

実大岸壁滑動時の地震時挙動と作用外力分析に 基づく重力式岸壁の新たな地震時土圧算定法

THE NEW METHOD OF CALCULATION DYNAMIC EARTH PRESSURE DURING EARTHQUAKE BASED ON THE SEISMIC BEHAVIOR

渥美洋一¹・先川光弘²・窪内篤³・三浦均也⁴・笹島隆彦⁵・井合進⁶

Youichi Atumi, Mituhiro Sakikawa, Atsushi Kubouchi, Kinya Miura, Takahiko Sasajima
and Susum Iai.

¹正会員 (独) 土木研究所寒地土木研究所寒冷沿岸域チーム (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

²正会員 北海道開発局港湾空港部港湾建設課 (〒060-0808 札幌市北区北8条西2丁目)

³正会員 (前) 釧路開発建設部釧路港湾事務所長 (〒080-0914 釧路市西港1丁目)

⁴正会員 工博 豊橋技術科学大学 建設工学系助教授 (〒441-8580 豊橋市天伯字雲雀ヶ丘1-1)

⁵正会員 (独) 港湾空港技術研究所 特別研究官 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

⁶正会員 工博 京都大学防災研究所 地盤災害研究部門教授 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

A system for recording seismic behavior was installed at a model gravity quay wall (full-scale) at the No. 4 Wharf in the West Area of Kushiro Port, Hokkaido. The system is able to record the seismic behavior of the wall simultaneously with that of the ground behind it, and to record the external forces acting on the wall and ground. The seismic behavior was successfully recorded during an earthquake that rated "5-upper" on the Japanese scale of seismic intensity and that displaced the wall by about 20 cm. This paper analyzes the phase relationship between the inertial forces acting when the wall was displaced and the distribution of earth pressure during the earthquake. We propose a more rational and economical method of seismic design for gravity quay walls by focusing on the interaction between the behavior of the wall and the behavior of the ground behind it.

Key Words : Gravity quay wall, behavior during earthquake, dynamic earth pressure during earthquake

1. はじめに

耐震強化岸壁の効率的・効率的な整備は物流拠点として機能する港湾において喫緊の課題である。レベルⅠ地震動を対象とした重力式岸壁の耐震設計では、これまで震度法による設計が広く用いられ、規定された設計震度を用いて算定された慣性力（或いは地震力）をその構造物の重心に作用させてその安定性を照査している。震度法による設計の考え方では、地震継続期間中に生じた最大の慣性力、最大の地震時土圧、最大の動水圧が、静的な力として地震が起きている間、常に同時に作用するものとして設計する。また、地震時土圧算定式としては一般的に物部・岡部式が用いられている。

一方、この震度法による考え方に対して、三浦ら¹⁾、小濱ら²⁾による背後地盤に液状化を考慮した振動台模型実験と数値解析により、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地震時における動的土圧増分が逆位相になることが明らかにされている。筆者らは、地震時におけるケーソンと背後地盤の相互作用と地震時土圧

の挙動を解明し、重力式岸壁のより合理的な耐震設計法を提案することを目的として、北海道釧路港西港区第4埠頭に設置した実大試験重力式岸壁にて、平成13年4月より地震時挙動観測を実施してきた。そして、2003年9月26日午前4時50分に発生した震度Ⅴ強地震動によって試験ケーソンが約20cm滑動した時のケーソンと背後地盤の地震時挙動と作用外力の同時観測に成功した³⁾⁴⁾。

本論文では、この地震動によりケーソンが滑動する時のケーソン慣性力と地震時土圧増分の位相関係を分析し、現行設計法による地震時土圧より低減できる物理的根拠を確認し、ケーソンと背後地盤の地震時相互挙動に着目した重力式岸壁の地震時土圧算定法を取入れた耐震設計法を提案するものである。

2. 実大ケーソンに生じた滑動変位

実大試験岸壁の地震時挙動観測システムのうち、液状化対策断面について示す。(図-1) この観測システムでは、ケーソン及び背後地盤に速度計、加速度計、土圧計、間隙水圧計、波圧計を設置して、地震時挙

動と作用外力を同時観測している。作用力については、静的観測値を計測し、これに対しての地震発生による変動分を観測している。ケーソン及び背後地盤には傾斜計を設置し、地震発生直後の残留水平変位の鉛直分布を把握することができる。なお、計測器センサー等の異常で地震発生直前の静的観測値が明らかに異常値を観測していることから、ここでは、地震発生直前の静的観測値として常時主働土圧を用いることとした。

2003年十勝沖地震の震度Ⅴ強地震動では、液状化

対策断面地表部（加速度計TA5）で最大157.0galを観測し、試験ケーソンの残留水平変位は、GPS測量結果より液状化対策断面で22.5cmであり、これは、図-2に示したケーソンに設置した傾斜計観測値を積分して求めた地表での残留水平変位18.6cmともほぼ一致している。この図より、ケーソンに生じた水平変位の約8割がケーソンとマウンド境界面において生じていることから、この地震動におけるケーソンの変位はケーソンと基礎マウンド境界面に生じた滑動現象が支配的であることが確認できる。

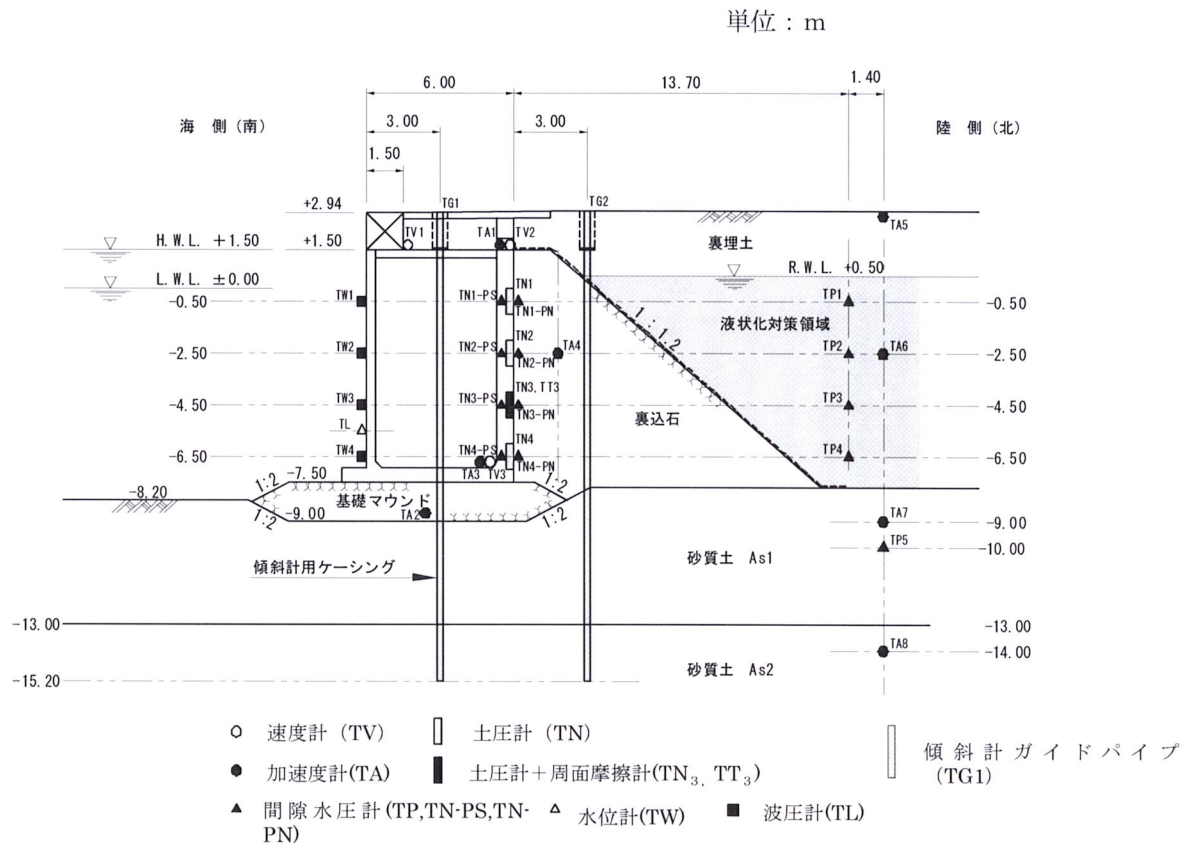


図-1 実大試験岸壁による地震時挙動観測システム

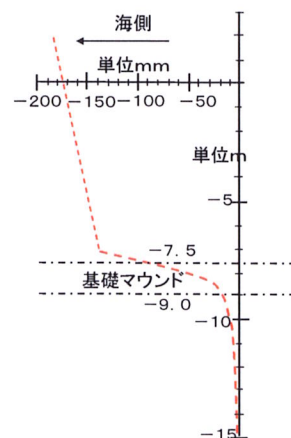


図-2 水平変位の鉛直分布

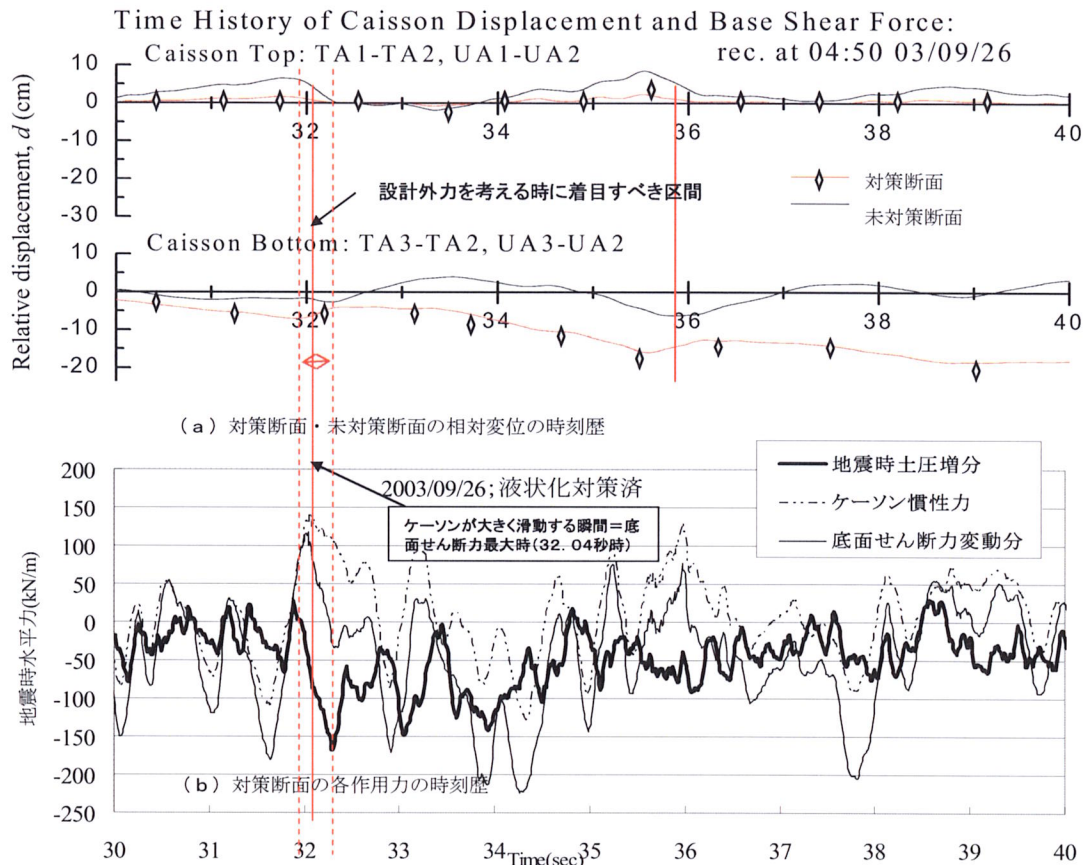


図-3 ケーソン相対変位計算値と各作用力の時系列

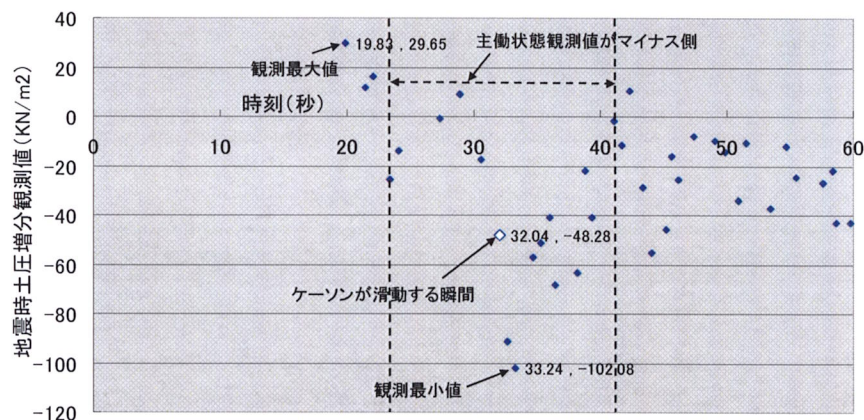


図-4 主働状態の地震時土圧増分観測値の時系列

3. 観測された変位と作用力の時系列

ここでは、地震開始後60秒間の観測結果からケーソン変位、底面せん断力地震時変動分、地震時土圧増分の観測結果時系列を示し、構造物の耐震設計を考える時に着目すべき時刻と観測された地震時土圧増分の大きさを確認する。図-3(a)には、対策断面及び未対策断面について、ケーソン上部と下部の相対

変位の時系列を示している。因みに、対策断面の場合は、ケーソン上部はTA1とTA2の差を、ケーソン下部はTA3とTA2の差を、2回積分して求めた相対変位の時系列を示す。未対策断面の場合も同様に求めている。図-3(b)には、対策断面におけるケーソン慣性力、地震時土圧増分、動水圧、底面せん断力変動分（ケーソン慣性力と地震時土圧増分と動水圧の合計値）の観測値の各時系列を示す。図-4には、ケーソン慣性力が海向きに作用する時のピークの地震

時土圧を主働状態の地震時土圧として定義し、実際に観測された主働状態地震時土圧の大きさを時系列で示した。図-3(a)より、対策断面のケーソン相対変位は主に30-36秒の範囲で起きており、特に32秒付近で海向きにケーソン相対変位が急に大きくなっており、この時刻は図-3(b)のケーソンが海側に滑ったことにより地震時土圧が急減したと考えられる時刻とも一致し32秒付近でケーソンが海側に滑動したことが推定される。このケーソンが滑ったと考えられる時刻は、底面せん断力変動分が最大となった32.04秒ともほぼ一致している(図-3(b)。次に、図-4に示す地震開始後60秒間に観測された地震時土圧増分の分布は、最大値は29.65 (19.83秒時)、最小値は102.08KN/m²(33.24秒時)であるが、27.31秒以降の範囲では、地震時土圧増分の大部分がマイナス側、すなわち陸向きに作用しており、しかもこの27.31秒以降の範囲には、図-3(a)に示した、ケーソンが海側に滑動し始めてから変位がほぼ収束し横ばいとなる30-36秒の時刻帯も含まれている。従って、ケーソンが滑動する時の地震時土圧は、震度法による設計で用いている最大地震土圧よりかなり小さな値であり、実際に構造物の滑動抵抗を照査する、ケーソンがまさに滑ろうとする時の地震時作用力の釣り合いを考える時刻としては、底面せん断力最大時刻の32.04秒付近の観測値を適切に評価すればよいことがわかる。

4. ケーソン滑動時の作用外力の位相関係

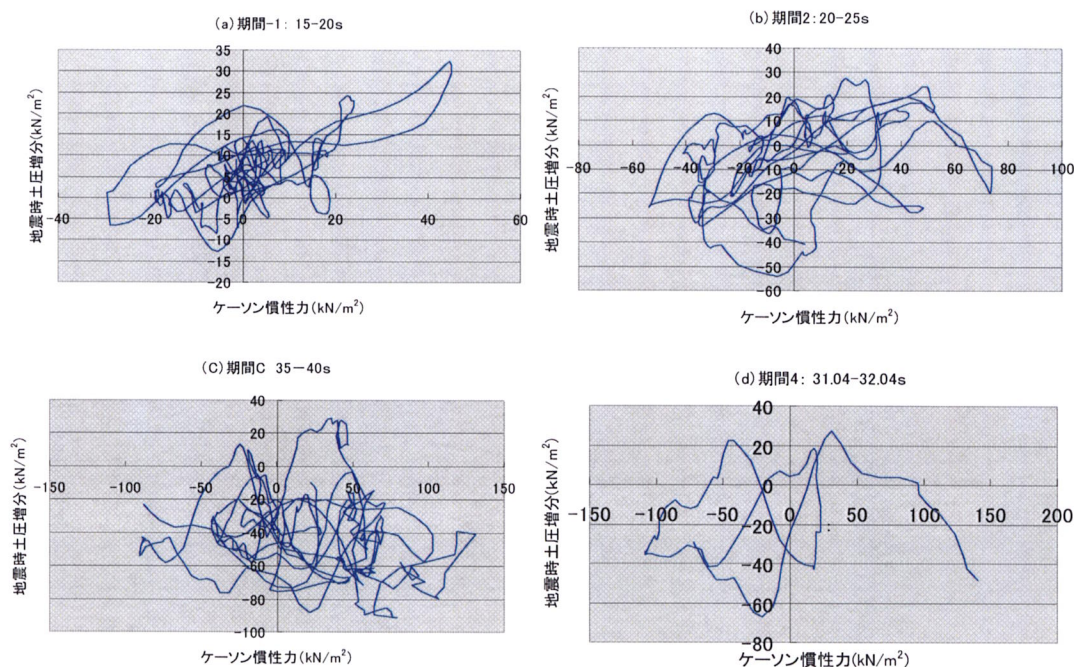


図-5 ケーソン慣性力と地震時土圧増分の軌跡図(期間1~4)

ここでは、特にケーソンが大きく滑動する瞬間に着目し、ケーソン慣性力と地震時土圧増分の作用関係を観測結果から確認しておく。図-5には、期間1(変位がほぼゼロの15-20秒区間)、期間2(変位がまだ小さい20-25秒区間)、期間3(変位が大きくなり始めケーソンに滑動が生じたと考えられる30-35秒区間)特に底面せん断力変動分最大時32.04秒時の直前1秒間である期間4(31.04-32.04秒区間)について、ケーソン慣性力と地震時土圧増分の軌跡図を示した。まだ振動が小さい期間1,2では、軌跡図より両者はほぼ同位相で作用していることが確認できる。これと比較して、ケーソンが滑り出す期間3、滑り出す直前の期間4では両者の軌跡図は、期間1,2とは明らかに異なり、両者の作用関係には位相のずれが明確に確認できる。以上より、実際の震度強地震動の時の観測結果からも、ケーソンが滑動する直前では、両者の作用関係には、振動台模型実験による検討¹⁾ほど明確な逆位相関係ではないが、明らかに位相のずれが存在することが確認できた。

5. 重力式岸壁の新たな耐震設計法の提案

ここでは、重力式岸壁の新たな耐震設計法を、滑動抵抗を照査する合理的な作用力の組み合わせを導くことで提案する。背後地盤に液状化が生じない状態では、最大慣性力と最大地震時土圧を同時に作用させる震度法による考え方に対して、実際に滑動する時の作用力は、3.に述べたようにさらに低減でき

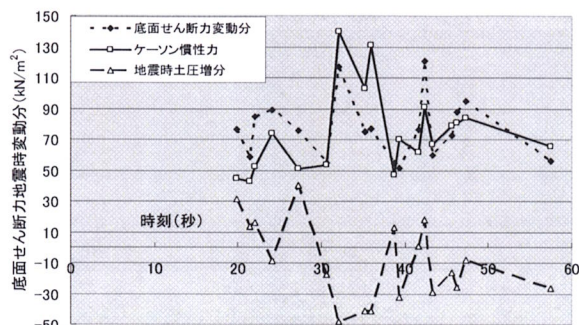


図-6 底面せん断力海向きピーク時の作用力

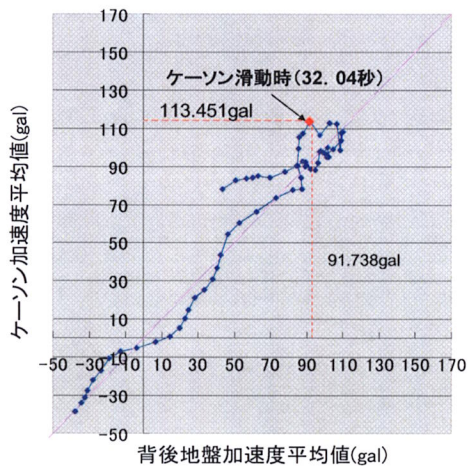


図-7 滑動時刻付近の水平加速度分布

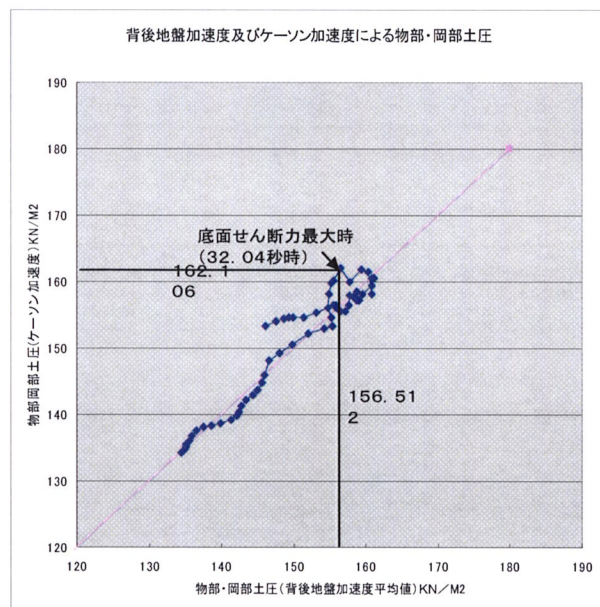


図-8 滑動時刻付近の物部・岡部土圧の分布

ることが確認できた。従って、新たな作用力の組み合わせを考える時に慣性力と地震時土圧のどちらかを現行設計法よりも低減することが考えられ、どちらの

作用力をどれだけ低減すべきかについて述べる。図-6は、地震開始後60秒間の観測値について、底面せん断力変動分が海向きに50kN/m²以上となる18ピークを抽出して、底面せん断変動分に占めるケーソン慣性力及び地震時土圧増分の大きさをプロットしたものである。これを見ると、底面せん断力変動分が海向きに作用するときに支配的なのはケーソン慣性力であり、底面せん断力変動分の大部分を占めるケーソン慣性力を低減することは設計上構造物にとって危険過ぎること、3.よりケーソンが実際に滑動する時には、実際に作用する地震時土圧は最大地震土圧よりも遙かに小さいことから、地震時土圧増分が低減すべき作用力と結論できる。

次に、低減すべき地震時土圧の大きさとして幾らが妥当であるかを観測結果より考察する。ケーソンと背後地盤の地震時挙動に着目すると、図-7に示すように、ケーソンが大きく滑動する瞬間（32.04秒時）における背後地盤加速度平均値（観測値を加速度計設置位置の有効土かぶり厚を用いて重み付け平均した値）は91.738galであり、ケーソン水平加速度観測値113.45 gal よりも小さいことが確認できる。この図には、32.04秒時を中心とし、前後15個、合計30個の観測値も示した。着目する時刻付近の背後地盤およびケーソンの観測水平加速度はいずれも、背後地表最大観測加速度156.97 gal（32.21秒時）よりかなり小さいことが確認できる。

また、図-8には、32.04秒時を中心とし、前後15個、合計30個の観測値について、背後地盤加速度平均値とケーソン水平加速度観測値の両方を用いて求めた物部・岡部式による地震時土圧をプロットした。背後地表最大観測加速度156.97 galを用いて求めた地震時土圧237.05kN/m²に比べ、ケーソンが滑動する時の背後地盤水平加速度観測平均値91.738galを用いた物部・岡部式による地震時土圧は157.00 kN/m²となり、またケーソンが滑動する前後の時刻のデータも含めて、ケーソンが実際に滑動するときの地震時土圧を低減できる根拠が観測結果からも確認できる。

そこで、3.で述べたケーソンが滑動する付近に着目し、耐震設計において考えるべき地震時土圧の大きさを考察する。図-7、8と同様に、32.04秒時を中心とし、前後15個、合計30個のデータについて物部・岡部式による地震時土圧を算出した計算値、観測された最大地震時土圧、常時主働土圧、本論分の提案設計法による土圧を図-9に一緒に表示した。なお、観測土圧の絶対値は、この観測システムが地震発生前の静的観測値に対して地震時における変動分を計測していることから、本来は地震発生直前の静的観測値と地震時変動分の合計として求めるべきであるが、最初

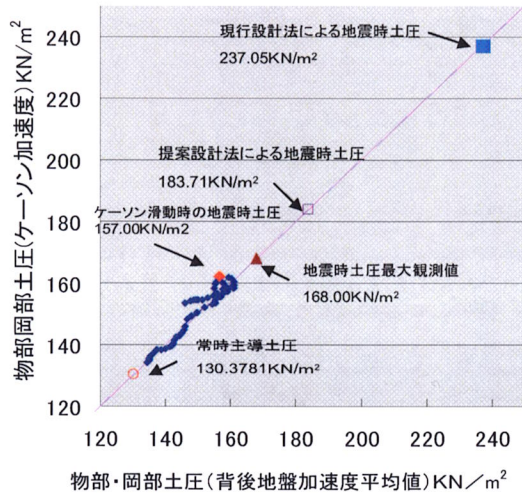


図-9 地震時土圧設計値・観測値の比較

にも述べた通り,ここでは,地震発生直前の静的観測値として常時主働土圧を用いることとした。これらのデータは,物部・岡部式による地震時土圧と常時主働土圧の差の0.5倍を常時主働土圧に加えた183.71 kN/m²よりはいずれも小さく,なおかつこの183.71 kN/m²は,観測された最大地震時土圧168.00 kN/m²を少し上回る値であることが確認できた。従って,重力式岸壁の滑動抵抗を照査する場合の作用外力の内,地震時土圧については,従来に比べて物部・岡部式による地震時土圧と常時主働土圧の差の0.5倍を常時主働土圧に加えた値まで低減できることが明らかとなった。

本論文における分析に基づき,重力式岸壁の新たな地震時土圧算定法を取り入れた耐震設計法を以下のように提案する。重力式岸壁の滑動抵抗を照査する底面せん断力をケーソン慣性力と地震時土圧と動水圧の合計として定義した時,重力式岸壁の背後地盤が液状化しない場合には,ケーソンと背後地盤の地震時相互挙動に着目した場合の地震時土圧として,物部岡部式による地震時土圧と常時主働土圧の差の0.5倍を常時主働土圧に加えたものを地震時土圧として用いることができる。ただし,実際の設計においては構造物建設箇所における地盤条件や振動特性,作用する地震動の周波数特性や継続時間等の影響に十分配慮する必要がある。提案設計法を用いる場合には,FLIP等の地震応答解析手法や模型振動実験等により変形量を照査する必要がある。

6. 結論と今後の課題

本論文における主要な結論を以下に述べる。

①震度Ⅴ強地震動による実大ケーソンと背後地盤の応答の観測結果から,背後地盤が液状化しない場合には,ケーソンが滑動する直前では,ケーソン慣性力と地震時土圧増分の作用関係に明確な位相のずれがあることを確認した。

②ケーソンが滑動する直前の地震時土圧は,物部・岡部式よりもかなり小さいことを,その物理的根拠と共に明らかにした。

③ケーソンと背後地盤の地震時相互挙動に着目した場合の新たな地震時土圧算定法として,物部岡部式による地震時土圧と常時主働土圧の差の0.5倍を常時主働土圧に加えたものを採用し,この算定法を用いて滑動抵抗を照査する作用外力の組み合わせを考える重力式岸壁の耐震設計法を提案した。

また,今後の課題としては,より多くの設計条件下での本設計法による試設計と変形量照査を行い,本設計法の適用と地震応答解析手法における留意点を確認し改善していくことが挙げられる。

最後に,観測データの評価,耐震設計法の提案に向けた検討にあたっては,京都大学防災研究所地盤災害研究部門の井合教授を委員長とする「港湾構造物の耐震性調査検討委員会」により技術的指導と助言を得た。ここに感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 三浦均也,小濱英司,吉田望,栗田悟,大塚夏彦: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, 1998
- 2) 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: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, pp.365-370, 1999
- 3) 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:「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」第52回海岸工学論文集Vo2.18, pp.801-805,2005
- 4) 渥美洋一,窪内篤,三浦均也:「2003年十勝沖地震における実大重力式試験岸壁による地震時挙動観測」独立行政法人北海道開発土木研究所月報O624, pp2-20,2005