破壊力学手法によるひび割れ分散を考慮した繊維補強軽量コンクリートパネル
の曲げ破壊解析FRACTURE MECHANICS BASED BENDING FAILURE ANALYSIS
FOR FIBER REINFORCED LIGHT-WEIGHT CONCRETE PANEL
CONSIDERING CRACK DISPERSION EFFECT

橘 高義典*, 高橋 仁智**

Yoshinori KITSUTAKA and Yoshinori TAKAHASHI

In this study, the fracture process of strain softening and hardening material which has the crack dispersion and localization characteristics was studied. Numerical analysis method to calculate the load displacement relationship of the member which has multiple cracking subjected to the bending was proposed based on the fracture mechanics consideration. Bending tests of the fiber reinforced light-weight concrete panel were performed. Influences of the fiber content and the air content on the mechanical properties and on the crack dispersing effect were cleared. Especially, the fiber reinforced light-weight concrete containing air showed high crack dispersion under the bending condition. Tension softening diagram of fiber reinforced light-weight concrete which can be used as a constitutive law for the numerical analysis were evaluated by the data of a load - crack mouth opening displacement (CMOD) relationships obtained by the wedge splitting test. The analysis results of the bending tests agreed well with the test results.

Keywords : fiber reinforced light-weight concrete, multiple cracking, strain hardening, fracture mechanics, tension softening diagram, localization

繊維補強軽量コンクリート, 複数ひび割れ, ひずみ硬化, 破壊力学, 引張軟化曲線, 局所化

1. はじめに

近年, コンクリート材料の高性能化に関する研究が多くなされているが, 特に繊維補強によるコンクリートの高靱性化は, 破壊進展時のエネルギー吸収を増大させるため, コンクリート部材の安全性・耐久性能向上等の観点から重要な研究課題である。繊維補強コンクリートの破壊進展の特徴として, ひび割れ発生後も繊維のブリッジング作用により引張応力が伝達され, 従来のコンクリートの脆性的な破壊に比べて, より延性的な破壊となることが挙げられる。さらに繊維条件あるいはマトリックス条件によっては, ひび割れ発生後も伝達応力が上昇する, いわゆるひずみ硬化(strain hardening)を示すものもある。部材の破壊過程で部分的に硬化が生じると, 他の部分に新たなひび割れが発生し破壊部分が分散する。そのことで破壊時のエネルギー吸収能が増大するとともに, ひび割れの局所化による脆性的な破壊を低減でき, 理想的な破壊形態となる。

このような繊維補強材料の引張破壊時の挙動は, 引張軟化特性として実験的及び解析的に評価することが可能であり^{1), 2)}, 多くの繊維補強コンクリートについてその特性が明らかにされている^{3), 4)}。また, 繊維補強材料の応力伝達機構に関する基礎的研究も報告され

ている^{5), 6)}。しかしながらそれらは破壊部分を一部に限定した要素レベルでの評価であり, 実際の部材の破壊に見られるようなひび割れの分散をモデル化した研究は数少ない。特に部材の荷重変形関係の数値解析を行うためには, 破壊部分の分散・局所過程のモデル化が重要となる。

一方でこのような繊維補強コンクリートの適用例として, 建築用 2 次部材, カーテンウォール, パネル材料等が挙げられるが, これらは軽量化が望ましく, 筆者らは前報⁷⁾において繊維補強軽量コンクリートのマトリックスを高強度とすることで, 軽量化を図りながら十分な強度が得られ, かつ靱性能が優れるコンクリート材料が得られることを実験的に示した。これら材料のパネル部材への適用性を検討するためには, 曲げ荷重時の破壊特性およびひび割れ分散性を把握することが重要と考えられる。

本報では, 軟化及び硬化現象を生じる複合材料の破壊について考察し, 破壊の分散及び局所化の簡便なモデルを示すとともに, パネル材レベルでの荷重変形関係の解析方法を提案する。さらに繊維補強された軽量コンクリートパネルの曲げ破壊性状を把握するとともに, 荷重変形関係について提案した解析方法の妥当性を検討する。

* 東京都立大学大学院工学研究科建築学専攻 助教授・工博

Assoc. Prof., Dept. of Architecture and Building Science, Graduate School of Eng., Tokyo Metropolitan Univ., Dr. Eng.

** 積水ハウス(株) 工修
(元東京都立大学 大学院生)

Sekisui House, Co., Ltd., M. Eng.

図一 引張軟化及び硬化を生じる要素相互の荷重変形関係

図二 引張軟化曲線での除荷・再載荷モデル

図三 除荷・再載荷を考慮した荷重変位解析フロー

2. 解析方法

2.1 破壊の分散及び局所化のモデル及び解析方法

図一は、同一材料であるが初期欠陥の大きさに差があり荷重変形関係が異なる、引張軟化・硬化を示す非線形要素 El_1 、 El_2 (繊維補強材料等)が直列している場合での破壊進展過程を模式化したものである。まず、荷重の増加に伴い各要素には徐々にひび割れが生じるが(a, a'), 初期欠陥の大きな El_2 のひび割れ進展が先行し、ピーク荷重($Q_0 \rightarrow Q_e$)を過ぎると、 El_2 は徐々に軟化し要素間の伝達力が低下して行く($Q_e \rightarrow Q_c$)。その結果、 El_1 は除荷経路をたどる($b \rightarrow c$)。この場合残留変形があるため完全には戻らない。その後 El_2 がさらに軟化を続けると El_2 に破壊が局所化しその部分の破壊が大きく進み(d)、逆に El_1 のひび割れは閉口に向かう(d)。コンクリート等の通常の軟化材料はこのような破壊の局所化現象を示し破断に至る。ところが c' の点から El_2 が硬化現象を示すと($c' \rightarrow e'$)、 El_1 は再載荷状態となり($c \rightarrow b$)、さらに、荷重が Q_e を過ぎると El_1 の破壊が再度進行しはじめ($b \rightarrow e$)破壊部の再分散化が起こる。さらに荷重が増加し El_1 がピーク荷重(Q_e)を超えると、今度は El_1 が軟化し($e \rightarrow f$)、 El_2 が除荷経路をたどる($e' \rightarrow f'$)。このような複雑な経路をたどりながら、各要素の破壊が連続的に進行し、大きなエネルギー吸収を生じる。

また、図一の $b \rightarrow c$ に示される除荷過程での引張軟化曲線の変化(除荷時の見かけの開口変位-結合応力関係)は図二のように考えることができる。まず荷重が $Q_0 \rightarrow Q_e$ に低下した場合、ひび割れは先端部から一定の割合で閉口するとみなすと、結合応力 σ は除荷率 $\alpha = Q_e/Q_0$ だけ一様に線形に低下し σ' となる(式(1))。開口変位 δ は、 α に塑性率 p を考慮し式(2)で表せる。塑性率 p は除荷によりひび割れが閉口する程度を表し、原点指向の場合は $p=0$ 、除荷後も開口変位が変化しない完全塑性の場合は $p=1$ となる。再載荷では除荷経路を戻り除荷開始点からは本来の引張軟化曲線に従う(図二参照)。

$$\sigma' = \alpha \sigma; \delta' = (\alpha + (1 - \alpha)p)\delta \quad (1), (2)$$

式(1), (2)に従って除荷後の開口変位の分布が求められ要素の変形が計算できる。各要素間の応力伝達に平面保持を仮定し、各要素の変形を計算し全てを重ね合わせることで部材全体の荷重-変形関係が求められる。以上の解析フローを図三に示した。

2.2 純曲げ破壊解析

ここでは、純曲げを受ける部材の解析法を検討する。まず1要素の破壊進展を結合力モデルで表す(図四)。仮想ひびわれ先端での

図四 曲げ要素のモードI変形破壊での結合力モデル

応力拡大係数の釣合、ならびに応力拡大係数から算出される各節点の開口変位の適合より下式が得られる。

$$K_{I,M}(a) + K_{I,r}(a) = 0 \quad (3)$$

$$\delta(a, x) = \delta_M(a, x) + \delta_r(a, x) \quad (4)$$

ここに、 $K_{I,M}(a)$ 、 $K_{I,r}(a)$ ：それぞれ、ひびわれ長さ a の時のモーメント M 、結合応力による応力拡大係数(モードI)、 $\delta(a, x)$ ： x での開口変位、 $\delta_M(a, x)$ 、 $\delta_r(a, x)$ ：それぞれ x でのモーメント、結合応力による開口変位である。応力拡大係数は、モーメント M による場合は式(5)、結合応力 σ による場合は式(6)で表せる⁹⁾。 F, G は形状関数である(Appendix I参照)。各記号は図四を参照されたい。

$$K_{I,M}(a) = 6M/d^2 \sqrt{\pi a} \cdot F(a, d) = M \cdot k_M(a) \quad (5)$$

$$K_{I,r}(a) = \int_0^a \frac{2\sigma(a, c)}{\sqrt{\pi a}} \cdot G(a, c, d) dc = \int_0^a \sigma(a, c) \cdot k_r(a, c) dc \quad (6)$$

任意部の変位は、Castiglianoの定理により、応力拡大係数の積分式で表せる⁹⁾。

$$dy = d_0 + \int_x^a \frac{2 \cdot K(z)}{E} \left[\frac{\partial K_f(z)}{\partial f} \right]_{f=0} dz \quad (7)$$

ここに、 dy ：変位、 d_0 ：ひび割れがない場合での変位、 E ：ヤング率、 $K(z)$ ：作用力による応力拡大係数、 $K_f(z)$ ：変位を求める部分の仮想力 f による応力拡大係数である。本式により亀裂を有する弾性体の任意部変位は応力拡大係数により算出することができる。求めるべき変位に応じて式(7)に式(5)、(6)の応力拡大係数を代入すると $\delta_M(a, x)$ 、 $\delta_r(a, x)$ は以下となる。

$$\delta_M(a, x) = 24M/d^2 \int_x^a \frac{1}{E} F(z, d) \cdot G(z, x, d) dz = M \cdot d_M(a, x) \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \delta_r(a, x) &= \int_0^a \sigma(a, c) \left[\frac{8}{\pi} \int_x^a \frac{1}{zE} G(z, x, d) \cdot G(z, c, d) dz \right] dc \\ &= \int_0^a \sigma(a, c) \cdot d_r(a, x, c) dc \end{aligned} \quad (9)$$

式(8), (9)を, 式(4)に代入し, M を消去し整理すると, 結合応力と開口変位に関する積分方程式, (10)式を得る。本式での $H(a, x, c)$ は形状関数であり作用力に依存しない。

$$\sigma(a, x) = \int_0^a \sigma(a, c) \cdot H(a, x, c) dc$$

$$; H(a, x, c) = k_p(a, c) \cdot d_p(a, x) / k_p(a) - d_p(a, x, c) \quad (10)$$

材料構成則となる引張軟化曲線は多直線近似式で式(11)で表せる。 $m(\delta)$, $n(\delta)$ はそれぞれ, 開口変位が δ での多直線近似式の傾き, Y 軸切片である。

$$\sigma(a, x) = m(\delta) \cdot \delta + n(\delta); \quad \delta = \delta(a, x) \quad (11)$$

式(11)に示す引張軟化曲線を式(10)に代入し $\sigma(a, x)$ を消去し離散化することで, 開口変位 $\delta(a, x)$ に関する非線形連立方程式が得られ, それを解くことにより, 任意ひび割れ長さ a での開口変位の分布が求められ, さらに式(11)より結合応力の分布が求められる⁹⁾。非線形連立方程式の解法では, 各節点の引張軟化曲線の傾き m が一致するまで連立方程式を繰返し解き最適解を求める(多直線構成関数一致法)⁹⁾。結合応力を式(6)に代入し式(3)から $K_{lw}(a)$ を求め, 式(5)より要素に作用するモーメント M が求められる。

各要素の仮想ひび割れ長さ a での回転角 $\theta(a)$ は, モーメントによる回転角 $\theta_M(a)$ と結合応力による回転角 $\theta_c(a)$ の和で下式で表せる。

$$\theta(a) = \theta_M(a) + \theta_c(a) \quad (12)$$

Castiglianoの定理により変形 θ は弾性変形時, 破壊進展時のエネルギーの M による偏微分値の和となる。

$$\theta = \frac{\partial U_{NoCrack}}{\partial M} + \frac{2}{E} \int_0^a K_I(z) \frac{\partial K_{IM}(z)}{\partial M} dz \quad (13)$$

式(5), (6)に示した応力拡大係数を式(13)に代入すると式(14)(15)となり, それらを式(12)に代入し M と $\theta(a)$ との関係が求められる。 $\theta_c(a)$ を求める場合には M を仮想力とし偏微分後 $M=0$ にする。

$$\theta_M(a) = \theta_{M, NoCrack} + \frac{2}{E} \int_0^a K_{IM}(z) \frac{\partial K_{IM}(z)}{\partial M} dz$$

$$= \frac{Mh}{EI} + \frac{72\pi M}{Ed^3} \int_0^a F(z, d)^2 dz \quad (14)$$

$$\theta_c(a) = \left(\theta_{M, NoCrack} \right)_{M=0} + \frac{2}{E} \int_0^a K_{Ic}(z) \left[\frac{\partial K_{IM}(z)}{\partial M} \right]_{M=0} dz$$

$$= \frac{24}{Ed^3} \int_0^a \sigma(a, c) \left[\int_0^a F(z, d) \cdot G(z, c, d) dz \right] dc \quad (15)$$

求めた回転角から各要素の曲率 $k=\theta/h$ を求め, 平面保持を仮定し, 面積モーメント法により部材全体のたわみの分布を計算する。

3. 実験概要

3.1 試験体の概要

表-1に使用材料を示す。2次部材への適用を考慮しセメントには早強ポルトランドセメントを, 細骨材にはガラス廃材による発泡人工軽量骨材, 混和剤には高性能AE減水剤及びAE剤, 短繊維には既報⁴⁾よりコンクリートの靱性改善効果及び軽量化に有効であると考察されたビニロン繊維を使用した。水結合材比(W/B)は20%とした。比較用として普通強度のコンクリートも作製した。表-2に試験体の調合条件を示す。混練には容量70リットルのオムニミキサーを使用した。圧縮強度及びヤング係数測定用に $\phi 100 \times 200$ mmの円柱試験体3体, wedge splitting test (以下, くさび割裂試験)用の試験体3体(100×100×120mm), パネルの曲げ試験用の試験体(300×100×900mm)2体を各調合条件毎に作製した。試験体

表-1 使用材料

記号	材 料	性 質
C	セメント	早強ポルトランドセメント, 比重3.20
SF	シリカフェーム	SiO ₂ 96.8%, 比重2.20
VF	ビニロン繊維 (RF4000)	比重1.30 繊維長30mm, 繊維径660(μ m) 引張強度900(MPa), ヤング率30(GPa)
GL	発泡ガラス骨材	1号: 2号: 3号=8: 1: 1 (重量比) 最大径5mm, 比重0.70, 吸水率約7%
SP	高性能AE減水剤	ポリカルボン酸エーテル系
AE	AE剤	アルキルアリルスルホン酸化合物系
FA	起泡剤	アニオン酸系特殊界面活性剤
S	砕砂	八王子市美山産, 表乾比重2.62
G	砕石	八王子市美山産, 表乾比重2.66

表-2 試験体の計画調合

a) 繊維補強軽量モルタル

記号	水結合材比 (%)	添加量 (B×%)	絶対質量 (kg/m ³)		空気を0%で計算					
			水 W	セメント C	骨材 GL	混和材 SF	混和剤			繊維 VF
							SP	FA	AE	
LP	20	0	121	677	420	75	30.1	—	4.5	—
LPa		1.0	113	677		75	30.1	7.5	4.5	—
LF		0	118	660		73	29.3	—	4.4	13.0
LFa		1.0	110	660		73	29.3	7.5	4.4	13.0

結合材: C+SF, 混和剤はすべて水重量に換算

b) 普通コンクリート

記号	W/C (%)	絶対質量 (kg/m ³)			
		水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G
NC	65	180	277	756	1152

表-3 試験体の性質

記号	スランブ (cm)	フロンブ (cm×cm)	比重	空気量* (%)	圧縮強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)
LP	25.5	50×50	1.29	4.73	37.4	14.7
LPa	23.5	39×39	1.04	23.79	17.6	8.6
LF	24.0	47×46	1.29	4.25	41.7	13.3
LFa	24.5	46×46	1.02	24.42	19.6	8.5
NC	16.5	19×18	2.35	0.66	27.6	29.3

* 起泡剤添加試料の空気量は打設後の比重と調査から算定

図-5 くさび割裂試験概要

は打設後1日で脱型し, その後20℃の水中で材齢12週まで養生した。表-3に各試験体のフレッシュコンクリートでの性状及び硬化後の強度性状を示す。

3.2 くさび割裂試験

数値解析での材料構成則となる引張軟化曲線は, モードI型(引張変形)の破壊が小試験体で得られるくさび割裂試験により評価した。試験体中央にダイヤモンドカッター(刃厚1mm)により, リガメント高さが50mmとなるように切欠きをいれ, くさびの挿入により引張破壊を生じさせる(図-5)。ジグの寸法等はRILEMで提案している軽量コンクリートのくさび割裂試験方法¹⁰⁾に準じた。荷重変位曲線を精度良く計測するために, クローズドループシステム(閉回路機構)を有するサーボ・コントロール式油圧試験機(MTS社製)を使用した。本試験機は, クリップゲージによる開口変位計

図-6 パネル状試験体の曲げ試験概要

図-7 くさび割れ試験での荷重-開口変位曲線 (平均値)

図-8 引張軟化曲線

表-4 引張軟化曲線の直線近似モデル

LP	LPa		LF		LFa		NC	
	bi-linear	tri-linear	bi-linear	tri-linear	bi-linear	tri-linear	bi-linear	tri-linear
COD	σ	COD	σ	COD	σ	COD	σ	COD
0.0	6.44	0.0	2.61	0.0	6.44	0.0	2.69	0.0
0.0035	0.82	0.0016	2.61	0.0035	0.82	0.0080	0.51	0.0138
0.0125	0.00	0.0081	0.00	0.0125	0.00	0.0219	0.69	0.1141
-	-	-	-	0.0169	0.73	0.0317	0.36	0.6418
-	-	-	-	1.3382	2.35	0.7572	1.09	-
-	-	-	-	3.0	0.00	3.0	0.00	-

測値をフィードバック信号として、油圧サーボバルブを調節することで変位速度の制御を行うことができる。開口変位 (CMOD) の変位速度は繊維無混入の軽量コンクリート試験体は脆性的な破壊となりやすいため0.0005mm/min、普通コンクリート及び繊維混入試験体は0.002mm/minに設定した。CMODの計測には変位制御用の高感度クリップゲージ (MTS-632.02) を用いた。得られた荷重-CMOD曲線を基に多直線近似法により引張軟化曲線を求めた。なお、引張軟化曲線を求める際に必要となるくさび割れ試験での解析諸条件をAppendix IIに示した。

3.3 パネルの曲げ試験

図-6にパネルの曲げ試験の概要を示す。曲げ試験には、100tonfアムスラー式万能試験機を用い手動載荷とした。支点間のスパン800mm、中央部の載荷スパン400mmの4点載荷とし、試験体のスパン中央両端下部のたわみを計測した。また、試験体底面には、ひび割れの発生状況、分散度等を計測するために、検長60mmの歪みゲージを7枚貼り付け計測した。

4. 試験結果及び考察

4.1 荷重-開口変位曲線

図-7にくさび割れ試験より得られた荷重-開口変位曲線を示す。図中には各調合条件ごとの試験体のデータを平均化したものを示した。繊維無混入の試験体においては、起泡剤無添加のLPは安定破壊が得られず脆性的な破壊となった。しかしながら起泡剤を添加したLPaでは強度はLPよりも低下するが、比較的安定した破壊となった。普通コンクリート試験体NCとくらべると両者とも曲線で囲まれる面積は小さくエネルギー吸収能は低い。繊維混入試験体では、最大荷重はLF、LFaともに繊維無混入の試験体と同様であるが、最大荷重以降の曲線の伸びが大きくなり靱性が大きく向上している。特に最大荷重直後に一旦荷重が低下するが、その後再び荷重が増加する硬化現象を示している。曲線で囲まれる面積および最大荷重は、LFに比べ、気泡混入のLFaの方が小さくなる。これは気泡の混入によりマトリックス自体の強度低下と伴に繊維とペーストとの付着面積が減少し伝達力が減少するためであると考えられる。

4.2 引張軟化曲線

図-8に多直線近似解析より求めた引張軟化曲線 (TSD) を示

す。TSDは荷重-開口変位曲線を反映しており、荷重-開口変位曲線に靱性に優れるものはTSDの軟化度が緩やかであり、TSDで囲まれた面積も大きくなる。繊維混入試験体においては、右上がりあるいは横這いとなり開口変位が増加しても応力が伝達されている。表-4および図-8中には、得られた引張軟化曲線を解析用に直線近似 (2~5直線) し簡易モデルとした結果を示す。なお、LPの引張軟化曲線はくさび割れ試験で不安定破壊となったため求めることが出来ず、同一調合のLFの引張軟化曲線で繊維のブリッジングが生じる前の初期の直線的な軟化部をLPでの引張軟化曲線とした。

4.3 パネル試験体の曲げ試験結果

図-11にパネルの曲げ試験より得られた荷重-たわみ曲線を示す。普通コンクリート試験体NCおよび繊維無混入の試験体では最大荷重以降に一気に脆性的に破壊し安定したデータが得られなかった。繊維混入試験体 (LF, LFa) においては、最大強度は繊維無混入試験体とほぼ同様であるが、最大荷重以降すぐには破壊せず延性的となる。気泡無しのLFは最大荷重以降いったん荷重が低下するが、徐々に荷重が増加する。気泡混入のLFaは最大荷重以降も荷重は上昇傾向にあり、いくつかの山がある。

曲げ試験終了後のパネルのひび割れ形態を観察した結果、NC, LP, LPaとも大きなひび割れが一本見られた。繊維混入試験体においては、LFの方は若干のひび割れの細かい分散が見られた。LFaにおいては、その破壊形態は他の試験体とは大きく異なり、ひび割れの分散が顕著に現れていた。図-9にひび割れの例を示す。

4.4 パネルの曲げ試験での歪みの変化

図-10にパネル下面の歪みの計測結果 (1試験体) を示す。普通コンクリートNCでは最大荷重以前の0.4mmの変形までは歪みは様に分布しているが、最大荷重付近の0.5mmの変形では一部に大きな歪みが生じており、破壊が局所化している様子が分かる。LPは、最大荷重で一気に破壊したため歪みの局所化は計測できなかった。気泡を含むLPaでは、NC同様、最大荷重以前の0.4mmの変形までは歪みは様に分布しており、最大荷重付近の0.5mmの変形では2カ所に大きな歪みが生じており破壊が分散している。気泡混入によりひび割れ分散が生じる理由としては、空気泡の存在によりひび割れ発生強度が低くなり最大荷重前に表面へのひび割れが多点的に生じること、空気泡の存在によりひび割れ進展の偏向効果があり、ひび割れが分散し易いことなどが考えられる。

繊維混入試験体においては、LFでは最大荷重付近の1.0mmの変形までは歪みが一様に増加していき、最大荷重以降は歪みが集中し破壊が局所化している。最大荷重前の一様な歪みは、LP等に比較すると大きく、これは繊維のブリッジング作用等により微細なひび割れが一様に分散発生しているためと考えられる。また特徴的な点として、最大荷重前の一様な歪みから、歪みが一カ所に集中してひび割れが局所化すると、他の歪みは小さくなり、大きな除荷が生じている点である。この場合には、微細ひび割れの閉口（回復）が生じているものと考えられる。なお、5mmの変形においても試験体は破断しなかった。気泡混入によるLFaでは、1mmの変形ですでに歪みが数カ所に分散しており、最大荷重以降も歪みは集中することなく、破壊の分散化が顕著であることが分かる。最終的には5カ所において大きな歪みを生じており、大きなエネルギーの吸収を生じていると推察できる。このようにひび割れ分散が大きくなる理由は、繊維の存在により生じるひずみ硬化過程において、他の要素はマトリックスが気泡を含み低強度であるため、ひび割れが生じやすくなることが考えられる。

図-9 ひび割れの形態例

図-10 パネル試験体の歪みの変化

5. 解析結果と実験結果との関係

5.1 解析条件

本報で提案した解析方法により曲げ解析を行い、パネル曲げ試験結果と比較した。試験体の形状・寸法、加力条件等は実験と同一とした。材料構成則には、引張に関してくさび割れ試験で求めた数直線で近似した引張軟化曲線（表-4）を用い、圧縮域は線形弾性とした。ヤング率は円柱試験体の圧縮試験結果を用いた。解析要素の幅 h に関しては、50, 100mmに設定して解析した結果、各試験体条件とも大きな差は認められないこと、実験結果との対応が最も良いことなどから今回は $h = 50\text{mm}$ に設定し、純曲げを受けるスパン400mmの部分を実験に分割した。各要素の初期欠陥のモデル化は、要素中央に初期切欠きを1mm刻みで1～5mmの範囲でランダムに設定した。図-3のフローに従って、初期切欠き5mmの最弱要素のひび割れを進展させ、最弱要素の軟化及び硬化時のモーメントに応じ各要素の回転角の変化を逐次求めた。さらに回転角から曲率分布を求めこれを荷重とみなしモーメント図を求めスパン中央点のたわみを求めた。塑性率 p は0, 0.5, 1.0 と変化させても解析

図-11 パネル試験体の荷重-たわみ曲線

図-12 切欠き長さの異なる要素の回転角モーメント関係例

結果に大きな差は生じなかったため0.5に設定した。

5.2 解析結果及び考察

図-12に解析の過程で計算された各要素のモーメント-回転角計算例を示す。NCを見ると初期の切欠きが大きい要素ほど最大モーメントは小さく、他の要素より先にピークとなることが分かる。LFaではピーク荷重後に一端軟化するが途中から硬化し最初のピーク荷重を超え繊維によるひずみ硬化現象をよく表している。

前出の図-11に、解析結果と実験結果との関係を合わせて示す。本解析結果と実験結果とは全体的に良い対応を示している。繊維無混入の試験体LP, LPaでは、最大荷重が実験結果よりもやや低めとなったが、荷重変位曲線は最大荷重以降変形が戻るスナップバック現象を示しており、実験結果での不安定破壊をよく表しているといえる。図中には従来の破壊進展解析で行われている一要素のみに離散ひび割れを生じさせた場合での解析結果を灰色の線で示した。一要素のみでは最大荷重以降の弾性歪みエネルギーの解放量が多くなるためLP, LPaではスナップバックの度合いが大きくなっている。NCでは、軟化部分の変形量が少なく評価される。しかしながら最大荷重までの荷重変形関係はほとんど変わらない。

繊維混入試験体LF, LFaでは、解析結果と実験結果とは良い対応を示し、特に最大荷重以降の変形能を良く表している。解析結果では最弱要素の硬化に伴う他要素の再載荷および軟化過程が折れ線で表されており、図中には各要素がピーク荷重となった点を数字で順番に示した。特にLFaの実験結果に見られる凸凹線と解析結果は良く一致している。灰色線で示される破壊部を一要素に限定した解析では他要素の除荷を考慮してないので実験結果との対応は多要素による解析よりも良くない。

6. まとめ

本研究により得られた結論をまとめると以下のとおりである。

- 1) ひび割れ分散及び局所化を伴う破壊進展を、引張軟化を考慮した多要素の組合わせによりモデル化し、要素の軟化及び硬化に伴う除荷及び再載荷を考慮した荷重変位関係の解析方法を提案した。
- 2) 各種コンクリートパネルの曲げ試験の結果、短繊維の混入によりひび割れは分散しエネルギー吸収能は向上する。特に本研究で使用了空気泡を多量に含ませ軽量化を図った軽量繊維補強パネルでは大きなひび割れ分散を示した。
- 3) 各種コンクリートパネルの曲げ試験での荷重-変位関係に関し本解析結果と実験結果とはほぼ対応した。特に繊維補強材料の最大荷重以降の軟化及び硬化に伴う変形性能を良く表し得た。

謝辞

本研究を行うにあたり、試料を提供していただいた、山宗化学(株)、(株)サンライト、クラレ(株)に感謝の意を表します。本研究は文部科学省研究費補助金(基盤B、研究代表者:橋高義典)の助成を受けました。

参考文献

- 1) V. C. Li and E. Liang: Fracture Processes in Concrete and Fiber Reinforced Cementitious Composites, J. of Engrg. Mech., ASCE, 112(6), 566-586, 1986
- 2) 三橋博三, 野村希品, 桐越一紀: 破壊力学手法に基づく繊維補強セメント系複合材料の力学特性に関する一考察, 日本建築学会構造系論文報告集, No.449, pp.1~7, 1993.7.
- 3) 栗原哲彦, 安藤貴宏, 国枝 稔, 内田裕市, 六郷恵哲: 多直線近似法による引張軟化曲線の推定と短繊維補強コンクリートの曲げ破壊性状, 土木学会論文集, No.532/V-30, pp.119~129, 1996.2.
- 4) 橋高義典, 大岡智尚: 高強度モルタルマトリックスの破壊パラメータに及ぼす短繊維の影響, 高強度繊維補強コンクリート(HFRC)の破壊性状に関する研究, 日本建築学会構造系論文報告集, No.497, pp.1-8, 1997.7
- 5) A. G. Evans: Perspective on the Development of High-toughness Ceramics, J. of Ame. Cer. Soc., Vol. 73, No. 2, pp.187-206, 1990.
- 6) V. C. Li and C. K. Y. Leung: Steady-State and Multiple Cracking of Short Random Fiber Composites, J. of Engrg. Mech., ASCE, Vol.118, No.11, pp.2246-2264, 1992.
- 7) 橋高義典, 高橋仁智, 吉岡昌洋: 高強度化軽量気泡繊維補強コンクリートの破壊特性, 日本建築学会構造系論文報告集, No.528, pp.7-11, 2000.2
- 8) H. Tada, P. C. Paris and G. R. Irwin: The Stress Analysis of Crack Handbook, Second Edition, Paris Productions Incorporated, 1985.
- 9) 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報告集, No.453, pp.15-25, 1993.11
- 10) RILEM AAC13.1: Determination of the Specific Fracture Energy and Strain Softening of AAC, RILEM Technical Recommendations for the Testing and Use of Construction Materials, pp.156-158, 1994
- 11) G. V. Guinea, M. Elices and J. Planas: Stress Intensity Factors for Wedge-splitting Geometry, Int. J. of Fract. 81, pp.113-124, 1996

Appendix I

本解析で用いた形状関数は以下のとおりである⁸⁾。

1) 純曲げ試験体

$$F(a, d) = \left(\frac{2}{\pi} \tan \frac{\pi A}{2} \right)^{0.5} \frac{0.923 + 0.199(1 - \sin(\pi A/2))^{0.5}}{\cos(\pi A/2)}, \quad (A = a/d) \quad (A1)$$

2) ひび割れ面への集聚力 f (図A1)

$$G(a, c, d) = \frac{G'(a, c, d)}{(1 - A)^{1.5} (1 - B^2)^{0.5}}, \quad (A = a/d, B = c/d) \quad (A2)$$

$$G'(a, c, d) = g_1(A) + g_2(A) \cdot B + g_3(A) \cdot B^2 + g_4(A) \cdot B^3$$

$$g_1(A) = 0.46 + 3.06A + 0.84(1 - A)^5 + 0.66A^2(1 - A)^2$$

$$g_2(A) = -3.52A^2$$

$$g_3(A) = 6.17 - 28.22A + 34.54A^2 - 14.39A^3 - (1 - A)^{1.5} - 5.88(1 - A)^5 - 2.64A^2(1 - A)^2$$

$$g_4(A) = -6.63 + 25.16A - 31.04A^2 + 14.41A^3 + 2(1 - A)^{1.5} + 5.04(1 - A)^5 + 1.98A^2(1 - A)^2$$

Appendix II

くさび割れ試験での荷重変位解析に用いた諸条件は以下のとおりである。

図A2にくさび割れ試験の模式図を示す。試験体寸法は以下である。

$d = 85\text{mm}$, $h_1 = 38.5\text{mm}$, $h_2 = 60\text{mm}$, $a_0 = 35\text{mm}$, $t = 100\text{mm}$

くさび割れ試験での応力拡大係数はコンパクトテンションとほぼ同じとみなせること¹¹⁾より、荷重 P による応力拡大係数は、

$$K_p(a) = \sigma_N(d-a)^{0.5} \cdot F(a, d) \quad (A3)$$

ただし、

$$\sigma_N = \sigma_{N \text{ tension}} + \sigma_{N \text{ bending}} = \frac{P_H}{(d-a)t} + \frac{6P_H(a + (d-a)/2) + 6P_V h_1}{(d-a)^2 t}$$

$$P_H = P/(2 \tan \theta), \quad P_V = P/2$$

$$F(a, d) = (0.05A + 0.95)(0.443 + 2.32A - 6.66A^2 + 7.36A^3 - 2.8A^4), \quad (A = a/d)$$

ここで、ひび割れ先端の応力計算については、水平力 P_H とともに、鉛直力 P_V により生じるモーメントも考慮している。

結合力による応力拡大係数、開口変位及びCMOD等の変位計算、ひびわれ進展解析は本論中の2.2純曲げ破壊解析に示す方法と同様である。

図A1

図A2 くさび割れ試験の試験体形状

(2000年5月10日原稿受理, 2000年10月23日採用決定)