

早稲田大学大学院 創造理工学研究科

# 博士論文概要

## 論文題目

グラウンドアンカーによる  
岸壁の耐震補強効果に関する研究

Study on Effect of Seismic Reinforcement of  
Quay Wall Using Ground Anchor

申請者

吉田	誠
Makoto	YOSHIDA

2013年5月

岸壁は、船舶を係留して貨客を輸送するための施設であり、大規模地震発生時には救助・救急活動や緊急物資輸送の拠点としての機能が求められている。2011年の東北地方太平洋沖地震では、港湾機能が一時的に喪失し、物流基盤としての岸壁の重要性が再認識された。一方、港湾分野では2007年に設計体系が性能規定型へ完全に移行したことや、断層を考慮した設計地震動の見直しにより、既存施設の耐震性能が再評価され、近年、既存岸壁の耐震補強が急速に進められている。

岸壁の耐震補強工法として、グラウンドアンカー（以後、アンカーと称す）工法は本体の抵抗力の補強工法の一つである。岸壁やアンカーの耐震性に関する研究は、それぞれ事例分析や実験・解析的研究が行われ、地震時挙動の把握や、数値解析の精度向上が進められている。しかし、アンカーで補強された岸壁について、実験などにより実際の地震時挙動を確認した事例は少ない。また、有効応力解析により被災事例の再現性や実際の地震時挙動を確認した事例も見あたらず、岸壁のアンカーによる耐震補強効果は十分には明らかにされていない。

以上の背景を踏まえ、本研究でははじめに、アンカーで耐震補強した矢板式岸壁および重力式岸壁の実際の地震時挙動を把握することを目的として、水中振動台を用いた振動台実験を実施している。次に振動台実験を対象として、有効応力解析による数値シミュレーションを実施し、実験の再現性を確認するとともに、岸壁の変形挙動を詳細に調べている。さらにアンカーのモデル化方法や最適配置、解析の構成モデルの違いについて検討を行っている。

本論文は8章で構成されており、その概要は以下のとおりである。

第1章は序論であり、研究の背景と目的および論文の構成について述べている。

第2章では、岸壁の耐震性やアンカー工法の概要およびその耐震補強への適用に関する研究について述べている。本論文で取り扱う岸壁の構造形式は、重力式（ケーソン式）岸壁および矢板式岸壁である。我が国では概ね5年に1度の頻度で大地震が発生しており、被災岸壁の調査や、実験・解析による被災メカニズムの解明が行われている。これらの成果は耐震性能の規定や変形照査法などの耐震設計法に反映されている。一方、アンカーは施工性および経済性に優れており、近年、防食法の開発が進んだことから、岸壁の耐震補強に適用されている。耐震性の観点から施工法をみると、削孔精度、グラウト品質の確保やアンカー試験による確認が重要となる。アンカーの耐震性に関する検討は斜面安定に関するものは多いが、アンカーで補強された岸壁の動的挙動に関する事例研究や実験的研究は少なく、アンカーによる岸壁の補強効果は十分には明らかになっていない。また、数値解析によって被災事例や模型振動実験などの再現性について検証された事例は見あたらない。このため、アンカーで補強された岸壁について、実際の地震時挙動の確認や、アンカーのモデル化方法や地震応答解析手法について実際の挙動と比較・検証する必要がある。

第 3 章では、アンカー工法を岸壁に適用した場合の現行の耐震性設計法について述べている。この設計法では、岸壁の設計には港湾設計基準を適用し、アンカーの設計には地盤工学会基準を適用している。本章では各基準の変遷を紹介している。港湾分野で最初の技術基準は、1950 年発行の「港湾工事設計示方要覧」といわれており、岸壁の耐震設計法は、当初、静的な力のつり合いに基づく震度法が用いられていた。現行の岸壁の設計法は、2007 年に改訂された港湾設計基準に基づいている。この基準には、レベル 1、レベル 2 地震動といった 2 段階設計法が導入されるとともに、従来の仕様規定型設計法に代わって性能規定型設計法が本格的に導入された。一方、アンカーは欧州で開発され、最初の実施は 1934 年である。我が国では 1957 年の藤原ダムにおけるプレストレストアンカーにはじまったとされている。その後、アンカー自体の品質・機能の向上、施工機械の開発による用途・適用範囲の拡大、防食技術の向上による信頼性向上と適用範囲の拡大、基準の改善による信頼性の向上などが図られ、これらの知見が 2012 年に改訂された現行の地盤工学会基準「地盤工学会基準グラウンドアンカー設計・施工基準、同解説」に反映されている。

第 4 章では、水中振動台を用いて実施した、アンカーで補強した矢板式岸壁の振動台実験について述べている。アンカーの耐震補強効果を明らかにするためには、アンカーで補強された岸壁の実際の地震時挙動を把握する必要がある。本章では、矢板背後の埋土地盤の密度や、加振条件を変えて実験を行い、埋土の過剰間隙水圧特性や正弦波と不規則波の違いなど様々な条件下での岸壁の加速度・変位特性、変形モード、アンカーの張力特性および矢板の曲げモーメントについて検討した。また、アンカーで補強する場合としない場合を比較することで、アンカーの耐震補強効果について考察した。アンカーで耐震補強した矢板式岸壁の実際の挙動を確認した事例は見あたらず、本研究はアンカーによる耐震補強効果を明らかにするための重要な基礎研究と考える。

第 5 章では、水中振動台を用いて実施した、アンカーで補強した重力式岸壁の振動台実験について述べている。アンカーで補強された重力式岸壁については、振動台実験などにより実際の地震時挙動を確認した事例は少なく、岸壁のアンカーによる耐震補強効果は十分には明らかにされていない。そこで本章では、ケーソン背後地盤が液状化する場合の実験を行い、岸壁の変形モード、加速度・過剰間隙水圧・変位特性について検討するとともに、アンカーの詳細な張力特性について考察した。また、アンカーで補強する場合としない場合を比較することで、アンカーの耐震補強効果について考察した。さらに、基礎捨石層厚の違いに着目し、基礎捨石の変形挙動の違いがアンカーや岸壁の地震時挙動に与える影響について考察した。グラウンドアンカーで耐震補強した重力式岸壁の実験的研究は少なく、本研究では背後地盤が液状化する場合のアンカーの効果について貴重な知見が得られたと考える。

第 6 章では、アンカーで補強した矢板式岸壁の振動台実験を対象として実施した有効応力解析について述べている。アンカーで耐震補強された岸壁の耐震性評価方法は港湾設計基準に準拠しており、レベル 2 地震動に対して有効応力解析による変形照査を行うことが標準とされている。しかし、アンカーを適用した岸壁の解析事例は少なく、被災事例や模型振動実験との比較による有効応力解析の再現性について検証された事例は見あたらない。そこで、アンカーをモデル化した鋼矢板式岸壁の有効応力解析による再現性を確認するため、模型振動実験の再現解析を実施した。さらに、アンカーの配置が矢板の変位や曲げモーメントに及ぼす影響について検討を行い、経済性・施工性の観点から考察を加えている。再現解析の結果、本解析手法によりアンカーの耐震補強効果を概ね検証できた。アンカーの配置に関する解析の結果から、アンカーの配置が矢板の変位および曲げモーメントに及ぼす影響を明らかにし、アンカーの配置を決定するためには、岸壁の変形性能や安定性だけでなく、施工性、経済性も考慮する必要があることを示した。

第 7 章では、アンカーで補強した重力式岸壁の振動台実験を対象として実施した有効応力解析について述べている。有効応力解析による変形照査は、アンカーを適用しない一般的な岸壁については実務レベルにおいて多数の実績を有しているものの、アンカーを適用した岸壁の解析事例は少なく、実験などとの比較による有効応力解析の再現性について検証された事例は見あたらない。本研究での振動台実験結果によると、アンカーの張力とひずみの関係は履歴ループを描くことが明らかにされていることから、解析精度向上のためには地震時におけるアンカーの張力特性を適切に反映することが重要と考えられる。そこで、本章ではアンカーで補強された重力式岸壁を対象に数値シミュレーションを実施し、アンカーの張力特性が岸壁の挙動に及ぼす影響について調査し、アンカーのモデル化方法や解析手法の違いによる実験の再現性について検討している。アンカーのモデル化方法を変えて行った有効応力解析の結果、実験結果に最も近いのは、アンカー張力の非線形特性を考慮した場合であった。このことは、従来はアンカーを線形材料でモデル化しているが、評価精度向上の観点から、アンカー張力の非線形性を適切に反映することの重要性を示している。解析による岸壁の変形モードおよび基礎捨石のひずみの発生状況は、アンカーによる補強で基礎捨石の変形が抑えられるという実験結果を支持するものであった。ケーソン底面に作用する垂直応力分布の解析結果から、アンカーによる補強で、ケーソンから基礎捨石へ作用する荷重の偏心量や傾斜率が小さくなり、基礎捨石の変形が抑制されることが示された。

第 8 章では、本論文で得られた成果を取りまとめている。

## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名 吉田 誠 印

(2013年 4月 現在)

種 類 別	題名, 発表・発行掲載誌名, 発表・発行年月, 連名者 (申請者含む)
①論文	
○1)	グラウンドアンカーによる重力式岸壁の耐震補強に関する研究, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol. 69, No.1, pp.69-88, 2013年3月 吉田誠, 清宮理
○2)	Effect of Seismic Reinforcement for Sheet Pile Quay Wall Using Ground Anchor, <i>Proceedings of Fifteenth World Conference on Earthquake Engineering, 2012.9,</i> Makoto Yoshida, Osamu Kiyomiya, Masaaki Mitou, Soichi Tashiro, Kazuya Gouda
○3)	グラウンドアンカーの耐震補強効果に関するケーソン式岸壁の模型振動実験, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.66, No.1, pp.I_233-I_241, 2011年4月 吉田誠, 田代聡一, 合田和哉, 清宮理
○4)	グラウンドアンカーで耐震補強した鋼矢板式岸壁の耐震性に関する振動台実験および有効応力解析, 構造工学論文集, Vol.57A, pp.63-74, 2011年3月 吉田誠, 清宮理, 三藤正明, 田代聡一, 合田和哉
○5)	グラウンドアンカーで補強されたケーソン式岸壁の耐震性に関する模型振動実験, 第13回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.3455-3462, 2010年11月 吉田誠, 田代聡一, 合田和哉, 清宮理
○6)	グラウンドアンカーで補強された矢板式岸壁の耐震性について, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.65, No.1, pp.I_345-I_353, 2009年12月 三好俊康, 吉田誠, 田代聡一, 合田和哉, 清宮理
7)	直杭式栈橋の地震時変形特性に関する模型振動台実験, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 68, No. 4, pp.I_343-I_354, 2012年7月 藤田 大樹, 小濱 英司, 竹信 正寛, 吉田誠, 規矩 大義
8)	海底面の傾斜がケーソン式護岸の地震時応答に与える影響に関する大型模型振動実験, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 68, No. 4, pp.I_355-I_364, 2012年7月 大矢陽介, 小濱英司, 高橋英紀, 伊勢勉, 吉田誠
9)	ハイブリッド重力式栈橋の開発とその耐震性能, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 68, No. 4, pp.I_899-I_906, 2012年7月 池野勝哉, 原基久, 吉田誠, 菅野高弘, 小濱英司
10)	液状化対策のための浮き型格子状固化工法の岸壁への適用性に関する検討, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 68, No. 2, pp.I_450-I_455, 2012年6月 高橋英紀, 森川嘉之, 吉田誠, 川崎廣貴, 田口博文, 丸山憲治
11)	グラウンドアンカーによるケーソン式防波堤の滑動防止工法に関する水理実験, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.67, No.4, pp.I_88-I_93, 2011年12月 吉田誠, 清宮理, 田代聡一, 合田和哉, 竹家宏治
12)	鋼矢板を用いた海岸堤防の液状化・津波対策に関する模型振動台実験, 構造工学論文集, Vol. 57A, pp.367-377, 2011年3月 中澤博志, 菅野高弘, 吉田誠
13)	液状化対策における格子状固化工法の格子間隔および改良深さの影響, 第9回地盤改良シンポジウム論文集, pp.339-344, 2010年11月 高橋英紀, 森川嘉之, 吉田誠, 川崎廣孝, 鈴木亘, 丸山憲治

## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名, 発表・発行掲載誌名, 発表・発行年月, 連名者（申請者含む）
14)	ケーソン式防波堤の大変形破壊に伴う作用波力の変化に関する実験的研究, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 65 巻, pp.I_881-I_885, 2009 年 11 月 宮田正史, 安野浩一郎, <u>吉田誠</u> , 関本恒浩, 大久保陽介
15)	偶発波浪荷重を受けるケーソン式防波堤の大変形メカニズムに関する実験的研究, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 65 巻, pp.I_886-I_890, 2009 年 11 月 宮田正史, <u>吉田誠</u> , 安野浩一郎, 三好俊康, 三藤正明, 熊谷健蔵
16)	溶液型薬液注入工法を用いた盛土直下の液状化対策効果とその数値解析, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 65, No.1, pp.I_622-I_628, 2011 年 4 月 池野勝哉, <u>吉田誠</u> , 安楽宗一郎, 風間基樹, 渦岡良介, 仙頭紀明
17)	滑走路地盤の合理的な液状化対策とその確率的評価法, 構造工学論文集, Vol. 55A, pp.393-404, 2009 年 8 月 池野勝哉, <u>吉田誠</u> , 熊谷隆宏, 菅野高弘, 中澤博志
18)	砕石の受働破壊抵抗に対する粒径の影響に関する研究, 構造工学論文集, Vol. 54A, pp.39-49, 2008 年 8 月 長尾毅, 中瀬仁, 黒瀬浩公, 齋藤秀樹, <u>吉田誠</u>
19)	管理型廃棄物埋立護岸の耐震性に関する数値解析, ジオシンセティックス論文集, 第 22 巻, pp.159-166, 2007 年 12 月 小田勝也, <u>吉田誠</u> , 三藤正明, 秋本哲平
20)	遮水シートの摩擦特性に関する数値解析, ジオシンセティックス論文集, 第 21 巻, pp.255-262, 2006 年 12 月 小田勝也, <u>吉田誠</u> , 狩野真吾, 三藤正明, 秋本哲平
21)	管理型廃棄物埋立護岸の耐震性に関する模型振動実験, 第 12 回日本地震工学シンポジウム, pp.606-609, 2006 年 11 月 <u>吉田誠</u> , 狩野真吾, 小田勝也, 三藤正明, 秋本哲平
22)	地震動の違いによる遮水工の動的変形特性に関する模型振動実験, ジオシンセティックス論文集, 第 20 巻, pp.47-52, 2005 年 12 月 狩野真吾, 小田勝也, <u>吉田誠</u> , 三藤正明, 秋本哲平
23)	管理型廃棄物埋立護岸の地震時挙動に関する実験的検討, 土木学会地震工学論文集, Vol.28, pp.1-10, 2005 年 8 月 狩野真吾, 小田勝也, <u>吉田誠</u> , 三藤正明
24)	管理型廃棄物埋立護岸の地震時変動に伴う遮水シートの変形特性, 海岸工学論文集, Vol.51, pp.796-800, 2004 年 11 月 狩野真吾, 小田勝也, <u>吉田誠</u> , 三藤正明
②講演	
1)	ハイブリッド重力式栈橋の地震時安定性に関する模型振動実験, 年次学術講演会講演概要集 第 6 部, Vol.66, pp.261-262, 2011 年 9 月 原基久, 菅野高弘, 小濱英司, <u>吉田誠</u>
2)	浮き型格子状改良工法を適用したケーソン式岸壁の二次元有効応力解析, 第 46 回地盤工学研究発表会, 2011 年 7 月 <u>吉田誠</u> , 高橋英紀, 森川嘉之, 川崎廣孝, 鈴木亘, 居場博之
3)	グラウンドアンカーで耐震補強した重力式岸壁に関する振動台実験, 第 65 回土木学会年次学術講演会講演概要集第 III 部門(368), pp.735-736, 2010 年 9 月 <u>吉田誠</u> , 田代聡一, 合田和哉, 清宮理

## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名, 発表・発行掲載誌名, 発表・発行年月, 連名者 (申請者含む)
4)	浮き型格子状改良地盤の二次元有効応力解析による再現性について, 第 45 回地盤工学研究発表会, 2010 年 8 月 吉田誠, 森川嘉之, 高橋英紀, 福武毅芳, 徳永幸彦
5)	鋼矢板式岸壁の振動台実験によるグラウンドアンカーの補強効果, 第 64 回土木学会年次学術講演会講演概要集第 III 部門, pp.497-498, 2009 年 9 月 吉田誠, 浅沼丈夫, 前田涼一, 清宮理
6)	グラウンドアンカーで補強された鋼矢板式岸壁の振動台実験 (その 2: 矢板岸壁実験), 第 44 回地盤工学研究発表会講演集, pp.1075-1076, 2009 年 8 月 吉田誠, 浅沼丈夫, 小竹望, 清宮理
7)	液状化地盤上の盛土挙動に関する模型振動実験および数値解析, 地震工学研究発表会論文集 Vol.30, 2009 年 5 月 池野 勝哉, 吉田誠, 安楽宗一郎, 風間 基樹, 渦岡 良介, 仙頭 紀明
8)	浸透固化処理工法による滑走路直下の液状化対策範囲に関する模型振動実験, 年次学術講演会講演概要集 第 3 部 Vol.63, pp.25-26, 2008 年 9 月 吉田誠, 池野 勝哉, 三藤 正明, 菅野 高弘, 中澤 博志
9)	浸透固化改良土における盛土構造物の地震時シミュレーション, 年次学術講演会講演概要集 第 3 部 Vol.63, pp.57-58, 2008 年 9 月 安楽 宗一郎, 風間 基樹, 渦岡 良介, 仙頭 紀明, 吉田誠
10)	滑走路直下における人工液状化地盤の RI-CPT 調査, 第 43 回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.1837-1838, 2008 年 6 月 吉田誠, 池野勝哉, 菅野高弘, 中澤博志
11)	大型土槽を用いた遮水シートの引き抜き実験の FEM 解析, 第 18 回廃棄物学会研究発表会講演論文集, pp.700-702, 2007 年 11 月 小田勝也, 吉田誠, 三藤正明, 秋本哲平
12)	遮水シート引き抜き実験の FEM 解析, 第 62 回土木学会年次学術講演会, pp.469-470, 2007 年 9 月 小田勝也, 吉田誠, 三藤正明, 秋本哲平
13)	管理型廃棄物埋立護岸の耐震性に関する有効応力解析, 土木学会地震工学論文集, Vol.29, pp.1211-1216, 2007 年 8 月 小田勝也, 吉田誠, 三藤正明, 秋本哲平
14)	大型土槽による遮水シートおよび保護材の引き抜き実験, 第 42 回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.2179-2180, 2007 年 6 月 小田勝也, 吉田誠, 三藤正明, 秋本哲平
15)	大型土槽を用いた遮水シートの引き抜き実験, 第 17 回廃棄物学会研究発表会講演論文集, pp.250-253, 2006 年 11 月 吉田誠, 狩野真吾, 小田勝也, 三藤正明, 秋本哲平
16)	遮水シートによる管理型廃棄物埋立護岸の地震応答解析, 第 61 回土木学会年次学術講演会, pp.443-444, 2006 年 9 月 小田勝也, 狩野真吾, 吉田誠, 三藤正明, 秋本哲平
17)	敷設条件の異なる遮水シートの変形特性に関する静的加力実験, 第 41 回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.2429-2430, 2006 年 6 月 小田勝也, 狩野真吾, 吉田誠, 三藤正明, 秋本哲平

その他 22 件