

論文

[1189] 繊維補強コンクリートの乾燥収縮ひび割れ

嵯峨山剛*1・眞嶋光保*2

1. はじめに

プレーンコンクリートに繊維を分散混入させることにより、従来のコンクリートではみることのできなかった特性を引き出すことのできる繊維補強コンクリートが生まれた。繊維補強コンクリートにみられる特長は主として以下の3点が挙げられる。

- ① 曲げ、引張強度の増加
- ② じん性の改善
- ③ ひび割れの分散

このような繊維補強コンクリートの補強材として用いられている繊維は鋼、ガラス、炭素および合成繊維である。これらのうち鋼繊維補強コンクリートは既に道路舗装、空港舗装、大地下空間の施工などに用いられている〔1〕。一方、ガラス・炭素繊維は主として薄板材として建築用の非構造材料として使われている〔2〕。しかしながら、合成繊維は先の繊維に比べると実用化の域に達しているとはいえない。

このような種々の繊維補強コンクリートの力学的性質に関する研究は過去にも例があり〔3〕〔4〕、その優位性は認められている。しかし構造材料として適用するには長期における供用性を調べておく必要があり、本研究ではその中の1つとして乾燥収縮ひび割れを取り上げている。コンクリート構造物のひび割れは、乾燥収縮が原因で発生するものが多く、荷重によって生じるものや温度変化によって生じるものなどに比べると、コンクリートの品質に直接関係するところが大きいとされている〔5〕。そこで、本研究では鋼およびアラミド繊維補強コンクリートについて実験を行い、乾燥収縮ひび割れ特性を比較した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

補強材としての繊維は鋼繊維、アラミド繊維の2種類とし、混入率は体積比で1.5%とした。各々の繊維の物理的性質を表-1に示す。セメントは早強ポルトランドセメント（比重3.14）、粗骨材は大阪和泉丘陵産砕石（表乾比重2.60,粗粒率6.33,吸水率1.63%）、細骨材は豊後水道沖海砂（表乾比重2.55,粗粒率2.68,吸水率2.01%）を用いた。

表-1 繊維の物理的性質

種 別	寸 法	繊維長	比 重	弾性係数
鋼繊維	φ0.6 mm	30 mm	7.85	2,100,000 kgf/cm ²
アラミド繊維	φ12 μm	30 mm	1.39	710,000 kgf/cm ²

*1 大阪市立大学大学院 工学研究科土木工学専攻（正会員）

*2 大阪市立大学助教授 工学部土木工学科、工博（正会員）

2. 2 配合設計

繊維補強コンクリートでは繊維の混入により著しくスランプが低下して適切なワーカビリティが得られ難いことから、単位水量を増加させる必要がある。また繊維はコンクリート中のモルタル部分に分散するので細骨材率を比較的大きく取る必要がある。本研究ではマトリックスとなるコンクリートの配合を各々の繊維補強コンクリート間で全く固定するものとし、その配合表を表-2に示す。

表-2 マトリックスコンクリートの配合表

Gmax (mm)	Sl. (cm)	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
					W	C	S*	G*	ad.**
10	20	5.0	60	60	195	325	995	677	6.5

*表乾重量 ** 高性能AE減水剤

2. 3 コンクリートの練混ぜおよび締固め

コンクリートの練混ぜは繊維の解繊、切断およびファイバーボールの形成を防ぐためにオムニミキサを用いた。練混ぜの手順はドライミックス1分間の後にウエットミックス3分間とし、繊維のミキサへの投入はウエットミックス開始1分後に始めその後に続く1分以内に完了させることとした。コンクリートの締固めは繊維の配向性を考慮して外部振動機を用いた。

2. 4 実験方法

実験は「コンクリートの乾燥収縮ひび割れ試験方法(案)」(JIS原案)に準じて行うものとした。拘束収縮ひずみ測定用供試体の形状・寸法を写真-1に示す。拘束供試体は打設後、材令7日まで $20 \pm 3^{\circ}\text{C}$ で湿潤養生を行い、その後に脱型した。一方、自由収縮ひずみ測定用供試体は $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ とし、打設後24時間で脱型を行い、7日間水中養生をした。供試体数は各々3本とし、養生終了後、いずれのコンクリートも温度 $20 \pm 1^{\circ}\text{C}$ 、湿度60%の恒温恒湿の室内で乾燥を開始した。いずれもコンクリートのひずみの測定は供試体の中央部でコンタクトゲージ法で行い(基長10cm)、拘束板のひずみはひずみゲージを用いて行った。また、ひび割れ発生後に π ゲージを配置してひび割れ幅の進展を調べた。

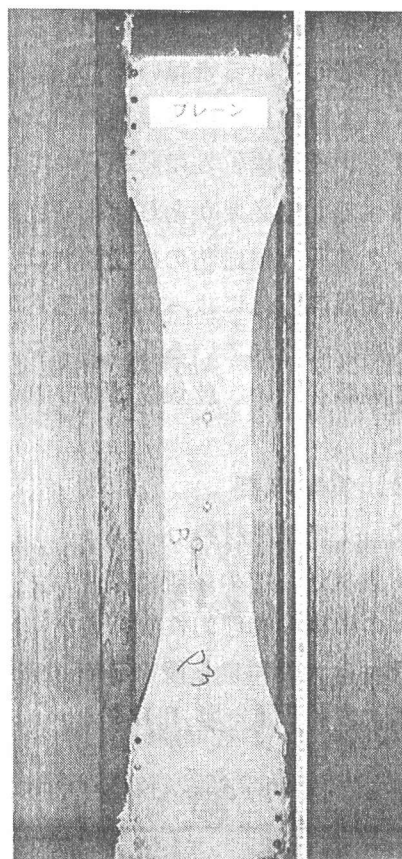


写真-1 拘束器具および供試体

3. 実験結果および考察

3. 1 自由収縮ひずみ

図-1にひび割れ発生時までの自由収縮ひずみを示す。図から明らかなように鋼およびアラミド繊維補強コンクリートはプレーンコンクリートよりも小さな収縮率を示している。これは繊維

補強コンクリートでは繊維がコンクリートを拘束する力が働くので、プレーンコンクリートに比べて乾燥収縮に対する抵抗が大きくなることによるものと考えられる。一般に、繊維補強コンクリートでは比較的多くの単位水量を必要とするので、繊維による拘束効果が低減するとされている〔6〕が、本研究ではマトリックスとなるコンクリートの配合を固定していることから、繊維の拘束効果が表れていると考えられる繊維間の比較では、アラミド繊維の約3倍の弾性係数を有する鋼繊維がより大きな拘束効果を示すと思われたが、本研究では繊維の違いによる明確な差が表れていない。

3. 2 拘束収縮ひずみ

図-2にひび割れ発生時までの拘束収縮ひずみを示す。コンクリートが拘束板によって収縮を拘束されているので、自由収縮ひずみと比較するとやや緩やかな傾きを示している。拘束収縮ひずみにおいても自由収縮ひずみと同様に、繊維補強コンクリートは拘束板だけでなく繊維による拘束作用も働くのでプレーンコンクリートよりも小さな収縮率を示している。ひび割れ発生時における拘束収縮ひずみはプレーンコンクリートで約 400μ 、繊維補強コンクリートで約 300μ である。また、拘束収縮ひずみにおいても繊維の有無でその効果は明確であるが、繊維の種類による相違は認められなかった。

3. 3 拘束引張ひずみ

ひび割れ発生時までの拘束引張ひずみを図-3に、ひび割れ発生時におけるコンクリートの割裂引張強度とひずみとの関係を図-4に、圧縮強度および静弾性係数を表-3に示す。拘束引張ひずみとは自由収縮ひずみから拘束収縮ひずみを差し引いた値で表している。乾燥初期においてプレーンコンクリートは他と比較して大きな値を示しているが、その後は各コンクリートとも同程度の僅かな増加が続くのみである。ここで示

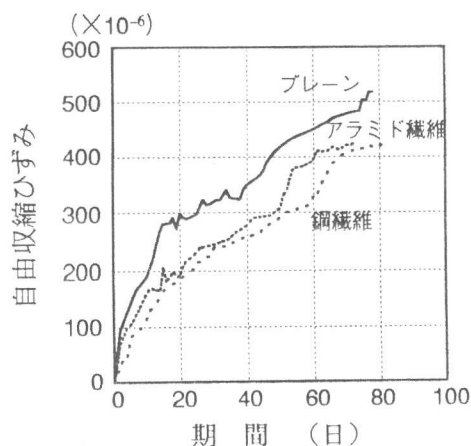


図-1 自由収縮ひずみ

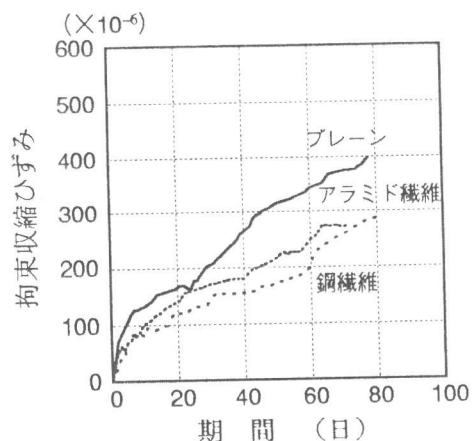


図-2 拘束収縮ひずみ

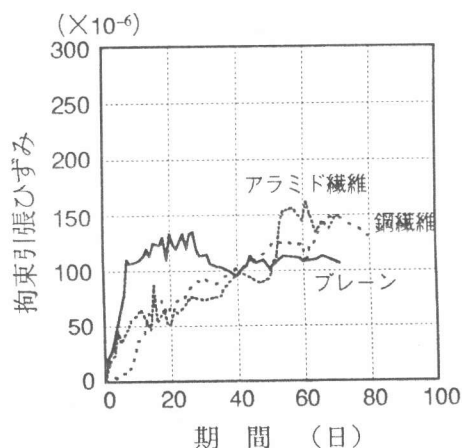


図-3 拘束引張ひずみ

表-3 ひび割れ発生時における強度および静弾性係数

(単位: kgf/cm^2)

繊維種	圧縮強度	静弾性係数	割裂引張強度 (ひび割れ)	割裂引張強度
プレーン	464	292,000	34.6	34.6
鋼繊維	472	292,000	42.6	65.9
アラミド繊維	429	278,000	39.1	61.0

されている拘束引張ひずみに弾性係数を乗じることによって、拘束板による拘束でコンクリートに生じる引張応力が算出される。ひび割れ時においてプレーンコンクリートでは約 110 μ 、鋼繊維およびアラミド繊維では約 135 μ となっている。各々弾性係数を乗じた引張応力を示すとプレーンコンクリートでは32.2kgf/cm²、鋼繊維およびアラミド繊維は 39.4、37.5kgf/cm²となっている。これらの値は表-3の割裂引張強度（ひび割れ）とほぼ同様な値を示している。

3. 4 拘束板のひずみ

図-5にひび割れ発生前後までの拘束板のひずみを示す。乾燥初期において拘束板のひずみは各コンクリートで同様な増加傾向を示し、その後繊維補強コンクリートでは大きな増加は認められないが、プレーンコンクリートはひび割れの発生まで直線的に増加している。ひび割れ発生直前の拘束板のひずみはプレーンコンクリートで約 400 μ 、鋼繊維およびアラミド繊維補強コンクリートで約 150 μ であり、ひび割れ発生直後には繊維補強コンクリートでは変化はないが、プレーンコンクリートでは直ちに応力解放が認められ、繊維の有無による相違が明らかとなっている。

拘束板のひずみから算出される拘束収縮応力度は次式で示されている[5]。

$$\sigma = \varepsilon \times E_s \times A_s / A_c$$

ここに、

ε : 拘束板のひずみ、 E_s : 鋼材のヤング係数

$A_s \cdot A_c$: 鋼材・コンクリート断面積

各コンクリートの拘束収縮応力度と割裂引張強度（ひび割れ）を表-4に示す。ここで示されている値には明確な相関関係はみられないとの報告[7]もあり、本研究においてもその相関関係は認められなかった。

3. 5 ひび割れ発生日数とひび割れ状況

図-6にひび割れ発生日数を示す。プレーンコンクリート、アラミド繊維、鋼繊維補強コンクリートの順に早くひび割れが発生している。本研究においては同じ種類のコンクリートで3~5日の差があり、繊維による補強効果がひび割れ発生日を遅延させる働きは明確には認められなかった。これは繊維補強コンクリー

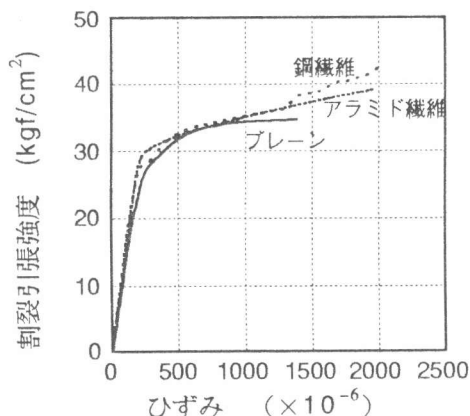


図-4 割裂引張強度-ひずみ関係

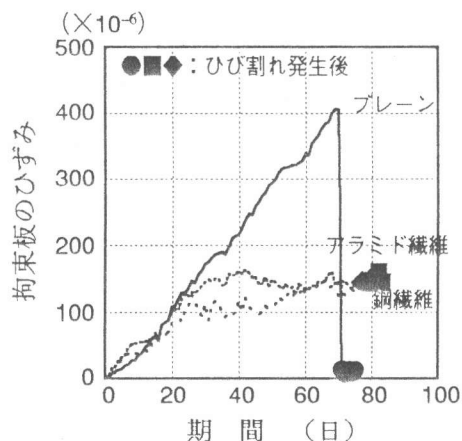


図-5 拘束板のひずみ

表-4 拘束収縮応力度と割裂引張強度
(単位: kgf/cm²)

繊維種	拘束収縮応力度	割裂引張強度
プレーン	71.4	34.6
鋼繊維	26.8	42.6
アラミド繊維	26.8	39.1

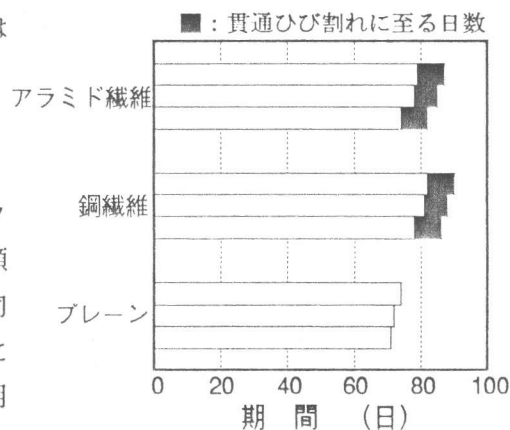


図-6 ひび割れ発生日数

トでは自由収縮ひずみだけでなく拘束収縮ひずみも小さくなることにより、コンクリートが応力として受ける拘束引張ひずみはプレーンコンクリートとの差がほとんどなくひび割れ発生日数に明確な相違がないものと考えられる。また、プレーンコンクリートではひび割れ発生と同時に貫通ひび割れとなるのに対し、繊維補強コンクリートではひび割れが貫通するまでに約1週間を要した。これはコンクリートが拘束によって受ける引張応力を繊維が負担することによる応力伝達が働くために、ひび割れ発生が直ちに貫通ひび割れとならないものと考えられる。この繊維への応力伝達の様子

は図-7に示されているひび割れ幅の進展によって確認することができる。プレーンコンクリートではひび割れ発生位置への応力集中によってひび割れ幅の増大がみられるが、繊維補強コンクリートでは繊維がひび割れ幅の進展を抑制する働きをしている。繊維の種類による比較では鋼繊維の方がアラミド繊維よりわずかにその抑制効果が大きいと思われる。これは弾性係数の違いによって変形性能が異なることによる相違であると考えられる。

写真-2~4に貫通ひび割れが生じた後の各コンクリートのひび割れ状況を示す。これらの写真からひび割れ幅の抑制効果が望めないプレーンコンクリートは、繊維補強コンクリートと比較してひび割れ幅が大きく進展しているのが認められる。またプレーンコンクリートではひび割れが直線的に入っているのに対し、繊維補強コンクリートではひび割れの蛇行、分散が認められる。

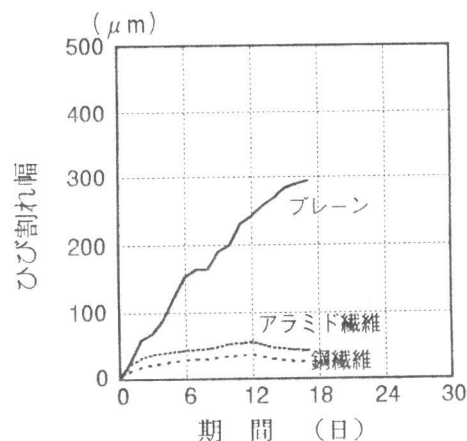


図-7 ひび割れ発生後のひび割れ幅の進展

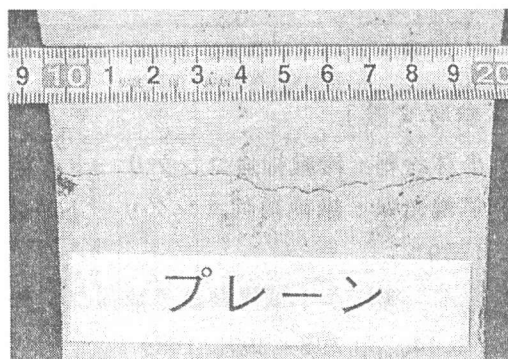


写真-2 ひび割れ状況 (プレーン)



写真-3 ひび割れ状況 (鋼繊維)

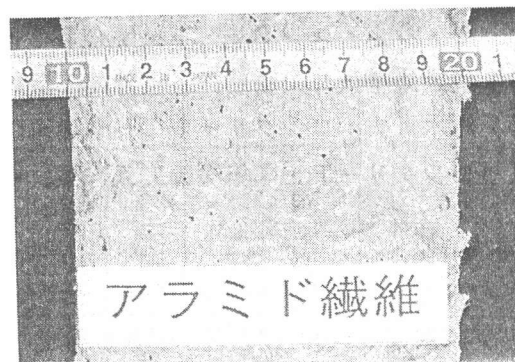


写真-4 ひび割れ状況 (アラミド繊維)

4. まとめ

本研究では「コンクリートの乾燥収縮ひび割れ試験方法(案)」(JIS原案)に準じて、プレーンコンクリートと2種の繊維補強コンクリートについて実験を行った。プレーンコンクリートと繊維補強コンクリートの間には乾燥収縮ひずみおよびひび割れ幅に相違が認められた。しかし、ひび割れ発生日数については拘束引張ひずみが両者間で同程度となることにより、明確な相違は認められなかった。本研究で得られた結果をまとめると以下のようなになる。

- (1) 自由収縮および拘束収縮ひずみは、繊維による拘束効果によりプレーンコンクリートに比べて繊維補強コンクリートの方が小さい。
- (2) 拘束引張ひずみはプレーンコンクリートと繊維補強コンクリートで大きな相違はない。またそのひずみから算出したコンクリート応力は、ひび割れ時における割裂引張強度とよく対応している。
- (3) 拘束板のひずみによると繊維補強コンクリートではプレーンコンクリートにみられるようなひび割れ後の応力解放が認められなかった。
- (4) ひび割れ発生日数はプレーンコンクリートと繊維補強コンクリートでは大きな相違はないが、繊維補強コンクリートではひび割れが貫通するまでに更に日数を要する。
- (5) 繊維補強コンクリートではひび割れ位置で繊維への応力伝達が働き、ひび割れの蛇行と分散が認められ、ひび割れ幅の抑制効果があると思われる。

〔参考文献〕

- 1) 小林一輔：繊維補強コンクリート 特性と応用、pp.11~22、オーム社
- 2) 眞嶋光保：繊維補強コンクリートの最近の技術と話題、日本材料学会講習会、pp.25~45、1989
- 3) 岩本 勲ほか：鋼代替繊維補強コンクリートの強度特性、土木学会第44回年次講演概要集、No.44、pp.298~299、1989
- 4) 川村満紀ほか：繊維-セメントペーストマトリックス界面領域の組織の観察に関する2, 3の手法、セメント・コンクリート論文集、No.46、pp.796~801、1992
- 5) 川瀬清孝：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、セメント・コンクリート、No.532、p.49、1991
- 6) 鋼繊維補強コンクリート設計施工指針(案)、pp.125~126、1983
- 7) 鈴木計夫：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拘束ひびわれ性状、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.10、No.2、pp.261~266、1988