短繊維補強コンクリートの収縮ひび割れ特性

—収縮ひび割れ性状の引張軟化曲線による評価およびひび割れ進展解析—

SHRINKAGE CRACK PROPERTIES OF SHORT CUT FIBER REINFORCED CONCRETE

—Evaluation of the state of shrinkage crack by tension softening diagram
and analysis of crack propagation—

大岡 督尚*, 橘 高義典**, 渡部 憲***

Tokunao OH-OKA, Yoshinori KITSUTAKA and Ken WATANABE

Crack propagation of the short cut fiber reinforced concrete due to drying shrinkage was investigated. Shrinkage crack tests using specimens with external restriction were performed. The relation between tensile stress and crack width of the specimen was measured and this relationship was compared with the tri-linear tension softening diagram. Tri-linear tension softening diagram was approximated to the poly-linear tension softening diagram which was analyzed by the data of a load - load point displacement curve obtain from three-point bending test. Analysis method of crack propagation of the shrinkage crack specimen was proposed based on the crack equation analysis method using a variant tri-linear tension softening diagram according to the concrete age.

Keywords : Shrinkage crack, Short cut fiber, Fracture mechanics, Tension softening diagram,
Analysis of crack propagation

収縮ひび割れ, 短繊維, 破壊力学, 引張軟化曲線, ひび割れ進展解析

1. はじめに

鉄筋コンクリート造にひび割れが発生すると, 耐力・耐久性・水密性・美観性などに大きな影響を及ぼす。このため, 様々なひび割れ抑制対策が提案¹⁾されているが, 万全な設計・施工上の対策を施しても, コンクリート自体の収縮性や環境温度の変化は避けられず, ひび割れを完全に防止することは困難である。そこで有害なひび割れを防止する目的で, 一般に伸縮目地や誘発目地の設置, あるいは鉄筋による補強が行われているが, 意匠上目地の位置が制約されたり, コンクリートの充填性に問題が生じる場合もある。これらの問題を解決する方法として, 短繊維を混入した高靱性コンクリートの採用が挙げられる。

鋼繊維補強コンクリートにおいては, 収縮ひび割れ制御に効果があり, 繊維混入率が大きくなると最大ひび割れ幅が小さくなること²⁾や, 収縮ひび割れ試験において, ひび割れ発生後鋼繊維が引張応力を負担すること³⁾などが報告されている。しかしながら, ひび割れ発生後の負担応力とひび割れ幅との関係は, 使用する短繊維の特性によって大きな影響を受けるため, 異なる短繊維の実験結果を参考とすることができない。よって, 各種短繊維のひび割れ制御効果を簡易に推定する手法の確立が望まれる。

収縮ひび割れ試験における貫通ひび割れ発生応力は, 短繊維の有無にかかわらず, コンクリートの引張強度より小さいことが指摘されて

いる^{3,4)}。また, 貫通ひび割れ発生前に断面の一部にひび割れが発生すること⁵⁾や, コンクリート打設面からひび割れが進展するケース³⁾が確認されているが, これらのひび割れ進展時の応力解析を実施した例は少ない。

そこで本研究では, 短繊維補強コンクリートにおける, ひび割れ発生後の負担応力とひび割れ幅との関係を簡易的に推定することを目的として, 収縮ひび割れ試験結果と既報⁶⁾で報告した引張破壊時の破壊パラメータとなる引張軟化曲線との比較検討を行った。また, ひび割れ進展時の応力とひび割れ幅との関係を明らかにする目的で, 仮想ひび割れモデルを用いたひび割れ進展解析⁷⁾を行い, 実験結果と比較した。

対象としたコンクリートは, W/B=60%のピニロン繊維補強コンクリートと W/B=20%の鋼繊維補強コンクリート, およびそれぞれのプレーンコンクリートである。引張軟化曲線は, 切欠き梁3点曲げ試験で得られる荷重-荷重点変位曲線から逆解析で求めた多直線近似引張軟化曲線⁷⁾を三直線(Tri-linear)で近似⁸⁾したものを用いた。Tri-linear引張軟化曲線は, コンクリート材齢の経過に伴って形状が次第に変化するため, 各種破壊パラメータと材齢との関係を明らかにし, 材齢の影響を考慮して近似した。

* 東急建設生産技術本部 博士(工学)

** 東京都立大学大学院工学研究科建築学専攻 助教授・工博

*** 東急建設技術研究所 工修

Construction Engineering Division, Tokyu Construction Co., Ltd., Dr. Eng.
Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Graduate School of Engineering, Tokyo Metropolitan Univ., Dr. Eng.
Institute of Technology, Tokyu Construction Co., Ltd., M. Eng.

表1 コンクリート調合・フレッシュ時特性・強度試験結果(標準養生)

記号	調合 (kg/m ³)									フレッシュ時特性		強度試験結果(材齢 28 日標準養生)			
	W/B (%)	W	C	SiF	S	G	VF	SF	SP (%)	スランプ (70-) (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)	単容質 (ton/m ³)	割裂引張強度 (MPa)
NP	60	180	300	—	821	968	—	—	0.3	21.5	2.7	36.1	27.6	2.37	2.57
NV	60	180	300	—	795	968	13.0	—	0.3	4.0	2.3	36.0	25.2	2.36	3.54
HP	20	160	680	120	695	789	—	—	3.0	(95×90)	1.4	114	41.9	2.42	4.15
HS	20	160	680	120	669	789	—	78.5	2.0	23.0	5.5	103	38.4	2.44	7.24

B=C+SiF, C: [H] 高ピーライト系セメント(比重 3.20), [N] 普通セメント(比重 3.15),

SP: [H] 高強度用高性能 AE 減水剤(ポリカルボン酸系と架橋ポリマーの複合体 高強度用), [N] AE 減水剤(リグニンスルホン酸系 AE 減水剤)

S: 山砂(君津産 表乾比重 2.62 吸水率 1.52%), G: 石英片岩砕石(比重 2.63, dmax20mm, 実積率 61.2%, FM6.63)

SiF: シリカフューム(比重 2.30) VF: ビニロン繊維(RF1500)

SF: 鋼繊維(DR30)

2. 実験概要

2.1 使用材料とコンクリート調合

試験に供したコンクリート調合を表1に、使用した短繊維の物性を表2に示す。短繊維補強コンクリートの混練は、100ℓパン型強制練りミキサーを用い、コンクリートが練り上がった後、ミキサーを回しながら短繊維を少しずつ投入する方法で行った。

2.2 収縮ひび割れ試験

収縮ひび割れ試験は、図1に示すようなコンクリートの乾燥収縮ひび割れ試験方法 JIS 原案⁹⁾に準じた拘束枠を用いて行った。ただし、ひび割れ発生位置を特定する目的で、コンクリート試験体中央部に深さ 15mm の直角二等辺三角形の切欠きを設けた。

ひび割れ試験体の底板面にはテフロンシートを張り、コンクリート打設数時間後に拘束枠と底板を締め付けているネジを取り外した。また弓型の側板は、発泡ポリスチレン系断熱材を加工し、表面にテフロンシートを張り付けた。脱型は打設翌日に行い、底板と側板を取り外した後、20℃60%RH の恒温恒湿室に静置して乾燥を開始した。各調合とも試験体数は3体とした。

拘束鋼材のひずみは、ワイヤーストレインゲージを用いて計測した。また、試験体中央部(切欠き位置)の開口変位は、スパン 100mm のパイゲージを用いた。HP・HS 試験体の場合はコンクリート打設後5時間経過した時点で打設上面のみパイゲージを取付け、脱型後下面に取付けたが、NP・NV 試験体の場合は、脱型後両面同時に取付けた。

2.3 コンクリートの物性試験

収縮ひび割れ試験体と同じ条件で養生した供試体について、①圧縮強度試験(φ100×200mm)、②割裂引張強度試験(φ100×200mm)、③自由収縮試験(100×100×400mm、φ100×200mm)、④引張クリープ試験(φ100×200mm)、⑤切欠き梁3点曲げ試験(100×100×500mm)を各3本ずつ実施し、収縮応力解析やひび割れ進展解析に必要な、各物性値と材齢との関係を求めた。

自由収縮ひずみおよび引張クリープひずみの計測は、すべてモールドゲージを用いて行った。引張クリープ試験は、1:10 のてこ型試験機を用い、荷重時割裂引張強度の 1/3 応力を持続荷重として、NP・NV は材齢 2 日から、HP・HS は材齢 1 日から荷重した。

切欠き梁3点曲げ試験は既報で詳述しているが⁶⁾、RILEM 法⁹⁾に準じ、試験スパンを 400mm として、インストロン型精密万能試験機のクロスヘッド移動速度の制御により荷重した(荷重速度: NP・HP 0.02mm/min, NV・HS 0.2mm/min)。

3. 実験結果

3.1 コンクリートの特性

1) 圧縮強度

表2 使用短繊維の種類と物性

記号	材質	長さ (mm)	径 (μm)	引張強度 (MPa)	ヤング率 (GPa)	比重
VF (RF1500)	ビニロン	30	240×720 (楕円)	882	29	1.30
SF (DR30)	鋼	30	φ600	1078 以上	206	7.85

図1 収縮ひび割れ試験体

図2 圧縮強度

$$f_{cm}(t) = \exp \left\{ s \left[1 - \left(\frac{28}{t} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \right\} \cdot f_{cm} \quad \dots (1)$$

ここに、 $f_{cm}(t)$: 材齢 t 日の圧縮強度 (MPa), f_{cm} : 材齢 28 日の圧縮強度 (MPa)

t : コンクリート材齢(日), s : 0.17 (NP・NV), 0.25 (HP・HS)

図3 引張強度(0.9×割裂引張強度)

圧縮強度試験結果を図2に示す。図中の推定値は(1)式によるものであるが、この式は、CEB-FIP MODEL CODE 1990¹⁰⁾ (以下MC90)の提案式に基づき、実験値と良く一致するような s の値を設定した。

2) 引張強度

図3に引張強度を示す。今回の実験では、割裂引張強度試験しか行っていないが、MC90によると、割裂引張強度の0.9倍をコンクリートの引張強度としているため、これに準じた評価を行った。NVおよびHSの場合は、ひび割れ発生時の強度を用いた。

3) 引張ヤング係数

図4に引張ヤング係数を示す。引張ヤング係数を圧縮ヤング係数と同一と仮定する方法もあるが、若材齢時の引張ヤング係数は圧縮ヤング係数より大きくなるとの報告¹¹⁾があるため、(2)式に示すようにMC90の提案式を基に引張クリープ試験時の載荷時弾性ひずみから求めたヤング係数と良く一致する E_{28} の値を設定して、材齢と引張ヤング係数との関係式を導いた。

$$E(t) = E_{28} \times \sqrt{\exp\left\{s \left[1 - \left(\frac{28}{t}\right)^{\frac{1}{2}}\right]\right\}} \quad \dots (2)$$

ここに、 $E(t)$: 材齢 t 日の引張ヤング係数(GPa)、 t : コンクリート材齢(日)
 s : 0.17 (NP・NV), 0.25 (HP・HS)
 E_{28} : 27.75GPa (NP), 25.15GPa (NV), 39.6GPa (HP), 40.7GPa (HS)

4) 自由収縮ひずみ

図5に100×100×400mm 供試体(収縮ひび割れ試験体用)とφ100×200mm 供試体(引張クリープ用)の自由収縮ひずみ平均値を示す。

5) 引張クリープ係数

図6に引張クリープ係数を示す。図中の推定曲線は、(3)式に示すMC90の提案式をベースとし、実験値と比較的一致するように、 $\phi_{RH} \beta(f_{cm})$ および β_H を設定した。特にひび割れ発生材齢付近の計算値が、実験値と良く一致するよう考慮した。

$$\phi(t, t_0) = \phi_{RH} \beta(f_{cm}) \cdot \frac{1}{0.1 + (t_0)^{0.2}} \cdot \left[\frac{(t - t_0)}{\beta_H + (t - t_0)} \right]^{0.3} \quad \dots (3)$$

ここに、 $\phi(t, t_0)$: 載荷材齢 t_0 の材齢 t 日におけるクリープ係数
 $\phi_{RH} \beta(f_{cm})$: 5.50 (NP), 5.70 (NV), 3.15 (HP), 2.80 (HS)
 β_H : 325 (NP・NV), 15 (HP・HS)

6) 引張軟化曲線⁹⁾

引張軟化曲線(TSD)は、仮想ひび割れモデルを用い、切欠き梁3点曲げ試験で得られた荷重-荷重点変位曲線から多直線近似法⁷⁾により逆解析して求めた。TSDのTri-linear近似は図7に示す方法で行い、各コンクリート別に材齢2日、7日、28日の多直線近似TSDが良く一致するよう定数を設定した。表3にTri-linear近似に必要な定数の設定値を、図8に多直線近似TSDと、Tri-linear TSDを示す。初期結合応力 f_i は、多直線近似TSDの開口変位0.01mmまでの平均結合応力(有効引張強度 f_i^{eff})を用いた。プレーンコンクリート(NP・HP)の破壊エネルギー G_F は、切欠き梁3点曲げ試験の荷重-荷重点変位曲線からRILEM法⁹⁾に準じて求めた G_F^{WOF} を用いた。短繊維補強コンクリート(NV・HS)の場合は、多直線近似TSDの有効開口変位 δ_u を0.5mmに設定し、それまでに囲まれる面積から求めた有効破壊エネルギー G_F^u および $\delta_u=0.5$ mm時点の結合応力 $\sigma_{0.5}$ を用いた。

これらの破壊パラメータ(f_i^{eff} ・ G_F^{WOF} ・ G_F^u ・ $\sigma_{0.5}$)は、コンクリート材齢の経過に伴って変化する。それらの算出結果を図9に示す。材

図4 引張ヤング係数

図5 自由収縮ひずみ

図6 引張クリープ係数

図7 引張軟化曲線のTri-linear近似法

表3 Tri-linear近似引張軟化曲線の定数

調査	G_F (N/mm)	f_i (MPa)	W_1	W_2	W_{cr}	δ_u	S_1	S_2	σ_u
NP	G_F^{WOF}	f_i^{eff}	0.6	2.2	5.8	—	0.4	0.1	—
NV	G_F^u	f_i^{eff}	0.2	0.6	—	0.5	0.5	(4)式	$\sigma_{0.5}$
HP	G_F^{WOF}	f_i^{eff}	0.6	2.2	5.8	—	0.4	0.1	—
HS	G_F^u	f_i^{eff}	0.05	0.3	—	0.5	0.6	(4)式	$\sigma_{0.5}$

$$S_2 = \frac{(2 - W_1 - S_1 \cdot W_2) \cdot G_F^u \cdot f_i - \sigma_u \cdot \delta_u \cdot f_i + W_2 \cdot G_F^u \cdot \sigma_u}{f_i \cdot \delta_u - W_1 \cdot G_F^u} \quad \dots (4)$$

図 8 引張軟化曲線 (TSD)

齢と f_t^{eff} との関係は、MC90 の提案式を基に、(5) 式で表した。 G_F^{WOF} 、 G_F^{u} 、 $\sigma_{0.5}$ は、材齢 2, 7, 28 日の数値を直線近似し、材齢との関係式 (図中に示す) を導いた。これらの関係式より、各材齢の Tri-linear TSD が推定可能である。

$$f_t^{\text{eff}}(t) = f_{\text{cik},0,m} \left(\frac{f_{\text{cm}}(t) - 8}{10} \right)^2 \quad \dots (5)$$

ここに、 $f_t^{\text{eff}}(t)$: 材齢 t 日の有効引張強度 (MPa)

$f_{\text{cm}}(t)$: 材齢 t 日の圧縮強度 (MPa) [(1) 式より算出]

$f_{\text{cik},0,m}$: 1.5 (NP), 1.6 (NV), 0.85 (HP), 1.3 (HS)

3.2 収縮ひび割れ試験結果

収縮ひび割れ試験体における両側の拘束鋼材ひずみの平均値を図 10 に、両面の開口変位の平均値を図 11 に示す。初期値はすべてコンクリート打設終了後 5 時間の時点とした。開口変位は自由収縮ひずみを差し引いた値とし、HP・HS 試験体の脱型前の底板面側開口変位は、打設上面と同一と仮定した。

図 9 各破壊パラメータと材齢との関係

図 10 拘束鋼材ひずみ

図 11 開口変位

図 12 引張応力と開口変位との関係

NP 試験体は、コンクリート材齢 7.6~10.2 日、NV 試験体は 9.3~11.0 日にひび割れが発生した。HP および HS 試験体は、脱型前にすでにひび割れが発生していた。HP 試験体の場合、乾燥開始後開口変位の増加のみで、拘束鋼材ひずみの変化はほとんどないが、HS 試験体は微細なひび割れが発生した状態で拘束鋼材ひずみが増大し、材齢 19.8~46.9 日の間で、急激に開口変位が大きくなる点がある。

3.3 開口変位と引張応力の関係

図 12 に拘束鋼材ひずみから求めたリガメント部（断面積 70cm²）の引張応力と開口変位との関係を示す。図中の実験値は最大応力時点の開口変位を 0 としてプロットしたものである。図中には材齢 7 日と 28 日の Tri-linear TSD を同時に示した。実験値は Tri-linear TSD とほぼ同じ傾向を示し、材齢 7 日の TSD の方が対応は良い。NP・NV においては、引張応力がやや小さくなる傾向にある。収縮ひび割れ試験と切欠き梁 3 点曲げ試験においては、載荷速度に大きな違いがある。既往の研究において、プレーンコンクリートの場合¹²⁾でも短繊維補強コンクリートの場合¹³⁾でも、載荷時の変位速度が小さいと、破壊エネルギーや引張強度が小さくなるとの報告がある。これらの報告では、開口変位における最小変位速度を 0.002mm/min まで実験しているが、今回の実験におけるひび割れ発生までの変位速度はさらに小さい。このため、収縮ひび割れ試験体による応力が小さくなったと考えられる。また、実際のひび割れ進展は均一に生じていないことも理由と考えられる。この点については、後でひび割れ進展解析により考察する。このように、載荷速度の違いによる影響を多少受けるが、引張軟化曲線によって、短繊維補強コンクリートのひび割れ発生以降の応力とひび割れ幅のおおよその関係は予測可能と考える。

4. 収縮応力解析

Neville は、コンクリートの材齢経過によって変化するヤング係数やクリープ係数を考慮して、逐次積分による応力解析方法（step-by-step 法）¹⁴⁾を提案している。この考え方にに基づき、外部拘束を受けた場合の応力解析方法^{15~17)}に従って、収縮ひび割れ試験体の応力解析を行った。解析ではリガメント部分の応力を求めることとし、その断面積は 3 体の実測値の平均を用いた。拘束鋼材の断面積は規格値を用い、ヤング係数は、あらかじめキャリブレーションを行った結果を用いた（コンクリートがない状態で拘束フレームに圧縮力を加えてひずみを計測）。コンクリートの特性は前述した材齢との関係式を用いたが、材齢 2 日未満の引張ヤング係数は、0 点と材齢 2 日のヤング係数を線形補間した。

解析結果を図 13 に示す。W/B=60% の NP・NV においては、引張応力が、図 3 に示した引張強度に達する時点、あるいはその手前でひび割れが発生している。W/B=20% の HP・HS は、コンクリート打設翌日にひび割れが発生していたが、応力解析でも材齢 1 日において、すでに引張応力が引張強度を上回っている。

5. ひび割れ進展解析

5.1 解析方法

切欠きを有する収縮ひび割れ試験体における、ひび割れ進展の際の応力を求める目的で、仮想ひび割れモデルを用いたひび割れ進展解析を行った。解析フローを図 14 に示す。本解析は、(6)式に示す結合応力と開口変位の条件式、および(7)式に示す引張軟化曲線式から導い

図 13 収縮応力

図 14 収縮ひび割れ試験体ひび割れ進展解析フロー

$$\delta(a, x) = \int_0^a \sigma(a, c) \cdot H(a, x, c) dc \quad \dots (6)$$

$$\sigma(a, x) = m(\delta) \cdot \delta \cdot n(\delta); \delta = \delta(a, x) \quad \dots (7)$$

ここに、 $\sigma(a, x)$, $\delta(a, x)$, $H(a, x, c)$: それぞれ、仮想ひび割れ a の時の節点 x での結合応力、開口変位、形状関数
 c : 結合応力の作用点

た離散化連立方程式（ひび割れ方程式）により開口変位と結合応力の分布を求め、それらより作用力を求めるものである⁷⁾。(6)式中の形状関数は、Appendix I および II に示す線形破壊力学での応力拡大係数の解析結果¹⁸⁾から求めた⁷⁾。解析はひび割れが切欠き両側から進展する場合と、片側から進展する場合について実施した。なお、片側から進展する場合は、もう一方の切欠き部を無視し、全断面積を 85cm²と仮定して計算し、100cm²の断面の引張応力に変換した。

解析手順は、まず第 1 節点まで仮想ひび割れを進展させ、材齢 1 日時点の Tri-linear TSD を用い、ひび割れ方程式を解く。次に、逐次積分によって計算された応力 σ_{step} が、ひび割れ進展解析で得られた

応力 σ_{cal} を超えときの材齢 t を特定する。その材齢の Tri-linear TSD を用いて、再度ひび割れ方程式を解いた後、材齢 $t-1$ から t の間の Tri-linear TSD を用いて、 σ_{step} と σ_{cal} の差が0.001MPa以下になるまで繰り返し計算を行う。第2節点以降は、その前の節点にひび割れが生じた材齢の Tri-linear TSD を用いて計算を開始する。このルーチンを最終節点まで繰り返す。ただし、HP・HS試験体においては材齢1日でひび割れが最終節点まで進展する応力が生じているため、すべて材齢1日の Tri-linear TSD を用いて計算した。

5.2 解析結果

ひび割れ進展解析で得られた、仮想ひび割れ長さ a と切欠きのない断面に生じる引張応力との関係を図15に示す。両側からひび割れが進展する場合は、仮想ひび割れが試験体断面中心に達するまで引張応力は増加するが、片側からひび割れが進展する場合は、仮想ひび割れ長さが55~65mmに達すると引張応力は減少する。W/B=20%のHP・HS試験体の材齢1日における収縮応力は、図13に示したように2MPaを超えているが、仮想ひび割れ貫通に必要な応力は、ひび割れの進展状況にかかわらず、2MPaより小さい。このことは、試験体脱型時にひび割れが発生していたことと一致する。

図16にW/B=60%のNP・NV試験体における、切欠き部開口変位(CMOD)の解析結果と材齢との関係を示す。両側からひび割れが進展する場合は、最終節点に到達するまでCMODは徐々に大きくなるが、片側からひび割れが進展する場合は、ある点で急激にCMODが大きくなる。この点は、図15b)に示した引張応力が最大値を示す点に相当する。

NP・NV試験体において、仮想ひび割れが進展する際の切欠きのない断面に生じる引張応力と材齢との関係を図17に示す。図中の解析結果の材齢は、ひび割れ進展解析で用いた、逐次積分による応力と材齢の関係から求めたものである。この図によると、各試験体の貫通ひび割れ発生時期は、ほとんどの場合、両側からひび割れが進展した場合と、片側から進展した場合の解析結果の間で、両側からの解析結果に比較的近い。片側からひび割れが進展する場合は、付加的な曲げモーメントが作用して引張応力が小さくなると考えられるが、側面に拘束鋼材を有するひび割れ試験体の場合、その鋼材によって付加モーメントを拘束され、解析条件と多少異なる。このため、実験結果は両側から進展するときの解析結果に近い値を示したと考える。

また、ひび割れ発生時付近の開口変位計測結果を示した図18によると、NV3は片側からのひび割れ進展傾向が顕著であり、コンクリート打設上面側からひび割れが進行し、底板面側は一時的に圧縮応力を受けている。切欠き部からひび割れが進行すると仮定したひび割れ進展解析と多少条件は異なるが、片側からひび割れが進行したことによって早期にひび割れが発生したと考えられる。

以上のことから、収縮ひび割れ試験体のひび割れは、片側から進展する場合があります。貫通ひび割れ発生時の応力は、両側からひび割れが進展する場合と比較して小さくなると言える。また、ひび割れ進展解析により、収縮ひび割れ試験体での引張応力とひび割れ性状との関係を推定することが可能と言える。

6. まとめ

短繊維補強コンクリートおよびプレーンコンクリートにおいて、切欠きを設けた収縮ひび割れ試験を実施し、ひび割れ進展解析を試みた。

図15 仮想ひび割れ長さと引張応力との関係

図16 CMODと材齢との関係

図17 仮想ひび割れ進展の際の引張応力と材齢との関係

検討結果をまとめると、以下のとおりである。

- 1) 収縮ひび割れ試験における短繊維補強コンクリートのひび割れ発生以降の応力とひび割れ幅の関係は、引張軟化曲線の形状から、おおよその予測が可能である。
- 2) 切欠きを有する収縮ひび割れ試験体のひび割れ進展解析方法として、クリープを考慮した収縮応力計算結果とコンクリート材齢の進行に伴って変化する引張軟化曲線を用いる方法を示した。
- 3) 収縮ひび割れ試験体で発生するひび割れは、試験体片面から一方方向に進展する場合があります、その時の貫通ひび割れ発生時応力は、両側からひび割れが進展する場合と比較して小さくなることから、実験および解析で明らかとなった。
- 4) ひび割れ進展解析により、収縮ひび割れ試験体での引張応力とひび割れ性状との関係を推定することが可能となった。

謝辞

本研究をまとめるに当たり多大なご指導をいただきました、東京都立大学大学院工学研究科教授・工博 西川孝夫先生、ならびに助教授・工博 北山和宏先生に深く感謝いたします。また、実験を行うに当たり、材料提供にご協力頂きました(株)ポリス物産・(株)クラレ・(株)ブリヂストンの方々に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造のひび割れ対策（設計・施工）指針・同解説、1990.1
- 2) 坂井正美、中村信行：鋼繊維補強コンクリートのひびわれ抵抗性について、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.333-334、1980.9
- 3) 山田紘、鈴木計夫、大野義照、中川隆夫、古島正博：鋼繊維補強コンクリートの収縮ひび割れ抵抗性能（その1～2）、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.701-704、1992.8
- 4) 鈴木計夫、大野義照、中川隆夫：コンクリートの収縮拘束ひびわれ試験（その2 実験的検討）、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.179-180、1976.10、他多数
- 5) 牧角龍憲、徳光善治：コンクリートの乾燥収縮拘束とひびわれ発生に関する研究、セメント技術年報 34、pp.222-225、1980
- 6) 大岡督尚、橋高義典、渡部憲：コンクリートの破壊パラメータに及ぼす短繊維混入および材齢の影響、日本建築学会構造系論文集、No.529、pp.1-6、2000.3
- 7) 橋高義典、上村克郎、中村成春：コンクリートの引張軟化曲線の多直線近似解析、日本建築学会構造系論文集、No.453、pp.15～25、1993.11
- 8) 日本コンクリート工学：JIS 原案 コンクリートの乾燥収縮ひび割れ試験方法、コンクリート工学、Vol.23、No.3、pp.50-51、1985.3
- 9) RILEM Draft Recommendation (50-FMC), Determination of the Fracture Energy of Mortar and Concrete by Means of Three-point Bend Tests on Notched Beams, Materials and Structures, Vol.18, No.106, pp.285～290, 1985
- 10) Comité Euro International du Béton : CEB-FIP Model Code 1990 Design Code, Thomas Telford Service Ltd., pp.54-55, 1993
- 11) 橋田浩：高強度コンクリートの若材齢引張クリープ係数の測定とそのモデル化、コンクリートの品質評価試験方法に関するシンポジウム論文集、pp.25-30、日本コンクリート工学協会、1998.12
- 12) F. H. Wittman, K. Rokugo, E. Bruhwiler, H. Mihashi and P. Simon : Fracture Energy and Strain Softening of Concrete as Determined by Means of Compact Tension Specimens, Materials and Structures, Vol.21, pp.21-32, 1988
- 13) 橋高義典、高橋仁智：高強度繊維補強モルタルの破壊特性に及ぼす載荷速度の影響、日本建築学会構造系論文集、No.514、pp.15-20、1998.12
- 14) A.M., Neville : Creep of Concrete : Plain, Reinforced and Prestressed, North-Holland, 1970
- 15) 森田司郎：コンクリートの収縮応力計算例、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.305-306、1974.10
- 16) 徳光善治、牧角龍憲：乾燥収縮ひび割れを予測する収縮応力解析方法、コンクリート工学年次講演会論文集、pp.429-432、1984
- 17) 自己収縮研究委員会：自己収縮研究委員会報告書、pp.123-132、日本コンクリート工学協会、1996.11
- 18) Tada, H., Paris, P. C., and Irwin, G. R.: The Stress Analysis of Cracks Handbook, Second Edition, Paris Productions Incorporated, p.p.2-16, 27, Appendix B, 1985

図 18 ひび割れ発生時付近の開口変位計測結果

Appendix I 形状関数（両側からひび割れが進展する場合）

（引張応力による応力拡大係数 K_I ）

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \cdot F\left(\frac{a}{b}\right)$$

$$F\left(\frac{a}{b}\right) = \frac{1.122 - 0.561 \cdot \left(\frac{a}{b}\right) - 0.205 \cdot \left(\frac{a}{b}\right)^2 + 0.471 \cdot \left(\frac{a}{b}\right)^3 - 0.190 \cdot \left(\frac{a}{b}\right)^4}{\sqrt{1 - \frac{a}{b}}}$$

（結合力による応力拡大係数 K_{II} ）

$$K_{II} = \frac{2P}{\sqrt{2b}} F\left(\frac{a}{b}, \frac{c}{a}\right)$$

$$F\left(\frac{a}{b}, \frac{c}{a}\right) = \left\{ 1 + 0.3 \left[1 - \left(\frac{c}{a}\right)^4 \right] \cdot 0.5 \cdot \left(1 - \sin \frac{\pi a}{2b} \right) \left(2 + \sin \frac{\pi a}{2b} \right) \right\} \times \sqrt{\tan \frac{\pi a}{2b} \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\cos \frac{\pi a}{2b} / \cos \frac{\pi c}{2b} \right)^2}}}$$

ここに、 σ ：ひび割れから離れた位置の引張応力 (MPa)

a ：仮想ひび割れ長さ (mm)

b ：試験体幅の 1/2 (50mm)

P ：節点における結合力 (N)

Appendix II 形状関数（片側からひび割れが進展する場合）

（引張応力による応力拡大係数 K_I ）

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \cdot F\left(\frac{a}{b}\right)$$

$$F\left(\frac{a}{b}\right) = \sqrt{\frac{2b}{\pi a} \tan \frac{\pi a}{2b}} \cdot \frac{0.752 + 2.02 \cdot \left(\frac{a}{b}\right) + 0.37 \cdot \left(1 - \sin \frac{\pi a}{2b}\right)^3}{\cos \frac{\pi a}{2b}}$$

（結合力による応力拡大係数 K_{II} ）

$$K_{II} = \frac{2P}{\sqrt{\pi a}} \frac{G\left(\frac{c}{a}, \frac{a}{b}\right)}{\left(1 - \frac{a}{b}\right)^{\frac{3}{2}} \sqrt{1 - \left(\frac{c}{a}\right)^2}}$$

$$G\left(\frac{c}{a}, \frac{a}{b}\right) = g_1\left(\frac{a}{b}\right) + g_2\left(\frac{a}{b}\right) \cdot \left(\frac{c}{a}\right) + g_3\left(\frac{a}{b}\right) \cdot \left(\frac{c}{a}\right)^2 + g_4\left(\frac{a}{b}\right) \cdot \left(\frac{c}{a}\right)^3$$

$$g_1\left(\frac{a}{b}\right) = 0.46 + 3.06 \cdot \left(\frac{a}{b}\right) + 0.84 \cdot \left(1 - \frac{a}{b}\right)^5 + 0.66 \cdot \left(\frac{a}{b}\right)^2 \cdot \left(1 - \frac{a}{b}\right)^2$$

$$g_2\left(\frac{a}{b}\right) = -3.52 \cdot \left(\frac{a}{b}\right)^2$$

$$g_3\left(\frac{a}{b}\right) = 6.17 - 28.22 \cdot \left(\frac{a}{b}\right) + 34.54 \cdot \left(\frac{a}{b}\right)^2 - 14.39 \cdot \left(\frac{a}{b}\right)^3 - \left(1 - \frac{a}{b}\right)^{\frac{3}{2}} - 5.88 \cdot \left(1 - \frac{a}{b}\right)^5 - 2.64 \cdot \left(\frac{a}{b}\right)^2 \cdot \left(1 - \frac{a}{b}\right)^2$$

$$g_4\left(\frac{a}{b}\right) = -6.63 + 25.16 \cdot \left(\frac{a}{b}\right) - 31.04 \cdot \left(\frac{a}{b}\right)^2 + 14.41 \cdot \left(\frac{a}{b}\right)^3 + 2 \cdot \left(1 - \frac{a}{b}\right)^{\frac{3}{2}} + 5.04 \cdot \left(1 - \frac{a}{b}\right)^3 + 1.98 \cdot \left(\frac{a}{b}\right)^2 \cdot \left(1 - \frac{a}{b}\right)^2$$

ここに、 σ ：ひび割れから離れた位置の引張応力 (MPa)

a ：仮想ひび割れ長さ (mm)

b ：試験体幅 (85mm, 片側の切欠き部分を除く)

P ：節点における結合力 (N)

(2000年8月9日原稿受理、2001年1月15日採用決定)