

論文 引張拘束力を受ける若材齢コンクリートの特性

楊恩翼*1・小松勇二郎*2・近藤吾郎*3・森田司郎*4

要旨：本研究は、水和反応の初期から始動する乾燥収縮の拘束によって発生する拘束応力の発達を実験的に調査し、拘束応力の定量化とひび割れ発生メカニズムの明確化を目的としている。拘束応力を受けながら硬化する高強度コンクリートのひび割れ強度等、拘束応力がコンクリート特性に及ぼす影響について検討した結果、持続引張拘束応力を受けるコンクリート部材では、その時の引張強度より低い引張応力でひび割れが生じること、高強度コンクリートの持つ高い引張強度は、拘束条件下では構造性能として発揮されない場合が多いことなどが明らかになった。

キーワード：拘束応力、高強度コンクリート、ひび割れ、引張強度、乾燥収縮歪、クリープ

1. はじめに

高強度コンクリート部材では、水和発熱の冷却による温度収縮および乾燥収縮の拘束によって生じる引張応力によって、しばしば初期材齢にひび割れの発生が見られる。コンクリート部材のひび割れは、コンクリート材齢にともなう発熱や収縮の時間的経過、コンクリートの引張弾性係数、変動応力下のクリープ、引張強度の発達、外部からの拘束度の均衡によって、その成否が決まる。引張強度が高くて、それに従って弾性係数が早期に上昇すれば、拘束応力も若材齢で発達し、引張強度を上回る可能性を増す。しかも、初期材齢から拘束引張応力を受けながら硬化が進行して行くコンクリートでは、拘束を受けない状態で硬化したコンクリートに比べて、その引張強度が低下する可能性を示す実験的、経験的事実が散見される。

一般に構造物の構造性能は、上述のような拘束応力を受けていない状態でのコンクリートの物性に基いて評価されている。しかしながら、実際には不可避の拘束引張力を受けて、ひび割れが発生しているか、またはひび割れが発生していなくても無拘束のコンクリートの引張強度よりはかなり低下した引張強度を持つコンクリート部材に変化していることになる。即ち、高強度コンクリートの持つ高い引張強度は、部材の構造性能として利用できない可能性があることを示している。

本研究では、水和反応の初期から始動する乾燥収縮の拘束によって発生する拘束応力の発達を実験的に調査し、拘束応力の定量化と、ひび割れ発生メカニズムの明確化を可能とする解析的方法の開発を目的としている。また、拘束応力を受けながら硬化したコンクリートの引張強度の定量化をすることも目的の中に含まれている。

2. 実験計画

2.1 実験方法

*1 京都大学大学院 工学研究科環境地球工学専攻、工修（正会員）

*2 京都大学技官 工学部建築学第二学科（正会員）

*3 京都大学助手 工学部建築学第二学科、工修（正会員）

*4 京都大学教授 工学部建築学第二学科、工博（正会員）

本研究では、コンクリート部材における乾燥収縮による拘束応力の影響を調査するために、一軸拘束試験を行った。拘束程度は高拘束(H)、低拘束(L)および無拘束(N)の場合に分けて行った。拘束鋼材は、高拘束の場合には溝形鋼(L75・40、断面積:881.8mm²)を、低拘束の場合には軽溝形鋼(L60・30・1.6、断面積:258.6mm²)を用いた。図1は低拘束試験体の詳細を示したものである。図1に示したコンクリート供試体の中央部分の長さ12cm区間の断面は5×5cmである。図1の緊結鋼棒の位置はコンクリート供試体について中心軸上、拘束鋼材にとっては偏心位置になっている。この偏心によって生じる曲げ拘束力は図2のように2つの供試体を連結させることによって除去した。

コンクリート試験体の拘束鋼材への固定は、鋼棒(φ10mmのネジ鉄筋)を両端に3本ずつ入れて緊結し、さらに拘束鋼材とコンクリートが接触する鋼材面にはVカットを設けて固定度を高める方法を取った。

コンクリートの乾燥収縮歪はコンタクトゲージで、拘束鋼材歪は電気抵抗線歪ゲージで測定した。拘束試験中にひび割れが生じてない供試体を適当な間隔の5材齢で選び、拘束を解放した後、静的引張載荷実験を行った。

純引張試験は、鋼線ネットで作られた筒状網の一方を供試体両端の拡大部に被せて、他の一方を引張るという方法で行った。曲げ試験は純引張実験で破断した供試体の中で、平行部が8cm以上確保できる供試体を選び、スパンの長さの半分以上が平行部に入るようにして3点載荷曲げ実験を行った。曲げ実験のスパン長は12cmで、試験体の下面が打設時の下面になるようにした。

2.2 コンクリート調合および拘束実験用供試体の数

本実験で用いたコンクリートはW/C=30%の高強度コンクリートで、その調合を表1に示す。拘束実験用供試体は各拘束条件および予定材齢に対して2つずつ、合計30個を作製した。そして、各材齢の圧縮強度および割裂引張強度を求めるためにφ10×20cmのシリンダーを各条件につき3本ずつ、合計30個を用意した。

2.3 脱型および養生

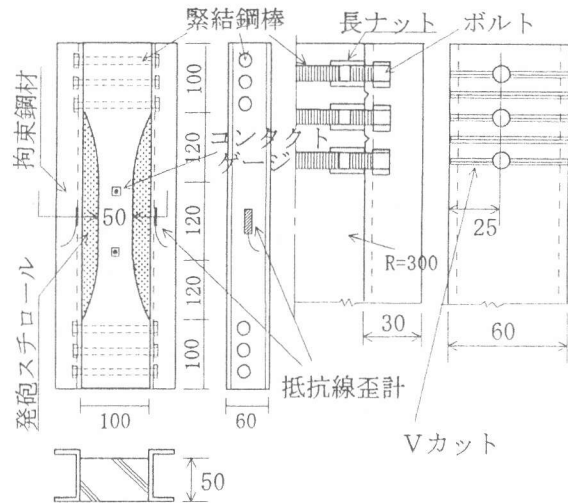
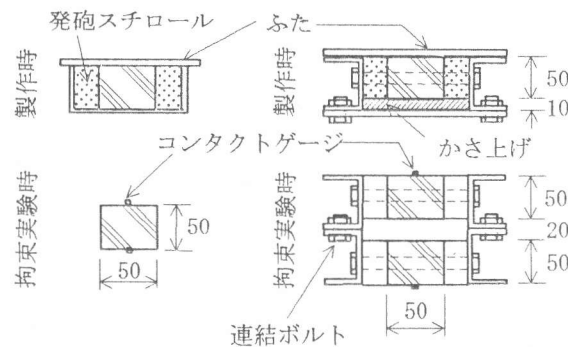


図1 L拘束試験装置と供試体の形状



(a) 無拘束の場合 (b) 拘束のある場合

図2 L拘束の製作時および拘束実験時の供試体(中央断面位置)

表1 コンクリート調合

W/C (%)	s/a (%)	W	C	S	G	Ad* (%)
		(kg/m ³)				
30	48	180	600	762	826	1.2

* 高性能減水混和剤(セメントに対する質量比)

供試体は、凝結前に打設面をタッピングし、直ちに乾燥防止のためビニルシートで被せて気中封かん養生を行った。脱型は打設後2日目で行い、上下面の型枠、および側面の発砲スチロールを取り除いた。脱型後は温度20℃、湿度40%の恒温恒湿室で養生した。

2. 4 拘束鋼材に生じる歪変化と拘束力の関係

拘束試験中に拘束鋼材の中心部で測定した歪量と拘束力との関係は、次のようなキャリブレーション実験を行って求めた。即ち、拘束試験時と同じ状態でコンクリート供試体の中央部のみがない状態でセットし、コンクリートの両端部に圧縮力を試験機で加えるキャリブレーション試験を行った。

3. 実験結果

3. 1 拘束実験下の拘束歪

コンクリートの収縮変形を拘束することによって拘束鋼材に生じる歪量を抵抗線歪計で測定した結果を図3に示す。図3の材齢の原点はコンタクトゲージの測定が始まった時刻を取ったものでコンクリートの材齢とは2.5日の差がある。図3のように拘束鋼材に生じる歪は鋼材の剛性が大きくなるほど小さくなる。

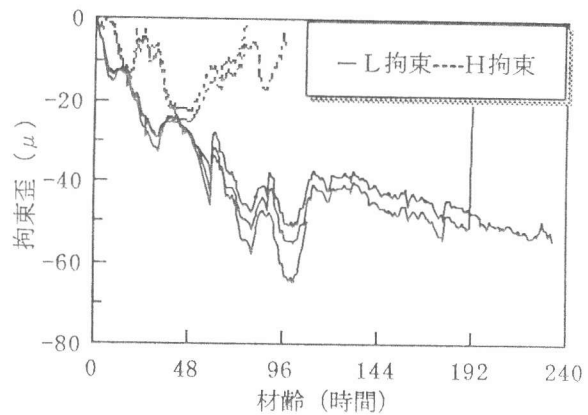


図3 拘束鋼材に生じた拘束歪

3. 2 拘束解放時に瞬間的に生じる歪

所定の材齢でひび割れが生じてない供試体を選び、拘束を静的に解放する実験を行い、歪の変化を測定した結果を表2に示す。H拘束の場合は材齢5日前にすでにひび割れが入っていたため、測定を省略した。表2の拘束鋼材の歪測定結果によると、拘束歪の測定開始前に拘束歪が生じたことがわかる。この拘束解放時の歪量は測定開始までの乾燥収縮と自己収縮による拘束歪が含まれた値である。拘束鋼材の解放歪⑤と拘束歪④との差から、測定開始時まで生じている拘束力が求められる。この測定開始までの拘束力によって生じるコンクリートの歪をクリープを無視して、拘束解放時の弾

性係数を用いて計算すると約72μとなる。これを拘束歪実験値①に加えて求めたものが修正拘束歪②である。修正拘束歪②と解放歪③との差がクリープ歪であり、材齢とともに増加することがわかる。

表2 拘束の解放による歪の瞬間的変化量 (L拘束の場合)

材齢 (日)	供試体 番号	コンクリート			拘束鋼材		
		①拘束歪	②修正拘束歪	③解放歪	④拘束歪	⑤解放歪	⑤-④
5	1	31 μ	103 μ	83 μ	—	—	—
	2			73 μ	—	—	
7	1	45 μ	117 μ	83 μ	26 μ	76 μ	50 μ
	2			58 μ	42 μ	92 μ	
13	1	83 μ	155 μ	77 μ	36 μ	90 μ	54 μ
	2			84 μ	47 μ	101 μ	
29*	1	—	—	—	36 μ	102 μ	66 μ

(*) ペアになっている供試体にひび割れが生じ、一本の供試体のみで計算

3. 3 無拘束コンクリートの力学的特性値

φ10×20cmの供試体から求めたコンクリートの圧縮強度を表3に示す。純引張試験の応力-歪関係から得られた引張弾性係数を材令の関数として表現すると式(1)になる。また、無拘束試験

表3 コンクリート圧縮強度

材齢(日)	5	7	13	29
強度(kgf/cm ²)	476	505	534	577

体の純引張強度を材令関数として表現すると式(2)になった。温度20℃、湿度40%の恒温恒湿に置かれた無拘束試験体と軽溝形鋼拘束試験体の乾燥収縮歪をコンタクトゲージで測定した結果を図4に、その値を材令の関数として求めたものをそれぞれ式(3)と式(4)に示す。図4の乾燥収縮歪は測定開始前

に生じた歪量を補正したもので、補正分の歪は脱型時(材齢2日)から始まり歪測定開始時(材齢2.5日)まで生じたものと見直した。H拘束の場合は歪がほとんど生じなかつたので省略した。

$$E_t = \frac{t}{1.006 + 2.556t} \times 10^6 \text{ (kgf/cm}^2\text{)} \quad t: \text{材令(日)} \quad (1)$$

$$F_t = \frac{t}{0.035 + 0.018t} \text{ (kgf/cm}^2\text{)} \quad (2)$$

$$\epsilon_{sh} = \frac{-\sqrt{t-2}}{6.5 + 0.5\sqrt{t-2}} \times 10^3 \text{ (}\mu\text{)} \quad (3)$$

$$\epsilon_{sh} = \frac{-(t-2)}{14 + 2.8(t-2)} \times 10^3 \text{ (}\mu\text{)} \quad (4)$$

3.4 静的引張载荷試験

ここでは、コンクリートの収縮変形を拘束することによって生じる拘束応力を受けながら固まったコンクリートの物性値と、拘束を受けていないコンクリートの物性値とを比較した。拘束実験時に大半のH拘束の供試体には拘束ひび割れが生じたため、H拘束の供試体の場合は拘束応力によるコンクリート特性値の変化を求めることは不可能であった。

引張拘束力を受けることによって引張弾性係数および引張強度がどのように変化するかを本実験の範囲内で説明するため、図5のように拘束を受けていないコンクリートの物性値に対する拘束を受けたコンクリートの物性値の比率を求めた。図中のE_t、F_t、F_bはそれぞれ無拘束の場合の引張弾性係数、純引張強度および曲げ引張強度である。図5によると、引張弾性係数および純引張強度の場合は引張拘束状態に置かれた期間が増加するに従い、その比率が低下していることがわかる。しかしながら、曲げ引張強度の場合は拘束の影響が現れなかつた。引張拘束力によるコンクリート引張強度の低下の定量化についてはさらに研究する必要があると思われる。

3.5 拘束鋼材の歪から求めたコンクリート拘束応力の時間的变化

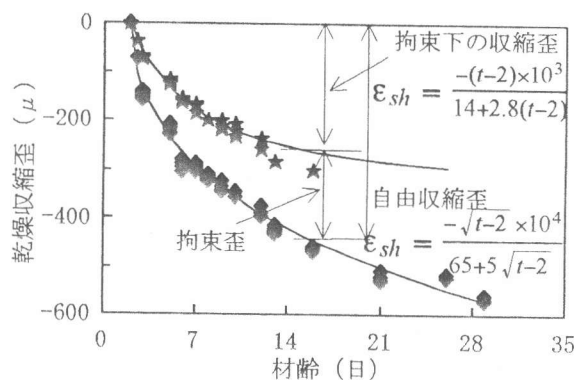


図4 乾燥収縮歪の変化

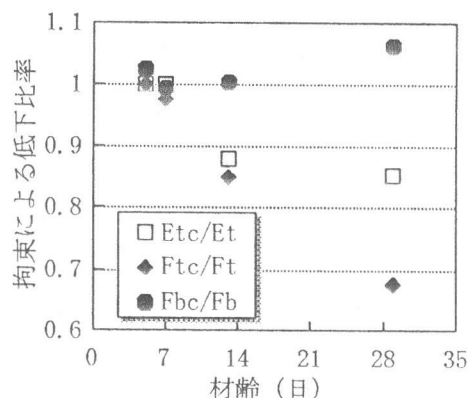


図5 拘束によるコンクリート物性値の変化(L拘束の場合)

コンクリートの打設からコンクリート供試体の静的載荷実験時まで、もしくは拘束供試体が拘束応力によってひび割れが発生する時までに測定されたコンクリート拘束応力の変化を図6に示す。図6のL拘束の場合において、材齢10日以後の実験結果の中で急に値が減少しているものは、ペアになっていた別の供試体にひび割れが入ったためである。この結果は、その時点まで受けていた拘束応力の大きさが引張強度の60%ぐらいであるにもかかわらず、ひび割れが生じたことを示している。

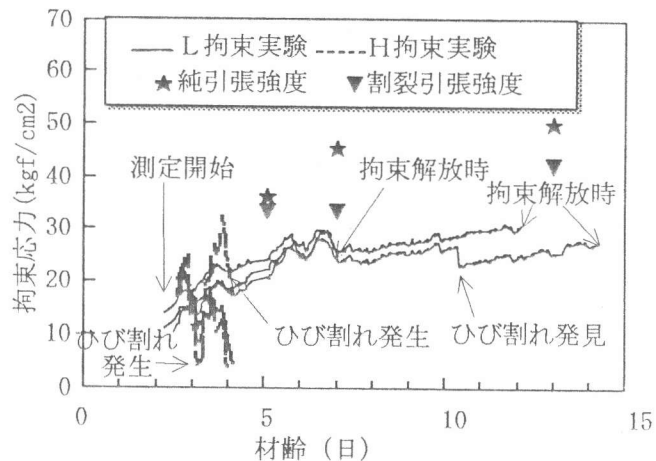


図6 拘束応力の変化

データも少なく明確な説明は出来ないが、原因としては持続拘束応力によるひび割れ強度の低下および供試体断面内の収縮歪分布の差異などが考えられる。このような現象は鈴木らの実験結果 [1] にも現れている。この現象についてはさらに研究する必要があると思われる。

H拘束の場合においては、クリープによる拘束応力緩和が生じる前に、拘束応力が増大して破断につながるようになった。拘束度が高い高強度コンクリート部材の場合にはコンクリートの初期剛性が大きいので、収縮によって生じる初期拘束応力も大きくなる。したがって、高強度コンクリート部材に対しては材齢数日前後における拘束応力について検討する必要があることを示唆している。

4. 本実験における拘束応力の解析

4.1 解析上の仮定

コンクリートのクリープ係数 ϕ_{ij} は供試体の場所および応力レベルに関係なく等しく、緊結鋼棒によりコンクリートに伝えられる拘束力は両端拡大部の中央点から与えられることにした。拘束鋼材の剛性 ($E_s A_s$) は 2.4 項で言及したように実験値を用いた。

4.2 解析方法

本解析では、材齢と共に発達する変動拘束応力下でのクリープ、供試体の変断面による一様でない応力、コンクリートの材齢に伴う物性値の変化を考慮するため、微小時間区分内で定応力を受けるコンクリートを連続的に結んで逐次計算する方法を用いた。その時、供試体全長の変位の釣り合いが成立するように、コンクリートと拘束鋼材との変位適合方程式から拘束応力を求めた。

クリープ係数としては、CEB(1968)が提案したクリープ係数を近似した近似式 [2] および阪田が提案したクリープ関数 [3] を使ったクリープ係数を用いた。

4.3 解析結果と実験結果との比較

収縮拘束実験で求められたコンクリートの拘束応力と解析で求めた値とを比較した結果を図7に示した。解析結果でクリープ係数のモデル式による差異は微小であったので、CEBモデルの近似式を用いた結果のみを示している。図7のL拘束の場合によると、初期材齢では実験結果より解析結果が多少低い値を、材齢が進むことに従って解析結果が大きい値を示している。これは引張応力レベルにかかわらず同じクリープ係数を用いたためだと思われる。しかし、拘束応力の傾向

について見れば、解析結果が実験結果をうまく再現しているといえる。H拘束の場合には材齢5日になる前にすでにひび割れが入ったため比較できるデータは少ないが、H鋼材で拘束した供試体に早期にひび割れが入ったことが当然だったことを明らかにしている。即ち、クリープによる応力緩和が生じる前に拘束応力が引張強度を越えていることを明確に示している。

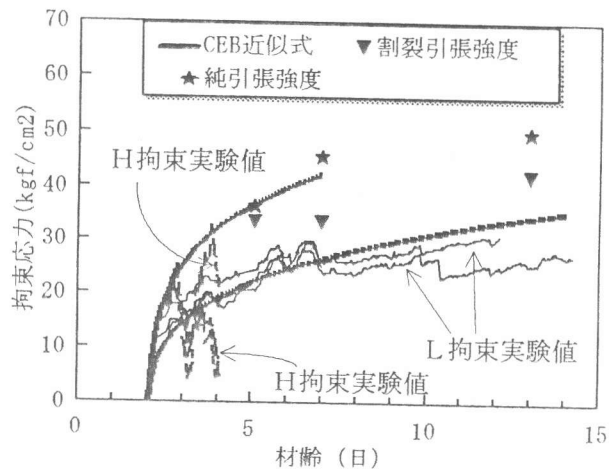


図7 拘束応力の解析値と実験値との比較

5. まとめ

本研究の範囲内での結果をまとめると次のようである。

と次のようである。

1) 高強度コンクリートは初期硬化が速く乾燥収縮歪の進展は普通コンクリートとあまり変わらないため、初期材齢で受ける引張拘束応力は普通コンクリートより大きい。

2) 引張拘束応力の発達の時間的経過は材齢に伴うコンクリートクリープ歪の進行速度によって緩和される。

3) 高強度コンクリートの持つ高い引張強度は、拘束条件下では構造性能として発揮されない場合が多い。

4) 持続引張拘束応力を受けるコンクリート部材では、引張強度より低い引張応力でひび割れが生じる。この原因としては、持続引張力によるひび割れ強度の低下および供試体断面内の不等収縮歪による自己拘束の影響などが考えられる。これらの要因の個々の影響度については研究を続ける必要があると思われる。

5) 断面寸法にかかわらず、また応力にかかわらず同じクリープ係数を用いて拘束応力を解析した場合、拘束応力は初期材齢では実験値より低く、材齢が進むに従って高く評価する傾向はあるが、全過程において引張拘束応力の発達をうまく再現した。

〈謝辞〉

本研究の一部は、第一筆者が受けた公益信託岸谷国際建築材料防火技術研究基金の補助によるものであることを付記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 鈴木計夫・大野義照・三浦義礼：コンクリートの一軸拘束ひびわれ試験と壁試験体の収縮拘束ひびわれ性状、第10回コンクリート工学年次論文報告集、pp. 261-266、1988
- 2) Neville, A.M.: Creep of Concrete-Plain, Reinforced and Prestressed, Amsterdam, North-Holland Publishing Co., 622pp., 1970
- 3) 阪田憲次：コンクリートの乾燥収縮およびクリープの予測、コンクリート工学、Vol. 31、No. 2、pp. 5-14、1993