

京都大学大学院 正会員 小林 俊一
 京都大学大学院 学生会員 ○木元 小百合

1. 背景と目的 海洋構造物の安定性を考える上で、支持地盤の不安定現象を解明することは、きわめて重要である。粒状体地盤と浸透流の動的相互作用による不安定化の例として、捨石マウンド法尻付近の局所的な洗掘や捨石マウンド直下の置換砂層の地震時液状化による抜け出しなどが挙げられる。これらの現象はいずれも広い粒径分布を示す粒状体地盤が浸透流による細粒分流出という物質移動現象を伴う不安定化現象である特徴を有する。従来、砂地盤の浸透流による不安定現象については、粒度分布に着目した Kenney らの実験的検討 [1] が知られている。Kenney らは図1に示すように、粒径加積曲線における粒径 D 以下の粒子の重量百分率 F 、粒径 D から $4D$ の粒子の重量百分率 H を用い、その比 (H/F) の最小値を不安定指標 $(H/F)_{\min}$ と定義して材料の不安定性を評価した。その結果、 $(H/F)_{\min} \leq 1.0$ の配合では、限界導水勾配が $0.2 \sim 0.4$ 程度で細粒分のみによる分離型パイピングを生じる内的不安定な粒子配合であると報告している。本研究では、広い粒径分布を示す異種粒径地盤の浸透流による不安定化に関する実験について報告する。

2. 実験概要 断面積 $15\text{cm} \times 5\text{cm}$ 、高さ 15cm の直方体供試体に鉛直上向きの一様な浸透流を与えて、その流量と供試体内 3 箇所の間隙水圧を経時的に計測した。供試体は表1に示すように砂礫分と細粒分の重量比で管理した。砂礫分として試料 A～C では珪砂 3 号 ($D_{50} = 1.4\text{mm}$)、試料 D～F では $2\text{mm} \sim 9\text{mm}$ のふるいを通した山砂 ($D_{50} = 3.1\text{mm}$) を使用し、細粒分は全ての試料で珪砂 7 号 ($D_{50} = 0.15\text{mm}$) を使用した。供試体作成では飽和度を確保しつつ分粒を避けるため、スラリー状の試料を水中落下法により液深 2cm から 5 層に分けて投入し、さらに試料 A～C については各層を直径 1.2cm の金属棒で 10 回突き固めた。各試料の粒径加積曲線を図2に示すが、いずれの試料も中間的な粒径の粒子がほとんど含まれておらず、 $(H/F)_{\min} \leq 1.0$ を示す内的不安定とされる配合である。また細粒分、砂礫分の平均粒径 D_{50f} 、 D_{50c} の比 D_{50c}/D_{50f} をとると、試料 A～C では $D_{50c}/D_{50f} = 9.0$ 、D～F では $D_{50c}/D_{50f} = 20.7$ である。

3. 結果および考察 まず試料 A～F について不安定性指標 $(H/F)_{\min}$ と限界動水勾配 i_c を表1に、供試体全体の動水勾配と単位面積単位時間当たりの流量の関係を図3～8にそれぞれ示す。試料 A～C では、いずれも細粒分の流出は徐々に進行し、全体的なボイルング破壊に到るまで、細粒分の大部分は砂礫分の間に残ったままであった。また動水勾配が概ね 0.5 を超えると曲線の勾配が小さくなっており、見かけの透水係数が低下する特徴がある。全体的なボイルングが生じた限界動水勾配はそれぞれ $i_c = 2.39, 2.04, 2.39$ で、Terzaghi の理論による限界動水勾配値 $i_{c0} = 1.00, 1.02, 1.09$ の $2.0 \sim 2.4$ 倍であった。さらに試料 B について供試体内部の経時的な水頭分布を図9に示すが、細粒分の流出に伴い上部では下部に比べて透水係数が増加し、ボイルング破壊前の動水勾配は供試体上部で $i = 0.9$ 、下部で $i = 3.5$ となることが分かる。

一方、試料 D では供試体全体にわたって徐々に細粒分が流出し、動水勾配 $i = 0.38$ で細粒分はほぼ完全に流出したが、砂礫の骨格部は動かず全体的なボイルング破壊はみられなかった。図中の領域 I はほぼ均一な混合試料としての透水性を、領域 II は細粒分が流出している遷移的な状態を、領域 III は砂礫の骨格部の透水性を反映していると考えられる。試料 E、F では、動水勾配が小さいときには細粒分の流出はあまり見られなかったが、それぞれ $i = 0.54, 1.1$ で直径 1cm 程度の範囲で部分的な細粒分のパイピングが起り、流量の急激な増加と細粒分の流出に伴う砂礫分の沈下が見られた。また試料 F では引き続いて全体的なボイルング破壊を生じた。試料 D～F について細粒分がほぼ完全に抜け出したあとの砂礫骨格部の体積は、試料 D では変化なし、E では 95% 、F では 82% に減少していた。細粒分の流出特性の違いを説明するため、Skempton ら[2]による細粒分の限界含有率 S^* の概念を導入する。すなわち、砂礫より構成される骨格部が細粒分に比べて十分大きくしかも細粒分が少量ならば、荷重の大部分は骨格部のみに伝達され、細粒分のみが流出しやすくなるが、細粒分がある限界含有率 S^* を超えると、砂礫の骨格部だけでは荷重を支持できなくなり、細粒分にも荷重が伝達されるため全体的なボイルングを生じやすくなると考えられる。本実験では試料 D～F の結果より、限界含有率が $15 < S^* < 30$ の範囲であることが予想される。

これらの試料は Kenney らの不安定性指標によればいずれも内的不安定とされる配合 $(H/F)_{\min} \leq 1.0$ であったが、細粒分と砂礫分の平均粒径比 D_{50}/D_{50s} は、試料 A～C で 9.0、D～F で 20.7 と異なることが、細粒分の流出特性の違いを反映していると考えられる。

4. まとめ 広い粒径分布を示す異種粒径地盤の浸透流による不安定化について実験的検討を行った。その結果、Kenney らの指摘した内的不安定な配合である不安定性指標 $(H/F)_{\min} \leq 1.0$ の試料であっても、砂礫分と細粒分の平均粒径の比によって、細粒分のみ分離型パイピングが発生する場合と全体的なボイリング破壊が発生する場合が観察された。さらに分離型パイピングが生じるためには細粒分が限界細粒分含有率 S^* 以下となる必要があった。今後は不安定化メカニズムの進展状況の可視化や粒子・流体間の相互作用力の評価法などについて検討を加えていきたい。

参考文献 [1] Kenney, T. C. and Law, D. ; Canadian Geotech. J., Vol. 22, pp. 215-225, 1985. [2] Skempton, A. W. and Brogan, J. M. ; Geotechnique, Vol. 44, No. 3, pp. 449-460, 1991.

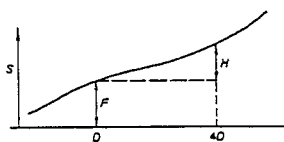


図1 Kenney による不安定性指標

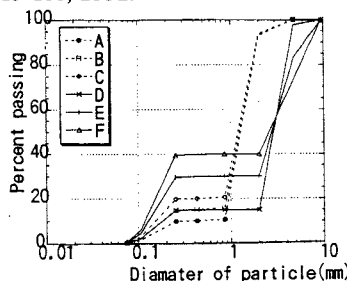


図2 試料の粒径加積曲線

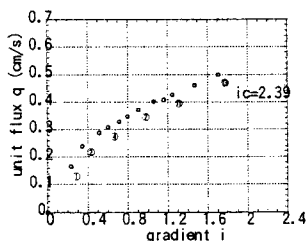


図3 混合 A

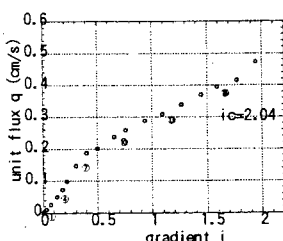


図4 混合 B

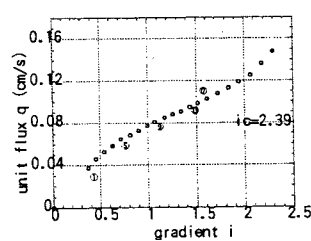


図5 混合 C

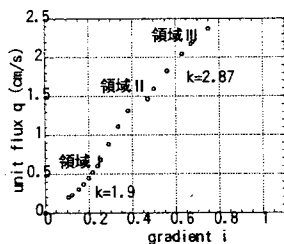


図6 混合 D

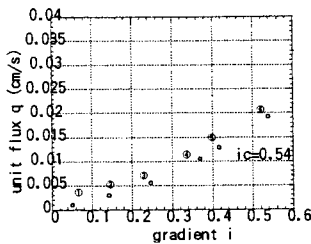


図7 混合 E

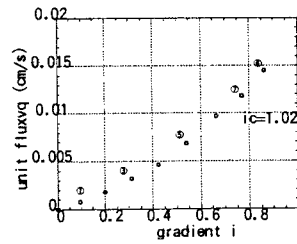


図8 混合 F

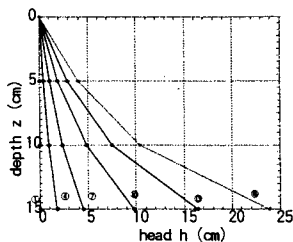


図9 混合 B の水頭分布

表1 実験に用いた試料

	混合 A	混合 B	混合 C	混合 D	混合 E	混合 F
	3号 90% 7号 10%	3号 85% 7号 15%	3号 80% 7号 20%	砂礫 85% 7号 15%	砂礫 70% 7号 30%	砂礫 60% 7号 40%
$(H/F)_{\min}$	0.40	0.41	0.36	0.00	0.00	0.00
間隙比 e	0.64	0.60	0.51	0.62	0.44	0.42
限界動水勾配 理論値 i_{L0}	1.00	1.02	1.09		1.16	1.15
実験値 i_L	2.39	2.04	2.39		0.54	1.02
理論値に対する 比率(i_L/i_{L0})	2.39	2.00	2.19		0.47	0.89