

重力式岸壁におけるケーソンと背後地盤の動的挙動と地震時土圧

渥美洋一* ・ 窪内 篤** ・ 小濱英司*** ・ 三浦均也****
先川光弘***** ・ 笹島隆彦***** ・ 井合 進*****

実大重力式岸壁における地震時挙動観測データの解析により、ケーソン及び背後地盤の地震時挙動特性として、ケーソン滑動時の土圧及び底面せん断力の位相特性と、ケーソン及び背後地盤に生じる水平加速度の鉛直分布を明らかにした。そのうえで、ケーソン滑動時に実際に作用した地震時土圧を物部・岡部式による地震時土圧、常時主働土圧と比較することによって、重力式岸壁におけるケーソンと背後地盤の地震時挙動に着目した場合、地震時土圧については現行設計法よりも低減できることを明らかにした。

1. ま え が き

重力式岸壁の耐震設計は、物部・岡部の地震時土圧式を用いて行われているのが一般的であるが、この式においては、地震時に構造物と背後地盤が一緒に動くものと仮定している。また、現行の港湾の基準においては、設計水平震度は背後地盤地表面の最大加速度を用いて求めている。

一方、三浦ら(1998)、小濱ら(1999)により、重力式岸壁の地震時土圧はケーソンと背後地盤の動的相互作用により生じ、背後地盤が液状化しない場合にはケーソンに作用する慣性力と動的土圧増分は逆位相になることが、背後地盤の液状化を考慮した振動台模型実験と数値解析により明らかにされている。また、笹島ら(2003)は、北海道において相次いで発生した東方沖地震(1993年)、南西沖地震(1995年)における港湾と漁港の重力式岸壁の被災事例を分析し、同様の水深と地盤条件かつ同様の構造断面を有する施設においても、背後地盤に液状化対策を施した施設では被害を免れることができたことを明らかにしており、地震時に土圧が小さかったことが想像できる。しかし、実際の重力式岸壁の地震時挙動について、現地観測に基づくケーソンと背後地盤の動的挙動とケーソンに作用する地震時土圧はまだ十分に解明されていない。

著者らは、北海道釧路港において実大試験重力式岸壁(7.5 m)の地震時挙動観測を行い、2003年十勝沖地震の震度V強地震動による岸壁の動的挙動の観測に成功した。

本論文では、この観測データについて、ケーソン滑動

前後の詳細な分析により、ケーソンに作用する動水圧、慣性力と土圧の関係、及びケーソンと背後地盤の生じる加速度の鉛直分布を求め、ケーソン滑動時のケーソンと背後地盤の地震時挙動にずれが存在することを明らかにした。そして、ケーソン滑動前後の底面せん断力最大時を含む観測土圧と物部・岡部式による地震時土圧、常時主働土圧と比較することにより、ケーソン滑動時に重力式岸壁に作用する地震時土圧は現行設計法で考慮している土圧より小さいことを明らかにした。すなわち、ケーソンと背後地盤の地震時相互挙動を考慮することにより、重力式岸壁に作用する地震時土圧を低減できることを明らかにした。

2. 観測システムと観測概要

試験重力式岸壁は、北海道釧路港西港区第4埠頭の仮護岸に設置されている(図-1)。仮護岸にケーソン3函を設置し、ケーソン1函を挟んで両側にそれぞれ、サンドコンパクションパイル工法による液状化対策断面と未対策断面を用意して、液状化対策の有無が与える影響を明らかにできる地震時挙動観測システムを構築した(渥美ら, 2004)。この試験岸壁のケーソン及び背後地盤には、加速度計、速度計、傾斜計、間隙水圧計、土圧計、波圧計などの計測器を配置することによって、基礎地盤、構造物基礎、ケーソン本体、及び背後地盤における地震時挙動の観測を可能とした(図-2)。この観測システムによって、2003年十勝沖地震にて発生した震度V強地震動(9月26日4時50分発生)時におけるケーソン及び背後地盤の加速度、動水圧、土圧、間隙水圧の観測に成功した。また、この地震動発生直後に、ケーソン及び背後地盤に設置された傾斜計ガイドパイプの変形を傾斜計により計測し、その計測値を積分して求めたケーソン水平変位の鉛直分布より、この地震動により試験ケーソンには約20 cmの滑動を生じたことが分かった。また、液状化対策箇所における背後地盤の噴砂や亀裂等の変状の程度は、未対策地盤のそれに比べて顕著に小さいことが地震発生直後の現地測量により確認できた(渥美ら, 2005)。

* 正 会 員 (独法)北海道開発土木研究所港湾研究室主任研究員

** 正 会 員 (独法)北海道開発土木研究所 港湾研究室長

*** 正 会 員 (独法)港湾空港技術研究所振動研究室主任研究員

**** 正 会 員 豊橋技術科学大学建設工学系 助教授

***** 正 会 員 北海道開発局 港湾建設課 港湾技術係長

***** 正 会 員 室蘭開発建設部 次長

***** 正 会 員 京都大学 地盤災害研究部門 教授

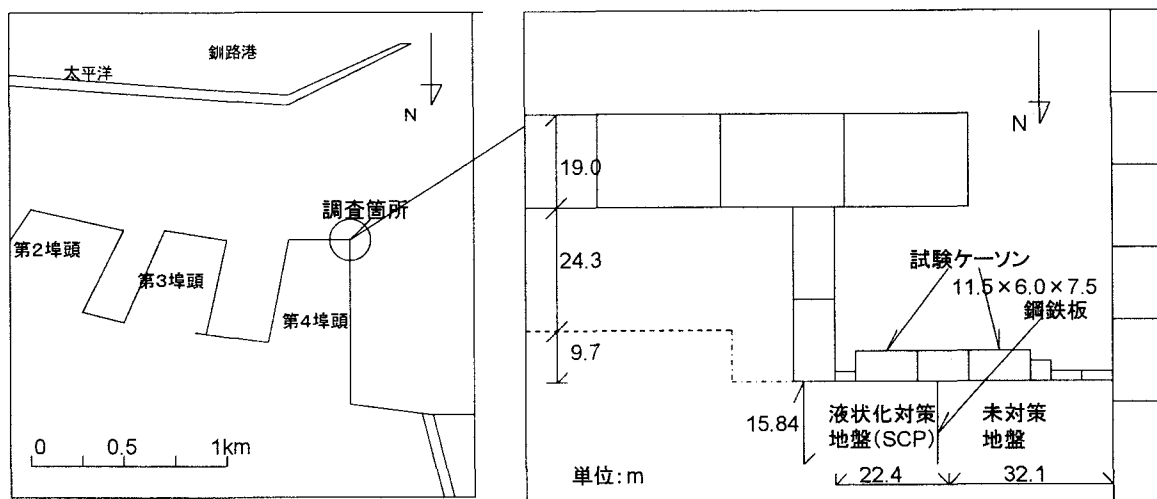


図-1 実大試験重力式岸壁の調査箇所及び配置

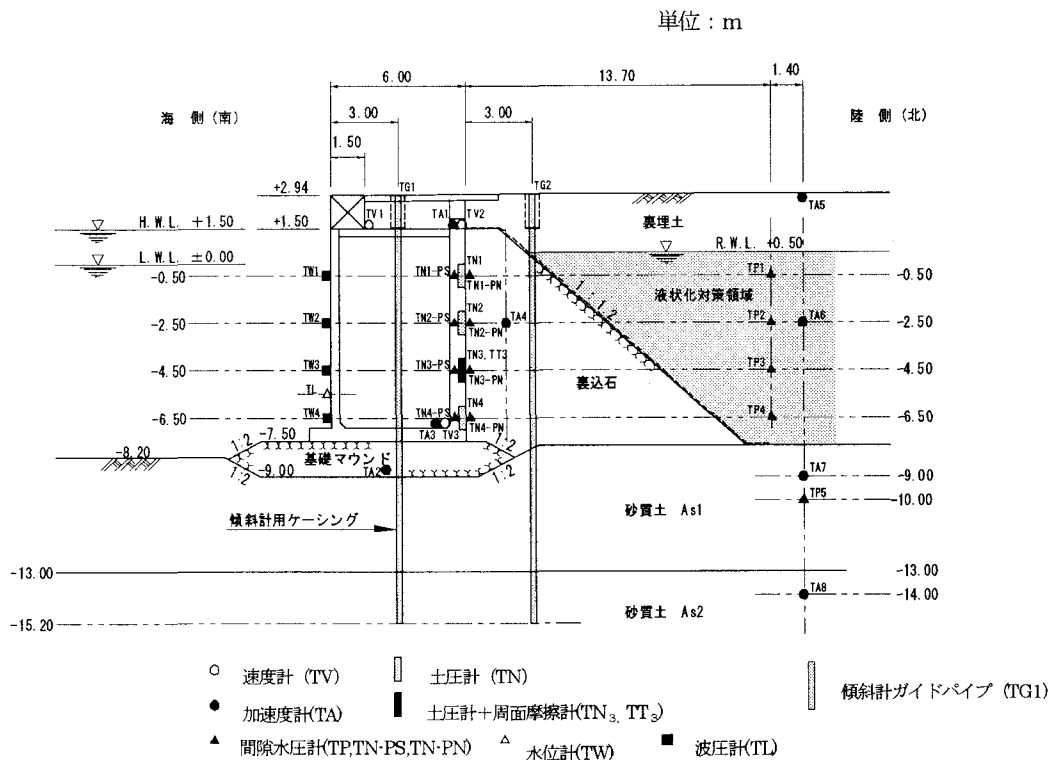
計器配置図 (対策済み) $S=1/200$ 

図-2 計測器配置図 (液状化対策断面)

3. ケーソン滑動時における作用外力の位相関係

図-3 には、地震時に重力式岸壁に作用する外力とここで考えるその極性を示した。また、図-4 には、加速度計記録を2度積分することによって算出した、ケーソンが滑動したと考えられる前後の変位と底面せん断力の時系列変化を示した。底面せん断力が最大となる32.04秒時、その次に大きくなる35.97秒時（以下、底面せん断力極大時と呼ぶ）において変位が大きくなっている。

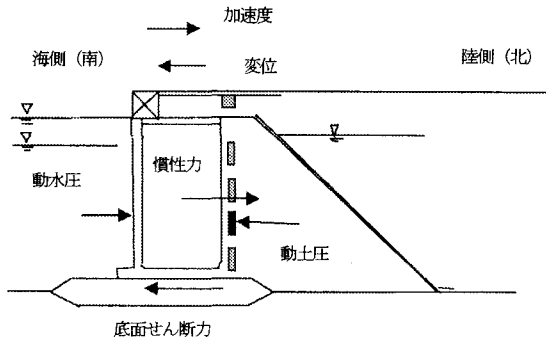


図-3 ケーソンに作用する外力と慣性力

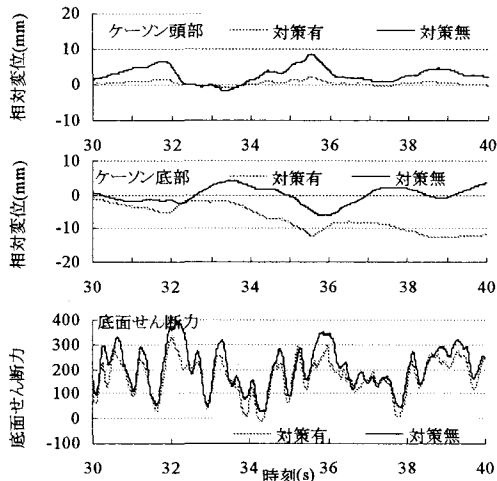


図-4 ケーソンの水平変位と底面せん断力の時刻歴

次に、FLIP を用いた正弦波加振による予備的検討により、地震動の主要な周波数成分と考えられる1.0 Hz 近傍の周波数範囲に着目して、ケーソン滑動前後の土圧と慣性力の位相関係を解析した（北海道開発局，2005）。図-5 には、液状化対策断面のケーソン滑動時における動水圧合力、動土圧合力、慣性力、底面せん断力の時系列変化を示した。ここで、動土圧合力はケーソン背面に設置した4基の土圧計観測値の平均値にケーソンの高さを乗じて求めた。動水圧合力は同じく4基の水圧計観測

値の平均値にケーソンの高さを乗じて求めた。また、慣性力は、ケーソン天端面及び底部に設置した2基の加速度計観測値の平均値にケーソン密度を乗じ、加速度と向きが逆なので-符号を付けて求めた。そして動水圧、動土圧、慣性力の合計を底面せん断力とした。

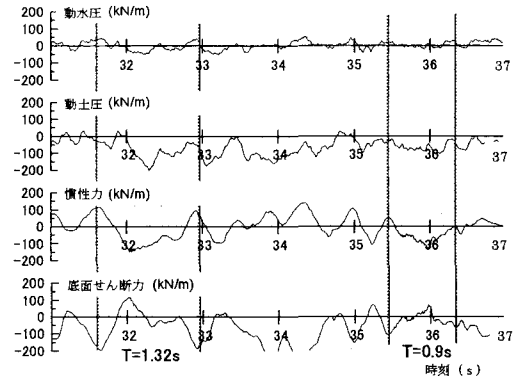


図-5 作用外力の時系列変化（液状化対策断面）

また、ケーソンに変形が生じたと考えられる32秒付近の1.32秒間、36秒付近の0.9秒間を抽出し、動水圧合力、動土圧合力、慣性力、底面せん断力の各作用外力について、それぞれ1.32秒及び0.9秒の周期成分を抽出し位相関係を求めた。図-6 には、液状化対策断面の結果を示した。これより、液状化対策断面ではケーソンに作用する底面せん断力に対し動土圧は概ね逆位相を示していることが確認できた。他方、図-7 に示した液状化未対策断面においても動土圧と底面せん断力との間に位相差はあるが、対策断面より近接していることが確認できた。以上の結果より、ケーソン滑動時の底面せん断力と動土圧の間には、地震動の主要周期成分においては明確に位

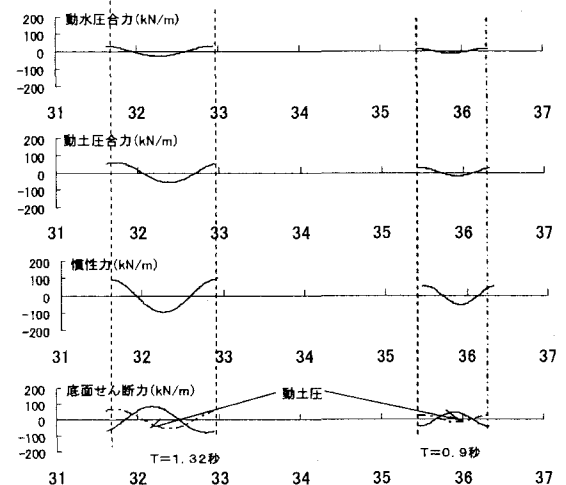


図-6 土圧と底面せん断力の位相特性（液状化対策断面）

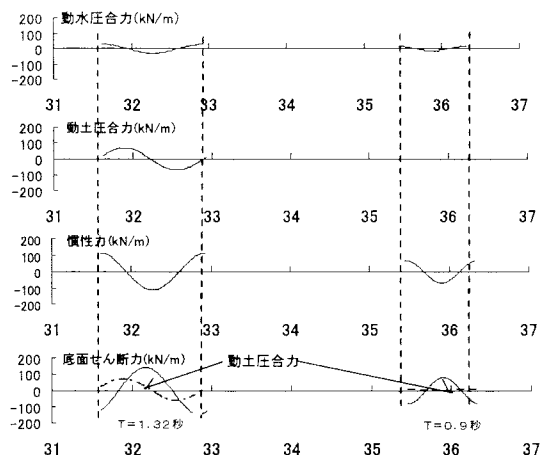


図-7 土圧と底面せん断力の位相特性 (未対策断面)

相差があることが確認できた。

4. ケーソン及び背後地盤加速度の鉛直分布特性

前節で述べたケーソンに作用する底面せん断力と動土圧との間に位相差が生じるということは、ケーソン滑動時にケーソン本体と背後地盤が一体に挙動するのではなく、あるずれを持って挙動していることを示している。言い換えると、作用する底面せん断力が最大の状態でありケーソンに滑動が生じる状態では、ケーソンと背後地盤が背後地盤地表面の最大加速度値で動くとする現行設計法での考え方と異なっている。

そこで、これをさらにケーソン滑動時の実測データから確認するための解析を行った。具体的には、液状化対策断面に設置されたケーソン天端と底部、及び背後地盤の鉛直方向4点に設置した加速度計記録を用いて、ケース1：底面せん断力最大時 (32.04秒時)、ケース2：底面せん断力最大時 (35.97秒時)、ケース3：背後地表加速度最大時 (32.21秒時) における水平加速度の鉛直分布を求めた。その結果を、図-8, 9, 10 に示した。図-8, 9 には、背後地盤地表面加速度が最大となった時のケース3の地盤内加速度分布も合わせて示した。これらより、どのケースにおいても、ケーソンと背後地盤は同一の加速度で動いているのではなく、それぞれが異なる加速度により動いていること、すなわち両者がお互いにずれを持って動いているのが確認できる。特に、実際に観測記録よりケーソンに滑動が生じているケース1、及び2における背後地盤の平均的な加速度は、背後地表加速度最大値よりは小さいことが確認できる。すなわち、構造物の滑動抵抗に対して最も厳しい状態である底面せん断力最大時の状態では、背後地盤に生じる平均的な加速度は背後地表加速度最大値よりは小さくなっている。現行設計に用いられる物部・岡部式の地震時土圧においては、

設計水平震度を算出する際には、ケーソンと背後地盤が同一の加速度で動くことと仮定して、背後地表加速度最大値を用いていることから、実際にケーソン滑動時に背後地盤に生じた加速度を用いて設計水平震度を算出した場合には、物部・岡部式による地震時土圧を低減できることは明らかである。

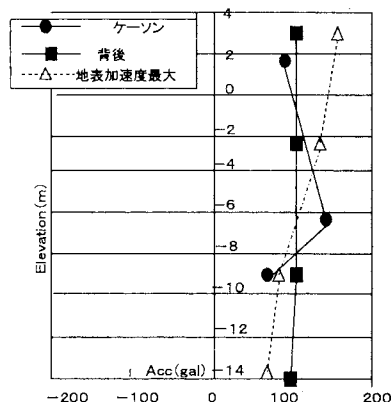


図-8 ケース1：底面せん断力最大時 (32.04秒時)

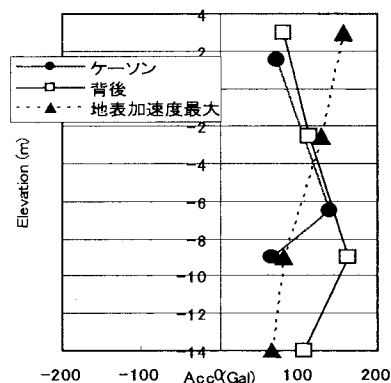


図-9 ケース2：底面せん断力最大時 (35.97秒時)

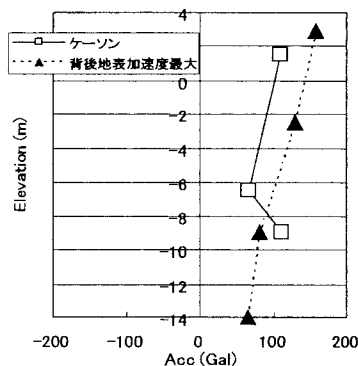


図-10 ケース3：背後地表加速度最大時 (32.21秒時)

5. 地震時土圧の低減について

ここでは、ケース1～3における各観測土圧を物部・

岡部式による地震時土圧、常時主働土圧の両者と比較することによって、実際にケーソンと背後地盤の地震時挙動を考慮した場合について地震時土圧を低減できる可能性を検討した。表-1には、各ケースにおける観測値及び計算値（背後地盤地表加速度、背後地盤加速度代表値、底面せん断力、土圧）、物部・岡部式による土圧、常時主働土圧を比較して示した。ここで、背後地盤加速度代表値とは、地震時には背後地盤についても鉛直方向で均一な加速度で動くのではないことを考慮し、背後地盤3箇所の加速度計測値を、各設置部を代表する鉛直全応力で重み付けした値である。

表-1 観測値と物部・岡部式による土圧の比較

	ケース1 せん断力最大	ケース2 せん断力極大	ケース3 加速度最大
時刻(秒)	32.04	35.97	35.21
観測加速度 (gal)	加速度代表値 101.3	加速度代表値 130.7	地表最大加速度 157
土圧観測値 (kN/m)	174.9	186.9	107.1
物部・岡部式土圧 (kN/m)	181.8	197.1	212
	$(\phi=40^\circ, \delta=15^\circ)$		
常時主働土圧 (kN/m)	136.9 $(\phi=40^\circ, \delta=15^\circ)$ ヌエ		
底面せん断力 (kN/m)	330.4	276.2	273.9

表-1を見ると、観測記録よりケーソンの滑動による変位が生じた時と考えられるケース1の背後地盤加速度代表値は、ケース3の背後地表加速度最大値よりも小さい。また、ケーソン滑動時に実際に作用した観測土圧については、ケース3の観測土圧は、ケース1、2のそれよりも小さくなっているが、ケーソンが滑動しようとするケース1、2の観測土圧の大きさは、現行の設計で用いる物部・岡部式による地震時土圧よりは小さく、常時の主働土圧よりは大きいことが確認できる。すなわち、重力式岸壁を実際に設計するにあたっては、構造物の滑動抵抗に最も厳しくなる底面せん断力が最大の時の土圧が重要であり、その時に作用する地震時土圧については、物部・岡部式による地震時土圧と常時主働土圧の中間値程度まで低減できる可能性があることが明らかになった。

6. ま と め

実大試験岸壁による震度V強地震動についての地震時挙動観測データについて、特にケーソンが滑動した32秒、36秒付近における解析から以下が明らかとなった。

- ①動土圧と底面せん断力は地震動の主要成分である1.32秒と0.9秒の周波数成分について明確な位相差が確認できた。
- ②ケーソン滑動時においてケーソンと背後地盤は一体ではなく、幾らかのずれを持って挙動することが、それ

ぞれの水平加速度の鉛直分布より確認できた。

- ③ケーソンが滑動すると考えられる底面せん断力最大時に背後地盤中に生じる加速度は、現行設計で用いている背後地盤の地表面加速度最大値よりは小さいことが確認できた。
- ④ケーソン滑動時に観測された底面せん断力最大時を含む観測土圧は、背後地表最大加速度を用いた物部・岡部式による地震時土圧と常時主働土圧との間に分布し、重力式岸壁の設計に用いる地震時土圧は両者の中間値程度まで低減できる可能性が明らかにされた。

7. あとがき

ケーソンと背後地盤の地震時挙動を考慮して物部・岡部の地震時土圧と常時主働土圧の中間値を設計に用いることにより、重力式岸壁についてより経済的な設計が可能になると考えられる。ただし、設計対象とする地盤条件、作用する地震動等により異なると考えられるため、実際にこの土圧を用いる場合には、模型振動実験やFLIP等の数値解析手法により構造物と地盤に対する変形量を照査することが不可欠であると考えられる。なお、本論文における観測データの解析と考察にあたっては、北海道開発局が組織した「港湾構造物の耐震性調査検討委員会」の適切な指導と助言を得た。ここに、関係者に謝辞を述べる。

参 考 文 献

- 渥美洋一，窪内篤，三浦均也，(2004)：実大重力式試験岸壁の地震時挙動観測の概要，(独法)北海道開発土木研究所月報NO. 616，pp. 4-13。
- 渥美洋一，窪内篤，三浦均也，(2005)：2003年十勝沖地震における実大重力式試験岸壁の地震時挙動観測(独法)北海道開発土木研究所月報NO. 624，pp. 2-20。
- 小濱英司，三浦均也，大塚夏彦，井上清敬，笹島隆彦，林忠志，吉田望，(1999)：背後地盤とケーソンの動的挙動を考慮した重力式岸壁の耐震設計法，第43回地盤工学シンポジウム，Vol. 43，Opp. 365-370，(1999)。
- 笹島隆彦，先川光弘，橋詰知喜，三浦均也，小濱英司(2003)：重力式岸壁の地震時安定性と地震時に作用する土圧の検討，土木学会，海洋開発論文集，Vol. 19，pp. 695-700。
- 北海道開発局港湾空港部港湾建設課，釧路開発建設部，(独法)北海道開発土木研究所港湾研究室，(2004)：重力式岸壁の新たな耐震設計法の検討について，<http://internet5.hkd.milt.go.jp/topics/gijyutu/pdf-files-h16/00shitei/shi.2005>
- 北海道開発土木研究所，(2005)：釧路港における実大試験重力式岸壁の地震時挙動観測プロジェクト，<http://taisinkouw-andata.ceri.co.jp/>
- 三浦均也，小濱英司，吉田望，栗田悟，大塚夏彦，(1998)：地震時における重力式岸壁の被害に関する模型振動台実験，地震時の地盤・土構造物の流動性と永久変形に関するシンポジウム発表論文集，pp. 333-338。