

(103) 飽和砂地盤上の盛土の振動破壊実験と円形すべり安定解析

運輸省港湾技術研究所 上部達生
運輸省第一港湾建設局 北沢計介
運輸省第四港湾建設局 檜垣典弘

1. まえがき

飽和砂地盤上の盛土は過去に発生した地震において著しい被害を受けている。この飽和砂地盤上の盛土の地震時の安定を検討するための1つの方法として円形すべり面を仮定した斜面安定解析法があるが、地震時に作用する慣性力の他に飽和砂地盤内の過剰間隙水圧の発生を考慮した検討はまだ十分行われていない。そこで、飽和砂地盤上の盛土について、大型模型振動破壊実験を実施し、その破壊性状を検討し、さらに地震時に作用する慣性力と飽和砂地盤内に発生する過剰間隙水圧を考慮した円形すべり安定解析法により実験結果の解析を行った。

2. 振動破壊実験

振動実験は4回実施した。1回の実験はひとつの模型に対応している。以後4回の実験をケース1から4で表現する。ケース1と2については既に報告している¹⁾のでここではケース3と4の結果を中心に記述する。

(1) 模型

振動箱(長さ8m、幅4m、高さ2m)内に、地盤と盛土を作成した。模型の形状は2種類有り、ケース1と2、ケース3と4が同一形状の模型である。図-1にこれを示す。ケース1と2は振動箱の大きさの範囲内で、盛土をできるだけ大きくし、盛土の法尻から先の地盤の長さも十分にとるため、盛土を片方に寄せ、左側斜面の安定についてのみ検討している。一方、ケース3と4では両側の斜面について検討するため、盛土を少し小さくして、振動箱の中央に作成している。

用いた砂の粒度分布を図-2に示すが、港湾構造物の現行設計法²⁾でいうところの「特に液状化の可能性あり」の範囲に含まれている。模型の単位体積重量等を表-1に示す。表-1に示すように、地盤はケース1以外はゆるい状態となっている。

(2) 実験装置および実験方法

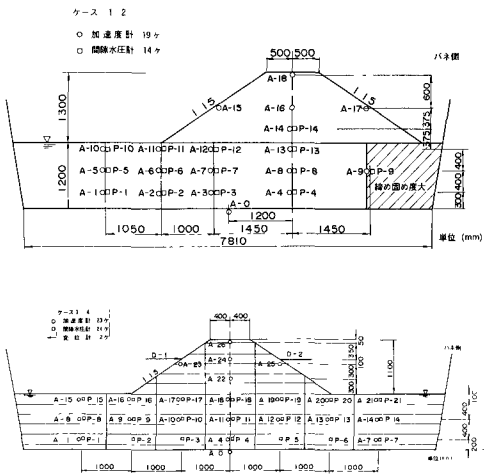


図-1 模型断面図

表-1 模型の性状

実験ケース 項目	ケース 1		ケース 2		ケース 3		ケース 4	
	地盤	盛土	地盤	盛土	地盤	盛土	地盤	盛土
湿潤単位体積重量 γ_d (gf/cm ³)	1.59*	1.52	1.51*	1.61	1.51	1.57	1.49	1.50
含水比 w (%)	12.3	11.6	14.5	14.2	12.6	14.4	13.2	12.9
()内は注水後の値			(29.3*)		(32.6*)		(33.4*)	
乾燥単位体積重量 γ_d (gf/cm ³)	1.42*	1.36	1.32*	1.41	1.34	1.37	1.32	1.33
飽和度 S_r (%)	86.2*		84.1*		84.6*		84.2*	
注水後単位体積 重量 γ (gf/cm ³)	1.84*		1.76*		1.78*		1.76*	
間隙比 e	0.95	1.03	1.10	0.97	1.06	1.01	1.10	1.08
相対密度 D_r (%)	68	54	41	65	38	47	29	33
内部摩擦角 ϕ (°)	39	37	36	38	37	37	36	36

* 推定値

表-2 加振方法と測定項目

項 目	内 容
加振方法	加振装置 振動破壊試験装置
	振動波形 衝撃波（自由減衰振動）
	加加速度 ケース 1：約50～1200Gal（7段階） ケース 2：約60～600Gal（5段階） ケース 3：約40～500Gal（5段階） ケース 4：約30～300Gal（5段階）
	振動数 約2～5 Hz
測定項目	加振時 地盤、盛土の加速度 地盤の間隙水圧
	各加振後 地盤、盛土の水平変位、鉛直変位 地盤、盛土表面のクラック
	実験終了後 地盤、盛土内の破壊箇所

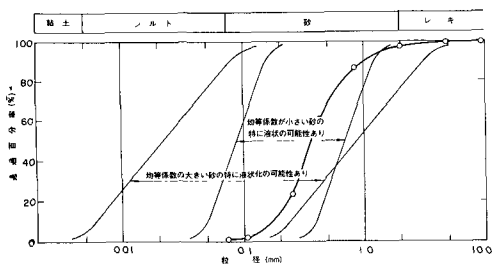


図-2 砂の粒度分布

実験には運輸省港湾技術研究所所有の振動破壊試験装置を用いた。この装置は、油圧シリンダにより振動箱を押し出してバネ装置に初期変位を与えた後、瞬間的にシリンダを引き戻すことにより、振動箱に水平一方向の自由減衰振動を発生させるものである。

表-2には実験の加振方法と測定項目を示す。加振は盛土が破壊したとみなせるまで、ケース1では7回、ケース2と4は5回、ケース3は6回加振した。

3. 実験結果

図-3に盛土の加速度の時刻歴の測定結果の1例を示す。図-4には、盛土中央位置における加速度の鉛直方向の分布を示す。図中、第1波とは第1番目の半周期の波をさしている。この第1波加速度は盛土の左側斜面を崩壊させる方向に力が作用している時の加速度である。入力加速度が大きくなると、第1波では振動台（A-0）と地盤中の最も下の測定点（A-4）の間における加速度の減衰が非常に大きい。この部分で大きなせん断ひずみが発生したと考えられる。盛土部では、ケース1と2では増幅がなく、高さ方向にほぼ一様な加速度を示したが、ケース3と4では図-4に示すように、加速度が高さ方向にやや増加しているのが認められた。

図-5に過剰間隙水圧の時刻歴の測定結果の1例を示す。過剰間隙水圧は、第1波の加速度の作用時にはまだ小さく、第2波以降急激に増大した。測定点のいくつかでは、振動終了後に過剰間隙水圧の最大値が計

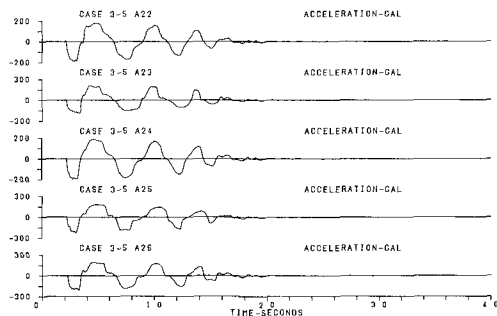


図-3 加速度の測定結果

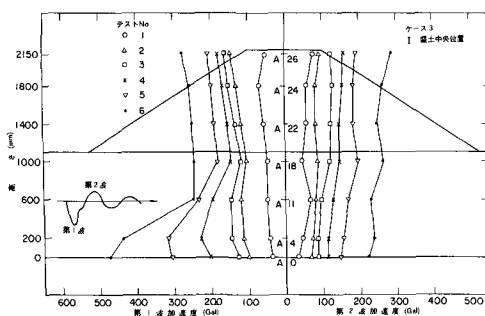


図-4 最大加速度分布

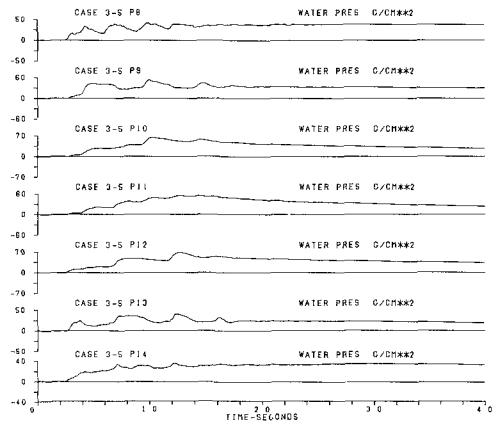


図-5 過剰間隙水圧の測定結果

測された。盛土の破壊は振動中に生じているので、ここでの過剰間隙水圧の検討は振動中の最大値について実施する。

図-6には盛土中央下の地盤表面部の加速度（地盤加速度と呼ぶ）と過剰間隙水圧比（過剰間隙水圧／有効拘束圧）を示す。有効拘束圧は有限要素法により求めた。地盤加速度の増加とともに、まず地盤部（図-6ではP-8）、および盛土法尻下の地盤部（図-6ではP-9）の過剰間隙水圧比が増大する。ケース1ではこの時の地盤加速度が約300Gal、ケース2では200Gal、ケース3と4では約150Galである。さらに、地盤加速度が増加すると盛土下の地盤内の過剰間隙水圧比も増大する。

図-7にはケース3の各加振後の残留水平変位を示す。図-7に示すように、地盤加速度が約180Gal（振動台加速度は約300Gal）で残留変位が急増しており、ここで盛土は破壊したとみなした。この時の過剰間隙水圧比は図-6に示すように盛土の法尻付近から前面の地盤内において0.5以上の値を示している。

加振時の破壊状況の目視観察によれば、第3、4波加振時（ケース1、2の場合は第3波加振時）の加速度は第1、2波加振時の加速度より小さいにもかかわらず、第3、4波加振時に破壊が進行するのか認められた。これは、第3、4波加振時に地盤内の過剰間隙水圧が上昇することによるものと考えられる。

各ケースの全ての加振が終了した後、模型を人力により掘りおこして模型作成時に敷設しておいた白色砂による模型の変状を調べた。その結果を図-8に示す。図中の○印は白色砂の右上り段差、●印は白色砂の左上りの段差の位置を示しており、これらを結ぶ線がすべり面となって破壊したものと推定される。

4. 円形すべり面法による安定解析

港湾施設の設計では、通常土塊を分割して考えるスウェーデン法のうち、チェボタリオフが述べている方法により安定解析が行われている²⁾。この報告での円形すべり安定計算は、この港湾施設の設計で用いられている方法を修正して慣性力および飽和砂地盤内に発生した過剰間隙水圧を考慮して行った。円形すべり安定計算で用いる砂の内部摩擦角は三軸試験結果より求めた。表-1にこれを示す。ケース1、2では盛土部での加速度の増幅がみられなかったことから、円形すべり安定計算での震度は高さ方向に一定の値を与えることとし、盛土直下の地盤加速度を重力加速度で除して震度とした。ケース3、4の場合には盛土部での加

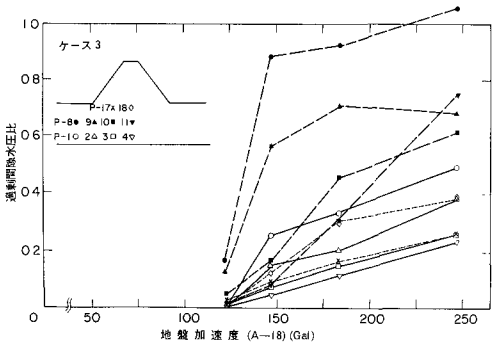


図-6 地盤加速度と過剰間隙水圧比

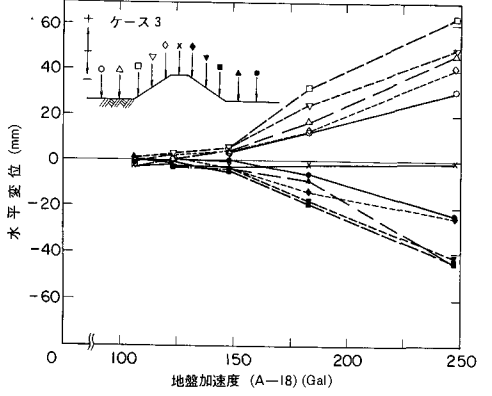


図-7 模型表面の水平変位

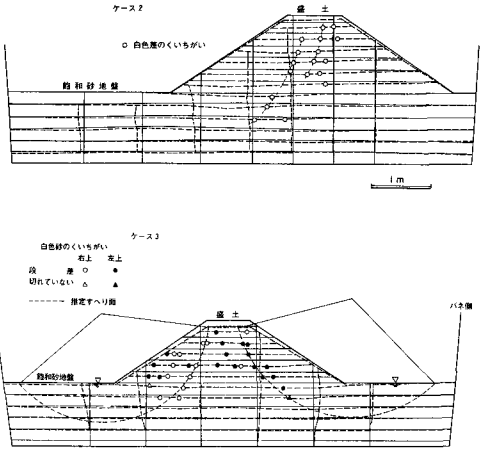
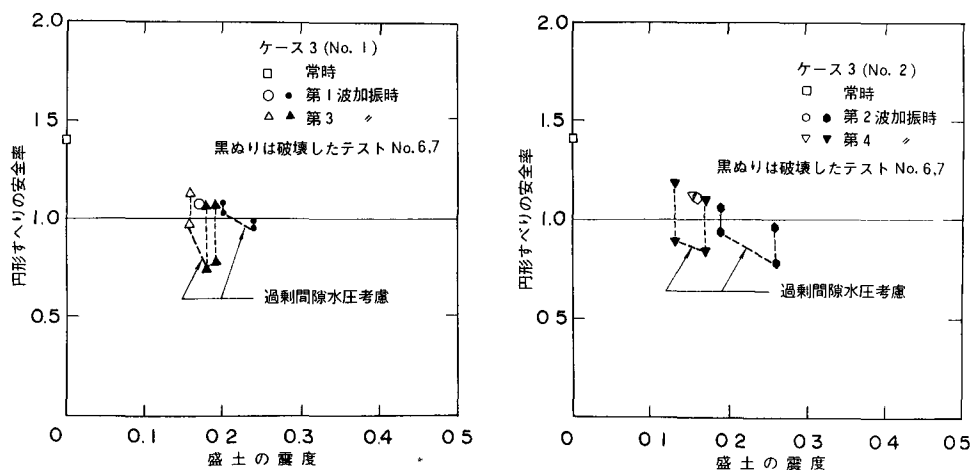


図-8 模型の破壊状況



速度の増幅がみられたので、盛土部と地盤部で別々の震度を与えた。過剰間隙水圧は計算で用いる震度を与える加速度作用時の測定値を用いた。

実験によれば盛土の破壊は第3、4波加振時に大きく進行していたので、加速度が大きい第1、2波作用時の他に第3、4波作用時についても計算を行った。第1～4波作用時に過剰間隙水圧が実測されていれば、その測定結果を用いて計算しているが、過剰間隙水圧を考慮しない場合についても比較のため計算した。

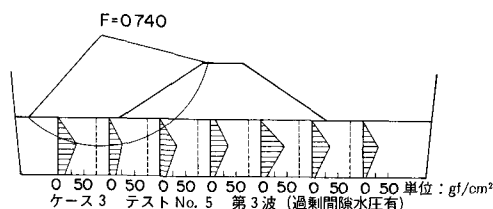


図-10 円形すべり円の例

ケース3の計算結果を図-9に示す。円形すべり円の1例を図-10に示す。図-9において、盛土が破壊した場合(ケース3ではNo. 5、6)が黒ぬりの記号で示してあるが、過剰間隙水圧を考慮した黒ぬりの記号はほぼ安全率が1以下となっている。第3、4波加振時においても過剰間隙水圧を考慮した場合の安全率が1以下となっており、実験において盛土の破壊が第3、4波加振時にも確認されたことと一致している。過剰間隙水圧を考慮しない場合の安定計算では安全率が1以上となっている。ケース1、2、4においても同様の結果が得られた。

5. 結論

飽和砂地盤上の盛土の大型模型の振動破壊実験によれば、振動台加速度の増加とともに、ある加速度で盛土の残留変位量が急増し、盛土の破壊が推定できた。盛土内にあらかじめ敷設した水平白色層の振動により生じた段差より盛土内のすべり破壊面が求められた。震度と過剰間隙水圧を与えて行う円形すべり安定計算より、実験の盛土の破壊が説明できることが確認された。以上より、飽和砂地盤上の盛土の地震時安定は、慣性力と過剰間隙水圧を考慮して行う円形すべり安定計算により検討できると考えられる。

参考文献

- 1) 北沢壮介、上部達生、檜垣典弘、横井聡之：飽和砂地盤上の盛土の振動破壊実験、第17回土質工学研究発表会、1982年6月、pp.1773~1776
- 2) 運輸省港湾局：港灣の施設の技術上の基準・同解説、日本港湾協会、1979年