

室内試験による蛇籠擁壁の耐震性評価 (その1)
 - 中詰材のせん断特性 -

蛇籠 中詰材 三軸試験

高知大学 国際会員 原 忠, 学生会員 ○田所 佑理佳, 学生会員 柴原 隆
 佐賀大学 国際会員 末次 大輔, 防災科学技術研究所 国際会員 中澤 博志
 (株)CPC 正 会 員 西 剛整, (株)エイト日本技術開発 正 会 員 栗林 健太郎

1. はじめに

蛇籠構造物とは、鉄線で編んだ籠に玉石や岩塊、再生材などの中詰材を詰めた土木構造物で、施工が簡易で安価なため開発途上国での施工例が多く、特にネパール国では直立の3段積み道路擁壁として多く使用されている¹⁾。一方、蛇籠は設計・施工から維持管理に至るまで経験的な知見を反映する部分が多く、蛇籠単体の力学特性や耐震性などを学術的な知見で定量的に評価した研究は多くない。筆者らは、道路擁壁に使用される蛇籠の中詰材や構造体に着目し、現在までに常時および地震時の安定性を評価するため実大模型振動台実験^{2), 3), 4)}や小型模型の水平載荷試験⁵⁾を行っている。本報では中詰材の常時および地震時の力学特性を求め、蛇籠の安定性に与える影響を明らかにすることを目的に、圧密排水三軸圧縮 (CD) 試験と繰返し非排水三軸試験を行ったので述べる。

2. 試験試料の概要

試験試料は、ネパール国で確認された蛇籠中詰材の形状の異なる玉石と岩塊の2種類を対象とし、それぞれ形状と硬度が類似の円礫 (仁淀川河床砂礫) と角礫 (筑波山産碎石) を使用した。試料の粒径加積曲線と物理特性を図-1と表-1にそれぞれ示す。各試料の粒度組成は図-1に示す模型蛇籠に使用する中詰材のそれ⁶⁾と均等係数がほぼ等しく、平均粒径を約1/50の相似粒度に調整した。

3. 三軸試験方法

供試体は、実際の蛇籠の作成方法に合わせた落下高さゼロの空中落下法で作成した。各試料の供試体の相対密度 D_r は、礫の最小密度・最大密度試験 (JGS 0612-2009) で求めた最小・最大密度から計算した。供試体の相対密度は有効上載圧によりわずかに異なるが、全て $D_r=35\%$ 以下である。試験種に関わらず各試料とも供試体作成後 CO_2 を圧入し、背圧を $98kPa$ 付加することで飽和化を促進させ、間隙圧係数 $B \geq 0.95$ であることを確認したのち等方圧密した。有効拘束圧 σ'_c は実物蛇籠の重量および寸法計測により得た蛇籠の単位体積重量 ($15.8kN/m^3$)⁶⁾ から計算し、 $3 \cdot 5 \cdot 8$ 段積み相当の $\sigma'_c=32kPa$, $64kPa$, $128kPa$ とし、繰返し非排水三軸試験は $\sigma'_c=64kPa$ を対象とした。等方圧密終了後、圧密排水三軸圧縮 (CD) 試験は軸ひずみ速度 $0.1\%/min$ で軸ひずみ $\varepsilon_a=15\%$ に達するまで単調排水載荷し、繰返し非排水三軸試験は載荷周波数 $0.1Hz$ の正弦波で両振幅軸ひずみ $DA=10\%$ に達するまで非排水状態で繰返し載荷した。繰返しせん断中はメンブレン貫入の影響を、田中ら⁷⁾の提案法で補正した。また、圧密・せん断過程で生じた粒子破砕量を分析するため、一部供試体に対して、圧密排水三軸圧縮試験では圧密後と軸ひずみ $\varepsilon_a=5\%$, 15% 到達時に、繰返し非排水三軸試験では載荷終了後に直ちに全投入試料に対する粒度試験を行い、Marsalの方法⁸⁾により粒子破砕率 B_M を計算した。

4. 圧密排水三軸圧縮 (CD) 試験結果

図-2にCD試験の結果を、 $\sigma'_c=64kPa$ の体積ひずみ-軸ひずみ関係で示す。同図中には各試験体の余裕間隙比 $e-e_{min}$ を併記する。粒度組成や相対密度がほぼ等しいにも関わらず拘束圧がいずれの場合も円礫は正のダイレイタンシーを、角礫は負のダイレイタンシーを示した。これは、円礫は余裕間隙比 $e-e_{min}$ が角礫の半分以下であり、載荷初期の軸ひずみが小さい段階で粒子が密な粒子配列に再配列され、せん断初期から体積膨張傾向を示したと推察される。CD試験より得られた、各試料の粘着力 c_d およびせん断抵抗角 ϕ_d は、円礫が $c_d=0kPa$, $\phi_d=46^\circ$, 角礫が $c_d=0kPa$, $\phi_d=44^\circ$ であり⁶⁾、

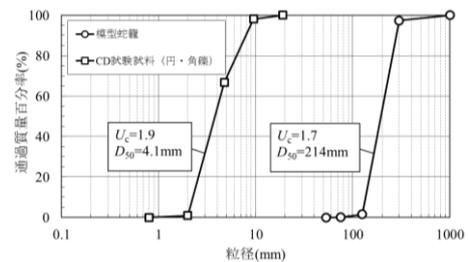


図-1 本試験試料の粒径加積曲線⁶⁾

表-1 各試料の物理特性

試料名	ρ_s (g/cm ³)	ρ_{dmax} (g/cm ³)	ρ_{dmin} (g/cm ³)	U_c	D_{50} (mm)
円礫	2.698	1.839	1.586	1.9	4.1
角礫	2.679	1.707	1.286	1.9	4.1

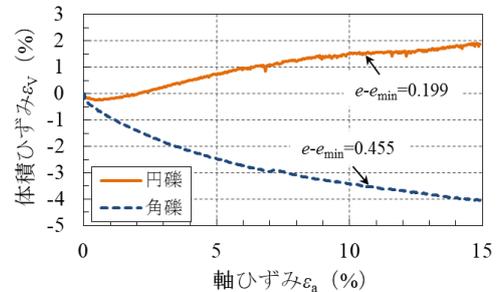


図-2 体積ひずみ-軸ひずみ関係 ($\sigma'_c=64kPa$)

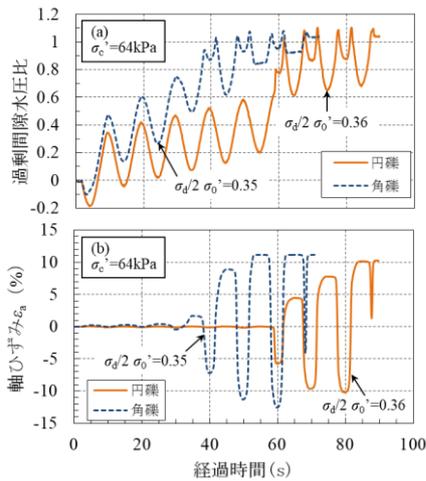


図-3 繰返し非排水三軸試験の時刻歴の例

角礫に比べ円礫が僅かに大きな値を示した。

5. 繰返し非排水三軸試験結果

図-3 に $\sigma'_c=64\text{kPa}$ の繰返し非排水三軸試験で得られた試験結果について、過剰間隙水圧比・軸ひずみの時刻歴の一例を示す。繰返し応力振幅比の等しい試験で比較した場合、角礫に比べ円礫は繰返し載荷回数 N_c の増加に伴う過剰間隙水圧比の変化が緩やかで、両振幅軸ひずみ DA が 10%に到達するまでの載荷回数が僅かに多い。

図-4 に $\sigma'_c=64\text{kPa}$ で得られた試験結果を $DA=$

5%到達時の繰返し載荷回数 N_c と繰返し応力振幅比の関係で示す。同図中には、原ら⁹⁾による相対密度の異なる $U_c=11.4$ の貧配合な砂礫の結果を併記する。各試料とも、貧配合な砂礫よりせん断強度は大きく、角礫と比べ円礫は繰返し載荷回数 $N_c=20$ で定義した繰返し応力振幅比 R_{L20} が僅かに大きい結果となった。

6. 粒子破碎率と粒子形状の関係

図-5 に、 $\sigma'_c=64\text{kPa}$ のせん断試験前後の粒度分布から計算した粒子破碎率 B_M をまとめる。ここでのプロットは CD 試験の供試体の圧密後、 $\varepsilon_a=5\%$ 、15%到達時、および繰返し非排水三軸試験の 3 供試体の平均値を示している。同図中に、上野ら¹⁰⁾による $\sigma'_c=196\text{kPa}$ で $D_r=70\%$ の角張のある粒子を持つ豊浦砂および破碎性材料のまさ土の試験結果を併記する。粒子破碎率は CD 試験ではまさ土や豊浦砂と比べるとやや小さいが、角礫は軸ひずみの増加に従って破碎率も大きくなるのに対し、円礫は圧密終了後に僅かに破碎が生じるものの、その後のせん断による値の増加は小さい。繰返し非排水三軸試験では各試料とも圧密後と破碎率に大きな差はなく、繰返し載荷による破碎はあまり見られない。これは、CD 試験と比べ繰返し載荷ではせん断中の軸ひずみが小さく、弱部の角張に応力が集中しにくいためと推察される。

7. まとめ

圧密排水三軸圧縮 (CD) 試験および繰返し非排水三軸試験の結果から、以下の主要な知見が得られた。

- 1) CD 試験結果は粒度組成や相対密度がほぼ等しいにも関わらず、粒子形状の違いにより特性が異なる傾向を示した。せん断抵抗角は円礫が $\phi_d=46^\circ$ 、角礫が $\phi_d=44^\circ$ と僅かに円礫が大きい値であった。
- 2) 繰返し非排水三軸試験は、繰返し応力振幅比が同程度の試験結果で比較した場合、角礫と比べ円礫は $DA=10\%$ 到達までの繰返し載荷回数が僅かに多く、繰返し応力振幅比 R_{L20} は大きい結果を示した。
- 3) 粒子破碎率 B_M は粒子形状により大きく異なり、角礫が破碎しやすい性質を示した。角礫は CD 試験では軸ひずみの増加に伴って破碎率が大きくなるが、繰返し載荷後のそれは圧密後とほぼ同程度であった。

一連の試験結果から、蛇籠中詰材には円礫を用いることで常時および地震時の蛇籠の安定性が保てると推察された。

【謝辞】本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金 (基礎研究 B (一般) 16H0413 および基礎研究 B (海外学術調査) 16H05746) の助成を受けたものです。関係者各位に謝意を表します。

【参考文献】1)原ほか：2015年ネパール・ゴルカ地震における蛇籠被害の実態調査と耐震性向上に向けた具体策の検討，第37回土木学会地震研究発表講演集，No.1171，pp.1-10，2017. 2)原ほか：蛇籠を用いた道路擁壁の耐震性評価に関する実大規模振動台実験 (その1) -実験概要-，第52回地盤工学研究発表講演集，pp.1555-1556，2017. 3)末次ほか：蛇籠を用いた道路擁壁の耐震性評価に関する実大規模振動台実験 (その2) -加振実験-，第52回地盤工学研究発表講演集，pp.1557-1558，2017. 4)臼倉ほか：蛇籠を用いた道路擁壁の耐震性評価に関する実大規模振動台実験 (その3) -残留変形の評価-，第52回地盤工学研究発表講演集，pp.1559-1560，2017. 5)末次ほか：室内試験による蛇籠擁壁の耐震性評価 (その2) -模型蛇籠擁壁の水平載荷実験-，第53回地盤工学研究発表会，(投稿中)，2018. 6)原ほか：蛇籠擁壁の耐震性評価手法の検討 (その1) -中詰め材の要素試験-，土木学会第72回年次学術講演集，pp.481-482，2017. 7)田中敬三，時松孝次：液状化試験結果に対する Membrane Penetration の簡便な評価方法，土の非排水繰返し試験に関するシンポジウム論文集，土質工学会，pp.85-88，1988. 8)Marsal, R.J. : Mechanical properties of rockfill, Casagrande Volume, John Wiley & Sons, pp.109-200, 1972. 9)原ほか：砂礫の液状化強度および液状化後の非排水せん断強度に及ぼす粒度分布の影響，土木学会論文集，No.645/III-50，pp.245-253，2000. 10)上野ほか：粒子形状の異なる砂質土のせん断特性と粒子破碎率の関係，第47回地盤工学研究発表会発表講演集，pp.375-376，2012.

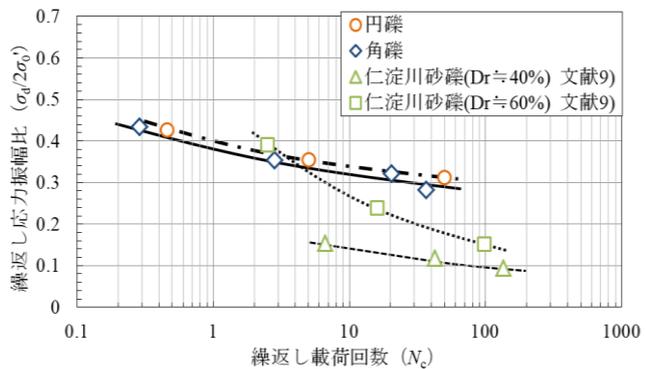


図-4 繰返し応力振幅比—繰返し載荷回数 ($\sigma'_c=64\text{kPa}$, $DA=5\%$)

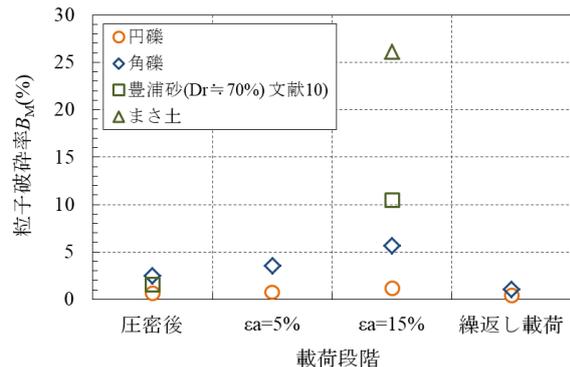


図-5 各載荷段階における粒子破碎率 B_M ($\sigma'_c=64\text{kPa}$)