DEM 解析によるさんご礫の破砕挙動

山口大学大学院　学生会員　○ 犬飼　惇
山口大学大学院　正会員　中田幸男
山口大学大学院　正会員　兵動正幸
港湾空港技術研究所　正会員　渡部要一

## １．序論

沖縄を含む南西諸島の島々の周りにはさんご礁が発達し浅い海を形成している．さんご礫堆積物は，さんご礁に生息する石灰質生物の死骸が堆積したもので，軟質で多孔質であるため，破砕されやすい地盤材料である[1), 2)]．このような砂礫地盤を支持盤とする場合，粒子破砕に伴う沈下，支持力の低下などの問題が考えられる．土質力学において砂に対する研究は数多く行われているものの，礫については粒径や形状が多種多様で実験を行うことが難しく実験結果の蓄積は進んでいない．そこで，本研究ではさんご礫の破砕挙動を把握するとともに, DEM 解析を用いてその挙動を再現することを試みる．

## ２．さんご礫の破砕挙動

本研究では沖縄県で採取した棒状のさんご礫を使用した．密度は棒状のままで 2.78g/cm$^3$，粉々に砕いたもので 2.91g/cm$^3$ であった．破砕試験に用いた供試体は，写真 1 に示すように試料を電動カッターを用いて円盤状に切断し，周囲を真円になるように鉄ヤスリを用いて整えたものである．切断したさんごは直径 5mm~13mm，厚さ 4mm~6mm である．

破砕試験は供試体を平板上に設置して上板を変位速度 0.1mm/min 一定で下降させるものである．実験中に得られた変位と荷重から，ひずみ ε や破砕応力 σ を以下の式から求めた．

$$\varepsilon = x/D, \qquad \sigma = 2P/\pi DL \qquad (1)$$

ここで x は変位，D は供試体直径，L は供試体厚さ，P は破砕応力の最大値である. 供試体サイズの平均は D=7.97mm, L=4.88mm である．図 1 に供試体直径が 8±0.5mm における破砕試験の結果を破砕応力とひずみの関係で示す．応力が最大になる前に何度か応力の減少がみられるが，これは供試体の角の破損もしくは供試体内部のクラックの発生が原因と考えられる．破砕応力が最大になったとき供試体は脆性的に破砕する．このときの最大破砕応力を破砕強度 $\sigma_C$ とする．

図 2 は破砕強度と供試体直径の関係を示す．この図から供試体直径が大きくなるとともに，破砕強度が減少していることがわかる．また直径が小さいものの方が強度のばらつきが大きいこともわかる．

Weibull の統計関数を用いて強度の均一性を検討する．Ps はある破砕強度 $\sigma_C$ のとき供試体が破砕しない確率を示す．$\sigma_C=\sigma_0$ すなわち Ps=0.37 のときの破砕強度を基準破砕強度 $\sigma_0$ とする．図 3 は破砕試験における非破砕確率と破砕強度 $\sigma_0$ で除して求める正規化破砕強度の関係を示している．

(a)棒状さんご礫　(b)破砕試験の供試体
写真 1 さんご礫

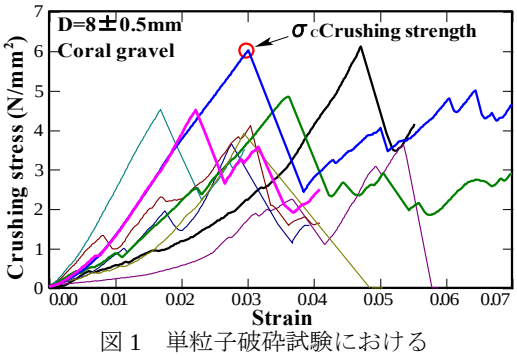


図 1　単粒子破砕試験における引張応力とひずみの関係

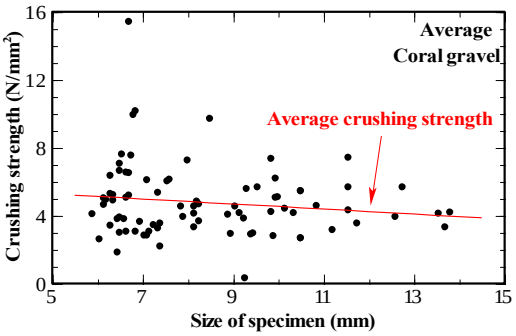


図 2　破砕試験における破砕強度と供試体直径の関係

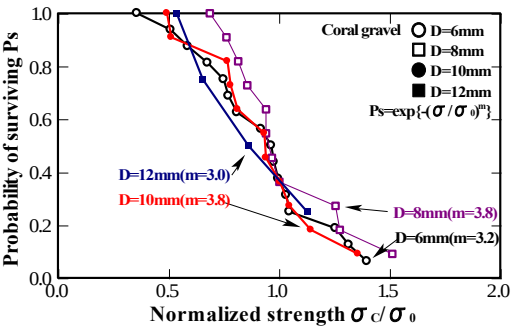


図 3　破砕試験における破砕強度の均一性

Weibull 係数 m は強度の均一性を示すパラメータであり，m の値が大きいほど基準破砕強度付近で破砕する粒子が多いことを示している．供試体の直径が 6mm から 12mm で m=3~4 であることがわかった．

## ３．DEM 解析による破砕シミュレーション

破砕試験に用いた供試体は，図 4 に示すように DEM 解析を用いて小さな球要素のかたまりとして表現する [3]．規則配置された球要素の接点には結合力を設定することで円盤状の形状を保持する．この DEM モデルに対して破砕試験のシミュレーションを行う．

用いたパラメータを表 1 に示す．モデルサイズは破砕試験の平均値とし，供試体が持つ破砕強度や形状を表現するため球要素に存在確率を与えた．ここでは 1 つ 1 つの球要素に 95%の存在確率を与えた．つまり，各要素は 5%の確率で取り除くとする．また，結合力には劣化確率が与えられ，劣化した結合力は本来の結合力の劣化値の積によって与えられる．今回 1 組のパラメータにつき 20 個の解析を行った．このパラメータを用いた解析について，代表的な 10 個の計算結果を図 4 に示す．DEM 解析による応力とひずみの関係は単調に増加し，最大値を示した後，単調に減少する．このシミュレーションによる破砕強度の平均は 4.95N/mm$^2$ であり，実験値の 4.53N/mm$^2$ とほぼ同様であった．

次に表 1 のパラメータを基準にして，供試体の直径と厚さのみを変化させて解析を行った．破砕強度と供試体直径の関係を図 5 に示す．破砕試験と同様に供試体の直径が大きくなるに従って全体的な破砕強度が減少していることがわかり，DEM 解析を用いて供試体のサイズ依存性を示す可能性を示唆している．

図 6 は DEM 解析における破砕強度の均一性について表している．供試体の直径が大きくなるに従って m の値が増加しており，単粒子破砕試験と同様の傾向がみられる．しかし単粒子破砕試験と比較すると極端に m の値が大きく，より高い均一性を示している．

## ４．結論

本研究ではさんご礫の破砕特性を理解するために，実験および解析的にさんご礫単体の破砕挙動に対する検討を行った．その結果破砕強度は供試体直径が大きくなるにつれ減少する．また供試体直径が大きくなるほどより破砕強度が均一になることが明らかになった．

## 参考文献


1) 新城俊也：さんご礁砂礫地盤の強度評価に関する研究，平成 7 年度化学研究費補助金（一般研究(C)）研究成果報告書，pp1~3，1997

2) 中田幸男・兵動正幸・加登文学・村田秀一：破砕性材料の力学特性，土と基礎，地盤工学会誌，vol48，第 513 号，pp.31~32，2000

3) Y Nakata・Malcolm D Bolton・Yi Pik Cheng : Relating particle characteristics to macro behavior of DEM crushable material，Powders and Grains 2005 Vol.2, pp.1387-1390，2005


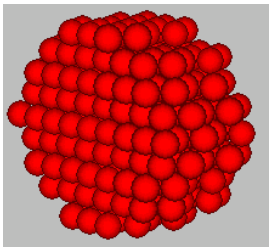

図 4　DEM 解析を用いた供試体

表 1　DEM 解析で用いたパラメータ

| | |
|---|---|
| Diameter of ball element d（mm） | 0.8 |
| Diameter of specimen D（mm） | 8 |
| Thickness of specimen L（mm） | 5.2 |
| Density of ball element (g/cm$^3$) | 2.91 |
| Normal and shear stiffness of each ball element (N/m) | 0.498×10$^6$ |
| Probability of existence of ball element | 0.95 |
| Friction coefficient of ball element | 0.7 |
| Normal and shear bond strength (N) | 2.13 |
| Probability of deterioration of bond | 0.6 |
| Value of deterioration | 0.001 |

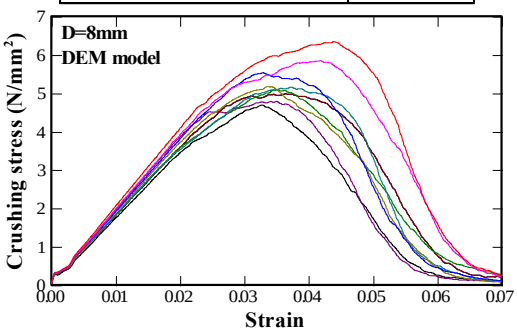


図 5　DEM 解析における破砕応力とひずみの関係

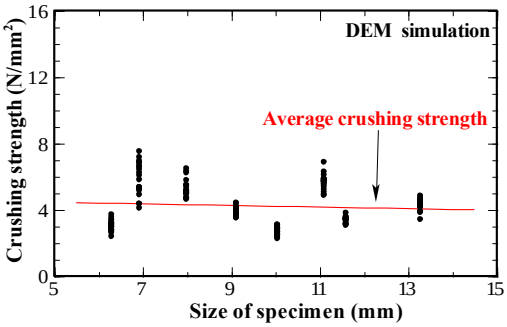


図 6　DEM 解析における破砕強度と供試体直径の関係

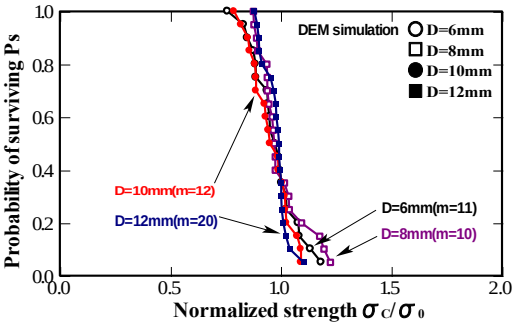


図 7　DEM 解析における破砕強度の均一性