

学位論文題名

A Study on the Stability of Gravity Type Quay Wall during Earthquake

(重力式岸壁の地震時安定性に関する研究)

学位論文内容の要旨

兵庫県南部地震で種々の社会基盤施設が甚大な被害を受けて以来、各方面で施設の耐震性能の強化が急速に進められている。港湾施設についても例外ではなく、大規模な地震が発生するたびに埋立地盤を中心に岸壁等が被害を受けてきた。地震後においては、都市機能の維持・復旧活動に必要な人材と物資の搬出入など、緊急時の物流拠点としての港湾機能の役割は大きい。このような視点からみて、港湾が地震被害に遭いその機能が低下することによる社会的影響は非常に大きく、耐震性の強化が急務となっている。

重力式岸壁については、背後埋立地盤の液状化によりケーソンが海側へ迫り出し、エプロンに段差が生じるなどの被害を引き起こし、車両の通行や荷役機械の機能が妨げられている。このような液状化による被害が初めて顕著に現れたのは、1983年の日本海中部地震における秋田港である。このため、この地震以降、全国の主要な港湾において液状化対策が積極的に進められてきた。1993年から1994年にかけて北海道で相次いで発生した3つの地震では、背後地盤で液状化が発生した重力式岸壁では被害が顕著であったが、反面、サンドコンパクションパイル工法やグラベルドレーン工法などの液状化対策を施した重力式岸壁では被害が最小限に抑えられ、港湾の機能が保持されたという貴重な事例が得られている。これらの事例から、地震時における重力式岸壁の被害は埋立地盤での液状化現象に強く関係していると推測され、液状化時に被害を増加させる方向に大きな土圧が作用したことが考えられる。またケーソン形式の重力式岸壁においては、液状化対策によって背後地盤とケーソンの相互作用が改善され、結果として液状化対策が岸壁の地震時安定化にある程度寄与していることが想像できる。しかし、震度法に基づいた地震時土圧を用いる現行の耐震設計手法の枠組では、液状化対策の効果を積極的に考慮しておらず、液状化対策の有無は設計上の地震時土圧に反映されていない。

本研究ではこのような実状を踏まえて、地震時における重力式岸壁の動的挙動を詳しく調べ、特に背後地盤の液状化の影響を解明して、液状化対策工の効果を取り入れた耐震設計手法を提案することを最終的な目標としている。

重力式岸壁に被害を発生させる要因は、以下のように整理できる。

- (1) ケーソン本体に作用する慣性力

(2) 背後地盤による土圧

(3) 基礎地盤の支持力の低下

基礎地盤が軟弱な粘土層である場合や、1995年兵庫県南部地震で多くの事例が報告されているような置換した基盤砂層が液状化して流動化する場合には、基礎地盤の剛性あるいは強度の不足により岸壁に被害が生じる。しかし、本研究では岸壁の被害要因を(1)と(2)に絞り、ケーソンの滑動による破壊だけに注目して研究を進める。

本研究は6章で構成され、各章の概要は以下のとおりである。

第1章では、特に背後埋立地盤内における液状化現象の影響に着目して、重力式岸壁についてのこれまでの地震時被害事例や研究例をまとめた。また、本研究の目的および研究内容について記述した。

第2章では、重力場および遠心力場における振動台模型実験を実施し、地震時における重力式岸壁の基本的な挙動を把握するとともにケーソンが滑動するメカニズムを検討した。ここでは、地震時土圧の実態をケーソンと背後地盤の相互作用に注目しつつ調べ、背後地盤の液状化・非液状化時における岸壁挙動の比較検討を行った。この結果、液状化発生時におけるケーソン滑動の原因として以下の二つを指摘することができた。

- ・有効応力の低下に伴う土圧の静的な増大
- ・土圧の動的変動成分のケーソンに作用する慣性力との位相の一致

さらに、液状化と地震時土圧の関係を明らかにするために、背後埋立地盤の液状化過程における土圧の推移と岸壁の振動特性の関わりに注目した研究を進めた。4種類の模型ケーソンを用いた重力場での振動台模型実験を行い、一連の実験から、異なる振動特性を持った岸壁についての土圧の特性、および背後地盤内での過剰間隙水圧の発生と土圧との関係を明らかにした。

第3章では、北海道内のいくつかの港湾で常時微動観測を行い、実大岸壁の振動特性を調査した。これは、第2章の振動台模型実験において重力式岸壁の振動特性が地震時に作用する土圧と背後地盤の液状化の関わりに大きな影響を及ぼすことが明らかになったためである。観測の結果、実際の重力式岸壁は振動台実験で用いられた模型岸壁と同様な振動特性を示すことが明確にされた。

第4章では、簡易な二質点-バネ-ダッシュポットモデルを用いて、地震時にケーソンに作用する土圧の動的変動成分の定性的解釈を行った。ここでは、実岸壁における常時微動観測や振動台模型実験で得られた重力式岸壁の振動特性を考慮して検討を行った。その結果、振動台模型実験で観察された液状化発生過程における土圧の動的変動成分の遷移挙動は、過剰間隙水圧の発生に伴う背後地盤の剛性の低下によるものであることを明らかにした。

第5章では振動台模型実験、実岸壁での常時微動観測および簡易な力学モデルによる解析の結果に基づいて、実大岸壁における液状化過程での地震時土圧の特性を推定した。また、岸壁の安定性、ケーソン移動のメカニズムおよび背後地盤における液状化対策の効果について検討し、これらを考慮した重力式岸壁の耐震設計手法を提案した。

第6章では結論であり、本研究で得られた知見を各章ごとに総括した。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 三 浦 清 一
副 査 教 授 石 島 洋 二
副 査 教 授 三 田 地 利 之
副 査 教 授 三 上 隆

学 位 論 文 題 名

A Study on the Stability of Gravity Type Quay Wall during Earthquake

(重力式岸壁の地震時安定性に関する研究)

都市に大規模な災害をもたらすような大きな地震の際に港湾の果たす役割は非常に大きい。すなわち港湾は、都市生活の維持・復旧活動に必要な人材と物資の搬出入など、緊急時の物流拠点としてその機能を十分に発揮しなければならない。しかしながら、兵庫県南部地震（1995年）のような大地震を受けると、埋立地域を中心に重力式岸壁のような重要港湾施設に甚大な被害をもたらされるため、その耐震性能の向上が強く求められている。

一般に、地震時における重力式岸壁の被害は埋立地盤での液状化現象と関係があると推測され、特に、液状化時に被害を増加させる方向に大きな土圧が作用するためではないかと想定されている。このような考え方に基づいて、たとえばケーソン形式のような重力式岸壁では、種々の液状化対策法によって耐震性能の向上が図られてきている。しかし、震度法に基づいた地震時土圧を用いる現行の耐震設計法では、背後地盤における液状化の発生が岸壁の安定性に及ぼす影響は考慮されておらず、したがって液状化対策の有無は設計上の地震時土圧に反映されていないのが現状である。

以上のような背景の下に、本研究では、まず地震時における重力式岸壁の動的力学挙動を振動台実験によって検討し、特に背後地盤の液状化発生の影響を解明した。ここでは過去の破壊事例に関する調査・研究から、重力式岸壁の破壊をもたらす要因として、①ケーソン本体に作用する慣性力および②背後地盤からケーソン本体に作用する土圧に注目し、一連の研究を進めた。さらに、実岸壁において行った原位置常時微動観測と地震時土圧の解析から、液状化対策工の効果を取り入れた新たな耐震設計手法を提案している。

本論文は6章から構成されるが、研究の成果を章毎に要約すると以下のものである。

第1章では研究の背景を示し、本研究の目的が述べられている。

第2章では、一連の振動台による模型実験を行い、地震時における重力式岸壁の基本的な力学挙動とケーソンの滑動メカニズムを明らかにしている。ここでは、特にケーソンと背後

地盤の地震時土圧との相互作用が詳細に検討され、液状化発生時におけるケーソンの滑動は、①有効応力の低下に伴う全土圧の静的な増大と②土圧の動的変動成分のケーソンに作用する慣性力との位相の一致によるものであることを確認している。また、異なる振動特性を持った種々の形状の模型岸壁について、背後地盤内での過剰間隙水圧と土圧との関係が定量的に示されている。

第3章では、振動台実験において模型岸壁の振動特性が地震時の土圧と背後地盤の液状化の関係に強い影響を及ぼすことが明らかになったことを踏まえて、実岸壁の振動特性を詳細に調べている。具体的には、常時微動観測を北海道内の4カ所の港湾で行い、一連の解析を展開した結果、振動台実験で得られた模型岸壁の振動特性が実際の重力式岸壁のそれをよく説明することが実証されている。

第4章では、実岸壁における常時微動観測や振動台実験から得た模型岸壁の振動特性を考慮した上で、二質点-バネ-ダッシュポットモデルによる地震時土圧の動的変動成分の力学的解釈を試みている。その結果、振動台模型実験で観察された液状化発生過程における土圧の動的変動成分の遷移挙動は、過剰間隙水圧の発生に伴う背後地盤の剛性の低下によるものであることが、合理的に説明されている。

第5章では、振動台模型実験、実岸壁での常時微動観測および簡易な力学モデルによる解析結果から、実岸壁における液状化過程での地震時土圧の特性を推定している。これらの考察から得た液状化時におけるケーソンの移動のメカニズム、および背後地盤における液状化対策の効果を合理的に評価する方法を明らかにした上で、具体的な重力式岸壁の耐震設計手法を提案している。

第6章は本研究の結論であり、得られた知見を総括するとともに、今後の研究課題を明らかにしている。

これを要するに、著者は、今まで未解明であった重力式岸壁の地震時安定性について背後地盤の液状化現象や岸壁の振動特性がもたらす影響を明らかにし、地震時土圧に関する多くの新知見を得るとともに、耐震岸壁の設計に有用な方法を提案したものであり、地盤工学の発展に貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。