

論文

[1069] サスペンション要素法によるコンクリートの破壊解析手法に関する研究

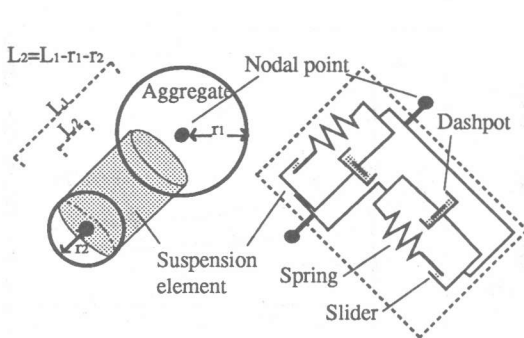
森博嗣*1・荒井正直*2・船見晃啓*3・谷川恭雄*4

1.まえがき

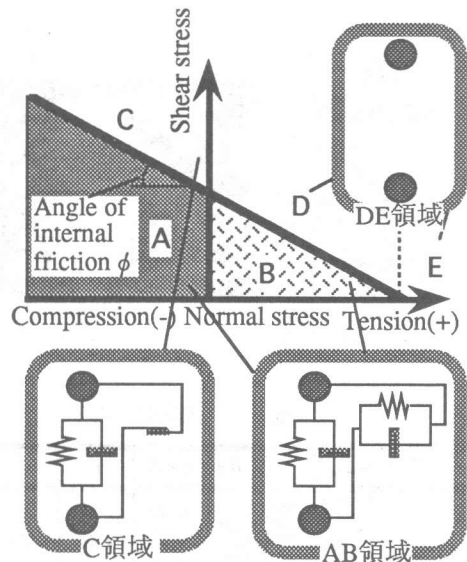
コンクリートの変形・破壊特性については、既に数多くの実験的研究が行われており、これらの成果から各種の構成モデルや応力-ひずみ関係表示式が提案されているが、複合材料のもつ複雑さ、不確定さから、力学的性状に与える材料要因の影響は定性的にしか説明されていない[1]-[4]。

本研究の目的は、複合材料であるコンクリートの変形・破壊性状をミクロな立場から解析的に取り扱い、従来、実験的な情報の整理によってしか得られていないコンクリートの構成則を、理論的な立場から説明し、より汎用的な力学モデルを構築することにある。

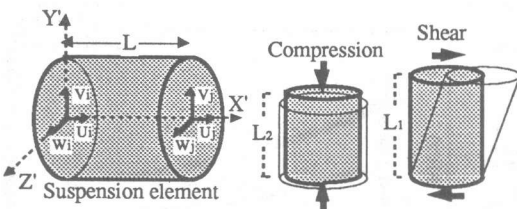
このため、本報では、粘弾塑性サスペンション要素法による非連続体モデルを用いた解析手法を提案し、脆性材料特有の破壊性状のシミュレーションを試みる[5]。本解析手法は、運動方程式を基本とする動的解析であり[6]、コンクリートの静的な変形・破壊現象に対しても、クラックなどの発生・進展を含めて動的に取り扱う点が特徴である。



図一 サスペンション要素と節点(骨材)



図三 破壊条件と各応力領域におけるサスペンション要素のレオロジーモデル



図二 サスペンション要素の座標と変形

*1名古屋大学助教授 工学部建築学科、工博（正会員）

*2名古屋大学大学院 工学研究科建築学専攻

*3名古屋大学 工学部建築学科

*4名古屋大学教授 工学部建築学科、工博（正会員）

2. 粘弾塑性サスペンション要素法

フレッシュコンクリートの流動シミュレーションに実績のある粘塑性サスペンション要素法(VSEM)に対して、弾性を追加した粘弾塑性解析プログラムを開発した。以下、拡張部について概説するが、計算手順等は粘塑性サスペンション要素法と同様であるため、詳細については既報[7]を参照されたい。

2.1 解析モデル

本解析に用いるサスペンション要素のモデルを図-1に示す。弾性バネおよび粘性ダッシュポットは、軸方向とせん断方向に設置されている。また、変形は、図-2に示す軸方向およびせん断方向を考慮し、骨材の回転による曲げおよびねじれは今回の計算では無視した。サスペンション要素の断面径は、小さい方の骨材と同一とした。

2.2 破壊条件

図-3には、本解析に用いたモール・クーロンの破壊条件と、各応力領域におけるサスペンション要素のレオロジーモデルの対応を示す。すなわち、本モデルでは、材料パラメータは引張強度と内部摩擦角の2つ

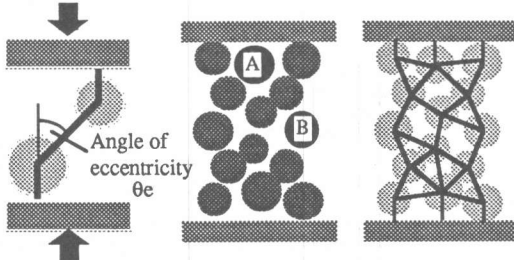


図-4 2Bモデル

図-5 14Bモデル

表-1 入力データ

		θe	$\tan \phi$	F_t	E	η
2B model	2B-1series	35°	0.20, 0.25, 0.30	1,2,3	21	0.5
	2B-2series	45°				
	2B-3series	55°				
		$\tan \phi$	F_t	E	η	v
14B model		0.20	3	21	0.1, 0.5	0.02, 0.01, 0.005

[Notes] θe : Angle of eccentricity, ϕ : Angle of internal friction, F_t : Tensile strength (MPa), E : Elastic modulus (GPa), η : Viscosity (MPa · s), v : Loading speed (cm/s).

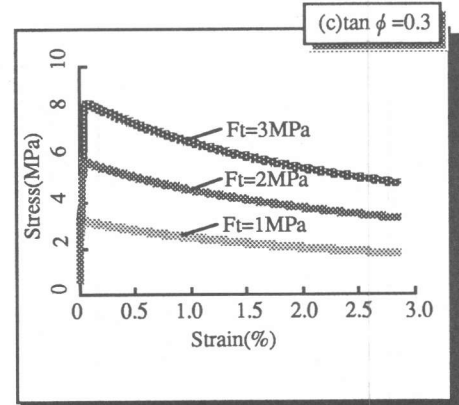
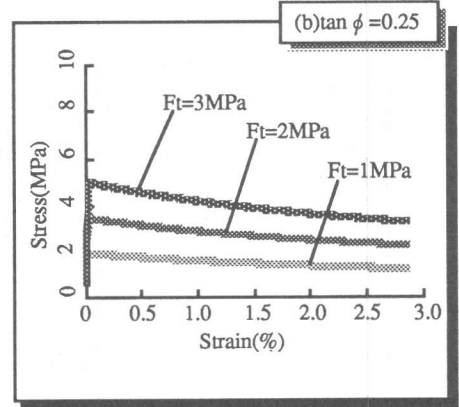
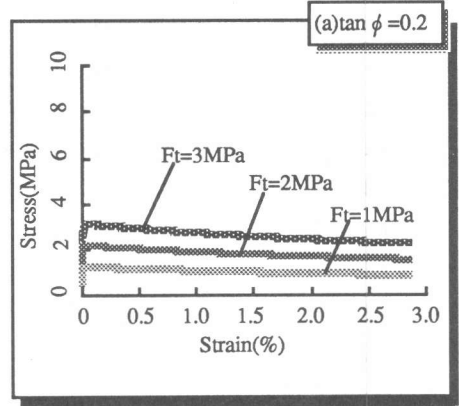


図-6 応力-ひずみ曲線($\theta e=45^\circ$)

であり、純圧縮による破壊は考慮していない。

2.3 解析例

影響要因を簡略化するために、まず、図-4に示す骨材(球形剛体)を2個配置したモデル(以下、2Bモデルと呼ぶ)を用いて解析を行い、その後、図-5に示す14個の骨材を配置したモデル(以下、14Bモデルと呼ぶ)を用いてコンクリートの破壊性状のシミュレーションを行った。

また、それぞれのモデルについて以下の条件で解析を行った。解析に用いた入力データを表-1に示す。

1) 2Bモデル

骨材中心間の直線と荷重軸方向とのなす角(以下、偏心角(θe)と呼ぶ)を、3通りに変化させたシリーズについて、それぞれ計算を行った。いずれも、両骨材半径を0.8および0.9cm、荷重板間距離を3.5cm、荷重時の変位速度を0.1cm/sとして、1秒間(時間刻み 5×10^{-6} s、20万ステップ)の挙動を計算をした。

2) 14Bモデル

図-5に示した14Bモデルの場合は、骨材半径を0.6~0.9cm、荷重板間距離を5cm、荷重時の変位速度を0.

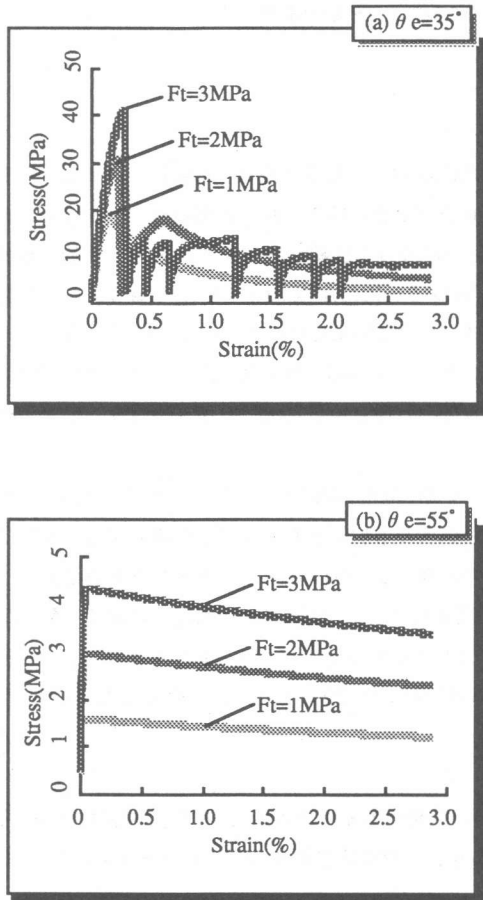


図-7 応力-ひずみ曲線($\tan \phi = 0.3$)

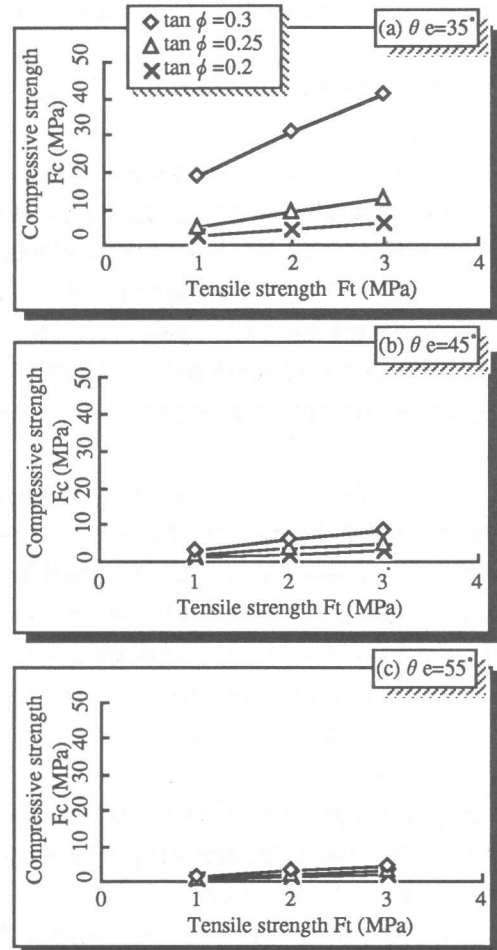


図-8 圧縮強度(F_c)と引張強度(F_t)の関係

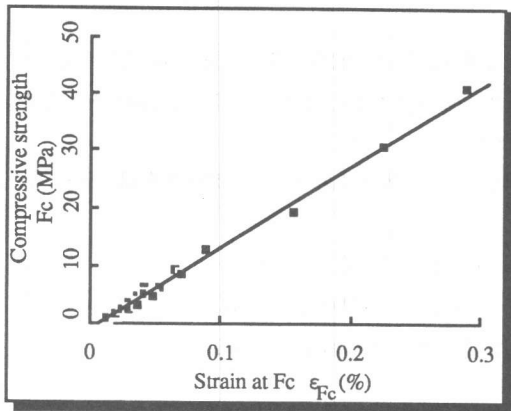


図-9 圧縮強度(F_c)と圧縮強度時のひずみ(ϵ_{F_c})の関係

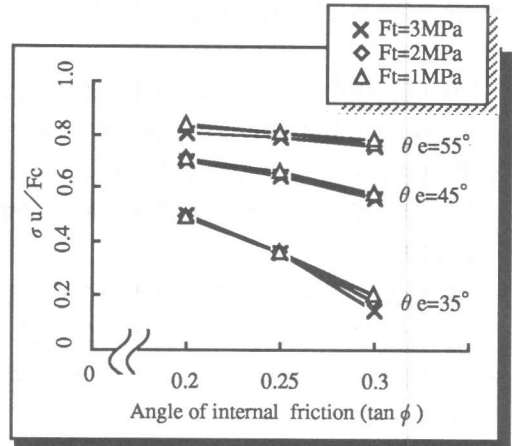


図-10 σ_u/F_c と内部摩擦角($\tan \phi$)の関係

005, 0.01および0.02cm/sとし、それぞれに対して10, 5および2.5秒間の挙動を計算した。

3. 解析結果と考察

3.1 2Bモデル

図-6および図-7は、引張強度(F_t)および偏心角(θe)が応力-ひずみ曲線に及ぼす影響について示したものである。内部摩擦角 $\tan \phi$ を0.2, 0.25および0.3と変化させたいずれの場合でも、引張強度が圧縮強度に大きく影響を及ぼすことがわかる。また、内部摩擦角が小さい場合ほど圧縮強度が低く、応力下降域の形状が、若干緩やかになっている。図-6(c)と図-7(a)および(b)より、内部摩擦角 $\tan \phi = 0.3$ の場合について偏心角(θe)の影響を比較すると、 $\theta e = 45^\circ$ および 55° の場合を示した図-6(c)および図-7(b)では、偏心角の大きさが応力-ひずみ曲線の形状に与える影響が少ないのに対し、 $\theta e = 35^\circ$ の場合の図-7(a)においては、応力-ひずみ曲線が載荷直後、急激に上昇し、極めて高い最大応力点に達した後、急激かつ複雑な応力下降域を示す。

図-8は、各シリーズについて、内部摩擦角 $\tan \phi$ が0.2, 0.25, 0.3と変化したときの圧縮強度(F_c)と引張強度(F_t)の関係を示したものである。いずれの結果も、引張強度の増加にともなって圧縮強度がほぼ線形に増加している。図-9は、各シリーズの圧縮強度(F_c)とそのときのひずみ(ϵ_{F_c})をプロットしたものであり、両者は、引張強度、内部摩擦角の値にかかわらずほぼ同一直線上にある。図-10は、応力下降域の勾配を比較するため、ひずみが3%のときの圧縮応力(σ_u)と圧縮強度(F_c)の比(σ_u/F_c)に与える内部摩擦角($\tan \phi$)の影響を示したものである。引張強度(F_t)にかかわらず、下降域の勾配が内部摩擦角($\tan \phi$)と骨材間の偏心角(θe)に支配されていることがわかる。

3.2 14Bモデル

図-11および図-12は、14Bモデルの応力-ひずみ曲線の出力例である。図の応力-ひずみ曲線は、先に述べた2Bモデルの解析結果を確率的に重ね合わせた結果であり、一般に観察されるコンクリートの応力-ひずみ曲線に類似した形状といえる。

なお、紙数の都合で示していないが、骨材の並び方によって、曲線の形状はかなり変化する。図-11は、載荷速度 v が応力-ひずみ曲線に及ぼす影響を示したものであり、(a),(b)いずれの場合も、載荷開始直後の領

域では、同様の応力上昇を示している。しかし、ひずみがある程度より大きくなると、荷重速度が小さいほど応力上昇傾向が頭打ちとなり、圧縮強度が低く緩やかな勾配の応力下降域を示す。ただし、図-11(b)に示した塑性粘度 $\eta=0.5\text{MPa}\cdot\text{s}$ の場合では、荷重速度にはほぼ比例した圧縮強度を示しているのに対し、図-11(a)の $\eta=0.1\text{MPa}\cdot\text{s}$ の場合では、 $v=0.005\text{cm/s}$ の条件のときの圧縮強度は、 $v=0.01\text{cm/s}$ の場合とほぼ同じ値となり、粘性 η が小さい場合、この程度の荷重速度で静荷重に近い条件となる。以上の傾向は、コンクリートの衝撃荷重下における圧縮特性に類似していると考えることができる。図-12は、粘性の影響を示したものである。図-12(a)の場合、粘性が大きいときに、高い圧縮強度と急激な応力下降域を示し、粘性の影響が顕著に現れている。図-12(b)および(c)の荷重速度では、粘性が強度に与える影響は小さくなるが、異なった形状の応力-ひずみ曲線を示している。

図-13は、図-11に示した $\eta=0.5\text{MPa}\cdot\text{s}$ 、 $v=0.02\text{cm/s}$ の解析例において、図-5中に示したA,Bの位置の加速度の大きさを、各ひずみレベルで平

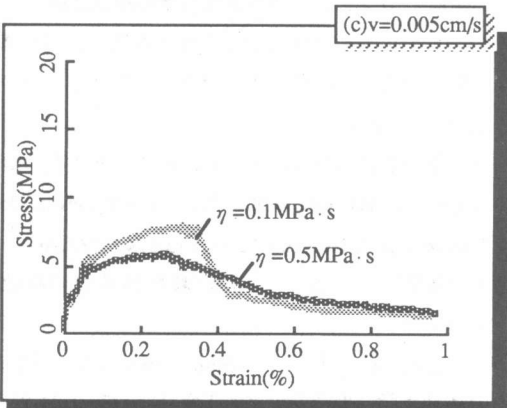
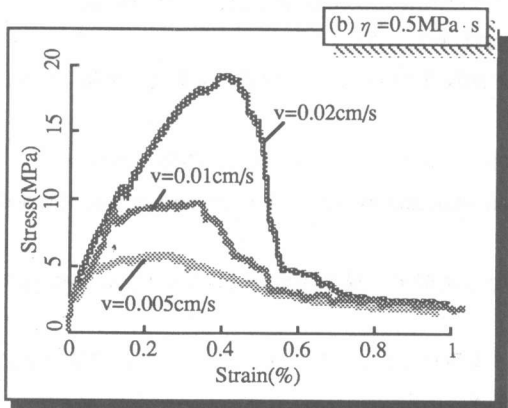
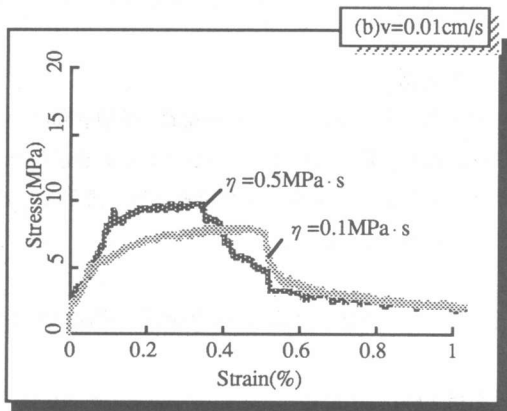
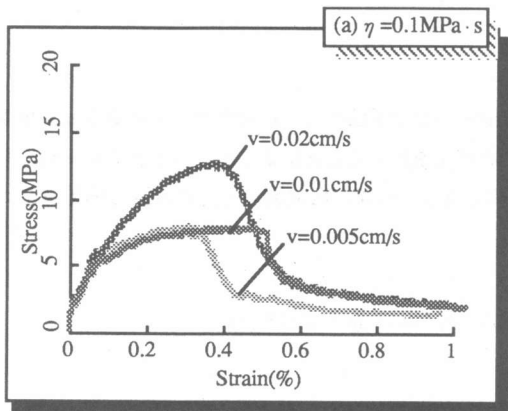
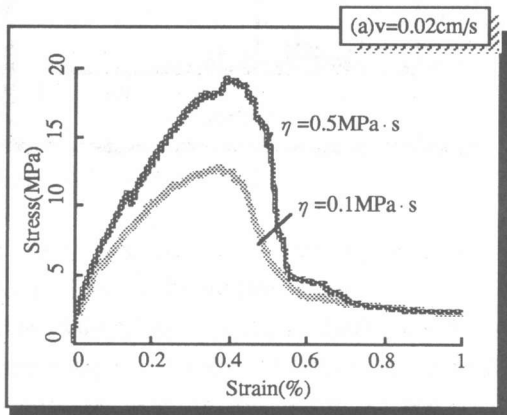
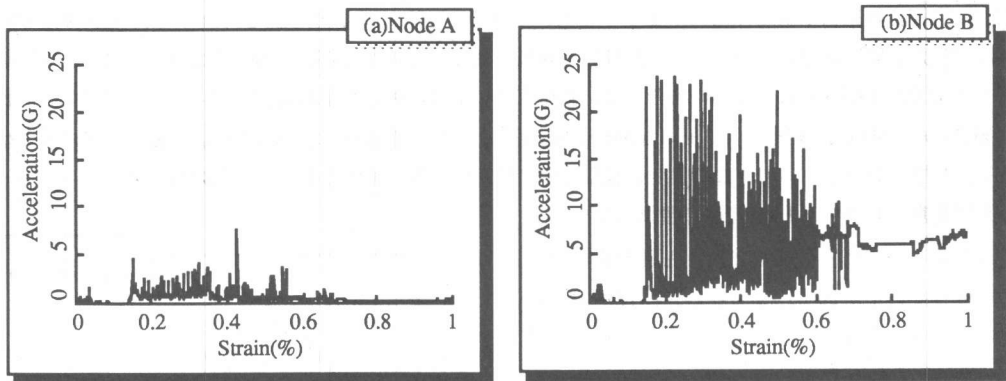


図-11 応力-ひずみ曲線(荷重速度の影響)

図-12 応力-ひずみ曲線(粘性の影響)



図一13 加速度-ひずみ曲線($\eta=0.5\text{MPa}\cdot\text{s}$, $v=0.02\text{cm/s}$)

均化して示したものである。これは、クラックやずりせん断による衝撃波をとらえたものであり、アコースティック・エミッション(AE)現象をシミュレートしているといえる。実際のAE波発生記録では、各ひずみレベルの平均AE振幅ではなく、所定の振幅を超える回数を測定するため、実験結果との直接的な比較は困難であるが、応力-ひずみ曲線のピーク付近より断続的に大きなAEが発生しはじめ、応力下降域に至る近辺では頻繁にAEが発生している。また、図一13の(a),(b)を比較すると、Bの位置の方が、加速度の大きさが極端に大きく、クラックの発生位置の違いが現れている。

4. まとめ

本研究では、コンクリートの変形・破壊挙動のシミュレーション手法として粘弾塑性サスペンション要素法を提案し、若干のシミュレーション結果を示した。この手法を用いることによって、コンクリートの各種条件下の応力-ひずみ曲線を解析的に取り扱うことが可能であり、今後、広範囲の分野における応用が期待できるものと思われる。

[謝辞] 本研究費の一部は、石田財団研究助成金によった。付記して謝意を表する。

[引用文献]

- 1)三橋博三:コンクリートの破壊力学の現状と展望,コンクリート工学, Vol.25, No.2, pp.14-25,1987.2.
- 2)К а ч а н о в, Л.М.: 破壊力学の基礎, pp.1-28, 森北出版, 1977.
- 3)小阪義夫・谷川恭雄:人工軽量骨材コンクリートの力学的特徴について,日本建築学会論文報告集, No.240, pp.21-29, 1976.2.
- 4)森野奎二:骨材との付着の観点から強度を見る,セメント・コンクリート, No.546, pp.42-55, 1992.8.
- 5) Meguro, K. and Hakuno, M. : Fracture Analyses of Concrete Structures by the Modified Distinct Element Method, Proc. of JSCE, No.410/I-12, pp.113-124, 1989.10.
- 6)山本英朗・藤村尚・二木隆: 粒状体地盤の離散剛要素法解析と模型実験,材料, Vol.35, No.392, pp.2-7, 1986.5.
- 7)谷川恭雄・森 博嗣・渡辺健治・梅本宗宏: 二相モデルを用いたフレッシュコンクリートの流動解析手法, 日本建築学会構造系論文報告集, No.427, pp.11-21, 1991.9.