論文　コンクリートの破壊挙動に及ぼす粗骨材の影響に関する引張軟化解析

田嶋　和樹*1・白井　伸明*2・森泉　和人*3

要旨：コンクリートの破壊挙動に及ぼす粗骨材の影響を検討することを目的として，3 次元粒子モデルによる引張軟化解析を行った。解析対象供試体として単一骨材モデルを用いた切欠きを有する三点曲げ供試体を選択し，骨材および界面のヤング係数，引張強度および破壊エネルギーに関するパラメトリック解析結果に基づいて，粗骨材の影響を評価した。その結果，骨材の破壊エネルギーは骨材破壊が生じる場合のみ軟化性状に影響し，ヤング係数は最大荷重に影響することが確認された。また，コンクリートの破壊モードは，破壊の局所化によって支配され，従来の最弱リンク理論に従わない可能性があることが分かった。

キーワード：破壊力学，粗骨材，粒子モデル，ひび割れ，破壊モード，破壊の局所化

1.　はじめに

兵庫県南部地震以後，コンクリートの耐久性問題が表面化し，コンクリート構造物に関して耐震性のみならず耐久性の向上を求める声が高まっている。また，コンクリート構造物の設計が仕様規定型から性能規定型へ移行するにあたり，コンクリート材料の合理的な性能評価基準が求められる中，各種の劣化現象に対する適切な耐久性評価手法を開発することが重要な課題となってきた。

このような背景のもと，石田・前川らはライフスパンシミュレーションに関する研究に取り組んでいる [1)]。ライフスパンシミュレーションとは，製造されてからその使用を終えるまでのすべての段階において，その状態と機能を定量的に把握することを目的としたシミュレーション手法であり，「マルチスケール・コンセプト」に基づいて材料の品質変化と構造物の応答に関する連成解析を行っている。コンクリート工学の様々な研究分野では，これまで優れた解析技術が個々に蓄積されており，今後，それらを統合した連成解析手法の開発が盛んに行われると予想される。筆者らも [2)]，水和反応モデルと熱伝導・熱応力を考慮したひび割れ解析モデルによる連成解析手法の開発を進めており，今後，物質移動解析モデルと組み合わせた劣化予測シミュレーションへの拡張も視野に入れている。

本研究は，開発を進めている連成解析手法のひび割れ解析モデルに焦点を当てており，コンクリートの破壊挙動に及ぼす粗骨材の影響を模擬することができるように改良を行うとともに，解析を通じて新たな知見を得たいと考えている。粗骨材の影響としては，ひび割れの進行阻止，偏向，分散などが知られる。これらはモルタルマトリクス強度に比べ粗骨材強度が高い場合に生じる現象であり，コンクリートは延性的な性質を示す。しかし，高強度コンクリートのように両者の関係が逆転する場合，ひび割れが粗骨材を貫通し，コンクリートは脆性的な性質を示す。また，このような破壊挙動は粗骨材界面の付着特性にも影響を受けるため，モルタルマトリクス－粗骨材－界面の三相構造の状態によって，コンクリートの破壊エネルギーや引張軟化特性などの破壊靭性パラメータも変化する。

以上，本研究ではコンクリートをモルタルマトリクス－粗骨材－界面の三相構造と考え，各

*1 日本大学大学院　理工学研究科建築学専攻　工修(正会員)
*2 日本大学教授　理工学部建築学科　工博　(正会員)
*3 日本大学助手　理工学部建築学科　工修　(正会員)

相の状態とコンクリートの破壊挙動との関連性を解析的に導くことを目的として，単一骨材モデル供試体を用いた各相のパラメータに関するパラメトリック解析を行い，粗骨材がコンクリートの破壊挙動に与える影響について検討する。

2.　3 次元粒子モデル

2.1　粒子モデルの概要

本研究で採用する粒子モデルは，基本的に Jirasek ら [3),4)]の定式化に従い，次のように作成される。

1)粒子モデルは，軸方向力のみを負担するリンク要素によって構成される。

2)引張軟化特性を考慮した応力－ひずみ関係および微視材料パラメータが各リンク要素に付与される。ただし，圧縮挙動は弾性と仮定し，破壊は考慮しない（**図－1**）。

3)同種のリンク要素には，同一の断面剛性（E_m・A）を仮定する。ここで，E_m は微視ヤング係数，A はリンク要素の断面積である。

4)非線形求解法には，非弾性力法を採用する。

本研究の粒子モデルは，Jirasek らによる粒子モデルとは異なり，コンクリート内部の複相構造を模擬し，粗骨材がコンクリートの破壊挙動や引張軟化特性に及ぼす影響を考慮するために，モルタル，骨材および界面リンクからなるラチスネットワークを定義する。

2.2　3 次元粒子モデルへの拡張

コンクリートの破壊挙動は，粗骨材の介在によりひび割れの進行阻止，分散および偏向などが生じるため，3 次元的挙動としての色合いが強い。また，マトリックスによる粗骨材の拘束状態のモデル化もひび割れ伸展に影響を及ぼすと考えられ，3 次元におけるモデル化が必要であると思われる。今後，既往の 2 次元粒子モデルと比較し，その有効性を確認するためにも，本研究では，粒子モデルを 3 次元に拡張する。

3 次元粒子モデルの作成方法は，基本的には 2 次元粒子モデルと同様である。なお，2 次元粒子モデルでは，平面トラスを形成するようにラチスネットワークを作成するが，3 次元粒子モデルでは立体トラスを形成しなければならない。**図－2** に 3 次元粒子モデルのラチスネットワークを示す。

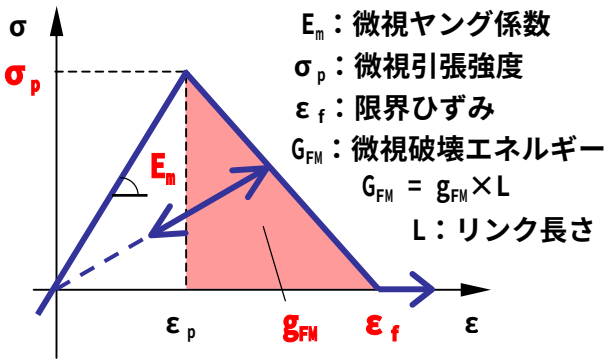
3.　単一骨材モデル供試体の引張軟化特性

3.1　解析対象供試体

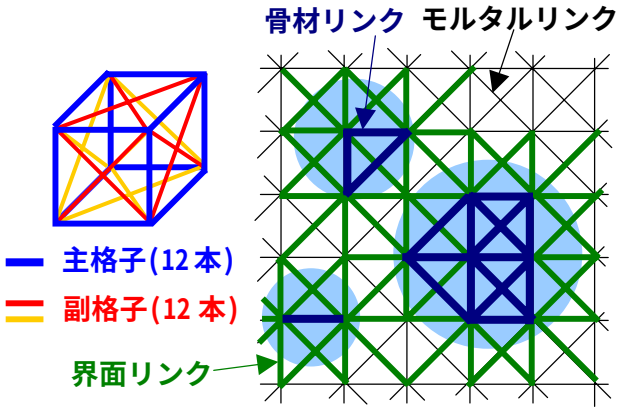
解析対象供試体は，橘高ら [5)]の切欠きを有する 3 点曲げ梁供試体である。**図－3** に解析対象供試体を示す。**表－1** にモルタルの調合条件，**表－2** に巨視的な力学特性を示す。供試体は 20℃の水中で養生され，材齢 28 日で試験された。

3.2　モルタルリンクの微視材料パラメータ

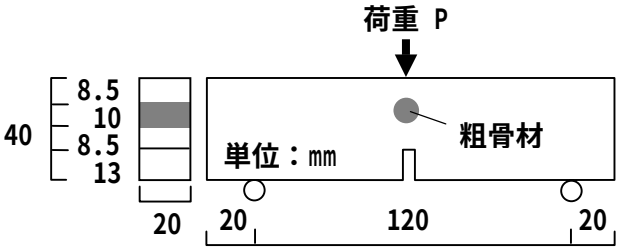
各リンク要素に付与される微視材料パラメータは，微視ヤング係数（E_m），微視引張強度（σ_p）および限界ひずみ（ε_f）である。これら微視材料パラメータは直接求めることができないため，実験から得られる巨視ヤング係数（E）や巨視破壊エネルギー（G_F）等の巨視材料パラメータと関連付けられる。



図－1　微視材料パラメータ



図－2　三次元粒子モデルのラチスネットワーク



図－3　解析対象供試体

表－1　モルタルの調合

W/C (%)	単位量 (kg/m³)			
	W	C	S	G
50	428	853	777	0

表－2　モルタルの性質

σ_c(N/mm²)	σ_t(N/mm²)	E(N/mm²)	G_F(N/m)
30	2.6	26000	26.3

σ_c：圧縮強度，σ_t：割裂引張強度

複相構造を模擬する粒子モデルでは，母材であるモルタルリンクの微視材料パラメータが解析の結果を大きく左右する。本研究では，解析対象供試体と形状および寸法が等しく，粗骨材を含まないモルタル供試体について，σ_p（0.05～2.5 N/mm² まで 0.5 刻み）および g_{FM} にリンク要素長さ（L）を乗じた G_{FM}（0.005～0.025 N/mm まで 0.005 刻み）に関する計 25 通りのパラメトリック解析を行い，モルタルリンクの微視材料パラメータを同定する。式（1）にパラメトリック解析により導かれた巨視材料パラメータと微視材料パラメータの関係式を示す。

$$G_F = 3.25G_{FM}$$
$$\sigma_b = 2.92\sigma_p + 105.56G_{FM} + 0.44 \qquad (1)$$

ここで，σ_b は曲げ強度であり，G_F とともに微視材料パラメータと関連付ける巨視材料パラメータとして選択した。なお，σ_b を計算するにあたり，曲げ強度算定式における有効断面としてリガメント断面を用いた。

3.3　単一骨材モデルのひび割れ解析

各相の状態に応じてコンクリートの破壊挙動や引張軟化特性がどのように変化するか検討するため，単一骨材モデル供試体を用いて，骨材および界面リンクの微視材料パラメータに関するパラメトリック解析を行う。以降，モルタル，骨材および界面の微視材料パラメータについてそれぞれ M, A および I の添字を付して表すことにする。パラメトリック解析は，モルタル－骨材の完全付着を仮定した場合（Case1）と界面のパラメータを材齢 1 日および 7 日のモルタルに相当するように設定した場合（Case2）の 2 ケースについて行った。両ケースとも，${}_AE_m/{}_ME_m$ および ${}_Ag_{FM}/{}_Mg_{FM}$ を 0.33, 0.5, 1.0, 2.0 と変化させ，${}_A\sigma_p/{}_M\sigma_p$ を 0.5～1.5 まで 0.25 ずつ（1.0～1.25 までは 0.05 ずつ）変化させた。

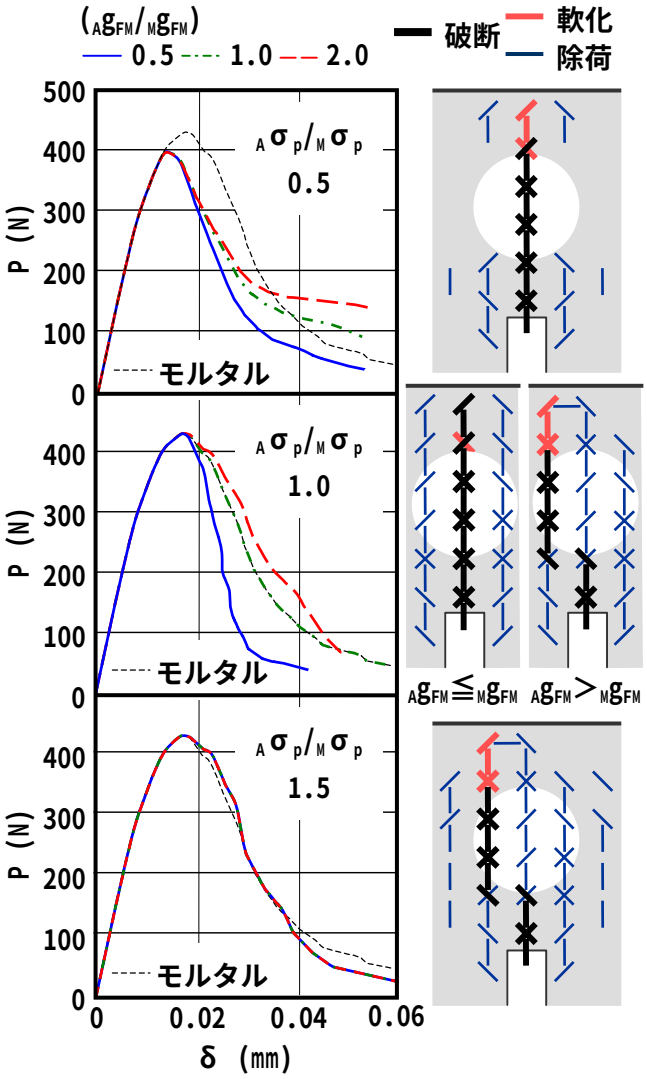
3.3.1　Case1（モルタル－骨材 2 相構造）

モルタル－骨材間の完全付着を仮定する Case1 は，モルタル－骨材の 2 相構造として解析を行い，粗骨材の σ_p，g_{FM} および E_m が引張軟化特性および破壊挙動に及ぼす影響に関して検討する。

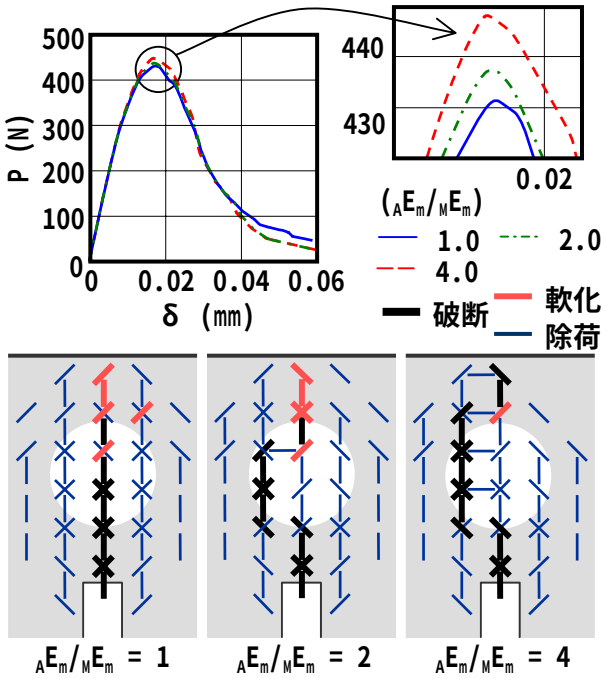
図－4 に ${}_AE_m = {}_ME_m = 26000$ N/mm², ${}_A\sigma_p/{}_M\sigma_p = 0.5$, 1.0 および 1.5 とした場合の荷重（P）－載荷点変位（δ）関係および最終状態のひび割れ状況を示す。供試体の破壊モードは ${}_A\sigma_p$ と ${}_M\sigma_p$ の関係に応じて，${}_A\sigma_p < {}_M\sigma_p$ の場合は骨材破壊，${}_A\sigma_p > {}_M\sigma_p$ の場合は界面破壊となり，最弱リンク理論[6]に従っている。しかし，${}_A\sigma_p = {}_M\sigma_p$ の場合，${}_Ag_{FM} \leqq {}_Mg_{FM}$ ではひび割れが直線的に進行するのに対し，${}_Ag_{FM} > {}_Mg_{FM}$ では破壊モードが変化している。また，${}_Ag_{FM}$ は骨材破壊が生じる場合においてのみ軟化性状に影響を及ぼしており，${}_Ag_{FM}$ の値が小さいほど破壊は脆性的となることから，粗骨材が破壊挙動に及ぼす影響を検討する際には，強度だけでなく破壊エネルギーに基づく評価も必要であると考えられる。

図－5 に ${}_A\sigma_p = {}_M\sigma_p$ として ${}_AE_m/{}_ME_m = 1$, 2 および 4 と変化させた場合の P－δ関係および最終状態のひび割れ状況を示す。図－5 を見ると，モルタル供試体に比べて単一骨材モデル供試体の最大荷重（P_{max}）が上昇しており，この傾向は

$_A\sigma_p$ および $_Ag_{FM}$ の値に関わらず確認された。同様の傾向は，筆者らの実験[7]でも確認されている。最弱リンク理論に基づく強度ベースの考察では，モルタル，骨材および界面のいずれかで破壊が生じるにしても，最も強度の低い相で破壊が生じることになるため，モルタル供試体よりもコンクリート供試体の P_{max} が上昇する傾向を説明することができない。つまり，P_{max} の上昇傾向はブリッジング効果に及ぼす粗骨材の剛性の影響によるものと考えられる。また，破壊状況を見ると $_AE_m/_ME_m$ の値が大きくなるにつれて骨材破壊から界面破壊へ移行しており，コンクリートの破壊モードを評価する際には，強度および破壊エネルギーに加えてヤング係数に基づいた評価も必要であり，相互の影響を適切に考慮しなければならないと考えられる。



図－4　$_A\sigma_p$ および $_AG_{FM}$ の影響



図－5　$_AE_m$ の影響

3.3.2　Case2（モルタル－骨材－界面 3 相構造）

Case1 では，モルタル－骨材間の完全付着を仮定したが，実際のコンクリートにおいては骨材界面に遷移帯が形成されるため，完全付着状態にはならない。遷移帯の形成メカニズムは未解明の部分が多く，実際に即して界面リンクの微視材料パラメータを同定することは現状において困難であると考え，Case2 では材齢 28 日の界面の状態として，材齢 1 日（Case2-1）および 7 日（Case2-2）のモルタルを仮定する。なお，文献には材齢 1 日および 7 日の物性が示されていないため，界面リンクの微視材料パラメータを HYMOSTRUC[8]による水和反応解析に基づいて決定する。まず，解析対象供試体の調合から HYMOSTRUC を用いて各材齢の水和度を計算し，Schutter の式[9]を一般化した式(4)を用いて，モルタルの物性を推定する。

$$\frac{P(\alpha)}{P(\alpha=1)} = \left(\frac{\alpha-\alpha_0}{1-\alpha_0}\right)^n \qquad (2)$$

ここで，P(α)：水和度がαのときの物性値，α：水和度，α_0，n：定数。

Schutter の式を用いるために必要な未知定数 n および α ＝1 における物性値は，既報の方

法[2]に基づいて，筆者らによる材齢を変化させた切欠きを有するモルタル製（水セメント比 50 %）3 点曲げ供試体に関する実験結果[7]から同定した。**表－3** に推定した物性値を示す。

図－6 に ${}_{A}E_{m}/{}_{M}E_{m}$ = 1 (${}_{A}E_{m}$ = 26000 N/mm^2), ${}_{A}g_{FM}/{}_{M}g_{FM}$ = 0.33, ${}_{A}\sigma_{p}/{}_{M}\sigma_{p}$ = 1.1 とした場合の最終状態におけるひび割れ状況を示す。Case2 では，Case1 と同様に ${}_{A}g_{FM}$ や ${}_{A}E_{m}$ の影響が確認されたが，${}_{A}\sigma_{p}$ と破壊モードの関係は Case1 と異なった。**図－6** を見ると，Case1（${}_{A}\sigma_{p} > {}_{M}\sigma_{p} = {}_{I}\sigma_{p}$）では骨材破壊が見られるが，Case2（${}_{A}\sigma_{p} > {}_{M}\sigma_{p} > {}_{I}\sigma_{p}$）では界面破壊となっている。以降，次の 2 点に着目して考察を進める。

1)破壊モードの相違を生じさせた要因

2)${}_{A}\sigma_{p} > {}_{I}\sigma_{p}$ において骨材破壊が生じるメカニズム

図－6 において Case1 と Case2-1 を比較すると，Case2-1 の方が状態変化（軟化，除荷，破断）した要素が少なく，Case1 が 441 本，Case2-1 が 310 本であった。このことから，他相に比べて低強度である界面に破壊の局所化が生じたために，Case1 と Case2 において破壊モードの相違が生じたと考えられる。しかし，Case2-2 では 438 本の要素が状態変化しており，Case1 との間に大きな違いは見られない。

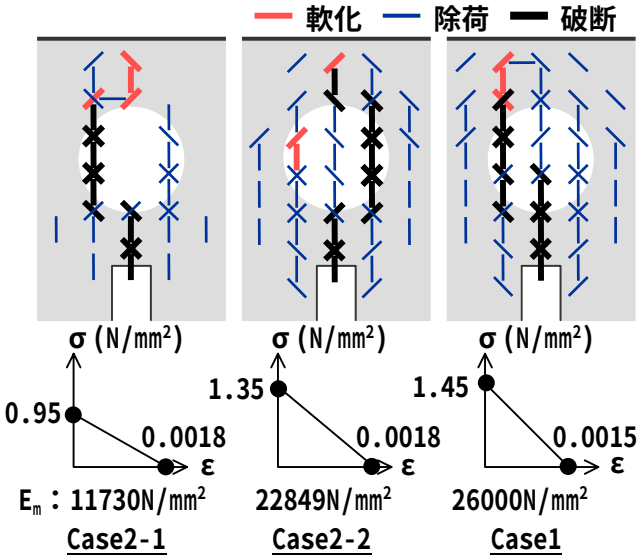
図－7 に Case1 と Case2-2 のひび割れ伸展状況およびリンク要素の応力状態の推移を示す。ひび割れ伸展状況を見ると，ピーク近傍まで両者のひび割れ状況に差異は見られなかったが，軟化開始直後に差異が生じている。Case1 では界面および骨材に軟化リンクが現れているのに対して，Case2 では界面に軟化リンクが集中し，骨材に生じていた軟化リンクが除荷へ移行している。その後，破断リンクの発生・増加とともに，リンク要素の状態が軟化から除荷へ移行し，両者ともにひび割れ進行ルートが確定している。このように，界面における破壊の局所化によって生じた，ポストピークにおけるひび割れ伸展の相違も破壊モードの相違を生じさせた要因であると考えられる。

次に応力状態の推移を見ると，Case1 および Case2-2 ともに破断リンクが発生するまで要素の応力状態は載荷軸を中心に対称であり，破断リンクの増加に伴って非対称に変化している。また，ひび割れ進行ルート決定するにつれて，両者とも骨材リンクに局所的な圧縮応力が発生している。この局所圧縮の発生メカニズムを考えると，ひび割れ進行ルート決定後，Case1 では骨材左側，Case2-2 では骨材右側界面における変形が増大し，それよって生じた非対称の応力状態に起因していると考えられる。ここで，骨材に生じる局所圧縮とひび割れ伸展状況を併せて，${}_{A}\sigma_{p} > {}_{I}\sigma_{p}$ において骨材破壊が生じるメカニズムを考察する。骨材破壊が生じた Case1 では，骨材下部に軟化リンクが発生している状態で局所圧縮が生じているのに対し，骨材が破壊しない Case2-2 では，局所圧縮発生時には既に骨材リンクは除荷へ移行している。以上のことから，ブリッジングによる引張軟化が生じている状態の骨材に，局所的な圧縮応力が生じ，骨材のひずみ勾配が大きくなることにより骨材破壊が生じると考えられる。

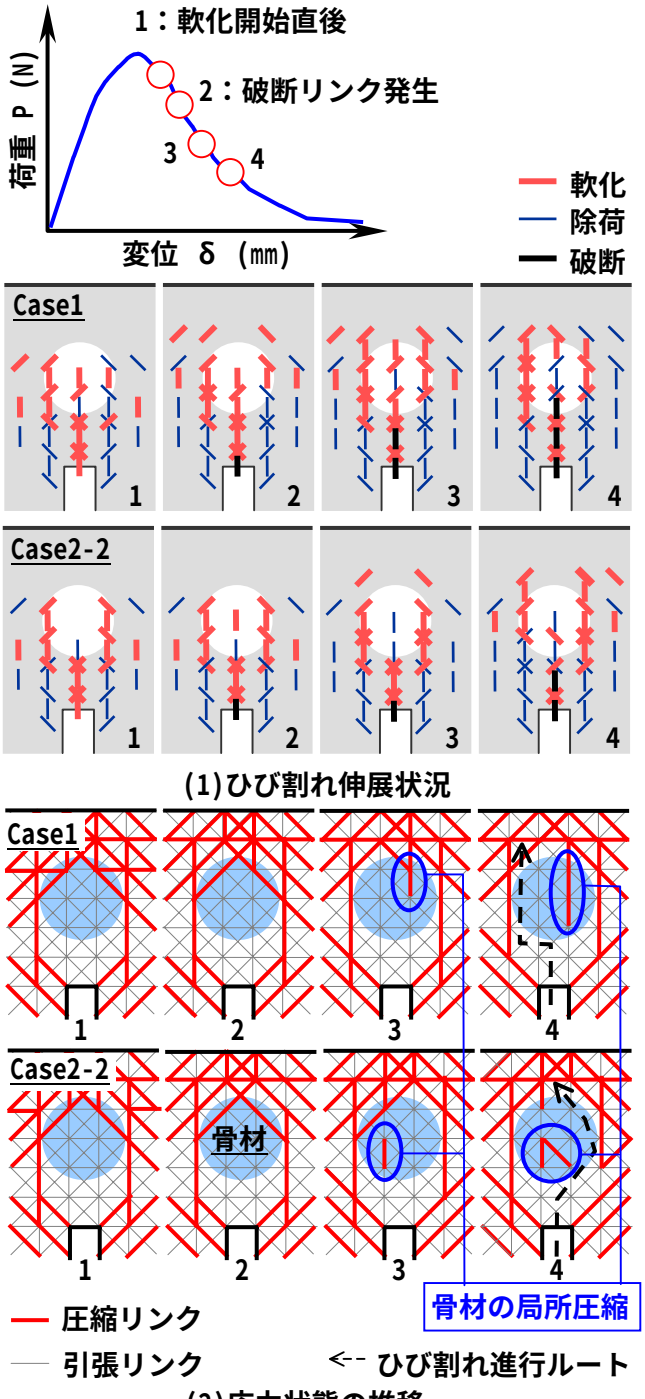
表－3　設定した界面の物性（Case2-2）

	α	α_0	n	P(α=1)	P(α)
σ_b	0.77	0.25	0.57	5.62	5.07
G_F			1.29	0.027	0.017
E			0.12	26413	22849

σ_b(N/mm^2)，G_F(N/mm)，E(N/mm^2)



図－6　界面リンクのパラメータと破壊モード



図－7　ひび割れ伸展および応力状態の推移

4．まとめ

粒子モデルを3次元に拡張し，コンクリートの破壊挙動に及ぼす粗骨材の影響について，単一骨材モデルを対象としたパラメトリック解析から以下の知見を得た。

1)3 点曲げ供試体の軟化性状は，骨材破壊が生じる場合のみ骨材の破壊エネルギーの影響を受ける。

2) ブリッジングの効果により，3点曲げ供試体の最大荷重は骨材のヤング係数が大きいほど上昇する。

3)コンクリートの破壊モード（モルタル破壊，骨材破壊，界面破壊）は，破壊の局所化の影響に支配され，粗骨材の破壊エネルギーやヤング係数の影響も受けることから，従来の最弱リンク理論に従わない可能性がある。

4)コンクリート中の骨材が破断するメカニズムとして，ブリッジング状態にある骨材に局所的な圧縮応力が生じることによって生じる大きなひずみ勾配が考えられる。

謝辞

本研究の一部は文科省学術フロンティア推進事業（日本大学理工学部）：研究課題「環境･防災都市に関する研究（研究代表者：大津岩夫，研究委員長：石丸辰治）」の一環として実施したものであり，一部は科学研究費補助金（基盤研究(C)(2)，代表者:白井伸明）の助成を受けて行われたものである。また，本研究を行うにあたりご協力頂いた笠原昭男氏および河村準氏（共に日本大学４年）に感謝の意を表する。

参考文献

1)石田，前川：物質エネルギーの生成・移動と変形・応力場に関する連成解析システム，土木学会論文集，Vol.44，No.627，pp.13-25，1999

2)Tajima，K.，Moriizumi，K.，and Shirai，N.：Numerical Calculation Mechanics Model Considering Hydration of Concrete，Proc. FRAMCOS-4(Paris)，Vol.1，pp.107-114，Jun.2001

3)Jirasek，M. & Bazant，Z.P.：Macroscopic fracture characteristics of random particle systems，International Journal of Fracture，Vol.69，pp.201-228，1994/1995

4)Jirasek，M. & Bazant，Z.P.： Particle model for quasibrittle fracture and application to sea ice，Journal of Engineering Mechanics，1016-1025，1995.

5)小野，橘高他：高強度コンクリート複合モデルの破壊性状 ―多相複合材モデルのひび割れ伸展解析―，日本建築学会大会学術講演梗概集（東海），A-1 分冊，pp.871-872，1994

6)Mihashi，H.：A Stochastic Theory for Fracture of Concrete，Developments in Civil Engineering，7，Fracture Mechanics of Concrete，Edited by Folker H. Wittmann，Elsevier Science Publishers B.V.，pp.301-339，1983

7)田嶋他：水セメント比と材齢の異なるコンクリートの引張軟化特性，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.24，No.2，pp.169-174，2002

8)K. van Breugel：Simulation of Hydration and Formation of Structure Hardening Cement-based Materials，PhD Thesis，Delft University of Technology，1997

9)De Schutter，G.，Taerwe，L.：Degree of Hydration-based Description of Mechanical Properties of Early Age Concrete，Materials and Structure Vol.29，335-344，1996