

III-A 25

砂の破碎性と圧縮性に関する一考察

九州大学工学部 正〇大野司郎 落合英俊
九州大学工学部 正 安福規之

1. まえがき 土の力学は土粒子が極めて堅固のもの、すなわち非破碎性の材料から構成されるとして体系化されている。しかしながら、元来土は圧縮性、破碎性材料であり、破碎性の程度によっては地盤工学上の問題となってきた例も少なくない。低い応力域で粒子破碎が生ずるまき土、しらす、カーボネイト砂などの地盤の杭の支持力算定に際しては、粒子破碎に伴う高い圧縮性を考慮することの重要性が指摘され、地盤の変形、杭の変位量を含めた精度良い支持力算定法の確立が望まれている。そのような中で、安福ら^{1), 2)}は変形を考慮した鉛直支持力の評価法を提案している。それはPrandtlが導いた支持力理論において、その支持力係数に材料の圧縮性を修正係数として組込むものであり、設定した杭の許容沈下量を越えないとする経験的手法である。その手法は圧縮性の大きな材料に対して工学的に有用であるが、圧縮性を経験的に取り入れた形であるため、支持力の仮定された破壊モードが異なることやせん断特性が反映されていないなど、支持力の発現メカニズムが十分に考慮されていないものである。本研究は、破碎性およびそれに伴う変形を考慮した杭の支持力の合理的な算定法の確立を背景に、支持力の発現メカニズムの解明と破碎性が材料の力学特性にどのように影響しているかを示す一連の研究^{3), 4)}の一端である。ここでは、破碎性の卓越した砂を用いて所定の鉛直応力レベルの一次元圧縮試験を行い、鉛直応力レベルで刻々と変化する粒子の破碎性が圧縮性とどのように関連づけられるかを考察する。

2. 破碎性指標について 粒子の破碎は粒径が小さくなることで評価できる。破碎性を合理的に評価するために、ここではふるい分けによって粒度分布を求め、簡便であり、変形と相関の良い⁵⁾相対破碎率Brを用いた。Brは粒径加積曲線の面積に基づき、図1のように算定される。

3. 実験方法 試料は、Dogs Bay砂($G_s=2.717\text{g/cm}^3$, $e_{\max}=1.720$, $e_{\min}=1.080$, $d_{50}=0.60$, $U_c=2.3$)で95%のカルシウム成分から成るカーボネイト砂である。実験には、2mmふるい通過試料から75 μm 以下の細粒分を極力除去したものをを用いた。供試体は気乾状態の砂を空中落下法により作成した。まず、初期相対密度Dr=15%, 60%, 95%の鉛直応力 $\sigma_v=10\text{MPa}$ までの一次元圧縮挙動を確認した後、所定の鉛直応力(Dr=60%で0.2~10.0 MPaの9段階、Dr=15%で0.5~10.0MPaの7段階)を付与し、各応力レベルでの破碎性を調べた。一次元圧縮の载荷は0.06mm/minの定変位速度で行い、载荷終了後、供試体試料を丁寧に収集し、Ro-tapシーカーで5分間ふるい分けを行い、粒度分布から破碎性を評価した⁵⁾。

4. 試験結果および考察 図2の $e \sim \log \sigma_v'$ 圧縮曲線では各応力レベルで圧縮量が顕著に違い、大きな初期間隙比の圧縮曲線は低い初期間隙比のそれに漸近し、屈曲点も低応力でみられる。

①粒度分布における破碎の形態について 図3(a), (b)にDr=15%, 60%における各応力レベルでの粒度分布の図を示す。図2における圧縮曲線では両者の各鉛直応力レベルにおいて圧縮指数が異なっているが、同じ応力レベルでは粒度分布には有意な差は殆ど見られない。す

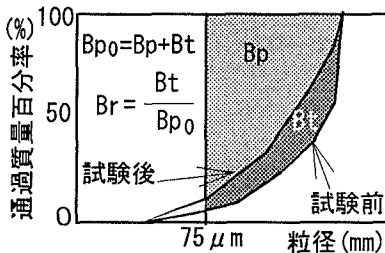


図1 相対破碎率Brの算定法

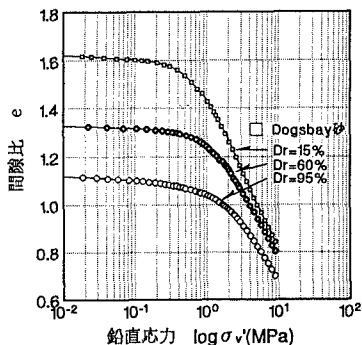


図2 一次元圧縮試験結果

なわち、任意の応力レベルにおいて粒度分布の軌跡はほぼ決まっており、粒子の破碎形態（粒度分布形状）は材料が同じであれば応力レベルで決定される。

②**破碎過程での平均粒径の減少について** 鉛直応力に対して粒度分布から得られる平均粒径 $\mu (= \sum x_i d_i', x_i$; 相対度数, d_i' ; 粒度分布幅での相乗平均粒径) と破碎性指標 Br の変化を図4に示した。平均粒径の減少は Br 値の増加と類似しているだけでなく、圧縮曲線における間隙比の減少とも極めて類似している。 $Dr=15\%$ の場合、0.5MPa以下、 $Dr=60\%$ の場合、0.4MPa以下の低応力レベルでは粒子破碎がほとんど見られず、図2の圧縮曲線における初期の圧縮は粒子構造の再配列によるものと解釈できる。図4において0.5MPaから2.0MPaの応力域では徐々に平均粒径が減少し、2.0MPa以上の鉛直応力の付与では直線的に減少している。この平均粒径の減少はまさに粒子破碎を意味し、平均粒径が減少し始める応力を破碎が開始する応力として定義できる。この応力を破碎応力と呼ぶこととする。破碎応力は図2の圧縮曲線の屈曲が開始する応力とほぼ同じ応力である。破碎応力以上の応力域では破碎は極めて顕著である一方、圧縮性も極めて大きい。また、屈曲以上の応力レベルでは相対密度の異なる砂は平均粒径～鉛直応力プロットに対して平均粒径の平行な直線とみなしうる。

③**間隙比の変化と破碎性について** 前述の圧縮性を間隙比の変化で捉え、間隙比に対して Br 値と平均粒径の変化をプロットしたものが図5である。鉛直応力の付与により間隙比は減少するが、それに対して Br 値は直線的に増加し、平均粒径は直線的に減少する。その直線の傾きは相対密度が異なれば変化するけれども、 Br 値、平均粒径両者ともに間隙比に対して、極めて良い相関があることがわかる。すなわち、圧縮性は破碎特性と関連づけられ、破碎性を土の力学に組み込むことの可能性を示唆しているといえる。

5. まとめ 1) 破碎後の粒度分布の軌跡は応力レベルでほぼ決まっており、粒子の破碎形態は決定される。

2) 平均粒径および破碎性パラメータ Br は間隙比の変化と極めて良い相関があり、圧縮性と破碎性には極めてユニークな関係がある。

参考文献 1) 安福規之, 田中邦博, 村田秀一, 兵動正幸: 圧縮性の卓越した砂中の杭の先端支持力とその評価, 土木学会論文集, No. 505/III-29, pp. 191-200, 1994. 12. 2) Yasufuku, N. & Hyde, A.F.L.: Pile end-bearing capacity in crushable sands, Geotechnique 45, No.4, 663-676, 1995. 3) 郭ら: 破碎性に着目した砂のせん断抵抗角について, 土木学会第51回年次学術講演会, 1996. (投稿中) 4) 高原ら: 破碎性に着目した砂の非排水変相状態における特性について, 土木学会第51回年次学術講演会, 1996. (投稿中) 5) 大野ら: 一次元圧縮下での砂質土の破碎性について, 第31回地盤工学研究発表会, 1996. (投稿中)

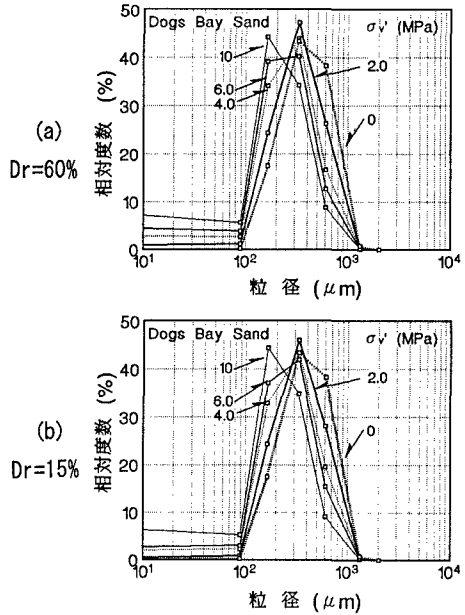


図3 各応力レベルでの粒度分布

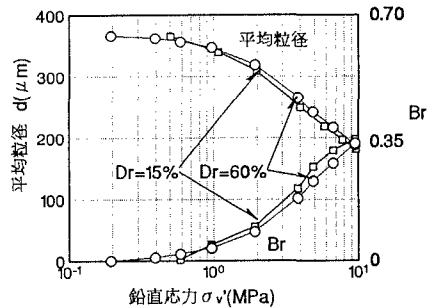


図4 各応力での破碎性指標の遷移

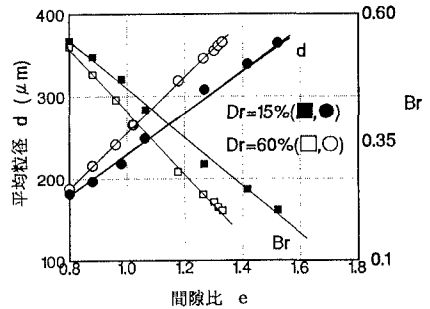


図5 間隙比と破碎性指標の関係