

三軸試験による砂の圧縮特性と粒子破碎

山口大学工学部 正会員 中田幸男 兵働正幸 村田秀一
山口大学大学院 学生会員 加登文学 ○篠田龍一

1. まえがき 一般的に土などの粒状体における圧縮特性やせん断強さなどの力学特性は、土粒子の基本物性や圧力レベルなどに依存して変化することが知られている。特に圧力レベルの変化は、圧縮指数の増加、ダイレイタンスの膨張挙動から収縮挙動への変化、ピーク時の内部摩擦角の低下など力学定数に変化を与えることが明らかにされており、その要因として砂の粒子破碎の影響が挙げられている¹⁾。したがって、これらの力学定数の変化を評価するには、拘束圧の変化、応力経路の違いに伴う砂の粒子破碎の状況を把握することが重要である。本報は、供試体になされた全エネルギーに着目し、高圧域に至るまでの砂の圧縮特性と粒子破碎の関係を正確に把握することを目的としている。

2. 試料及び試験方法 すべての試験に用いた試料は、1.4mm-1.7mm に粒度調整した silica 砂($G_s:2.639$, $e_{max}:0.881$, $e_{min}:0.632$)である。一次元圧縮試験は直径 50mm の鋼製の圧縮リング内に、高さ 10mm、相対密度 90% を目標に試料を詰め、鉛直方向変位を変位速度 0.1mm/min で行った。高圧三軸試験の供試体は、直径 50mm、高さ 100mm で、ダンピング法により相対密度 90% を目標に作成し、変位速度 0.1mm/min のひずみ制御で K_0 圧縮試験、および応力制御で応力比一定の圧縮試験を行った。試験終了後にふるい分析を行うとともに着色粒子を混入した試験については、着色粒子を採取し顕微鏡を用いて観察した。

3. K_0 圧縮試験と一次元圧縮試験の関連性 図-1 は K_0 圧縮試験、一次元圧縮試験の間隙比-鉛直方向応力関係を示したものである。この図から K_0 圧縮試験結果は、一次元圧縮結果と比較して圧縮降伏応力点付近において緩やかに折れ曲がっていることがわかる。これは側方変位や、側面の摩擦の影響などが考えられる。また、図中には一次元圧縮試験における鉛直方向応力と比表面積増加量 $\Delta S'$ ¹⁾ との関係を示している。ここで、 $\Delta S'$ は次式を用い得られる試験前後の比表面積 S_w (cm^2/cm^3) の差で表わされる。

$$S_w = \sum \frac{F}{100} \cdot \frac{4\pi(d_m/2)^2}{(4/3)\pi(d_m/2)^3 G_s \gamma_w} \cdots (1)$$

ここで、 $F(\%)$ は、各試料の残留率を表し、 γ_w は水の単位体積重量 (kN/mm^3)、 d_m (mm) は平均粒径である。 $\Delta S'$ の変化に着目することにより、圧縮降伏応力付近から急激な破碎が生じていることがわかる。着色粒子の観察を行うために粒子破碎の程度を 5 段階評価した。Type I : 試験前後で変化の見られないもの、Type II : 粒子の角が 1 つでも欠けたり、一部分が割れた様な破碎を示したもの、Type III : 数ヶ所の角が欠けるか、削れるような破碎を起こしたもの、Type IV : 粒子が完全な破碎を示したもの、Type V : 完全な破碎を示した後、更に破碎したと認められるものである。一次元圧縮試験の供試体に計 12 個着色粒子を挿入し、試験後の着色粒子を観察すると、 $B_1 \sim B_3$ では試験前後で変化の

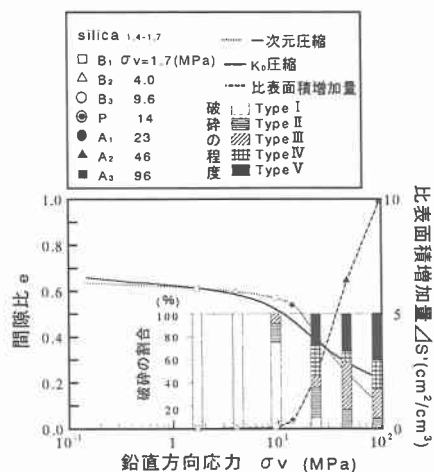


図-1 K_0 及び一次元圧縮試験結果

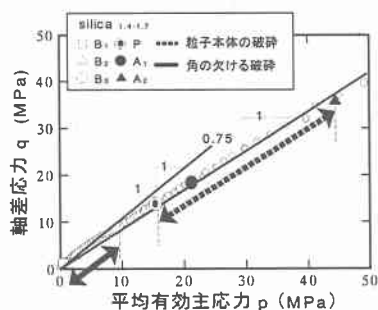


図-2 K_0 経路及び一次元圧縮試験における観察点

ないものや角が欠ける程度の軽微な破碎、 $A_1 \sim A_3$ では完全な破碎を示す粒子が急増することが明らかになっている²⁾。図-2は K_0 圧縮試験の応力経路を平均有効主応力-軸差応力平面に示したものである。また、一次元圧縮において観察を行った応力点と同一の鉛直方向応力となる状態をプロットで示している。この図から K_0 圧縮試験の応力経路は10MPa付近まではやや高い応力比を示し、20MPa以降はほぼ一定の応力比状態を保つことがわかる。また、それらの応力状態の違いから、前述したような粒子破碎の特徴の違いを対応づけられる。

4. 応力比一定試験と粒子破碎 応力比 $\eta=0, 0.5, 0.75, 1.0$ で圧縮試験を行った後、次式を用い全エネルギー¹⁾を求めた。

$$W = \int p \Delta \varepsilon_v + \int q \Delta \varepsilon_\gamma \cdots (2)$$

図-3は全エネルギーコンターを平均有効主応力-軸差応力平面に示したものである。本研究では、砂の粒子破碎と全エネルギーとの関係を調べるために、 $p=20, 30, 40$ MPaを目標に等方圧縮試験①、②、③を行った。その結果、①、②、③の全エネルギーはそれぞれ $W=0.7, 1.6, 2.6$ J/cm³であった。更に $W=2.6$ J/cm³を目標に $\eta=1.0$ で異方圧縮試験④を行った。図-4にそれぞれの試験終了後の粒径加積曲線を示す。 $W=2.6$ J/cm³の③、④についてみると、試験終了時の応力状態は③が $p=41$ MPa、 $q=0$ MPa、④が $p=20$ MPa、 $q=20$ MPaと異なるにもかかわらず、これら2つの粒径加積曲線に、あまり違いが表れていないようにみとれる。また $\Delta S'$ は③が 3.2 cm²/cm³、④が 3.7 cm²/cm³となり、ほぼ同じ量の破碎が生じている。図-5に①~④の供試体の上、中、下部に各6個づつ、計18個着色粒子を挿入し、試験後の着色粒子の観察を行った結果を示す。この図から③と④はほぼ同じ程度の破碎が生じていることが把握できる。これらの結果から全エネルギーコンターと、同じ量・同じ程度の破碎をする破碎コンターは、平均有効主応力-軸差応力平面において相関性があるといえる。 $p=20, 30, 40$ MPaを目標に行った等方圧縮試験を比較した結果は図-4、図-5より破碎の量、程度が異なることがわかる。

5. まとめ 本研究で得られた結果を以下に示す。

1. K_0 圧縮状態を高圧三軸圧縮試験機で精度良く再現し、一次元圧縮試験の結果と関連付ける事により K_0 圧縮試験中の粒子破碎の進行状況が応力経路上においてほぼ把握できる。平均有効主応力10MPa付近までは角が欠けるような軽微な破碎、それ以後は粒子本体の劇的な破碎が生じている。

2. η 一定試験を行い、平均有効主応力-軸差応力平面上に描いた全エネルギーコンターと、ふるい分析結果と試験終了後の着色粒子の観察結果から描いた破碎コンターとに相関性がみられた。

<参考文献> 1) 三浦哲彦他(1977):砂のせん断特性に及ぼす粒子破碎の影響、土木学会論文集、第260号、pp.109-118

2) Nakata, Y. Hyodo, M. Hyde, A.F.L., Kato, Y. and Murata, H. (1999): Microscopic particle crushing of sand subjected to high pressure one dimensional compression, Soil and Foundations, (submitted)

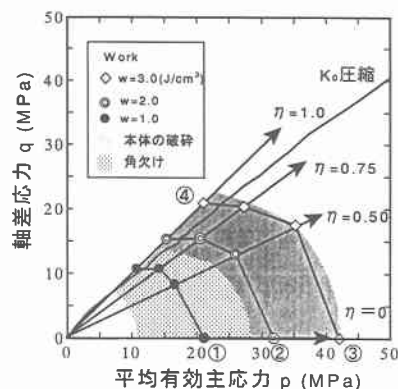


図-3 全エネルギーコンター及び破碎コンター

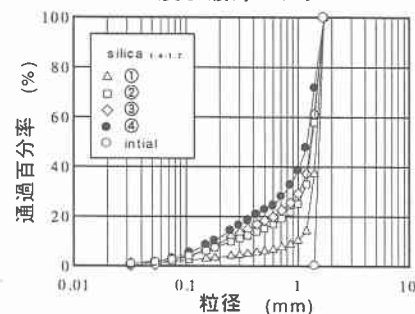


図-4 粒径加積曲線

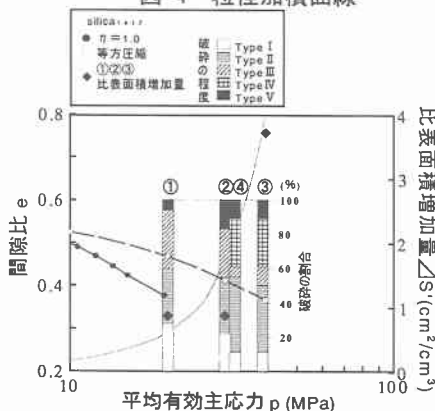


図-5 異方、等方圧縮試験結果