混合モード破壊に対する短繊維の架橋力を考慮したメゾスケール解析

清水建設　技術研究所　正会員　○小倉　大季，吉武　謙二
名古屋大学大学院　　正会員　　国枝　稔，中村　光

1. はじめに

短繊維補強セメント系材料は，繊維の材質，長さ，マトリクスの特性などの組合せ次第で様々な性能の材料を開発できるが，組合せが無数に存在するため配合の最適化は難しい．筆者らは，短繊維を離散化した 3 次元メゾスケール解析における，ひび割れ面の繊維による伝達力（以下，架橋力）の算定手法を提案し[1)]，材料の高性能化を目的とした検証に適用した．しかしながら，本手法は一軸引張応力下の破壊挙動への適用を目的としたため，ひび割れ面に沿ったせん断変形（モードⅡ・Ⅲ）が生じた場合の架橋力は考慮できず，適用範囲が限られる．そこで，本研究では，混合モード破壊に対する繊維架橋力を考慮した解析手法を提案し，その検証のために，ひび割れ面に沿ったせん断変形が卓越する押抜きせん断試験ならびに，せん断変形が卓越しない曲げ試験を対象とした解析を行った．

2. 解析手法

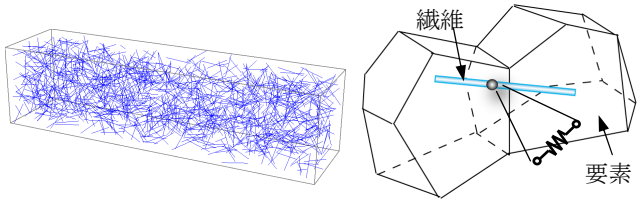
2. 1　剛体バネモデル（RBSM）の概要

本研究では，解析手法として 3 次元 RBSM を用いた．RBSM は，要素を剛体と仮定し，要素の重心に 6 自由度を設定する．各要素の境界面には境界と垂直，平行，回転方向にばねを配置した．垂直ばねはコンクリートの引張強度，破壊エネルギーを考慮してモデル化し，平行ばねにはモール・クーロン型の破壊基準を導入し，せん断挙動を表現した[2)]．

2. 2　短繊維の離散モデル

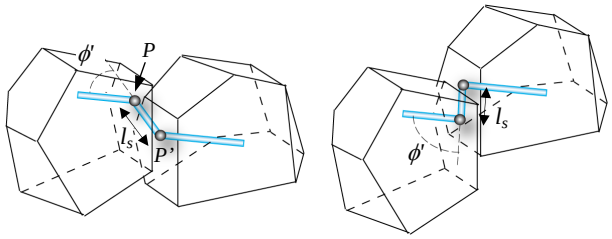
(1) 従来モデル

短繊維は，**図－1 (a)** のように所定の長さ，径の繊維を対象領域に離散的にモデル化する．繊維による補強効果は，要素境界面（ひび割れ面に相当）を跨ぐ繊維位置に長さ 0 のばねを配置し（**図－1 (b)**），このばねに架橋力を作用させることで表現した[1)]．当該モデル（以下，従来モデル）は，個々のひび割れ幅 w を逐一求め，w と繊維の付着特性から架橋力を算出する．すなわち，ひび割れ面に対して垂直に繊維が引抜けることを仮定するため，ひび割れ面に沿ったせん断変形に対しては，繊維が寄与しないモデルである．



(a)　繊維のモデル化　　(b)　架橋力のモデル化

図－1　繊維の離散モデル



図－2　せん断変形に対する架橋モデル（改良モデル）

(2) 改良モデル

提案する改良モデルは，混合モード破壊に対する架橋力を考慮するために，ひび割れ幅のかわりに**図－2** に示す抜出し量 l_s を直接求めて架橋力を算定する．また，ひび割れ面に沿ったせん断変形が生じ，図のようにひび割れを繊維が跨ぐ場合，初期の配向角度が同一でもせん断変形の方向によって引抜け角度 ϕ' は変化する．このため，各繊維の l_s, ϕ' を逐一算出する必要がある．

そこで，要素が剛体である RBSM の特徴を活かし，変形前の繊維－境界面の交点位置を用いて，変形後の交点位置 P，P' （**図－2**）を算出し，l_s，ϕ' を求めた．ϕ' による影響は，繊維の引抜きに対する抵抗性の向上効果ならびに繊維強度の低減を以下の式から求めることで考慮した．

$$F = F^n e^{f\phi'} \qquad \cdots(1)$$

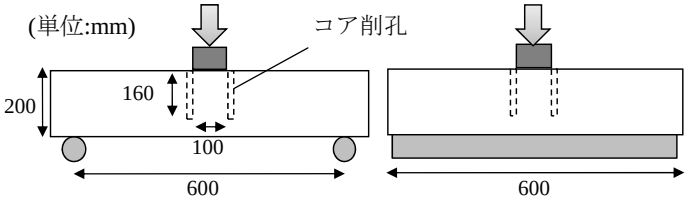
$$\sigma_{fu} = \sigma^n{}_{fu} e^{-f'\phi'} \qquad \cdots(2)$$

ここで，F：引抜き荷重，F^n：引抜け角度 0°の引抜き荷重，f：スナビング係数（0.4），ϕ'：引抜け角度（rad），σ_{fu}：破断強度，$\sigma^n{}_{fu}$：引抜け角度 0°の破断強度，f'：減少係数（0.3）である．

3. 解析概要

改良モデルを検証するために，3 等分点曲げ試験ならびに押抜きせん断試験[3)]を対象として，解析を行った．

キーワード　短繊維補強コンクリート，メゾスケール解析，3 次元 RBSM，押抜きせん断破壊，混合モード破壊
連絡先　　〒135-8530　東京都江東区越中島 3-4-17　　ＴＥＬ 03-3820-6415



図－3　押抜きせん断試験の概要

図－3 に押抜きせん断試験の概要を示す．実験は**表－1** に示す PP 繊維を 0.71 および 1.18%混入している．

解析モデルは，ヴォロノイ分割を用いて要素分割し，繊維は所定の本数を**図－1** と同様にランダムに分散させた．押抜きせん断試験については，コア削孔位置に切欠きをモデル化した．載荷は，載荷板位置の要素を変位制御することにより行った．**表－1** に示す繊維の付着特性に関する諸元は，単繊維引抜き試験の結果から同定した．

4. 解析結果

図－4，5 に曲げ解析の結果を，**図－6，7** に押抜きせん断解析の結果を，実験結果と併せて示す．混入率 0.71%のケースは，従来モデルの結果も併記した．

曲げ解析においては，ひび割れ発生後，繊維の架橋により荷重が再上昇する挙動が認められ，実験結果を概ね再現している．また，従来，改良の両モデルにおける差異は小さい．一方，せん断変形が卓越する押抜きせん断解析では，従来モデルを用いたケースはポストピークにおける繊維の補強効果を過小評価し，両モデルの差異は大きいことがわかる．図より，従来モデルと比較して改良モデルのほうが，実験で得られた荷重－変位関係を妥当に評価していることが確認できる．

5. まとめ

本研究では，短繊維を離散化した 3 次元メゾスケール解析を混合モード破壊へ適用できるように改良し，その妥当性を確認した．その結果，改良モデルは，ひび割れ面に沿ったせん断変形が卓越する対象においても繊維の補強効果を概ね表現できることが確認された．

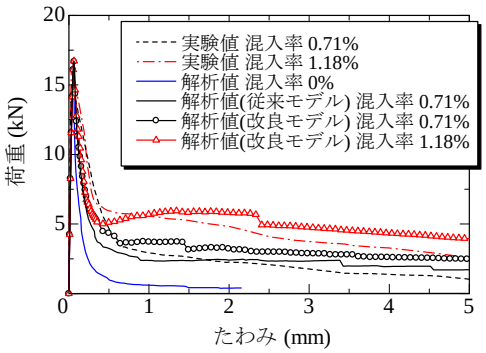
【謝辞】本研究に対して，高速道路総合技術研究所の野島昭二氏より押抜きせん断試験に関するデータを提供していただきました．ここに付記し謝意を表します．

【参考文献】

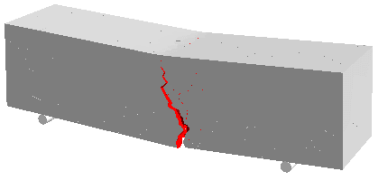
1) 小倉大季ほか：メゾスケール解析による短繊維補強セメント系複合材料の力学特性の評価，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.29，No.1，pp.309-314，2007
2) Saito, S. : Fracture analyses of structural concrete using spring network with random geometry, Doctoral thesis, Kyushu University, 1999
3) 野島昭二ほか：繊維補強コンクリートの剥落防止効果の検討，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第11巻，pp.1-6，2011

表－1　解析に用いたパラメータ

短繊維（PP 繊維）	繊維長 L_f(mm)	30
	繊維径 d_f(mm)	1.0
	弾性係数 E_f(GPa)	9.8
	破断強度 σ_{fu}(MPa)	400
短繊維・コンクリート界面	摩擦付着強度 τ_f(MPa)	1.8
	化学付着強度 τ_s(MPa)	4.0
	付着剛性 G (MPa/mm)	60

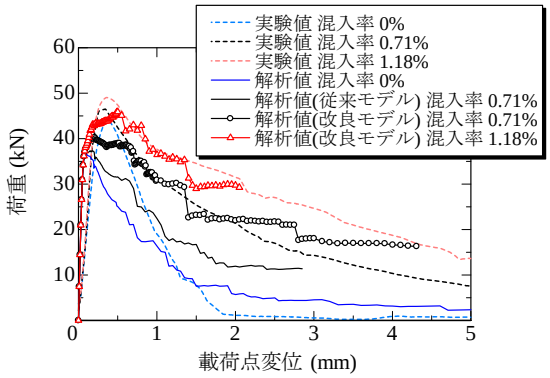


図－4　3 等分点曲げ試験の荷重－たわみ関係

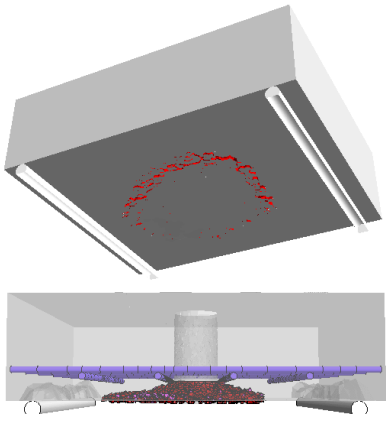


混入率 1.18%
たわみ 4.2mm 時
（変形倍率 5 倍）

図－5　3 等分点曲げ解析のひび割れ性状



図－6　押抜きせん断試験の荷重－載荷点変位関係



混入率 0%
載荷点変位 4mm 時
（変形倍率 2 倍）

図－7　押抜きせん断解析のひび割れ性状
（上図：下面からの視点，下図：内部ひび割れ）