

個別要素法によるコンクリート圧縮破壊解析 におけるモール・クーロン条件の及ぼす影響

Effect of Mohr-Coulomb's Parameters on Compressive Failure Analysis of Concrete Using Distinct Element Method

原木大輔*・白石博文**・香月智***

Daisuke HARAKI, Hirobumi SHIRAISHI and Satoshi KATSUKI

*学生会員 防衛大学校理工学研究科 建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

**学生会員 修(工) 防衛大学校理工学研究科 建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

***正会員 工博 防衛大学校教授 建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

This paper discusses the effect of Mohr-Coulomb's parameters on the analysis results of concrete-like material failure behavior using the Distinct Element Method. The failure behavior of plane concrete which is model by the particle elements arranged in a couple of plane which are stood parallel on a horizontal plane is analyzed under several constitutive law conditions. Two types Mohr-Coulomb condition are used, and various cohesion parameter and friction angles are combined in some simulation condition. It is pointed out that 5 types failure modes appear in global viewpoint depending on the Mohr-Coulomb condition.

1. 緒 言

個別要素法は、本来要素間の結合が分離されているものの集合体を解析するものであるため、コンクリート材料の亀裂の発生やその進展に関しての再現性に優れる¹⁾のではないかと考えられる。特に、衝撃的荷重を受ける構造物の解析に適用すれば、分離破砕片の挙動を再現できる可能性もあり、応用分野が広い。このような観点から、コンクリート材料に対する個別要素法の適用研究を見ると、以下のようなものがある。

まず、目黒²⁾は、コンクリートの破壊問題に拡張個別要素法を適用し、破壊を伴う大変形問題に適していることを示している。下田ら^{3~6)}は、個別要素法を用いてコンクリート製砂防ダム袖部模型の衝撃応答解析を行い、袖部の変形過程、破壊過程を明確にした。中田、榎谷ら⁷⁾は、個別要素法を鉄筋コンクリートはりの衝撃挙動解析に適用し、実験結果をよくシミュレートすることを示した。森川ら⁸⁾は、コンクリート構造物の破壊現象を追跡する解析手法として個別要素法を取り上げ、解析で用いる各種パラメータの設定法を述べ、連続体としての挙動から大変形、破壊の発生、進行に至る解析が可能であることを示した。別府ら⁹⁾は高ひずみ速度下におけるコンクリート材料の弾塑性解析に対する個別要素法の適用性を検討するため、コンクリートの静的圧縮破壊挙動や急速三軸圧縮試験のシミュレーションを行った。

これらの研究は、個別要素法が載荷条件などによ

らず破壊現象に対して適用できることを示している。しかし、個別要素法は局所の接触モデルによって、全体系の破壊現象などの挙動を決定することから、バネ係数等の各種パラメータの設定が難しいとされている。そこで、各研究者それぞれが解析対象となる構造や現象に合わせて、試行的な感度解析を通じて解析パラメータと解析モデルを的確に選択することにより、それぞれの現象を再現している。コンクリートの破壊現象を再現する上で、一般的にせん断方向の破壊基準として用いられるモール・クーロンの破壊基準はその破壊形態に大きく影響する因子であると思われるが、粘着力と摩擦角が変化すると破壊形態にどのような影響を与えるかについては基礎的に検討されていない。

そこで本研究は個別要素法によってコンクリート供試体の静的圧縮試験をモデル化し、バネの軟化の影響を除いた簡素なモデルにおいてモール・クーロンの破壊基準の形状や粘着力と摩擦角が破壊形態に及ぼす影響について検討したものである。

2. 解析手法

2.1 基本式

本解析では、コンクリートを細かい球形要素の集合体と考え、要素間にコンクリートの構成則に対応する接触バネを導入し¹⁰⁾、時々刻々運動方程式はオイラー法に比べて計算結果が安定して得られる中心差分法¹¹⁾を用いて解く。ただし、速度項は後進差分とした。すなわち、

$$\ddot{\mathbf{u}}(t) = \frac{\mathbf{u}(t + \Delta t) - 2\mathbf{u}(t) + \mathbf{u}(t - \Delta t))}{\Delta t^2} \quad (1a)$$

$$\dot{\mathbf{u}}(t) = \frac{\mathbf{u}(t) - \mathbf{u}(t - \Delta t))}{\Delta t} \quad (1b)$$

ここで、 $\mathbf{u}$:変位ベクトル、 $(\cdot)$:時間に関する1次微分。

これを運動方程式と連立して解くと、変位を求める基本式は次式となる。

$$\mathbf{u}(t + \Delta t) = \left(\frac{\mathbf{M}}{\Delta t^2} \right)^{-1} \left\{ \mathbf{F}(t) - \mathbf{K}\mathbf{u}(t) + \mathbf{D} \frac{\Delta \mathbf{u}}{\Delta t} \right\} + (2\mathbf{u}(t) - \mathbf{u}(t - \Delta t)) \quad (2)$$

ここで、 $\mathbf{M}$:質量マトリクス、 $\mathbf{D}$:減衰マトリクス、 $\mathbf{K}$:剛性マトリクス、 $\mathbf{F}$:外力ベクトル。

本研究ではモール・クーロンの限界条件が破壊形態にどのように影響を及ぼすかを明確にすることを目的としているため、法線方向バネに関しては圧縮限界と引張限界のみを考慮した構成則とし、コンクリート材料の応力～ひずみ曲線のモデル化については、図-1に示すPopovics式^{12,13)}を採用した。また、引張力には圧縮強度の1/10程度まで抵抗するモデルを用いた。

$$P = P_{\max} \left(\delta / \delta_{\max} \right)^n \frac{n}{(n-1) + (\delta / \delta_{\max})^n} \quad (3)$$

ここで、 P :法線方向のバネ力、 δ :法線方向バネの任意の変形量、 $P_{\max}$:法線方向バネの強度(圧縮強度 30N/mm^2 に相当するバネ力)、 $\delta_{\max}$:強度に対応するバネの変形量(ひずみで 2000μ に相当する変形量とした)、 n :非線形パラメータ(上昇域:1.522, 下降域:0.95)。

接線方向バネについては、線形モデルとし、モール・クーロンのすべり限界条件を与える。この場合、既往研究ではモール・クーロンの限界条件を変化させないもの^{3~8)}と、法線方向バネ力の強さに応じて変化させるもの^{9,14)}とがある。そこで本研究においては、モール・クーロンの限界条件を2種類設定し、比較検討する。すなわち、一方は図-2(a)に示すような1段階モデルで、他方は図-2(b)に示すような法線方向バネ力が圧縮強度の半分以上を超えると摩擦角を $\phi=0$ とする2段階モデルである。

すなわち1段階モデルでは、

$$P_s = k_s \delta_s \quad (4a)$$

$$|P_s| \leq C + P_n \tan \phi \quad (4b)$$

2段階モデルでは、

$$P_s = k_s \delta_s \quad (5a)$$

$$|P_s| \leq C + P_n \tan \phi \quad (P_n < \frac{1}{2} P_{\max}) \quad (5b)$$

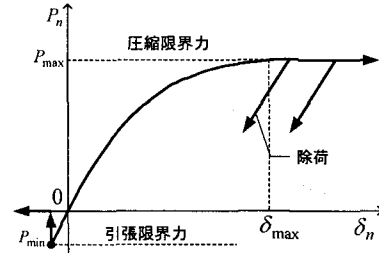
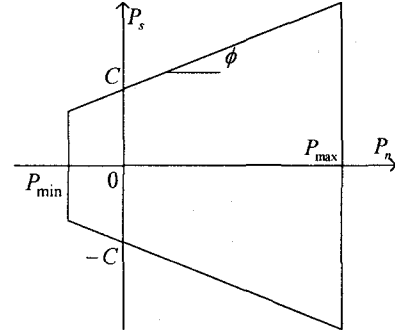
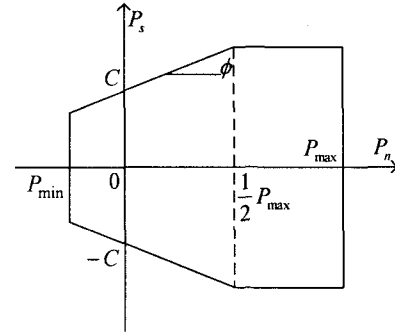


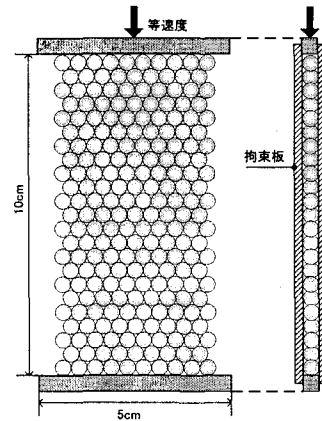
図-1 法線方向バネの構成則



(a) 1段階モデル



(b) 2段階モデル
図-2 限界条件



(a) (b)
図-3 解析要素配置

$$|P_s| \leq C + \frac{1}{2} P_{\max} \tan \phi \quad (P_n > \frac{1}{2} P_{\max}) \quad (5c)$$

ここで、 P_s :要素に作用する接線方向の力、 k_s :接線方向のバネ定数、 δ_s :せん断方向のバネの変形量、 C :粘着力、 ϕ :摩擦角、 P_n :要素に作用する法線方向の力、 $P_{\max}$:法線方向バネ力の圧縮強度。

2.2 解析モデル

本解析法は3次元解析であるが、構成則パラメータの影響を基礎的に調べるために、図-3(a),(b)に示すようにモデルの前後面を平面要素で挟むことにより、2次元モデルの条件で解析した。载荷状態はモデルの上下を平面要素で挟み、上側の平面を一定の速度で下げることで表現した。これは、薄い平板状の供試体に相当し、面外変形は生じない状態である。

解析に用いた条件¹⁵⁾を表-1に示す。摩擦角は $\phi=15^\circ$ 、 $\phi=20^\circ$ 、 $\phi=25^\circ$ 、 $\phi=30^\circ$ と $\phi=35^\circ$ の5種類、粘着力は $C=15\text{N}$ 、 $C=30\text{N}$ 、 $C=45\text{N}$ 、 $C=60\text{N}$ 、 $C=75\text{N}$ と $C=90\text{N}$ の6種類を組み合わせ、計30種類について検討した。

3. 解析結果

3.1 1段階モデルにおける粘着力 C と摩擦角 ϕ の影響

(1) 荷重～変形関係

図-4(a),(b)に解析で得られた荷重～変形関係を示す。(a)は粘着力を $C=60\text{N}$ と一定に保って、摩擦角 $\phi=15^\circ\sim 35^\circ$ を変化させた場合、(b)は摩擦角を $\phi=25^\circ$ と一定に保って、粘着力 $C=15\text{N}\sim 90\text{N}$ を変化させた場合について比較したものである。図-4(a)より、摩擦角の増加に伴って最大耐力が増加することがわかる。また、図-4(b)より、粘着力の増加によっても最大耐力が増加することがわかる。これらの弾塑性挙動は、その形状から大別して3つに分類できる。すなわち、①Mode-1：最大耐力後に単調に耐力が低下するもの、②Mode-2：最大耐力直後に変形の増分がないままに最大耐力の1/3程度まで耐力を失うもの、③Mode-3：耐力の低下が現れず単調に最大耐力が漸近するものである。このMode-3の場合には変形量が 1mm を超えても耐力の急激な低下はない。全解析結果は、粘着力と摩擦角の組み合わせに応じて表-2のように分類された。表中に示した $C=15\text{N}$ と $\phi=20^\circ$ 、 $C=90\text{N}$ と $\phi=15^\circ$ を結ぶ太線より左上の領域がMode-1となり、逆に、 $C=60\text{N}$ 、 $\phi=35^\circ$ と $C=90\text{N}$ 、 $\phi=30^\circ$ を結ぶ太線より右下の領域ではMode-3が現れる。そして、中央部分の大部分はMode-2となることがわかる。

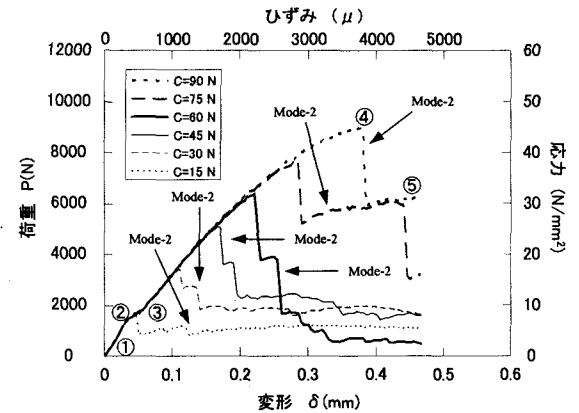
(2) 破壊状態の推移

図-5には、各モードの代表的な粘着力と摩擦角の組み合わせにおける破壊状態の推移を示している。

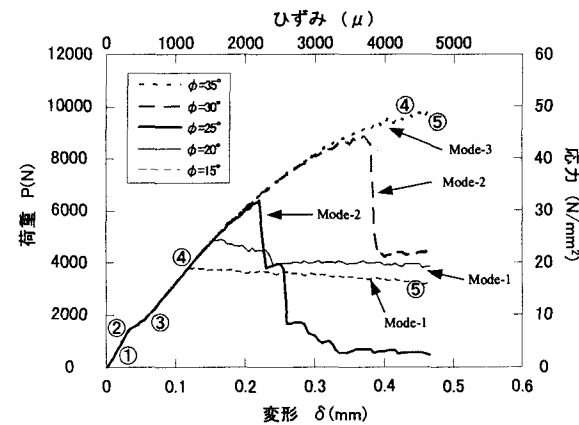
図-5(a)の $C=60\text{N}$ 、 $\phi=15^\circ$ (Mode-1)において、下段に示した要素間接触の限界状態の推移を見ると、① $\delta=0.04\text{mm}$ において、コンクリート供試体を左斜め方向に貫く一連の要素間の限界状態(×印)が現れる。これ(×印)は、水平に隣接する要素間の法線方向バネが引張限界に達したものであり、本法ではこの状態で法線方向バネ力は0となる。なお、この

表-1 解析条件

バネ係数	減衰率	圧縮 限界力 $P_{\max}$ (N)	引張 限界力 $P_{\min}$ (N)	非線形 パラメータ n	粘着力 C (N)	摩擦角 ϕ (°)
法線方向 k_n (N/mm)	接線方向 k_s (N/mm)					
7.9×10^4	1.6×10^4	0.05	5.89×10^2	5.89×10	上昇域 1.522 下降域 0.95	15, 30, 45, 60, 75, 90 : 6種類
						15, 20, 25, 30, 35 : 5種類



(a) $C=60\text{N}$ (一定)



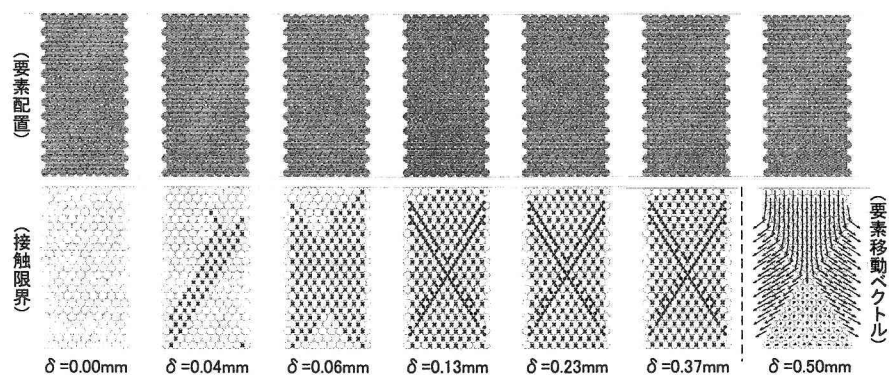
(b) $\phi=25^\circ$ (一定)

図-4 荷重～変形関係

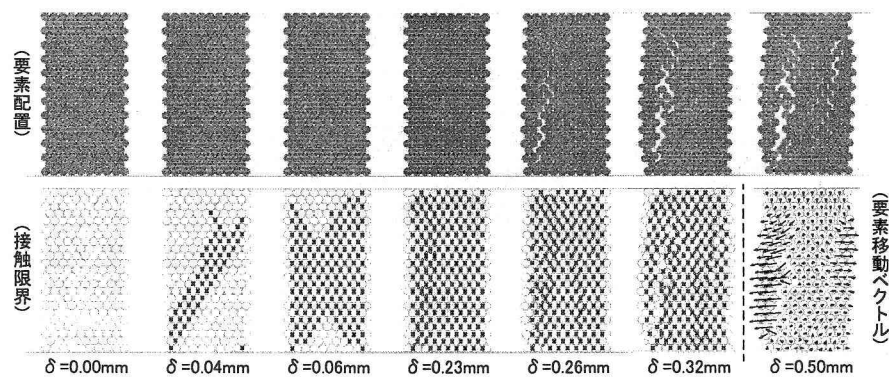
表-2 粘着力と摩擦角の組み合わせと弾塑性挙動の分類

摩擦角 ϕ	15°	20°	25°	30°	35°
粘着力 C					
15 N	Mode-1	Mode-1	Mode-2	Mode-2	Mode-2
30 N	Mode-1	Mode-1	Mode-2	Mode-2	Mode-2
45 N	Mode-1	Mode-1	Mode-2	Mode-2	Mode-2
60 N	Mode-1	Mode-2	Mode-2	Mode-2	Mode-3
75 N	Mode-1	Mode-2	Mode-2	Mode-2	Mode-3
90 N	Mode-1	Mode-2	Mode-2	Mode-3	Mode-3

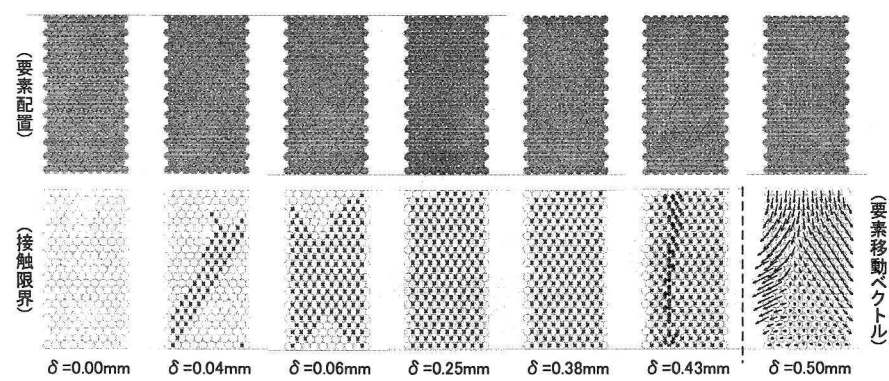
斜め線が左右対称とならないのは、初期配列もしくは解析の時間積分において丸め誤差などの数値処理誤差が影響しているためである。この $\delta=0.04\text{mm}$ は、図-4(a)において、わずかに剛性が低下する点に対応している。② $\delta=0.06\text{mm}$ では、引張限界に達



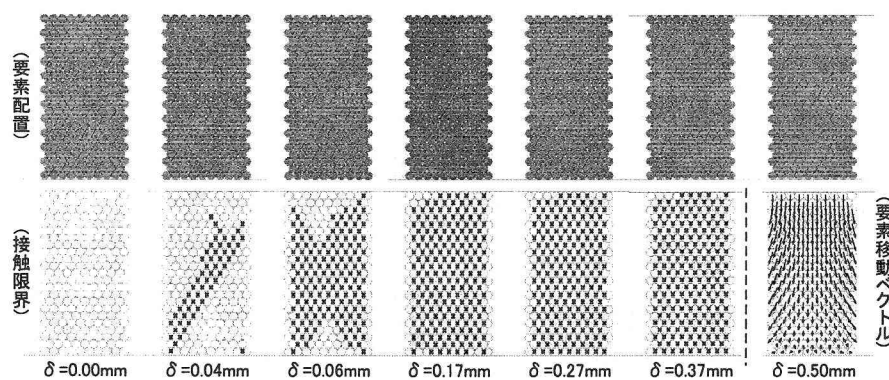
(a) $C = 60\text{N}, \phi = 15^\circ$ (Mode-1)



(b) $C = 60\text{N}, \phi = 25^\circ$ (Mode-2)



(c) $C = 90\text{N}, \phi = 25^\circ$ (Mode-2)



(d) $C = 60\text{N}, \phi = 35^\circ$ (Mode-3)

× : 横方向引張限界
 ◇ : 斜め方向引張限界
 ● : クーロン限界

図-5 破壊状態の推移

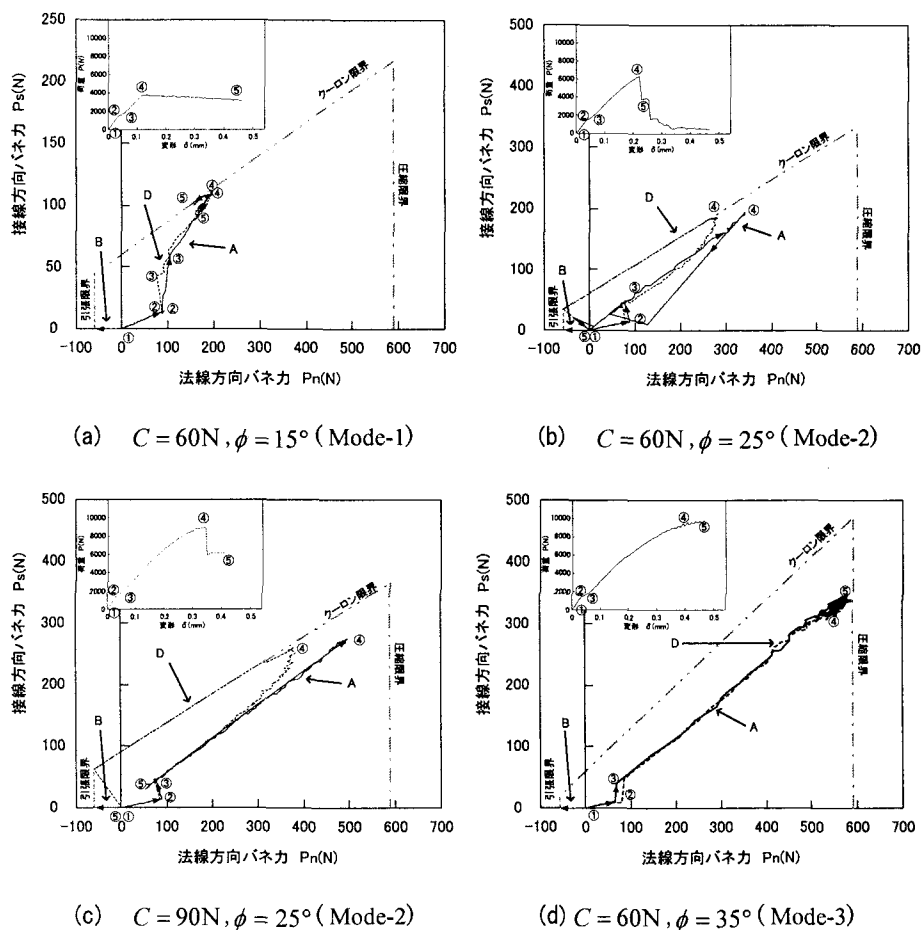


図-6 接線方向バネ力～法線方向バネ力関係

した領域が拡大し、 $\delta = 0.13\text{mm}$ では●印で示した斜め方向に隣接する要素間のせん断バネ力がクーロン限界に達した要素がコンクリート供試体をクロス状に貫通するように破壊連続線が形成される。この $\delta = 0.13\text{mm}$ は図-4(a)の最大耐力の生じた変位と対応しており、このクロス状の破壊連続線が形成されることにより、この供試体の耐力が決定付けられたことがわかる。③以後、 $\delta = 0.23\text{mm}$ 、 $\delta = 0.38\text{mm}$ と変形が増大すると、水平方向の引張限界に達した領域は拡大するものの、せん断滑りのクロス連続線はそのまま維持されている。

図-5(a)下段の最右側には、 $\delta = 0.50\text{mm}$ における各要素の初期位置からの変位量ベクトル図を示す。これより、コンクリート供試体内部はクロス線によって明瞭に4つの領域に分割された動きを示していることがわかる。上段には、それぞれの変形量に対応した各要素の配置を示しているが、クロス連続線に対応して要素間の間隙が生じている様子がわかる。

図-5(b)には、 $C = 60\text{N}$ 、 $\phi = 25^\circ$ (Mode-2)の例を示している。① $\delta = 0.04\text{mm}$ および $\delta = 0.06\text{mm}$ の隣接する水平引張限界状態の分布の現れ方は、図-5(a)と全く同じである。② $\delta = 0.23\text{mm}$ では◇印で示した

た斜め方向に隣接する要素が引張限界に達し、それらがコンクリート供試体の左側部分に縦方向に並んで現れる。これは、図-4(a)に示した6000Nの最大耐力点に対応するものである。③ $\delta = 0.26\text{mm}$ と変形が増大すると、上段の要素配置図においても供試体内部に縦方向の明瞭な割裂間隙が形成されている。④図-5(b)下段最右側の移動ベクトル図では、供試体左右の端部領域が中心部から離れるように移動している一方で、内部にはあまり移動しない要素群が柱状に残っていることがわかる。

図-5(c)には、 $C = 90\text{N}$ 、 $\phi = 25^\circ$ (Mode-2)の例を示している。①この場合も $\delta = 0.38\text{mm}$ までは図-5(b)の場合と同じである。②図-5(b)の $\delta = 0.32\text{mm}$ と同様に、◇印で示した斜め方向に隣接する要素が引張限界に達し、それらがコンクリート供試体の左側部分に縦方向に並んで現れる。これは、図-4(b)に示した8500Nの最大耐力点に対応するものである。③下段の要素移動ベクトルを見ると図-5(a)と(b)の中間的な動きをしていることがわかる。

図-5(d)には、 $C = 60\text{N}$ 、 $\phi = 35^\circ$ (Mode-3)の例を示している。①この場合も $\delta = 0.04\text{mm}$ 、 $\delta = 0.06\text{mm}$ における破壊分布は、図-5(a)、(b)と全く同じである。

このことは、図-4(a)においてそれぞれに対応する弾塑性応答線が完全に一致しており、これらの変形は一端剛性がやや低下していることと対応している。

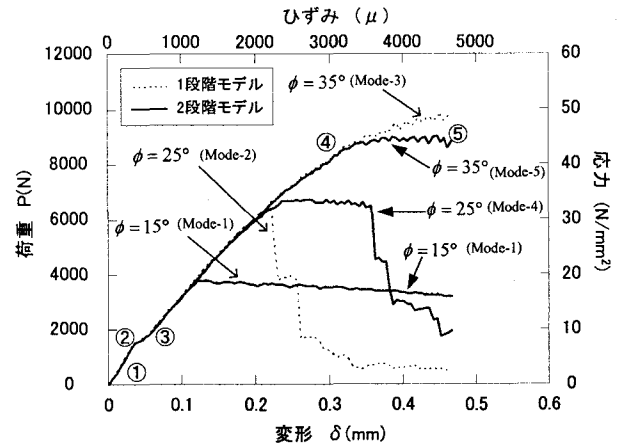
②しかし、この例では $\delta = 0.17, 0.27, 0.37\text{mm}$ と変形が増大しても斜め方向隣接要素間には全く破壊現象は現れていない。単に全領域にわたって水平方向の隣接が引張限界に達しているだけである。すなわち、この状態ではコンクリート供試体内部では斜め方向の力の伝達機構だけで上端からの荷重につり合う力が伝達されていることになる。③このため上段の要素配置図からは $\delta = 0.50\text{mm}$ でも破壊線は観察できない。しかし、下段最右側の移動ベクトルを見ると、内部は図-5(a)と同じ4つの領域に分かれた動きをしていることがわかる。

(3) 接触間バネ力と限界線との関係

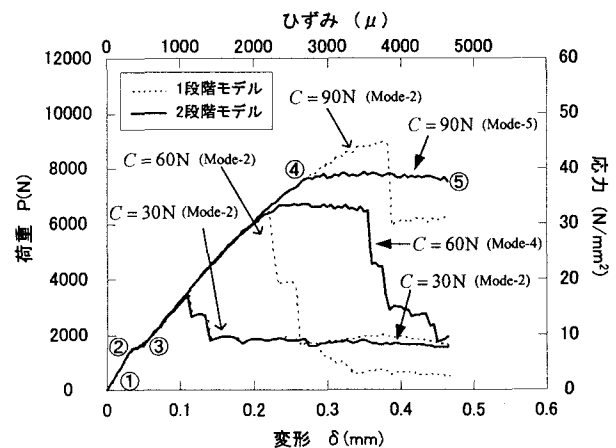
図-6には、図-6(f)に示すA,B,D連結における、法線方向バネ力と接線方向バネ力の相対関係の推移を示す。図中に示した番号①～④は、図-4(a),(b)の図中に示した番号とそれぞれ対応している。

図-6(a)の $C = 60\text{N}$, $\phi = 15^\circ$ (Mode-1)では、図-4(a)に示した荷重～変形関係の②において、B連結の法線方向バネ力が引張限界(-60N)に達している。このときA連結およびD連結のバネ力は法線方向バネ力が 90N 、接線方向バネ力が 10N であり、図中に示したいずれの限界線からも遠い状態、すなわち弾性状態である。その後A,D連結のバネ力は②から③へと増分方向を変化させて増加する。この方向変化は③に達するまでに水平方向に隣接する要素間の接触バネが引張限界に達しているためである。③～④の間はA,D連結は、ほぼ同じ経路で増加する。④の段階ではA連結のバネ力は法線方向が 190N 、接線方向が 110N となりモール・クーロンの滑り限界線上に達する。そして⑤では、A連結はモール・クーロン限界線上に沿って逆に戻るように法線方向バネ力と接線方向バネ力は低下し、それぞれ 170N と 100N になる。これはモール・クーロンの滑り限界にしたがってA連結の接触点において塑性的な滑りが生じているためである。しかし、D連結では、A連結がモール・クーロンの滑り限界に達するので、それまでの増加過程を逆にたどるように、接線・法線方向バネ力が低下している。すなわち、D連結において除荷現象が確認できる。

図-6(b)の $C = 60\text{N}$, $\phi = 25^\circ$ (Mode-2)でも、図-6(a)の $C = 60\text{N}$, $\phi = 15^\circ$ (Mode-1)とほぼ同じ経路をたどって弾性状態から弾塑性状態へ変化する。このため、図-5(a),(b)の $\delta = 0.06\text{mm}$ までの接触限界の分布がほぼ一致している。その後④に至る経路でA連結とDは、最初は同じ経路であるが途中から、D連結の接線力増分が大きくなり、④においてD連結がクーロン滑り線に達している。その時の連結Aは弾性範囲にある。その後D連結はクーロン滑り線



(a) $C = 60\text{N}$ (一定)



(b) $\phi = 25^\circ$ (一定)

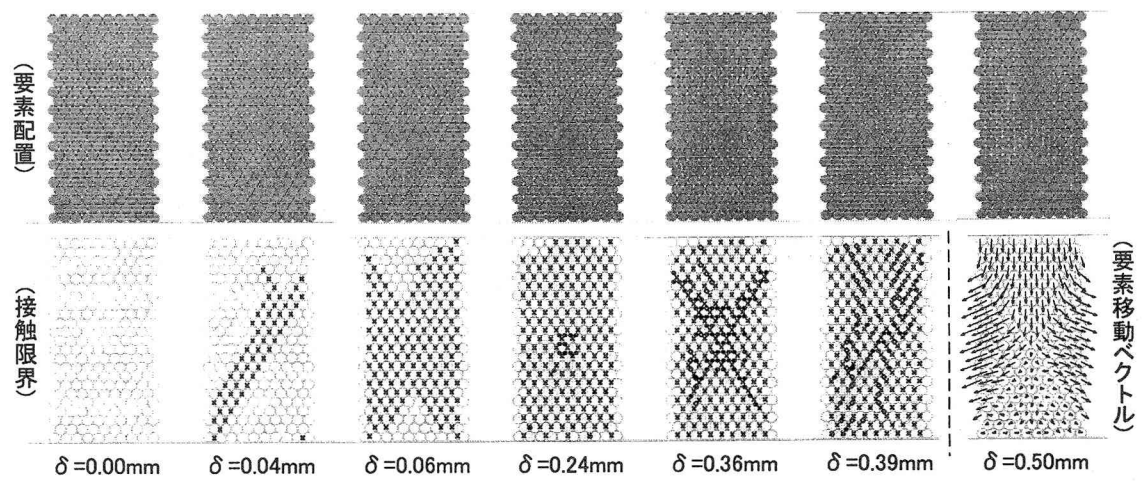
図-7 荷重～変形関係に及ぼす
2段階モデルの影響

表-3 弾塑性挙動(Mode)の分類に及ぼす
2段階モデルの影響

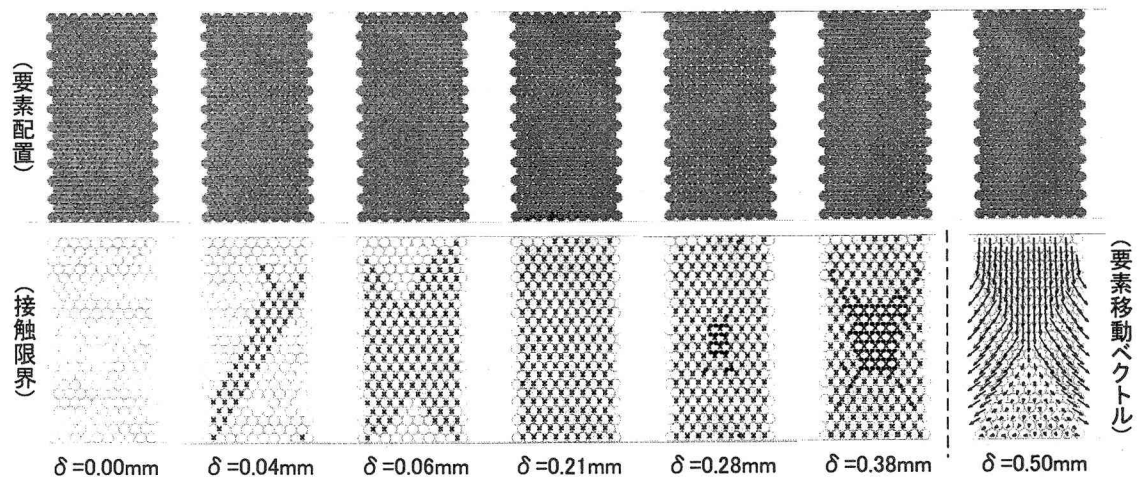
摩擦角 ϕ	15°	20°	25°	30°	35°
粘着力 C					
15 N	Mode-1	Mode-1	Mode-2	Mode-2	Mode-4
30 N	Mode-1	Mode-1	Mode-2	Mode-4	Mode-4
45 N	Mode-1	Mode-1	Mode-2	Mode-5	Mode-5
60 N	Mode-1	Mode-4	Mode-4	Mode-5	Mode-5
75 N	Mode-1	Mode-5	Mode-5	Mode-5	Mode-5
90 N	Mode-1	Mode-5	Mode-5	Mode-5	Mode-5

に従って急激に接線および法線方向バネ力が低下し、引張限界に達する。すなわち、⑤において連結Dは離反した状態へと移行する。この④に至る間にA連結とD連結の増分割合が途中で分かれるのは周辺における連結状況の変化による応力配分が異なるためである。

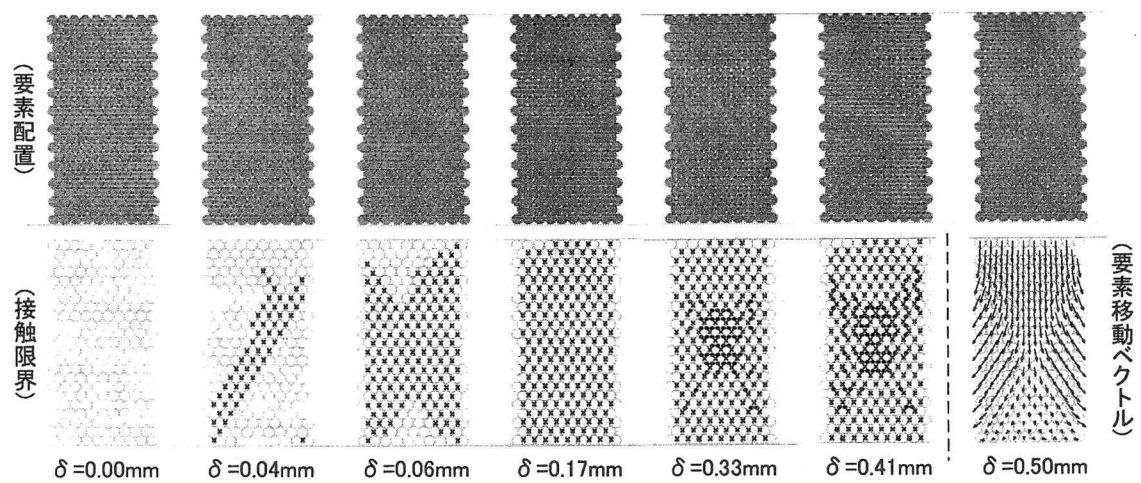
図-6(c)の $C = 90\text{N}$, $\phi = 25^\circ$ (Mode-2)でも図-6(b)と同じ特徴を示す。ただしA連結の弾性応力状態は



(a) $C = 60\text{N}, \phi = 25^\circ$ (Mode-4)



(b) $C = 90\text{N}, \phi = 25^\circ$ (Mode-5)



(c) $C = 60\text{N}, \phi = 35^\circ$ (Mode-5)

× : 横方向引張限界
 ◇ : 斜め方向引張限界
 ● : クーロン限界

図-8 破壊の推移に及ぼす2段階モデルの影響

④でかなり圧縮限界に近づいている。

図-6(d)の $C = 60\text{N}$, $\phi = 35^\circ$ (Mode-3)は, ③まではA,B,D 連結とも図-6(a), (b)または(c)と同じ経路をたどって弾性状態から弾塑性状態へ変化している。その後, A,D 連結は④から⑤へと Popovics 式の圧縮限界に近づき, 圧縮限界線への漸近を続けている。

3.2 モール・クーロン条件の2段階化の影響

(1) 荷重～変形関係

モール・クーロン条件を2段階モデルとした場合の荷重～変形関係を図-7(a), (b)に示す。(a)は粘着力を $C = 60\text{N}$ と一定にした場合, (b)は摩擦角を $\phi = 25^\circ$ と一定にした場合であり, それぞれ図-4(a), (b)に対応するものである。また, 比較のため粘着力と摩擦角が同条件の1段階モデルの解析結果も示している。

図-7(a)において, $\phi = 15^\circ$ の場合は, 1段階モデルの解析結果も2段階モデルも全く同じ荷重～変形関係(Mode-1)が得られた。 $\phi = 25^\circ$ の場合, 1段階モデルでは最大耐力時($\delta = 0.21\text{mm}$)から急激に耐力が失われる Mode-2 であったが, 2段階モデルは $\delta = 0.21\text{mm} \sim 0.36\text{mm}$ まで耐力が軟化しながらも持続し, その後 $\delta = 0.38\text{mm}$ で, 急激に耐力が低下している。これを Mode-4 と呼ぶものとする。 $\phi = 35^\circ$ の場合, 荷重～変形関係は $\delta = 0.21\text{mm}$ までは1段階モデルの Mode-3 と同じ経路をたどるが, 8000N で最大耐力を迎えた後, 耐力は顕著に低下することなく変形が進行する。ただし, 他の Mode と比べて若干目立つ振動が現れるが, これは図-8(b), (c)で説明するように内部の核状の破壊領域が増加剛性のない力のつり合い状態になっているためである。このように最大耐力後, 耐力が維持される場合を Mode-3 と区別して Mode-5 と定義する。

図-7(b)の $C = 30\text{N}$ の場合は, 1段階モデルの解析結果も2段階モデルもほぼ同じ荷重～変形関係(Mode-2)が得られる。 $C = 90\text{N}$ の場合, 2段階モデルにすると, 1段階モデルでは Mode-2 であったものが Mode-4 に変わっている。

2段階モデルとした場合の Mode 区分を表-3に示す。Mode-1 の領域は変化しないが, $C = 75\text{N}$ と $\phi = 20^\circ$, $C = 60\text{N}$ と $\phi = 35^\circ$ を結ぶ線より右下の領域が Mode-5 となり, 表-2 のモール・クーロン条件が1段階の場合は Mode-3 であった全領域と Mode-2 の一部, $C = 75\text{N}$ よりも下の領域が表-3 では Mode-5 に変わったことがわかる。また, Mode-4 の領域も出現するため Mode-2 は少なくなる。

(2) Mode-4, 5 の破壊状態の推移

図-8に, Mode-4, 5 の破壊状態の推移の例を示す。

図-8(a)は, $C = 60\text{N}$, $\phi = 25^\circ$ の場合であるが, これは1段階モデルでは Mode-2 であったものが Mode-4 に変化したものである。① $\delta = 0.04\text{mm}$ および $\delta = 0.06\text{mm}$ の隣接する水平引張限界状態の分布の現れ方は, 図-5(a)～(e)と全く同じである。② $\delta = 0.24\text{mm}$ において, ●印で示した斜め方向に隣接する要素のせん断バネ力がクーロン限界に達した連結がコンクリート供試体の中心部に現れる。この $\delta = 0.24\text{mm}$ は図-7(b)の最大荷重の生じた変位と対応しており, この供試体の耐力が決定付けられたことがわかる。③その後クーロン限界に達した連結は供試体内部にクロス状に進展している。ただし, 図-5(a)に示すような, 明瞭なクロス線は形成されていない。④ $\delta = 0.39\text{mm}$ では◇印で示した斜め方向に隣接する要素が引張限界に達し, それらがコンクリート供試体の左右端部に縦方向に並んで現れる。これは, 図-7(a)に示した急激に耐力が低下する点に対応し, 図-5(a)と似ている。⑤図-8(a)下段最右側の移動ベクトル図では, 内部は4つの領域に分かれた動きをしており, Mode-1に近い。

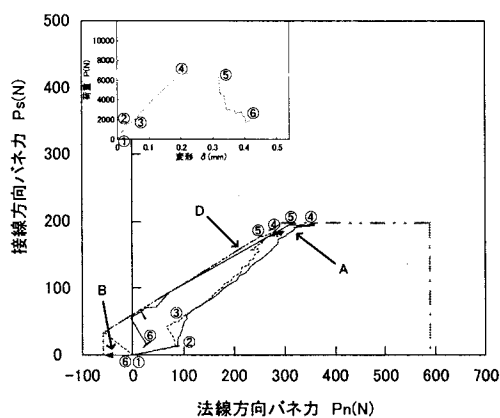
図-8(b)の $C = 90\text{N}$, $\phi = 25^\circ$ は, Mode-2 から Mode-5 に変化したものがある。この場合, ① $\delta = 0.28\text{mm}$ までの挙動は図-8(a)の $\delta = 0.24\text{mm}$ までの挙動と同様に進展している。この $\delta = 0.28\text{mm}$ は図-7(b)の最大荷重の生じた変位と対応している。③その後クーロン限界に達した点は増加し供試体の中心部からクロス線を描くように上下左右に進展しているが, 中心部に固まった領域の破壊も進展している。この場合も, 下段最右側の移動ベクトルを見ると, 内部は4つの領域に分かれた動きをしていることがわかる。

図-8(b)の $C = 60\text{N}$, $\phi = 35^\circ$ は, Mode-3 が Mode-5 に変化した例であるが, この場合は, 中心部のみに連結の破壊が集中し, 下段最右側の移動ベクトルを見ると, 内部は4つの領域に分かれた動きをしている。

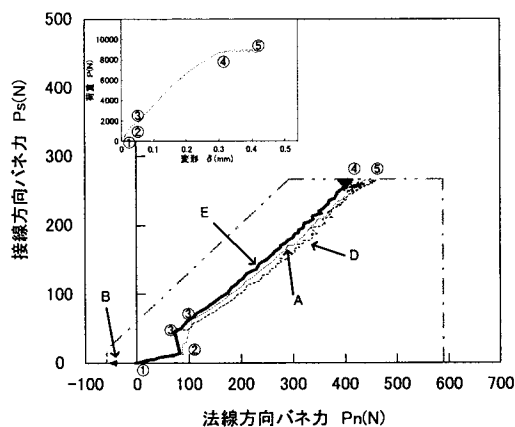
(3) Mode-4, 5 の応力状態の推移

図-9には図-8に示した各例における法線方向バネ力と接線方向バネ力の相対関係の推移を示す。

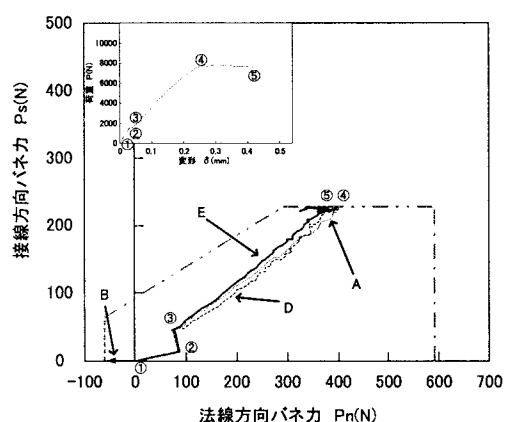
図-9(a)の $C = 60\text{N}$, $\phi = 25^\circ$ (Mode-4)では, ③までは図-6(a), (b)とほぼ同じ経路をたどって弾性状態から弾塑性状態へ変化し, ④でA連結がクーロン限



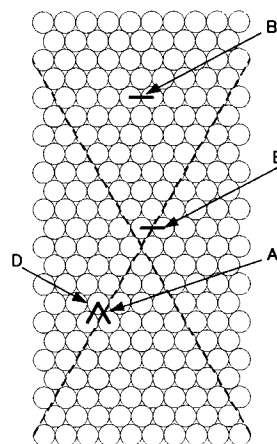
(a) $C = 60\text{N}, \phi = 25^\circ$ (Mode-4)



(b) $C = 90\text{N}, \phi = 25^\circ$ (Mode-5)



(c) $C = 60\text{N}, \phi = 35^\circ$ (Mode-5)



(d) 連結点 A,B,D,E

図-9 バネ力の推移に及ぼす2段階モデルの影響

界に達する。⑤でD連結がクーロン限界に達し、その後急激にバネ力が低下し、⑥に至って連結が離れている。それに伴ってA連結もバネ力が低下し、除荷現象が見られる。

図-9(b),(c)の $C = 90\text{N}, \phi = 25^\circ$ および $C = 60\text{N}, \phi = 35^\circ$ では、図-9(d)に示す連結Eについてもあわせて示す。③まではA,D,E連結ともに、図-6(a),(b)とほぼ同じ経路をたどって弾性状態から弾塑性状態へ変化し、④の段階までは、法線方向・接線方向のバネに生ずる力はほぼ一定の割合で増加する。しかし、④においてモール・クーロン限界線の2段階の部分に達し、その後はモール・クーロンの2段階の限界線上でとどまっており、局所的な降伏状態と全体での降伏状態がバランスして変形が増大していることがわかる。ただし、この2段階の限界線上で振動しているため、その振動が1段階の限界線に達した場合にはMode-4となる。ちなみに $\phi = 30^\circ$ の場合は

1mm以上変形すると耐力が急激に低下しMode-4の挙動を示す。

4. 結 言

本研究は個別要素法をコンクリート材料の破壊挙動解析に適用する基礎的段階として、モール・クーロン条件が圧縮破壊におけるコンクリート供試体の全体の挙動に与える影響について考察した。その結果、きわめて単純な粘着力 C と摩擦角 ϕ の組み合わせ状態の変化が、コンクリート供試体内部の巨視的領域分離形態に大きな影響を及ぼすことを示した。特に2段階摩擦角を変化させて、高圧縮力領域での摩擦角を小さくするモデルでは、弾塑性挙動がじん性的になるが、その際の供試体内部の破壊挙動は、中心部における集中した破壊領域の形成と関連することを示した。

参考文献

- 1) 中川光雄, 蔭 宇静, 江崎哲郎: 個別要素法を用いた不連続性岩盤における亀裂発生・進展のモデル化, 土木学会論文集, No.543/ I -36, pp.83-90, 1995.10.
- 2) 目黒公郎: コンクリートの破壊解析への個別要素法の適用, コンクリート工学, Vol.31, No.5, pp.5-17, 1993.5.
- 3) 下田義文, 鈴木真次, 石川信隆, 古川浩平: 個別要素法によるモルタル片持ちばりの衝撃応答解析, 構造工学論文集, Vol.38A, pp.1467-1476, 1992.3.
- 4) 下田義文, 鈴木真次, 石川信隆, 古川浩平: 個別要素法によるコンクリート製砂防ダムの衝撃破壊シミュレーション解析, 土木学会論文集, No.480/VI-21, pp.97-106, 1993.12.
- 5) 鈴木真次, 石川信隆, 古川浩平, 水山高久, 石川芳治: 個別要素法による鉄筋で補強した砂防ダム袖部の衝撃破壊解析, 構造工学論文集, Vol.43A, pp.1555-1566, 1997.3.
- 6) 鈴木真次, 石川信隆, 石川芳治, 水山高久, 古川浩平: 高速荷重を受ける主鉄筋で補強したコンクリート製砂防ダム袖部模型の動的挙動と個別要素法による破壊解析, 土木学会論文集, No.567/VI-35, 141-160, 1997.6.
- 7) 中田吉彦, 榊谷浩, 梶川康男, 森嶋芳大: 個別要素法による鉄筋コンクリートはりの衝撃挙動解析, 構造工学論文集, Vol.44A, pp.1761-1771, 1998.3.
- 8) 森川博司, 澤本佳和, 小鹿紀英: 個別要素法を用いたコンクリートの破壊解析, 日本建築学会構造系論文集, 第473号, pp.127-135, 1995.7.
- 9) 別府万寿博, 園田佳巨, 大野友則: 静的および動的三軸圧縮荷重を受けるコンクリート供試体の弾塑性解析に対する個別要素法の適用性, 構造工学論文集, Vol.50A, 2004.3.
- 10) 伯野元彦: 破壊のシミュレーション, 森北出版, pp.25-38, 1997.
- 11) 土木学会: 構造物の衝撃挙動と設計法, pp.25-33, 1993.
- 12) Popovics, S: Factors affecting the elastic deformations of concrete, Proc. of the Int. Conf. on Mechanical Behavior of Materials, Kyoto, pp.172-183, Aug., 1971.
- 13) 香月智, 黒木勇人, 石川信隆, 太田貞次: 高速荷重を受けるコンクリート充填鋼管はりの動的弾塑性挙動に関する一考察, 土木学会論文集, No.696/ I -58, pp.61-76, 2002.1.
- 14) 上田真稔: 鉄筋コンクリート部材の離散化極限解析法に関する研究, 東京大学博士論文, 1995.11.
- 15) 阿部和久: 個別要素法による連続体解析におけるパネ係数の設定, 土木学会論文集, No.543/ I -36, pp.83-90, 1996.

(2004年4月16日受付)