

阪神大震災におけるケーソン岸壁の破壊メカニズムの評価

山口大学工学部 正 員 兵動正幸 中田幸男
 日本国土開発(株) 正 員 ○徳原裕輝
 山口大学大学院 学生員 荒牧憲隆 松下純子

1. まえがき

阪神大震災では、六甲アイランドやポートアイランド外周のケーソン岸壁が大きな被害を受けた。代表的な破壊形態は、図-1 に示すようにケーソンが海側に数 m 移動し、背後の地盤が大きく陥没するというものであった。埋立て材料は六甲山系のまさ土であり、岸壁下部は、海底粘土地盤を同じまさ土で約 10m の厚さにわたり、置き換えられている。本研究は、ケーソン岸壁の破壊メカニズムを究明するためにこの置換砂の挙動に着目し検討を行ったものである。置換砂はケーソンの自重により、様々な初期せん断応力が作用する状態にあったと考えられる。本研究では、まさ土が破砕性土であることを勘案し、このような初期応力状態が地震時の繰返しせん断特性に及ぼす影響について調べ、これを支持地盤とするケーソン岸壁の地震時安定性の評価を行った。具体的には、まさ土の様々な初期せん断応力下における非排水繰返し三軸試験を行い、得られた結果を用いて円弧すべり法による地震時安定解析を行った。

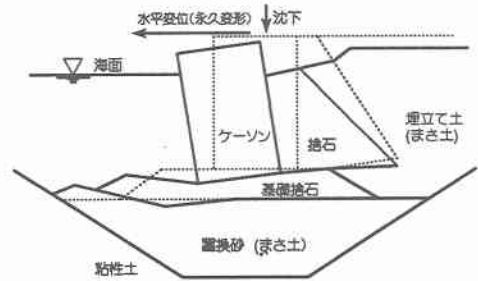


図-1 代表的なケーソン岸壁の破壊状況

2. 実験方法および実験条件

本研究では、阪神大震災においてケーソンの転倒などの被害を生じた六甲アイランドの北側岸壁付近で採取したまさ土($G_s=2.648, e_{max}=1.248, e_{min}=0.565, U_c=12.0$)を対象とし、この 2mm ふるい通過分を試料として用いた。三軸供試体は、水中落下法により緩詰め($Dr_1=50\%$)および密詰め($Dr_1=80\%$)の 2 種類を作成した。これらの供試体に繰返し三軸試験機を用いて初期平均有効拘束圧 $p_c=100\text{kPa}$ 一定で種々の初期せん断応力比 $q_s/2p_c=0, 0.1, 0.2, 0.4$ の下、周波数 $f=0.1\text{Hz}$ の正弦波載荷により、非排水繰返しせん断試験を行った。

3. 試験結果の考察

初期せん断応力下、とりわけ応力反転のない片振りでは、一般の砂ではほとんど変形は生じないが、まさ土では大きな残留変形が生じ、破壊に至った。図-2 は、繰返し回数 20 回におけるピーク軸ひずみ $\varepsilon_p=5\%$ に至るに必要な繰返し応力比 R_{f20} と初期せん断応力比 $q_s/2p_c$ の関係を示した図である。なお、図中には豊浦砂の結果も併せて示している。この図を見ると、初期せん断応力の増加に伴い応力反転のある領域では、わずかに動的強度の増加が認められるものの、応力反転のない領域ではさらに動的強度を低下させることが分かる。豊浦砂は初期せん断応力比の増加と共に強度を増加させるのに対して、まさ土では、初期せん断応力比の増加と共に強度を低下させている。また、応力反転のある領域では豊浦砂の $Dr=50\sim70\%$ と同程度の強度を有するが、応力反転のない領域では $Dr=50\%$ より低い強度を示

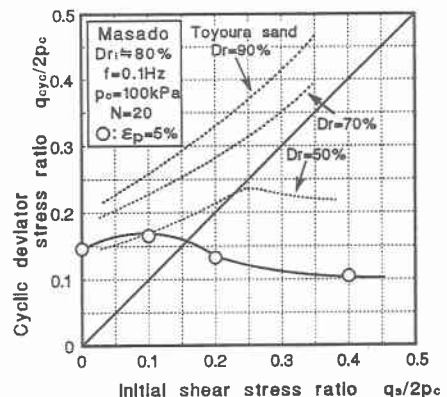


図-2 繰返し回数 20 回におけるピーク軸ひずみ $\varepsilon_p=5\%$ に対する動的強度 R_{f20}

すことが分かった。

4. 地震時安定解析結果

前述の試験より得られた種々の初期せん断応力下におけるまさ土の動的強度を導入することにより、被災したケーソン岸壁を対象に地震時安定解析を行った結果について示す。解析は、修正フェレニウス法による震度法を適用し、円弧すべり法により行った。解析手法として、動的安全率 F_d は、地震時発生する繰返し応力を滑動力 R とし、初期せん断応力を考慮した繰返し三軸試験より得られた結果を抵抗力 R_d とし、両者の比を取ることで求めた。用いたケーソンおよび各地層の単位体積重量を表-1に示す。設計水平震度はポートアイランドでの観測結果を参考に $k_h=0.5$ とし、ケーソン岸壁および裏込め土に様に震度を与えている。図-3にケーソンを含むすべりの中での最小安全率を表す円弧を示した。なお、ここに示す結果は、繰返し回数 20 回の繰返しせん断強度に対する動的安全率 F_d である。この図より、ケーソンと裏込めの境界にテンションクラックを生じる円弧が最小安全率となり、動的安全率は、 $F_d=0.553$ とかなり低い値を示し、地震時の破壊形態と概ね一致する結果が得られた。このことから、被災したケーソン岸壁の破壊の原因は、破碎性土としての数砂がケーソンの自重による初期せん断応力の作用により動的強度が低下している中で、地震時にケーソンの大きな慣性力によりすべりせん断破壊を起こしたためと考えられる。図-4は、上述の円弧すべり解析結果より得られた動的安全率 F_d と繰返し回数 N の関係を示した図である。今回の地震の主要動における繰返し回数は 10 回以内であったことを考慮すると、動的安全率は $F_d=0.6$ 程度と見なすことが出来る。

表-1 各地層の単位体積重量

土層名	$\gamma_d(\text{tf/m}^3)$	$\gamma'_d(\text{tf/m}^3)$
ケーソン	2.1	1.1
裏込め土	1.8	0.8
捨石	2.0	1.0
置換砂	1.8	0.8
粘土	1.6	0.6

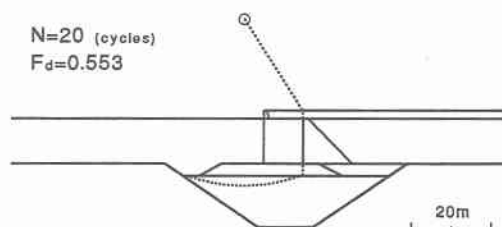


図-5 地震時安定解析結果

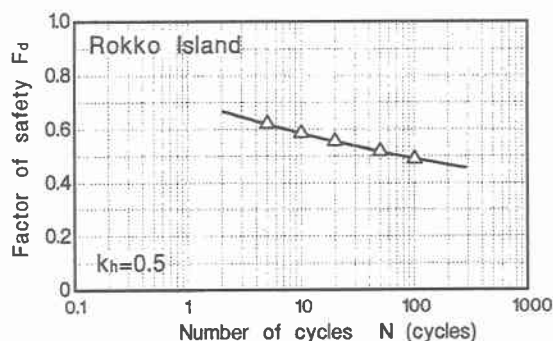


図-4 動的安全率と繰返し回数の関係

5. まとめ

本報では、六甲アイランドより採取したまさ土を用いて種々の初期せん断応力下における繰返し三軸試験を行い、得られた結果を用いて円弧すべり法による地震時安定解析を行った。得られた知見を以下に示す。

- 1) まさ土の動的強度は、初期せん断応力比の増加に伴い低下の傾向を示した。
- 2) 初期せん断応力下のまさ土は、残留変形によるせん断破壊を生じた。
- 3) 豊浦砂と比較してかなり低い強度を示した。
- 4) 地震時安定解析では、ケーソン背後から置換砂層内ですべりを生じ、その時の動的安全率は $F_d=1$ を大きく下回った。

【参考文献】1) 高橋邦夫・菊池嘉昭：“港湾施設の基礎の調査報告”，基礎工，pp.95-99，1995.10. 2) 福江・山崎・北原ら：“海からみた阪神大震災”，第30回土質工学研究発表会発表講演集，pp.59-62，1995. 3) 片山・川畑・村田ら：“兵庫県南部地震による液状化が起因となった埋立地の建物被災状況について”，第30回土質工学研究発表会発表講演集，pp.65-66，1995.