

論文 乾燥収縮ひび割れ発生時の引張伸び能力に関する実験的研究

大野俊夫*1・魚本健人*2

要旨: コンクリートにひび割れが発生する際のひずみや応力を明らかにすることを目的として、水セメント比、乾燥開始材齢、拘束度を実験要因に取り上げ、軽量溝形鋼を拘束体とする拘束ひび割れ試験を実施した。その結果、水セメント比が小さいほど、拘束度が大きいほど、湿潤養生期間が非常に短い場合、乾燥後ひび割れが早く発生することが分かった。また、引張伸び能力や収縮応力はひび割れ発生材齢と相関性があり、引張伸び能力や収縮応力によってひび割れが発生する時期を推定できることを示した。

キーワード: 引張伸び能力、乾燥収縮、ひび割れ、拘束ひび割れ試験、収縮応力

1. はじめに

コンクリートはひび割れが発生しやすい材料であり、これまで多くの研究者によってひび割れに関する様々な研究がなされてきている。コンクリートのひび割れ発生を抑制することができるならば、耐久性の高い構造物を構築することができるとともに、より経済的な耐久性設計を行うことが可能となる。コンクリートにひび割れが発生するタイミングとしては、収縮応力がコンクリートの有する引張強度を超える、または引張ひずみが引張伸び能力を超えることが考えられる。しかしながら、ひび割れ発生時の収縮応力や引張伸び能力に関するデータは試験方法が標準化されていなかったこともあって少なく、また試験機関によるばらつきがあることから [1] [2]、確立されていないのが現状である。また、これまでの研究では養生中に受ける応力やひずみを考慮している例は少なく、その影響が無視できない水結合材比の小さいコンクリートでの課題になっている [3]。

本研究は、コンクリートにひび割れが発生する際のメカニズムを明らかにすることを目的に、ひび割れのうち収縮ひび割れに着目し、これに影響する要因として水セメント比、乾燥開始材齢、拘束度を取り上げ、軽量溝形鋼を拘束体とする拘束ひび割れ試験を実施し、ひび割れが発生する際の応力、ひずみなどから、各要因がひび割れ発生日数や引張伸び能力などに及ぼす影響を検討したものである。

2. 実験方法

2.1 実験要因

収縮ひび割れの発生に影響すると思われる要因として単位水量、水セメント比、粗骨材量などの配合条件、拘束の形態や拘束度、乾燥開始材齢、環境湿度、部材の形状・

表-1 実験条件の組合せ

No.	W/C (%)	乾燥開始材齢 (日)	拘束度
1	30	7	中
2	45		
3	60	1	
4		7	大
5			中
6			小
7		28	中

*1 鹿島建設(株) 技術研究所 第二研究部主任研究員(正会員)

*2 東京大学教授 生産技術研究所 第5部、工博(正会員)

寸法などが挙げられるが、ここでは表-1に示す水セメント比、拘束度、乾燥開始材齢を実験要因として取り上げ、これらを組み合わせた7種類により実験を行った。

2.2 配合

実験に使用したコンクリートは単位水量、単位粗骨材量を一定として配合設計したもので、その配合を表-2に示す。使用材料は、セメントは普通ポルトランドセメント（比重 3.15、比表面積 3,260cm²/g）、細骨材は富士川産川砂（比重 2.63、吸水率 2.01%、粗粒率 2.75）、粗骨材は両神産砂岩碎石（比重 2.70、最大寸法 20mm、吸水率 0.51%、粗粒率 6.66）である。混和剤は水セメント比 45%、60%ではオキシカルボン酸塩系の AE 減水剤、水セメント比 30%ではポリカルボン酸塩系の高性能 AE 減水剤とした。

2.3 試験項目

a. 拘束収縮試験：拘束試験体は「コンクリートの乾燥収縮ひび割れ試験方法」修正案 [4] に準拠し、図-1に示す形状・寸法とした。拘束板は JIS G 3350 の軽みぞ形鋼の厚さ 2.3（拘束度：中）、3.2mm（拘束度：大）のものを用い、また厚さ 2.3mm のウェブを幅 50mm 切取ったもの（拘束度：小）を用いた。拘束板の肉厚はマイクロメータ（精度 0.01mm）により測定し、断面積を算定した。なお、拘束板の断面積は、拘束度大が平均 10.19、中が 6.97、小が 4.96cm²であった。

拘束板のひずみは重心位置 4 点にひずみゲージを貼り、コンクリートの始発以後、試験体に貫通ひび割れが発生するまで 3 時間毎に自動計測した。コンクリートのひずみは乾燥開始時に表面にチップを中心部 500mm に検長 100mm で貼り、以後 1～2 日おきにコンタクトストレインゲージ（精度 0.001mm）により測定した。

b. 自由収縮試験：自由収縮試験体は図-1に示すように、拘束試験体と同一の形状・寸法の拘束板のないものとし、拘束試験体と同様に測定を行った。

c. 自己収縮試験：湿潤養生過程に受けるコンクリートのひずみを測定するため、日本コンクリート工学協会「自己収縮研究委員会報告」[5]に準拠し、100×100×400の試験体により材齢 24 時間後から乾燥開始までの自己収縮ひずみを、コンタクトストレインゲージ（精度 0.001mm、基長 300mm）で測定した。乾燥開始以後は自由収縮試験体と同様に乾燥条件下で乾燥収縮ひずみを測定した。

d. 強度試験：圧縮強度試験（φ 100×h200）、静弾性係数試験（φ 100×h200）、割裂引張強度試験（φ 150×h200）は乾燥開始材齢、拘束試験体の 1 体目、5 体目にひび割れが発生した際、材齢 28 日（引張試験を除く）に実施した。なお、水中養生のほか全ての試験体は拘束試験体等と同一の乾燥条件とした。

2.4 試験体の作製方法

各実験ケースにおけるコンクリートは水平強制練りミキサにより、100 リットルを 2 回連続して練混ぜ、混合した後フレッシュコンクリートに関する試験を行い、各種試験体を作製した。試

表-2 配合表

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
		W	C	S	G	混和剤
30	37.6	167	557	604	1030	C×0.5%
45	43.1		371	759		C×0.2%
60	45.5		278	837		C×0.2%

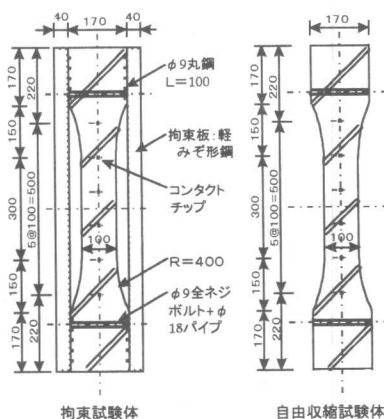


図-1 試験体の形状・寸法

表-3 物性試験結果

No.	フレッシュ			材齢28日(水中養生)	
	スランブ (cm)	空気量 (%)	練上り温 度(°C)	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 ($\times 10^4$ N/mm ²)
1	14.5	4.4	24.2	56.45	3.71
2	10.0	4.6	21.2	43.02	3.40
3	8.5	4.8	20.0	36.76	2.89
4	9.0	4.2	22.4	32.50	2.95
5	6.0	5.3	22.5	35.73	3.18
6	9.5	4.8	21.3	32.54	2.95
7	8.0	4.7	20.5	37.05	3.09

験体数は拘束試験体が5体である他は全て3体ずつとした。試験体作製後乾燥開始材齢までの期間むしろ+散水養生を行い、湿潤状態を保った。乾燥後の試験室の温度は全試験期間を通して $20.5 \pm 1.5^\circ\text{C}$ 、湿度は $62 \pm 5\text{R.H.}\%$ の範囲にあった。

3. 実験結果及び考察

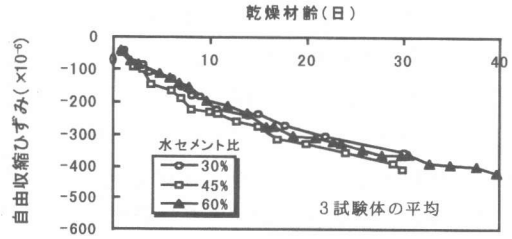
3.1 物性試験結果

表-3に各配合における物性試験の結果を、図-2に各要因ごとに整理した自由収縮ひずみの履歴を示す。図-2(a)より、水セメント比45%の自由収縮ひずみが30%、60%に比べて若干大きいことが分かり、(b)図より乾燥開始材齢が若いほど自由収縮ひずみが大きくなっていることが分かる。また、(c)図は同一配合のコンクリートで拘束度ごとに作製した場合であるが、ほぼ同様な自由収縮ひずみの履歴になっていることが分かる。

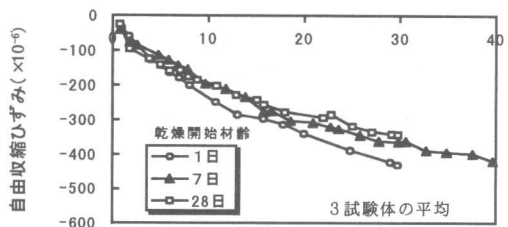
図-3に自由収縮試験体と同一乾燥条件下においた自己収縮試験後の収縮ひずみの一例を自由収縮ひずみと比較して示す。両者の収縮ひずみはほぼ同一履歴を示しており、試験体端部の形状の違いや基長500mmと300mmの違いは収縮ひずみに表われないという結果となった。この結果は既往の文献[6]と同様の結果であり、試験区間の断面形状が同一であれば、収縮ひずみが同じになると推察された。

3.2 ひび割れ発生日数

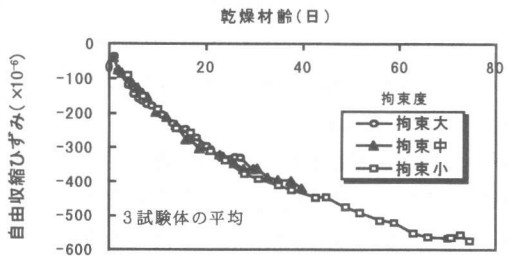
図-4に各実験ケースにおける乾燥開始から貫通ひび割れが確認された日時までのひび割れ発生日数を示す。5試験体のひび割れ発生日数の平均は水セメント比30、45、60% (実験No. 1,



(a) 水セメント比の影響



(b) 乾燥開始材齢の影響



(c) 拘束度ごとに作製した同一配合の場合

図-2 自由収縮ひずみの履歴

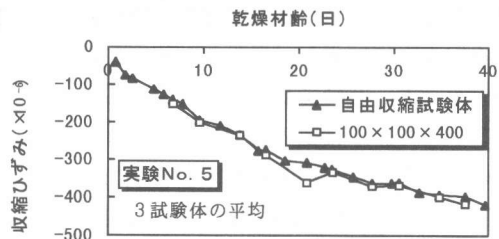


図-3 収縮ひずみの比較

2, 5) でそれぞれ 10.9、12.3、26.3 日であり、水セメント比が小さいほどひび割れが早く発生する傾向が見られる。乾燥開始材齢 1、7、28 日 (実験 No. 3, 5, 7) では平均 16.0、26.3、25.4 日であり、乾燥開始材齢 1 日ではひび割れが早く発生するものの、湿潤養生期間を 7 日程度以上とればひび割れ発生日数に差が生じなくなると考えられた。また、拘束度大、中、小 (実験 No. 4, 5, 6) の平均ひび割れ発生日数は 17.6、26.3、54.0 日であり、拘束度が大きいほどひび割れの発生が早くなっている。

3.3 引張伸び能力

図-5 に乾燥開始以後の拘束試験体の拘束収縮ひずみの経時変化の例を、図-6 に自由収縮ひずみから拘束収縮ひずみを引いた拘束引張ひずみの経時変化の例を示す。図-6 において、拘束引張ひずみが小さく、履歴曲線が下側に位置する方がひび割れが早く発生すると考えられるが、水セメント比 30% と 45% ではその関係が入れ替わっており、乾燥過程のみの収縮ひずみではひび割れ発生日数との関係を説明できないことが分かる。

図-7 に乾燥開始からひび割れ発生までのひび割れ発生日数とひび割れ発生直前の拘束引張ひずみ (引張伸び能力) の関係を示す。同図より、引張伸び能力はひび割れ発生日数の増加とともに増加し、ひび割れ発生日数が 10 日前後では引張伸び能力が 100×10^{-6} 程度であるが、60 日前後では 250×10^{-6} 程度に達することが分かり、実験要因の違いがひび割れ発生日数に影響するものの、引張伸び能力はひび割れ発生日数との関係で表せることを示している。また、同一試験法による既往の研究結果 [1] [2] に比べると、ひび割れ発生日数が 30 日以後の引張伸び能力の値

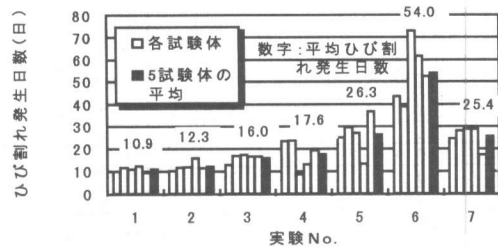


図-4 ひび割れ発生日数

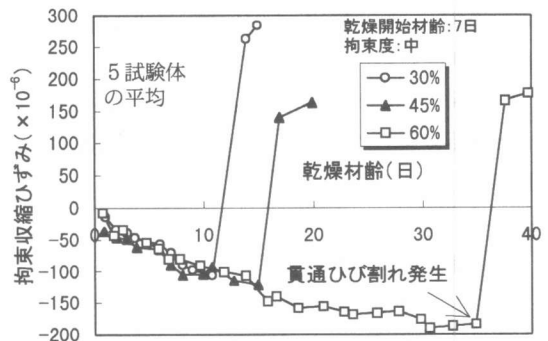


図-5 拘束収縮ひずみの経時変化

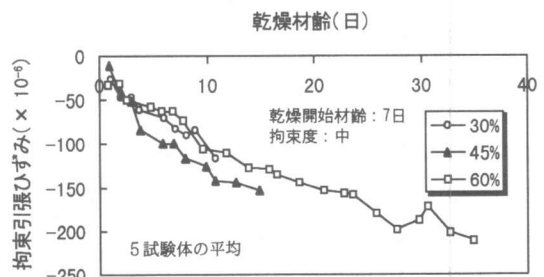


図-6 拘束引張ひずみの経時変化

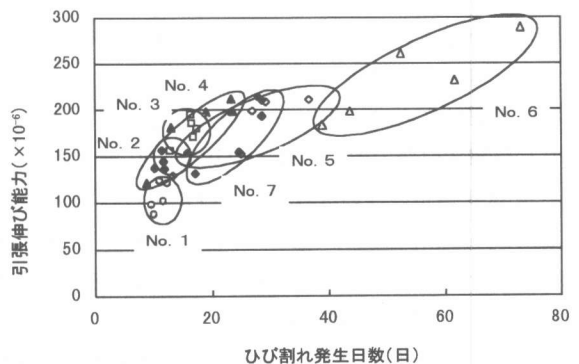


図-7 ひび割れ発生日数と引張伸び能力の関係

が $50 \sim 100 \times 10^{-6}$ 程度小さい傾向となっている。

図-8に湿潤養生中に受ける拘束引張ひずみを加算した引張伸び能力とひび割れ発生材齢との関係を示す。ここで、養生中の拘束引張ひずみは自己収縮ひずみに乾燥後の実拘束率（拘束引張ひずみ/自由収縮ひずみ）の平均値を乗じて算出したものである。なお、ここでは自由収縮試験体と自己収縮試験体の収縮ひずみは等しいと仮定し、湿潤養生中の拘束率は乾燥過程の拘束率と等しいと仮定している。

図-9に湿潤養生中に受けるひずみを加算した拘束引張ひずみの履歴を、図-8より得られた近似式と合せて示す。同(a)図から、水セメント比が小さいほど小さい拘束引張ひずみを示しており、履歴曲線が下側に位置する方がひび割れが早く発生する関係を説明できることが分かる。また、同様に同(b)図から湿潤養生日数が短いほど、同(c)図から拘束度が大きいほど拘束引張ひずみが小さく、早い材齢で引張伸び能力に達することが分かり、養生中に受けるひずみを考慮した引張伸び能力によってひび割れ発生の時期を判断できると考えられる。

3.4 収縮応力

ひび割れ発生直前にコンクリートに作用している収縮応力 (σ_c) は拘束板とコンクリートの平衡条件から、以下の式(1)により求めた。

$$\sigma_c = \varepsilon_s \times E_s \times A_s / A_c \quad (1)$$

ここに、 ε_s : 始発からひび割れ発生までの拘束板のひずみ

E_s : 拘束板の弾性係数

(205940 N/mm²)

A_s : 拘束板の断面積 (mm²)

A_c : コンクリート破断面の断面積 (mm²)

図-10にひび割れ発生材齢と引張強度比（収縮応力/引張強度）の関係を示す。なお、引張強度の試験結果を表-4に示す。

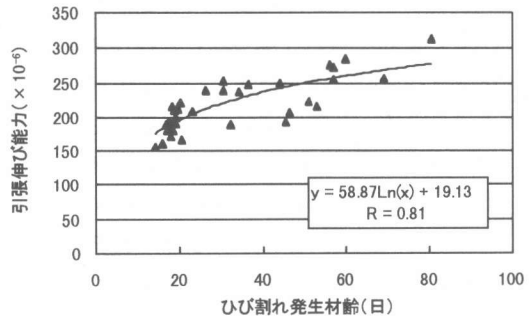
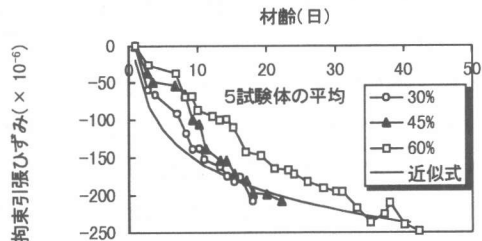
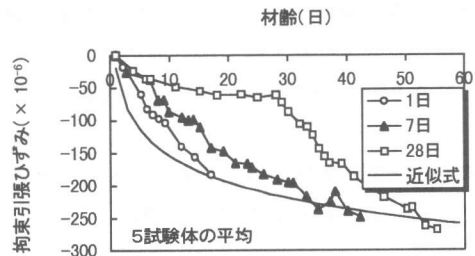


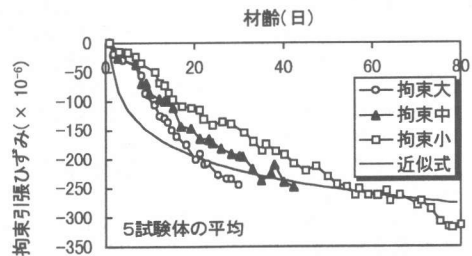
図-8 ひび割れ発生材齢と引張伸び能力の関係（湿潤養生中のひずみを考慮）



(a) 水セメント比



(b) 乾燥開始材齢



(c) 拘束度

図-9 拘束引張ひずみの履歴

同図から、ひび割れ発生材齢と引張強度比の間には相関性が認められ、ひび割れ発生材齢が 20 日程度では引張強度の約 50%でひび割れが発生するのに対し、80 日程度では 90%に近くなるとひび割れが発生しないことが分かる。既往の研究 [7] では、材齢に関わらず引張強度の 40~60%でひび割れが発生している例が多いが、今回の結果はこれらよりも若干大きい引張強度比であり、ひび割れ発生材齢により微増する傾向であった。

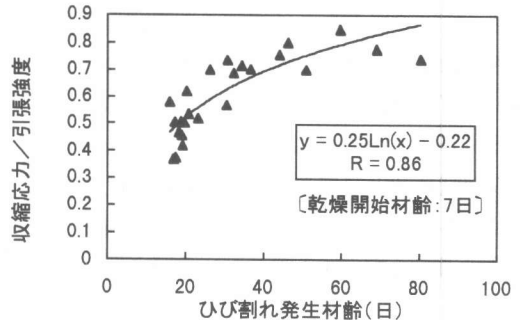


図-10 ひび割れ発生材齢と収縮応力／引張強度の関係

表-4 引張強度試験結果

No.	乾燥開始		ひび割れ発生開始		ひび割れ発生終了	
	材齢 (日)	引張強度 (N/mm ²)	材齢 (日)	引張強度 (N/mm ²)	材齢 (日)	引張強度 (N/mm ²)
1	7	4.10	17	4.27	20	4.19
2	7	2.78	18	3.08	24	3.06
3	1	0.70	14	1.85	18	1.67
4	7	2.39	16	2.39	32	2.49
5	7	2.31	21	2.59	45	2.95
6	7	2.31	47	2.60	81	3.15
7	28	2.84	46	3.15	57	3.16

4. まとめ

収縮ひび割れを対象とした拘束ひび割れ試験を通して得られた結論は以下のとおりである。

①乾燥収縮ひずみに湿潤養生中に受ける自己収縮ひずみを考慮することにより、水セメント比が小さいほど、拘束度

度が大きいほど、また乾燥開始材齢が

②引張伸び能力や収縮応力はひび割れ発生材齢と相関性が認められ、ひび割れ発生材齢が長くなるほど大きくなり、両者によりひび割れ発生時期が判断できると考えられた。

本報告で取上げた実験要因は前述のように収縮ひび割れに影響を及ぼす要因のうちの限られたものであり、今後その他の要因の影響についても検討を進める予定である。

謝辞 本研究を実施するに当り、芝浦工業大学 4 年生伊代田岳史君に多大なご助力を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- [1] ひび割れ研究会：コンクリートの乾燥収縮ひび割れ試験方法の標準化とその適用性に関する研究(その 2)、セメントコンクリート、No.533、pp.56-66、1991. 7
- [2] ひび割れ研究会：コンクリートの乾燥収縮ひび割れ試験方法の標準化とその適用性に関する研究(その 3)、セメントコンクリート、No.534、pp.57-65、1991. 8
- [3] 安田正雪、阿部道彦、笹原厚、桃谷智樹：各種高流動コンクリートの収縮性状とひび割れに関する一実験、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.18、No.1、pp.147-152、1996
- [4] ひび割れ研究会：コンクリートの乾燥収縮ひび割れ試験方法の標準化とその適用性に関する研究(その 4)、セメントコンクリート、No.536、pp.62-71、1991. 10
- [5] 日本コンクリート工学協会自己収縮研究委員会報告、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.18、No.1、pp.29-38、1996
- [6] 鈴木計夫、大野義照、中川隆夫、太田寛：コンクリートの収縮拘束ひびわれ試験、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.3、pp.25-28、1981
- [7] 例えば、牧角龍憲、徳光善治：拘束を受けたコンクリートの乾燥収縮に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.2、pp.161-164、1983