

地震時における重力式岸壁の滑動挙動に関する模型振動実験

小濱英司*・菅野高弘**・井合進***
 窪内篤****・宮部秀一*****

本研究では、重力式岸壁のケーソン滑動メカニズムを明らかにする事を目的として、水中振動台を用いた模型振動実験を行った。釧路港西港区第四埠頭仮護岸の 1/12.5 模型を作成し、実岸壁と同様な液状化対策工を模した背後地盤の締固めを施した岸壁と、未対策の岸壁を準備して比較を行った。この結果、重力式岸壁被災時の作用外力とケーソン滑動挙動の詳細が明らかになった。ケーソン挙動に与える地震動の影響は大きく、この実験においてはケーソンに作用する加速度（慣性力）によってケーソンが滑動した。また、ケーソンがまさに海側に滑り出そうとする際の外力とケーソン挙動との関係が明らかとなった。

1. はじめに

1995 年兵庫県南部地震などの大地震時において、埋立地域を中心とする臨海港湾施設は多大な被害を受けてきた。重力式岸壁においても、背後および基礎地盤において液状化が発生し、ケーソンの沈下・傾斜・迫出しなどのかたちで被災した。日本における多くの都市は海に面しており、港湾構造物は地震後における救援物資、人の流通経路として重要な役割を果たさなければならず、その耐震性の向上は必要不可欠であろう。

重力式岸壁について、耐震設計手法のより一層の合理化を念頭においた場合、ケーソンが滑動挙動を起こす際の外力を明らかにする必要がある。通常のケーソン式岸壁の設計時に用いられる土圧には、物部 (1924)・Okabe (1924) が提案した地震時土圧式が用いられている。一方、近年における研究では、ケーソン慣性力と土圧の位相の関係が着目されており、この位相差によって被害程度が大きく異なる、また地盤の液状化によってこの位相の関係が変化する等が報告されている (風間ら (1990)、宮田ら (1997) 濱田ら (1998)、Kohama ら (1998)、および Kohama (2000))。

本研究では、ケーソンがまさに海側に滑り出そうとする際の土圧などの外力およびケーソン挙動・変形との関係について検討し、地震時におけるケーソン滑動のメカニズムを明らかにする事を目的とした。

2. 実験方法

模型振動実験では、水中振動台を用い、釧路港西港区第四埠頭仮護岸の 1/12.5 の模型を作成した。この護岸においては、加速度計、間隙水圧計、土圧計などの各種計測機器を構造物に設置した、実岸壁の地震時挙動観測を行っている (梅沢ら, 2002)。本実験においては、実岸壁

と同様な液状化対策工を模した背後地盤の締固めを施した岸壁模型と未対策の岸壁模型 (図-1, 表-1) を準備して比較を行った。地盤材料には、背後地盤に相馬硅砂 5 号、裏込石に碎石 6 号、基礎捨石マウンドに碎石 4 号を用いた。背後地盤については、水中落下法により砂を堆積させて作成し、締固めは足踏みにて行った。ケーソン模型では、背面および底面の受圧板およびロードセルによって土圧および底面せん断力を計測した (図-2)。

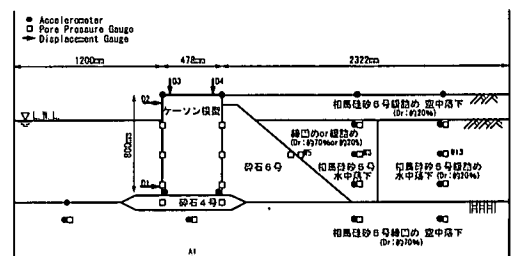


図-1 模型断面および計測器の配置

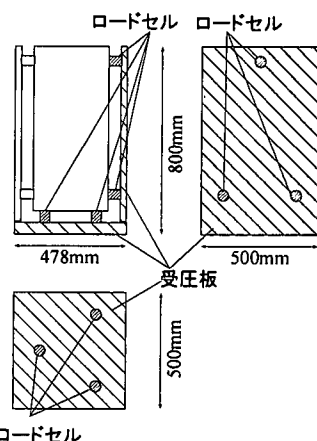


図-2 模型ケーソンおよびロードセルの配置

表-1 実験ケース

Case	Backfill Condition
case 1	Backfill consolidation countermeasure (背後地盤 液状化対策有)
case 2	No backfill consolidation countermeasure (背後地盤 液状化対策無)

* 正会員 工博 港湾空港技術研究所構造振動研究室研究官
 ** 正会員 工博 港湾空港技術研究所構造振動研究室室長
 *** 正会員 工博 京都大学防災研究所教授
 **** 正会員 北海道開発局港湾建設課課長補佐
 ***** 正会員 (独法)北海道開発土木研究所主任研究員

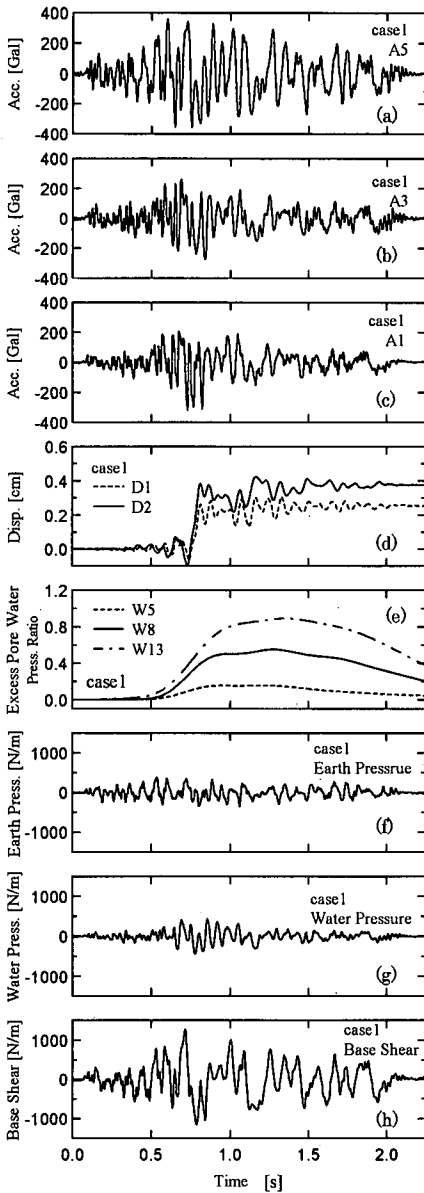


図-3 加速度，変位，間隙水圧，土圧，水圧，底面せん断力の時刻歴 (case 1)

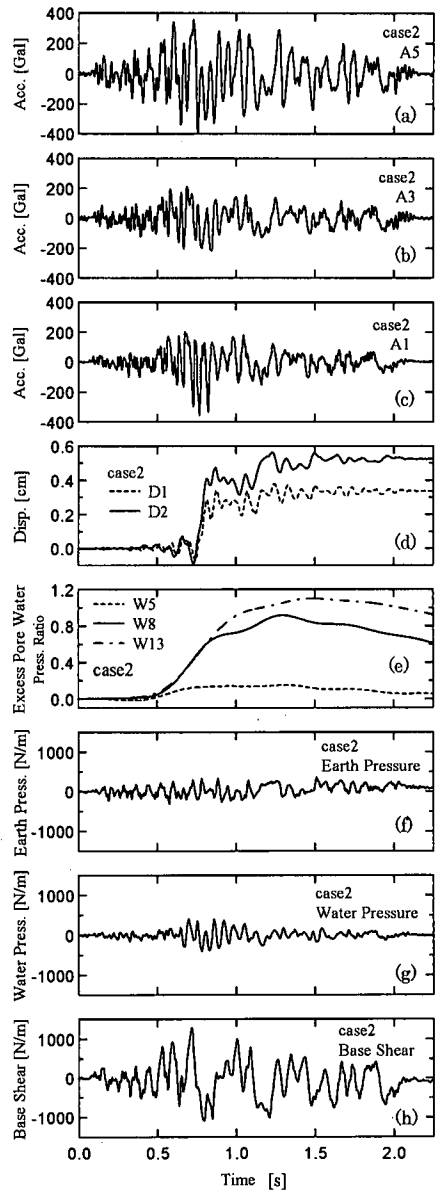


図-4 加速度，変位，間隙水圧，土圧，水圧，底面せん断力の時刻歴 (case 2)

加振波には、1968年十勝沖地震の際に八戸において記録された地震波を最大加速度が350 Galとなるよう調節し、相似則 (Iai, 1988) に基づいて時間縮尺を $1/(12.5)^{0.75}$ 倍としたものを用いた。

3. 結果および考察

3.1 実験結果

図-3 および図-4 に、それぞれのケースでの、各計測点の加速度、ケーソン水平変位、間隙水圧、土圧、ケーソン前面水圧、ケーソン底面でのせん断力を示す (図-1

参照)。

case 1, case 2 の振動台加速度について、図-3(a) および図-4(a) に示されるように、時刻歴は同様であり、それぞれの模型岸壁にほぼ等しい振動が作用したことが分かる。図-3(b, c) および図-4(b, c) より、ケーソン加速度はどちらのケースでも上部のほうが下部よりも大きくゆれており、比較的細長い模型ケーソンであったために、上部を大きく振るような形で揺れが生じた。

ケーソン変位については、図-3(d) および図-4(d) に示されるように、下部よりも上部のほうが水平変位が

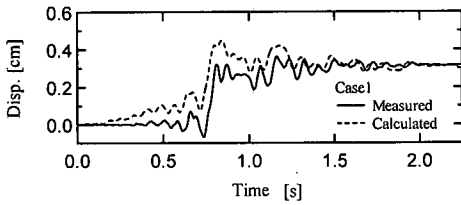


図-5 ケーソン変位時刻歴の比較

大きくなっており、海側にケーソンが倒れるように変位した。case 2の液状化対策無のほうが、変形量は大きいですが、大きな水平変位が発生する時刻(タイミング)はほぼ等しい(約0.75s, 約1.2s付近)。したがってケーソン挙動に与える地震動の影響が大きく、この実験においてはケーソンに作用する加速度(慣性力)によってケーソンが滑動したと考えられる。図-5には、ケーソン上部・下部加速度(A3, A5)の平均から振動台加速度を引いたケーソン相対加速度を二階積分したものと、計測されたケーソン変位(D1, D2)の平均の時刻歴を示す。なお積分されたものについては、加振前後の変位量が計測値と等しくなるように基線(0線)補正をしたものを行っている。積分により求められた値は、計測されたケーソン変位時刻歴と若干のズレがあるものの、ほぼ同じタイミングで変位が増大している。ケーソン変位を計測した変位計は土槽に取り付けられているため、土槽変位と振動台変位を等しいとすると、この変位はケーソンと振動台の相対変位となる。また、積分から求めた計算値もケーソン-振動台の相対変位である。したがって、これらが良い一致を示したことにより、変位計の取付はしっかりとしており、ケーソン変位の計測において誤差が小さいことが確認できる。

図-3(e) および図-4(e) に、それぞれのケースでの背後地盤内における過剰間隙水圧比の時刻歴を示す。ここでは、フィルターを作用させて過剰間隙水圧の動的な

変動成分を省いた、準静的な成分のみを示している。加速度の増大とともに過剰間隙水圧が徐々に発生し、液状化無対策領域(case 1のw13, case 2のw8およびw13)では、過剰間隙水圧比が1s付近でほぼ1まで到達し、液状化に至っている。一方、case 1の液状化対策を施した領域(w8)では過剰間隙水圧発生量は小さく、締固めの効果が現れている。また、両ケースの裏込石に近い領域(w5)においても過剰間隙水圧比は小さく、裏込石の透水性が良いために、発生した過剰間隙水圧がすぐに消散してしまっただことが考えられ、完全な液状化状態には至らなかった。図-6に模型岸壁での最大過剰間隙水圧の分布を示す。図中には、有効鉛直応力も合わせて示している。両ケースにおいて、背後地盤の浅い箇所では過剰間隙水圧はほぼ有効鉛直応力まで到達しているが、case 1の対策領域内(w8)では、過剰間隙水圧発生量は小さい。また、背後地盤の深い箇所では、どちらのケースでも過剰間隙水圧発生量は小さい。裏込石内(w4)において過剰間隙水圧発生量は小さく、このためにそれに近いw5においても過剰間隙水圧が小さくなったと考えられる。

図-3(f-h) および図-4(f-h)にそれぞれのケースでの土圧、ケーソン前面水圧、ケーソン底面せん断力の時刻歴を示す。土圧、水圧については圧縮を正、底面せん断力は背後地盤向きを正としている。土圧および底面せん断力については、それぞれ三つのロードセルでの計測値を合計したものである。土圧については、さらに、受圧板および受圧板とケーソン本体間の水の影響を考慮して、受圧板およびこの水の半分の質量による慣性力成分を計測値から差し引いている。底面せん断力についても、受圧板質量による慣性力成分を差し引いている。水圧については、ケーソン前面に取り付けられた三つの水圧計の値をもとに、深さ方向に計測位置を考慮して和をとったものを行っている(図-1参照)。土圧については、液状化対策の有無によってやや異なる。case 1の液状化対

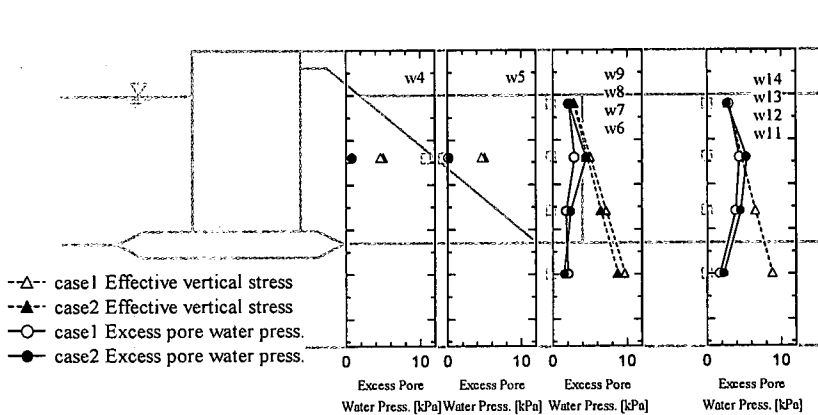


図-6 過剰間隙水圧の分布

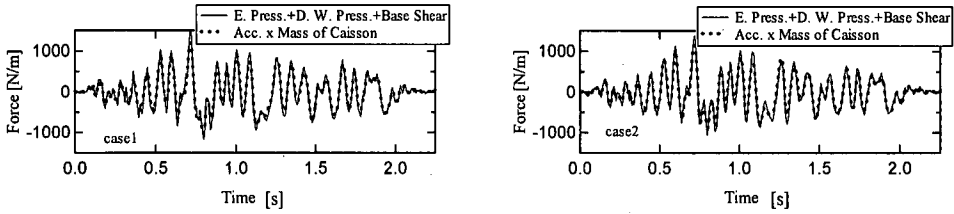


図-7 作用外力とケーソン絶対加速度に質量を乗じたものの比較

策有の岸壁においては常に0N/mを中心として土圧は変動する。一方、case 2の無対策の岸壁では、特に約1s以降において土圧変動の中心が上にずれており、振動終了後においても0N/mに戻っていない。これは、液状化による過剰間隙水圧の発生が影響したためと考えられる。ケーソン底面せん断力については、その変動幅が土圧・水圧よりもかなり大きく、ケーソン質量に対する地震動による慣性力の影響が大きいたことが容易に想像できる。

図-7にそれぞれのケースにおけるケーソン絶対加速度にケーソン質量を乗じたものと、ケーソンに作用する外力の合計（土圧、海側前面水圧、ケーソン底面せん断力の和）を時刻歴で示している。図に示されるように、両者はよい一致を示しており、加振中における加速度、土圧、底面せん断力の計測の精度が良かったことが伺える。

3.2 考察

図-3, 4に示されるように、ケーソン水平変位は液状化対策の有無によって大きさが異なったが、ケーソンの滑動が生じるタイミングはほぼ同等であり、ケーソンに

作用する慣性力の影響が大きかったためと考えられた。ここでは、ケーソンがまさに滑動する際のケーソン挙動および外力の関係について着目する。

図-8にそれぞれのケースでのケーソンの絶対加速度と土圧との関係を示す。加速度は、海向きを正としている。case 1, case 2ともに、バラツキはあるものの、ほぼ右上がりとなっており、液状化対策の有無にあまり関係がないように見える。これは、裏込石の存在によって、無対策岸壁であっても裏込石近傍ではあまり過剰間隙水圧が発生しなかったためと考えられる。ただしcase 2においては、約0.75s, 約1.2s付近でケーソンが大きく変位するときに、ケーソン加速度と土圧変動成分の関係が少し変化し、図において加速度と土圧の関係がほぼ水平かやや右下がりとなった。

図-9にcase 2での大きな変位が発生する0.75s付近での、ケーソンに作用する外力の時刻歴を示す。また、図中のそれぞれのタイミングにおけるケーソン挙動と外力の関係を示した模式図を合わせて示す。この図より、ケーソンの滑動は以下のような順序で生じたと考えられる。

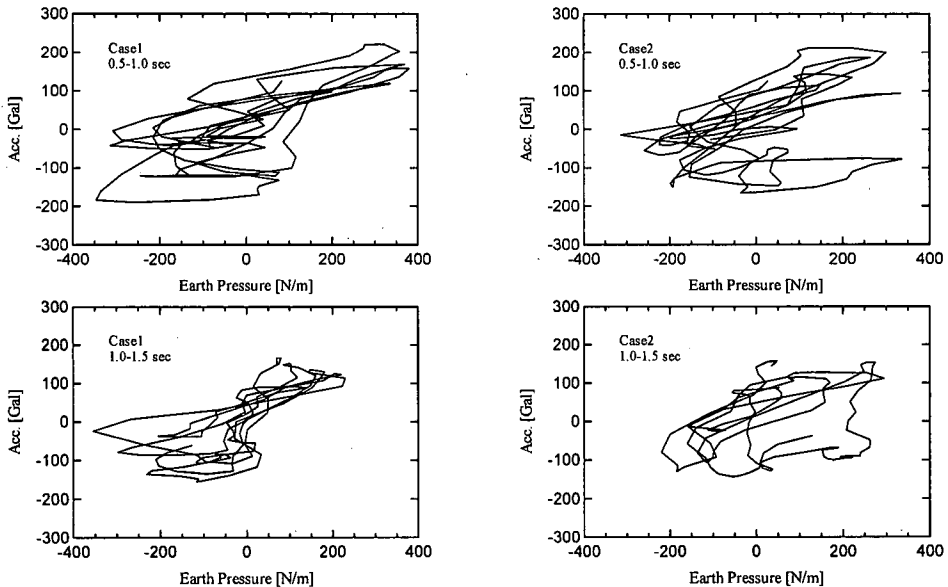


図-8 ケーソン絶対加速度と土圧変動の関係

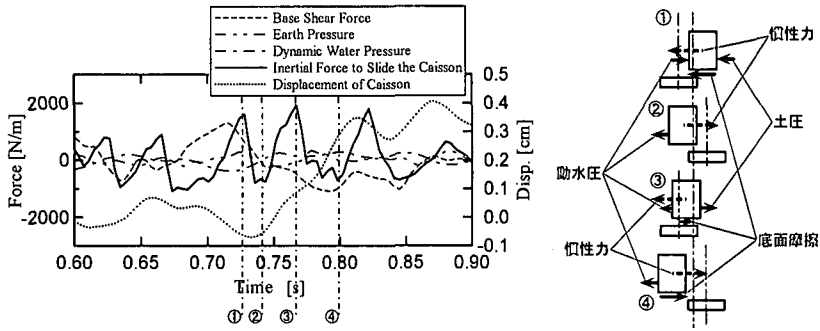


図-9 ケーソン滑动時におけるケーソン挙動と作用力の関係

- ① ケーソンを海側に押し出そうとする大きな慣性力が作用する事によりケーソンが滑り始める。(図-9, ①)
- ② 次にケーソン滑动を止める方向に慣性力が働いたときに、ケーソンが止まらなかった。(図-9, ②)
- ③ さらにケーソンを押し出す方向に慣性力が働いたときに、滑动量が大きくなる。(図-9, ③)
- ④ ケーソン滑动を止める方向に慣性力が働いたときに、ようやくケーソン滑动が止まる。(図-9, ④)

このとき、土圧の動的な変動は慣性力に比べてかなり小さい。また、設計上で考慮する土圧の変動と比較してもかなり小さいことが明らかとなった。したがって、ケーソンを押し出すときの合計の力が土圧などによって小さくなるか、あるいは、ケーソンを止めるときの力が土圧などにより大きくなれば、滑动量は小さくとなると考えられる。

4. おわりに

本研究においては、重力式岸壁の地震時挙動に関して、特に、ケーソンがまさに滑动しはじめるタイミングでの外力などの挙動に着目して整理を行い、ケーソンへの作用外力と滑动挙動の詳細が明らかになった。本研究の結論は、以下のようにまとめることが出来る。

- (1) 液状化対策の有無による岸壁挙動の比較を行った。過剰間隙水圧は無対策岸壁で大きくなったが、裏込石近傍背後地盤では、裏込石の排水性の良さから、液状化対策の有無に関係なく、過剰間隙水圧があまり発生しなかった。
- (2) 今回の実験では、地震動加速度(ケーソンに作用する慣性力)の影響が大きかった。ケーソンが滑动するタイミングは、背後地盤での液状化発生の程度によらずそれぞれのケースでほぼ同じであった。ただし、液状化無対策岸壁で過剰間隙水圧の発生が大きいほうがケーソン変位量は大きくなり、液状化が変位量に影響することが確認された。

- (3) ケーソンがまさに滑动しようとするときの外力を整理した。まずケーソンを海側に押し出そうとする大きな慣性力が作用する事によりケーソンが滑り始め、次にケーソン滑动を止める方向に慣性力が働いたときにケーソンが止まりきれず、結果的に滑动量が大きくなった。したがって、ケーソンを押し出すときの慣性力などの力が小さいか、もしくはケーソンを止めるときの慣性力などの力が大きくなれば、滑动量は小さくとなると考えられる。

参考文献

- 梅沢信敏・笹島隆彦・三浦均也・大塚夏彦・小川真澄 (2002): 釧路港西港区における実大試験重力式岸壁の地震時挙動観測の概要, 第37回地盤工学研究発表会発表講演集。
- 風間基樹・稲宮隆昌・大塚幸治 (1990): ケーソンに作用する地震時土圧に関する模型振動実験とその解析, 港研報告, 第29巻, 第2号, pp. 177-217。
- 濱田純次・宮田正史・菅野高弘 (1998): ケーソン式岸壁の入力地震力による動的挙動とそのメカニズムの一考察, 構造工学論文集, Vol. 44 A, pp. 611-620。
- 宮田正史・菅野高弘・森田年一 (1997): 重力式ケーソン岸壁に作用する地震時土圧に関する模型実験, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 1011-1015。
- 物部長徳 (1924): 地震上下動に関する考察並に振動雑論, 土木学學會誌, 第10巻, 第5号, pp. 1063-1094。
- Iai, S. (1988): Similitude for Shaking Table Tests on Soil-Structure-Fluid Model in 1G Gravitational Field, Report of the Port and Harbour Research Institute, Vol. 27, No. 3, pp. 3-24。
- Kohama, E., K. Miura, N. Yoshida, N. Ohtsuka and S. Kurita (1998): Instability of Gravity Type Quay Wall Induced by Liquefaction of Backfill during Earthquake, Soils and Foundations, Vol. 38, No. 4, pp. 71-84。
- Kohama, E. (2000): A Study on the Stability of Gravity Type Quay Wall during Earthquake, Doctoral Thesis Submitted to Hokkaido University。
- Okabe, S. (1924): General Theory on Earth Pressure and Seismic Stability of Retaining Wall and Dam, 土木学學會誌, 第10巻, 第6号, pp. 1277-1323。
- Westergaard, H. M. (1933): Water Pressures on Dams during Earthquakes, Trans. ASCE, Vol. 98, pp. 418-432。