

(55) シルト岩の破碎、スラリー化による力学特性の劣化

東京ガス㈱	正会員	渋谷政文
東京ガス㈱	正会員	小松原徹
清水建設㈱	正会員	○ 渡辺浩平
清水建設㈱	正会員	伊東亮治
清水建設㈱	正会員	西川洋二

Deterioration of Mechanical Properties of Siltstone by Crushing or Fully Softening

Masafumi SHIBUYA, Toru KOMATSUBARA, Tokyo Gas Co., Ltd.
Kohei WATANABE, Ryoji ITO, Yoji NISHIKAWA, Shimizu Corporation

Abstract

It is well known that mechanical properties of sedimentary soft rocks are deteriorated by crushing or fully softening. In order to investigate these influences on mechanical properties, triaxial compression tests were performed using intact, crushed and fully softened siltstone specimens. As the result, the influence of crushing is larger than that of fully softening on deterioration of deformation properties. However, the differences between these influences on deterioration of strength properties are hardly found.

1. はじめに

筆者らは¹⁾、シルト岩ずりを埋戻し材料として使用するに伴い、埋戻された地盤の力学特性を把握するため、室内試験によりシルト岩ずりの締固め特性および締固め後の力学特性について検討を行った。また、シルト岩ずりは、スレーキングなどの風化の影響により、セメンテーションの劣化や粒子の軟弱化に伴い最終的に泥状になる可能性もあるため、シルト岩をスラリー状にしたシルト岩スラリーについて検討する必要があると考えられる。ちなみに、軟岩母材をスラリー状にした後に正規圧密したスラリー試料の三軸圧縮試験から得られた最大強度は完全軟化強度と呼ばれており、軟岩母材の残留強度との関係などについて報告が行われている^{2), 3), 4)}。

本研究では、シルト岩の破碎およびスラリー化による力学特性の劣化について検討を行うため、シルト岩母材、シルト岩ずりおよびシルト岩スラリーを用いて三軸圧縮試験を行った。また、三軸圧縮試験結果については、強度特性および変形特性について有効応力に基づいて検討を行った。なお、表-1には、今回使用したシルト岩の物理試験、基本的な力学試験（一軸圧縮試験、圧密試験、圧裂試験）から得られた基本的な物理特性、力学特性を示した。

表-1 シルト岩母材の基本特性

項 目	値
湿潤単位体積重量 γ_t	1.95 tf/m ³
乾燥単位体積重量 γ_d	1.56 tf/m ³
自然間隙比 e_n	0.72
自然含水比 w_n	25.2 %
粒子比重 G_s	2.671
液性限界 w_L	55.8 %
塑性限界 w_p	22.0 %
塑性指数 I_p	33.8 %
一軸圧縮強度 q_u	28.0 kgf/cm ²
圧密降伏応力 p_c	63.2 kgf/cm ²
引張強度 σ_t	2.3 kgf/cm ²

2. シルト岩母材の力学特性

シルト岩母材の力学特性を求めるため三軸圧縮試験を、排水条件、側圧一定、ひずみ速度一定条件下で実施した。側圧 σ_3 は1、2、5、10 kgf/cm²の4種類を用い、ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_1$ は0.005%/minとした。図-1にはシルト岩母材について得られた主応力差 $(\sigma_1 - \sigma_3) \sim$ 軸ひずみ $(\epsilon_1) \sim$ 体積ひずみ (ϵ_v) 関係の実測値を示した。三軸圧縮試験結果に基づいて、まず、シルト岩母材の変形特性について、最大強度の1/2における接線弾性係数により検討を行った。図-2には平均有効応力 $p' \sim$ 接線弾性係数 E_t 関係を示すとともに接線弾性係数の拘束圧依存性について最小自乗法により求めた直線関係式を実線で示した。これより、接線弾性係数には拘束圧依存性がわずかに認められるもののほぼ一定となっている。

つぎに、強度特性について検討するため図-3には最大強度(O)および残留強度(●)を、また足立ら⁵⁾により提案され式(1)により表されるべき関数型の破壊基準線も示した。

$$(q/p_0) = \alpha \cdot (p/p_0)^\beta \quad (1)$$

ここで、 $q = (\sigma_1 - \sigma_3)$ 、 $p = (\sigma_1 + 2\sigma_3)/3$ 、 $p_0 = 1 \text{ kgf/cm}^2$ である。

図-3より、式(1)に示すべき関数型の破壊基準を規定する強度定数 α 、 β として以下のような値が得られた。

最大強度 $\alpha = 8.37$, $\beta = 0.458$

残留強度 $\alpha = 2.46$, $\beta = 0.821$

3. シルト岩ずりの力学特性

シルト岩ずりの力学特性を求めるため、まず、締固め試験を行い、三軸圧縮試験に用いるシルト岩ずりの条件を決定した。締固め試験はシルト岩母材を破碎ふるい分けにより図-4に示すような粒度分布(粒度A、粒度B)になるように混合した後2種類の締固めエネルギー条件(1.0 Ec、0.5 Ec)を用いて行った。なお、Ecは、JIS A 1210の第一方法相当の締固めエネルギーである。また、粒度A、粒度Bは、大根の研究⁶⁾に従ってタルボットの式(2)で敷きならし時、 $n = 0.4$ 、 0.6 、最大粒径 $D = 19.1 \text{ mm}$ とした。

$$P = (d/D)^n \times 100 \quad (2)$$

ここで、P: 通過質量百分率(%), d: 任意の粒径、D: 最大粒径、n: 粒度分布を表す指数である。

締固め試験結果と三軸圧縮試験に用いるシルト岩ずりの条件を表-2に示した。シルト岩ずりは、含水比を最適含水比とし乾燥密度を最大乾燥密度の90%となるように調整した。

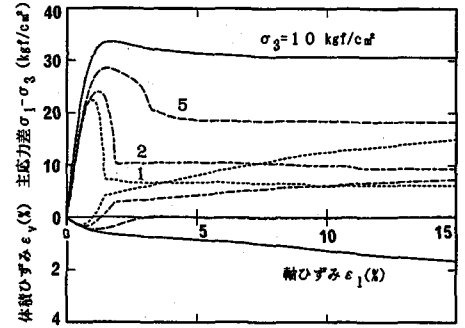


図-1 主応力差 $\sim$ 軸ひずみ $\sim$ 体積ひずみ関係(母材)

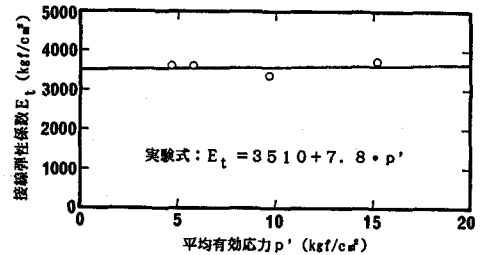


図-2 接線弾性係数の拘束圧依存性(母材)

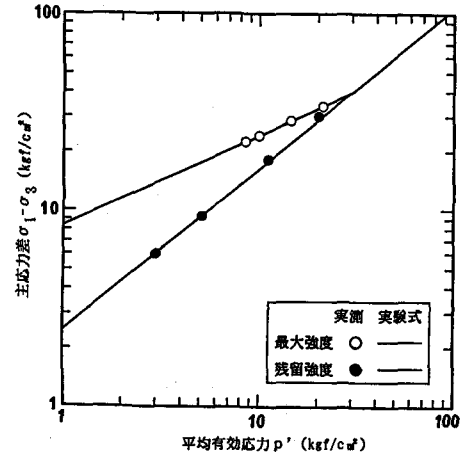


図-3 最大強度、残留強度および破壊基準線(母材)

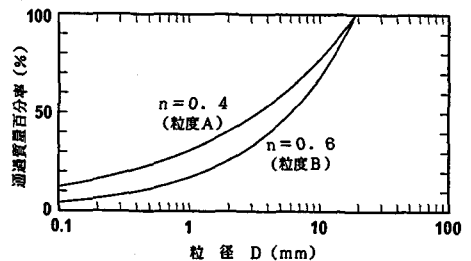


図-4 敷きならし後の粒度分布(ずり)

三軸圧縮試験は、排水条件、側圧一定 ($\sigma_3 = 1, 2, 5, 10 \text{ kgf/cm}^2$)、ひずみ速度一定 ($\dot{\epsilon}_1 = 0.01\%/min$) 条件下で、表-2に示した4種類の試料について行った。なお、供試体寸法は、直径10cm、高さ20cmとした。

図-5には、B-1試料について得られた主応力差 ($\sigma_1 - \sigma_3$) ~ 軸ひずみ

(ϵ_1) ~ 体積ひずみ (ϵ_v) 関係を示した。三軸圧縮試験結果に基づき、まず、変形特性について最大強度の1/2における接線弾性係数により検討を行った。図-6には平均有効応力 p' ~ 接線弾性係数 E_t 関係をA-1 (○)、A-2 (●)、B-1 (△)、B-2 (▲) の各試料について示したが、接線弾性係数は、ほぼ平均有効応力に比例して大きくなっている。

また、同じ粒度分布の場合締固めエネルギーの大きい方が、同じ締固めエネルギーの場合粒度Aと粒度Bでは粒度Aの場合つまり粒度分布の良い方が接線弾性係数は大きくなっている。

つぎに、シルト岩母材の破碎による変形特性の劣化について検討を行うため、シルト岩母材とシルト岩ずりの接線弾性係数の比と平均有効応力の関係を、A-1 (○)、A-2 (●)、B-1 (△)、B-2 (▲) について図-7に示した。これより、接線弾性係数比は、平均有効応力1.5 kgf/cm²付近では100~119のものが、平均有効応力13.5 kgf/cm²付近では16~20と、平均有効応力の増加に伴い減少している。

つぎに、強度特性について検討を行った。図-8にはA-1 (○)、A-2 (●)、B-1 (△)、B-2 (▲) の各試料から得られた最大強度を示した。なお、最大強度は、軸ひずみ $\epsilon_1 = 15\%$ における値とした。これより、式(1)により表されるべき関数型の破壊基準を規定する強度定数 α 、 β としてつぎのような値が得られた。

A-1試料: $\alpha = 1.93$ 、 $\beta = 0.853$

A-2試料: $\alpha = 1.72$ 、 $\beta = 0.918$

B-1試料: $\alpha = 1.90$ 、 $\beta = 0.862$

B-2試料: $\alpha = 2.21$ 、 $\beta = 0.803$

なお、図-8には、B-1試料についてのべき関数型の破壊基準線を実線で示したが、シルト岩ずりの強度特性には、今回設定した締固め条件の範囲内では、ほとんど差がみられない。

また、図-8には、破碎による強度特性の劣化について検討を行うため、シルト岩母材について得られた最大強度 (□)、残留強度 (■) を示すとともに、べき関数型の破壊基準線を破

表-2 締固め試験結果および三軸圧縮試験試料設定条件

ケース	試験条件		締固め試験		三軸圧縮試験試料設定条件		
	粒度	締固めエネルギー E_c	最適含水比 $w_{opt}(\%)$	最大乾燥密度 ρ_{dmax}	含水比 $w(\%)$	乾燥密度 $\rho_d^3 (\text{g/cm}^3)$	湿潤密度 $\rho_t^3 (\text{g/cm}^3)$
A-1	A	0.5	29.1	1.36	29.1	1.23	1.58
A-2	A	1.0	25.6	1.46	25.6	1.31	1.65
B-1	B	0.5	29.5	1.34	29.5	1.21	1.56
B-2	B	1.0	27.3	1.41	27.3	1.27	1.62

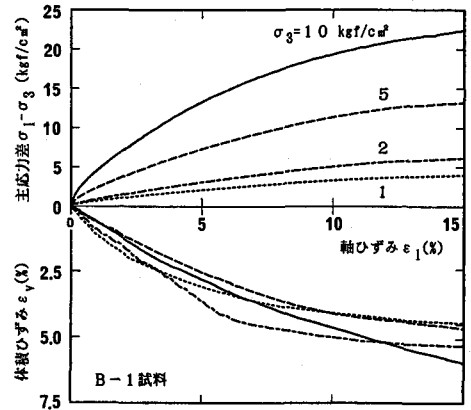


図-5 主応力差~軸ひずみ~体積ひずみ関係(ずり)

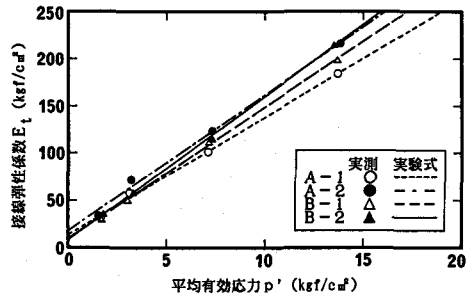


図-6 接線弾性係数の拘束圧依存性(ずり)

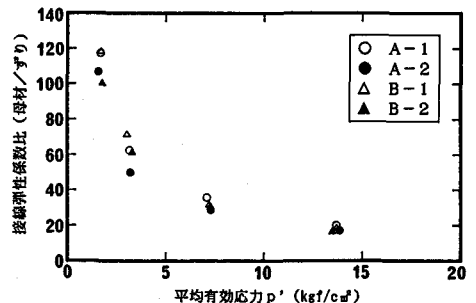


図-7 接線弾性係数比(母材/ずり)の拘束圧依存性

線で示した。これより、シルト岩ずりの最大強度は、シルト岩母材の残留強度よりもやや小さい値となっている。

さらに、図-9にはシルト岩ずりの強度の劣化について検討を行うため、シルト岩ずりの最大強度とシルト岩母材の残留強度の比と平均有効応力の関係をA-1 (○)、A-2 (●)、B-1 (△)、B-2 (▲)について示した。これより、平均有効応力2.1 kgf/cm²でのA-2の場合を除いて、強度比は0.8~0.9の範囲の値となっている。

4. シルト岩スラリーの力学特性

シルト岩スラリーの力学特性を求めるため、三軸圧縮試験を行った。シルト岩スラリーは、シルト岩母材を粉砕し、含水比が60%程度となるように水を加えてミキサーで混ぜ合わせた後0.42mmのふるいを通したものをを用いた。また、三軸圧縮試験に用いる供試体は、まず、所定の拘束圧 σ_3 の1/2の圧力で予圧密を行った後、直径5cm、高さ10cmの寸法に整形して作成した。三軸圧縮試験は、非排水条件、側圧一定($\sigma_3 = 1, 2, 5, 10$ kgf/cm²)、ひずみ速度一定($\dot{\epsilon}_1 = 0.01\%/min$)条件下で実施した。

図-10には主応力差($\sigma_1 - \sigma_3$)~軸ひずみ(ϵ_1)~間隙水圧 u 関係を示したが、主応力差と間隙水圧は、軸ひずみの増加とともに双曲線状に増加し、正規圧密粘土特有の挙動を示している。三軸圧縮試験結果に基づいて、まず、シルト岩スラリーの変形特性について最大強度の1/2における接線弾性係数により検討を行った。

図-11には、平均有効応力 p' ~接線弾性係数 E_t 関係を示すとともに、接線弾性係数の拘束圧依存性について最小自乗法により求めた直線関係式を実線で示した。これより、接線弾性係数は平均有効応力に比例して増加していることがわかる。

つぎに、シルト岩母材のスラリー化による変形特性の劣化について検討するため、シルト岩母材とシルト岩スラリーの接線弾性係数の比と平均有効応力の関係を図-12に示した。これより、接線弾性係数比は、平均有効応力0.8 kgf/cm²で7.2となっていたものが、平均有効応力8.7 kgf/cm²では8と、平均有効応力の増加に伴って減少している。また、図-7に示した破碎による変形特性の劣化の場合と比較するとスラリー化による方が変形特性の劣化は小さいことが分かる。

つぎに、シルト岩スラリーの強度特性について有効応力に基づいて検討を行った。図-13には、シルト岩スラリーの最大強度(○)を示すとともに、べき関数型の破壊基準線を実線で

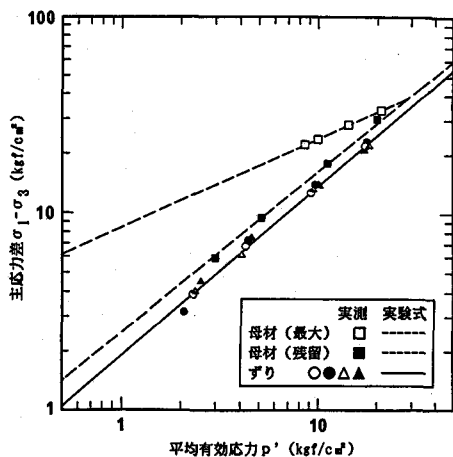


図-8 強度および破壊基準 (母材、ずり)

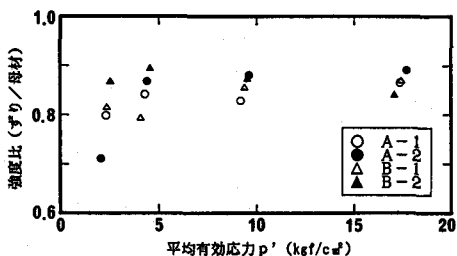


図-9 強度比 (ずり/母材) の拘束圧依存性

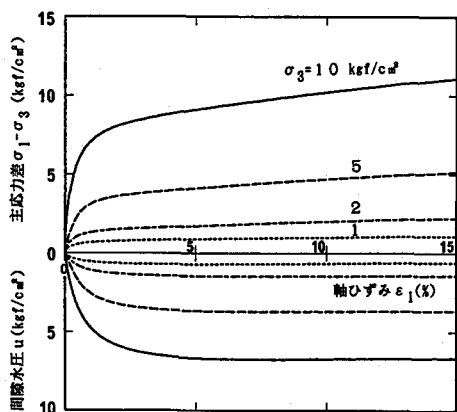


図-10 主応力差~軸ひずみ~間隙水圧関係 (スラリー)

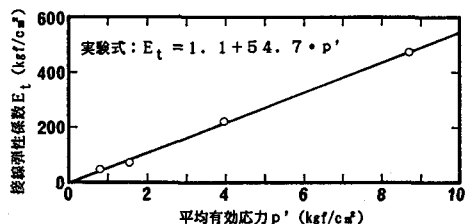


図-11 接線弾性係数の拘束圧依存性 (スラリー)

示した。なお、最大強度は、軸ひずみ $\varepsilon_1 = 15\%$ における値とした。これより、式 (1) により表されるべき関数型の破壊基準を規定する強度定数として $\alpha = 1.58$ 、 $\beta = 1.018$ の値が得られた。

また、スラリー化による強度特性の劣化について検討を行うため、図-13には、シルト岩母材について得られた最大強度 (□)、残留強度 (■) およびべき関数型の破壊基準線を破線で示した。これより、シルト岩スラリーの最大強度はシルト岩母材の残留強度よりもやや小さめの値となるが、平均有効応力の増加に伴いシルト岩母材の残留強度に近い値となっている。

図-14には、シルト岩スラリーの強度の劣化について検討を行うため、シルト岩スラリーの最大強度とシルト岩母材の残留強度の比と平均有効応力との関係を示した。これより、平均有効応力の増加に伴って劣化の程度は小さくなり、平均有効応力 3.0 kgf/cm^2 以上では、強度比は、 $0.83 \sim 0.91$ の範囲の値となっている。また、図-9に示した破碎による強度特性の劣化の場合と比較すると、スラリー化による強度特性の劣化は、破碎による場合とほぼ同程度となっている。

5. おわりに

シルト岩の破碎、スラリー化による力学特性の劣化について有効応力に基づいて検討を行いつぎのような結果が得られた。

①変形特性については、最大強度の $1/2$ における接線弾性係数により検討を行ったがシルト岩スラリー (スラリー化) よりもシルト岩ずり (破碎) の方が劣化が大きくなった。また、シルト岩母材の接線弾性係数に比べてシルト岩スラリーの場合には $1/72 \sim 1/8$ に、シルト岩ずりの場合には $1/119 \sim 1/16$ に劣化した。②強度特性については、シルト岩スラリーの最大強度とシルト岩ずりの最大強度はほぼ一致し、シルト岩母材の残留強度の $0.80 \sim 0.91$ 倍に劣化した。

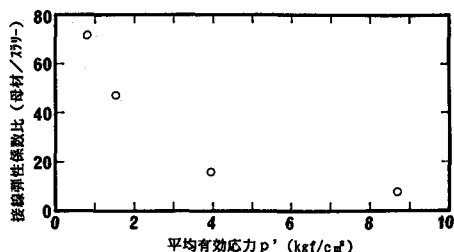


図-12 接線弾性係数比 (母材/スラリー) の拘束圧依存性

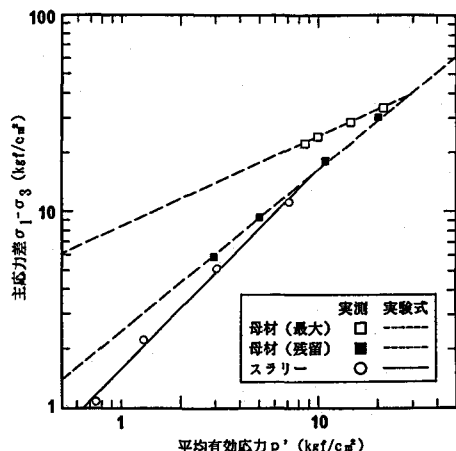


図-13 強度および破壊基準 (母材、スラリー)

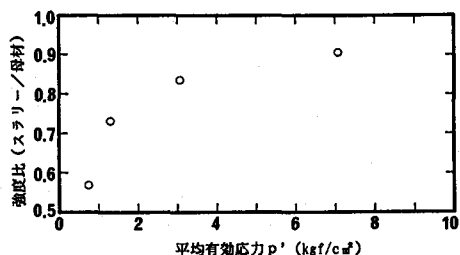


図-14 強度比 (スラリー/母材) の拘束圧依存性

- 参考文献 (1) 渋谷政文、小松原徹、渡辺浩平、伊東亮治、西川洋二、宮本武司：シルト岩の粗粒材料としての締固め特性および力学特性、粗粒材料の現場締固めの評価に関するシンポジウム、pp.17～pp.24、1990。
 (2) 仲野良紀：軟岩をめぐる諸問題 一泥岩の力学特性一、土と基礎、Vol.28、No.7、pp.1～pp.10、1980。
 (3) 足立紀尚、八嶋厚、松蔭茂男：粘土シームの岩盤の力学挙動に及ぼす影響に関する研究、土木学会論文集 第364号、pp.61～66、1985。
 (4) 傳田篤、渡辺浩平、川崎廣貴、中沢亨：スラリー化した第三紀堆積泥岩の力学特性について、第22回土質工学研究発表会、pp.903～pp.906、1987。
 (5) 足立紀尚、小川豊和：堆積軟岩の力学特性と破壊基準、土木学会論文報告集 第295号、pp.51～63、1980。
 (6) 大根義男：盛立て材料としての岩塊の諸問題、土と基礎、Vol.32、No.7、pp.3～8、1984。