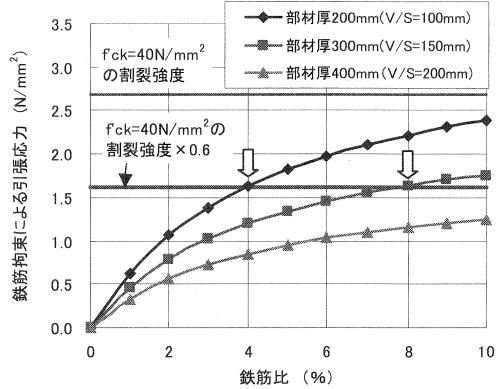


図-14 材齢 3 日以降の乾燥収縮を鉄筋が拘束することによるコンクリート応力と鉄筋比の関係

4. まとめ

- 1) 鉄筋コンクリートの収縮ひずみは、無筋コンクリートの収縮ひずみ予測式 (コン示 解 3.2.3 式) と鉄筋比をパラメータとした本提案式 (3.3) を用いて精度よく求めることができる。
- 2) 鉄筋拘束による収縮ひずみの低減は、部材外部の拘束条件に対しては有利に設計することが可能であるが、この時、式 (3.4) に示す鉄筋拘束によって部材内部に蓄積されるコンクリート引張応力を考慮しなければならない。

5. 参考文献

- 1) 例えば、師山ら：長支間場所打ち PC 床版実物大試験体のひび割れに対する日照変化の影響に関する解析的検討，土木学会第 58 回年次講演，2003
- 2) 関田：ひび割れ発生条件，コンクリート工学，Vol.43, No.5，2005.