

# 博士論文概要

## 論文題目

鋼板セル式岸壁の地震時挙動に関する研究  
Study on Dynamic Behavior of Steel  
Cellular-Bulkhead Quaywalls during  
Earthquake

申請者

佐藤	成
Shigeru	SATO

建設工学専攻 構造設計研究

2014年9月

昨今、国際競争力のある港湾、空港施設等の整備・改修が計画され、大水深の構造物が構築されるようになってきた。このような施設の多くは、地震後の損害を最小限にとどめ継続的に施設を使用するため、レベル 2 地震時においても短期間で復旧し、早急に機能を回復できることが要求されている。また、生活環境の保全、資源の有効利用の観点から循環型社会の形成促進が施策として進められる中で、廃棄物処理施設やエネルギー施設等の護岸構造物が構築されている。これらは適当な建設地が不足する状況下で、大水深、かつ、軟弱な地盤条件での建設を余儀なくされることも多くなっている。これらの構造物では、長期安定性、遮水性、急速施工性などが求められるが、一方で、東北地方太平洋沖地震(2011年、Mw9.0)における原子力発電所の被害の教訓から、レベル 2 地震動や津波の作用に対する有害物質の流出の可能性など、施設の有する性能やリスクの透明性、説明性が社会的に求められている。

大水深で、かつ、軟弱な地盤条件において有利な岸壁・護岸の構造形式のひとつに鋼板セル式構造がある。鋼板セル式構造は、あらかじめ製作された鋼製円筒体「セル」を海底地盤に設置あるいは打設し、中詰めを行った後、隣接する相互のセルを円弧状の鋼板「アーク」で接続し、さらにこれを中詰めして構築する壁状構造物である。この工法は、工場やヤードで製作したセルおよびアークを運搬し、現地での比較的単純な作業で施工することができることから、大水深や急速施工に適している。また、溶接による一体構造であり、アークとの接続も CT 継手など、鋼管矢板構造等で使用されている既往の継手を用いて構築することから、止水性に優れた特徴を有している。

本研究は、耐震強化岸壁として現行の「港湾の施設の技術上の基準」(平成 19 年 日本港湾協会、以下、港湾技術基準と略記)の設計方法により決定された鋼板セル式岸壁断面を対象に、レベル 2 地震動に対する模型実験と数値解析によるシミュレーションを行うことで、セル殻やアークの地震時挙動を確認するとともに、現行基準および設計方法の妥当性の検証を行うものである。

本論文は 6 つの章により構成されている。

第 1 章「序論」は、本研究の背景と対象および目的、さらに、本論文の構成を述べている。

第 2 章「既往の研究および実績」ではセル式構造物の主な施工実績、既往の研究、被災事例、現行基準における設計方法について整理を行っている。既往の研究では、剛塑性体の挙動に着目した水平耐力特性について多く研究され、せん断変形の照査、剛体バネモデルによる安定照査の方法が設計基準に反映されている。セル式構造物は、港湾施設が被害を受けた既往の被害地震において、兵庫県南部地震(1995年、M7.3)以外はほとんど被災していない。神戸港摩耶ふ頭岸壁の被災事例に対する菅野らの研究によって、現地調査、観測記録などを踏まえた模型実験と数値解析を組み合わせた検討方法がレベル 2 地震動に対する有効な評価方法とされている。現行の港湾技術基準は性能規定型となっており、鋼板セル式岸壁の設計は、土圧や自重作用時の永続状態、レベル 1 地震動作用時の変動状態に対して使用性が要求され、既往の設計法である簡便法(震度法)を適用し、レベル 2 地震動作用時の偶発状態に対しては修復性、安全性が要求され、地盤～構造物の動的相互作用を考慮した数値解析や模型実験を適用して照査することを推奨している。しかしながら、被災した摩耶ふ頭岸壁は、砂置換された基礎地盤を有する置き鋼板セルであるため、現地調査、地盤調査を基にした地震応答解析や模型実験による知見は、CDM 工法などの改良断面にそのまま適用することが困難であること、地盤改良による変形抑制効果を見込んだ照査用震度の算出式は、レベル 1 地震動に対して構築されたものであり、レベル 2 地震動に対しては 2 次元地震応答解析や模型実験によって性能を照査することが必要であること、さらに、セル殻、アーク、継手の損傷状態を評価する方法として 2 次元地震応答解析と 3 次元静的解析を組合せた応答変位法などが考えられるものの、既往の研究では、鋼板の挙動に着目した実験は実施されておらず、3 次元地震応答解析による被災事例や模型実験のシミュレーションも行われていないため、応答変位法の適用性が確認されていないなどの課題を明確にしている。

第 3 章「現行設計法による断面検討」では、現行の港湾技術基準にしたがった耐震強化岸壁の設計例を示し、この断面を対象に 2 次元地震応答解析と 3 次元静的解析を組合せた応答変位法によるセル殻、アーク、継手の耐震性能照査を実施した上で課題を整理している。まず、レベル 2 地震動作用時の偶発状態における修復性に配慮した性能規定について限界値を設定し、これに基づいた設計検討を行った結果、残留変位の抑制を目的とした基礎地盤の CDM 改良を行い、セル径 24.5m、セル高 32.0m、原海底面からの根入れ 2.3～3.2m、前面水深-20.1m、セル殻 SM490(t=15mm)、アーク SS400(t=8mm)、

CT 継手の断面諸元が得られている。当該施設は大水深 (-20.1m) を有しており、また、レベル 2 入力地震動の特性が強大であり、残留変位が比較的大きく断面諸元の決定要因となったことから、地震後の使用性や修復性に配慮した性能規定および制限値の設定は非常に重要であることを明らかにしている。

次に、3次元静的解析（応答変位法）の結果、継手は隣接するセル同士が異なる変位を生じる際に応力や相対変位が大きくなり、また、セルおよびアークを構成する鋼板は、最大変位時において陸側基部が塑性化することを明らかにしている。しかし、鋼板の塑性化領域が限定的であり、ひずみレベルも最大で 0.5% 程度であること、また、継手部の鉛直方向ズレ量の最大値が 46mm、反力による鋼板換算応力も 59N/mm<sup>2</sup> と使用材料 SM490, SS400 の降伏強度 315N/mm<sup>2</sup>, 235 N/mm<sup>2</sup> と比較して小さいことから、当該断面の岸壁構造物は地震時における安定性を確保していると考えられた。しかし、用いた性能照査方法がプログラム FLIP およびその結果を用いた 3次元応答変位法であることから、他の数値解析方法あるいは模型実験等で検証することが必要であり、また、応答変位法は最大変位時のような速度がゼロの状態を想定していることから、抽出する時刻や結果の妥当性については検証が必要として、改めて課題を提示している。

そこで、第 4 章「1G 場大型水中振動台実験による地震時挙動の検討」において、基礎地盤を改良された条件での鋼板セル式岸壁の 1G 場における大型水中振動台模型実験（1/30 縮尺）と、2次元地震応答解析プログラム(FLIP2D)を用いた再現解析を実施し、レベル 2 地震動に対する鋼板セル式岸壁の挙動に関する考察を行うとともに、2次元地震応答解析のセル～アーク構造系の数値モデル（菅野モデル）の適用性を評価している。

振動台実験の結果、セル岸壁が前面側に傾斜しながら移動する挙動が確認され、設計における 2次元地震応答解析結果と整合的であることが示された。相似則にしたがい 1/30 スケールの実寸に戻すと、1.3m の最大水平変位量で傾斜角  $4.1 \times 10^{-3} \text{rad} (=0.23^\circ)$  の残留変位量であった。これはセル高の 4% 程度の残留水平変位量であり、耐震強化施設のように地震後の早急な復旧を目標とする場合には、やはり使用性や復旧性に配慮した検討が重要であること、また、加振前後のセルの寸法計測からセルの形状変化があったことにより、厳密には剛体としての変位拘束とはなっていないことを明らかにしている。また、セルの円周方向ひずみの発生は、セルの変形が反映されたものであり、剛体変位拘束を前提とした解析では限界があり、セルの変形を再現できる 3次元的な解析方法で評価する必要があることを指摘している。この振動台実験においては中詰砂および埋立土の沈下が目立った。特に、埋立土の最大沈下量が実スケールで 2.1m とかなり大きく、復旧性に十分配慮しなければならない。中詰砂についても沈下が認められ、実スケールで最大 1m となっていた。この点については低拘束圧条件であったこともあり、遠心場などでの検証やダイレイタンスーモデルを用いた解析などが必要であることを示している。また、模型実験を対象とした菅野モデルによる 2次元地震応答解析を実施し、振動台実験での残留変位挙動を概ね再現することができ、この結果、改良地盤であっても同様のモデル化が有効であることが確認された。また、前面側セル殻先端周辺の数石、中詰砂の軸差せん断による非線形挙動が卓越することにより鉛直方向に沈下し、かつ、前面側に傾斜したものであり、さらに、盛石の鉛直面内のせん断および敷石の水平面におけるせん断による非線形性の卓越から水平方向に残留変位を生じたものと残留変位のメカニズムを考察している。

次に、第 5 章「50G 遠心場振動模型実験による地震時挙動の検討」では、セル殻に発生する応力性状を把握することを目的に 50G 場の遠心載荷装置を用いた模型振動実験（1/100 縮尺）と、2次元および 3次元地震応答解析プログラム(FLIP2D, FLIP3D)を用いた再現解析を行い、セル殻およびアークの地震時挙動に注目して評価を行っている。相似則は試験装置のスペックの制約から、50G 遠心場（1/50 縮尺）と 1G 場（1/2 縮尺）を組合せた拡張型相似則を適用した。

50G 場振動実験の結果、セル式岸壁が前面側に傾斜しながら水平移動する剛体的な挙動が確認され、やはり設計における 2次元地震応答解析結果と整合的であることが示された。残留水平変位量は実寸換算で 1.57m、傾斜角  $2.4 \times 10^{-2} \text{rad}$  であった。また、模型実験を対象とした 2次元地震応答解析では残留水平変位量 1.94m、傾斜角  $2.95 \times 10^{-2} \text{rad}$ 、3次元地震応答解析で 1.65m、 $1.76 \times 10^{-2} \text{rad}$  であり、これも整合的な結果が得られたことを示している。

1G 場の模型実験で確認された中詰砂の沈下は遠心場では微小であったが、直背後の沈下量は実寸換

算で 1.8m であり、これも 1G 場の 2.1m と整合する結果が得られ、復旧性に十分配慮しなければならないとしている。

セル殻およびアークは、実験では局所的な変形を含む挙動が確認されたが、初期値を合成した円周方向および鉛直方向ひずみから推定された最大発生応力は  $143\text{N/mm}^2$  であり、使用材料 SM490, SS400 の降伏強度  $315\text{N/mm}^2$ ,  $235\text{N/mm}^2$  と比較して小さいことから降伏には至っていないことを示している。また、模型実験と 3 次元地震応答解析から推定される地震時鋼板応力は、発生時刻や部分的な符号の違いはあるものの、最大発生応力としては模型実験で円周方向応力  $128\text{N/mm}^2$ , 鉛直方向応力  $143\text{N/mm}^2$  に対し、3 次元地震応答解析では各々  $144\text{N/mm}^2$ ,  $93\text{N/mm}^2$  と同程度の値であった。ただし、解析上は、ひずみゲージのないセル背後側（陸側）最下端において最も大きな応力が発生し、若干の塑性化の可能性を示唆するものであった。この点については要素分割の粗さが影響することが推察され、モデル化の留意点としている。一方で、第 3 章における応答変位法の結果では陸側基部が塑性化に至っていることから、両者で同様の挙動が確認され、かつ、応答変位法の結果が安全側となっていることから、設計法として有用であるとしている。ただし、2 次元地震応答解析と 3 次元地震応答解析ではセル天端変位時刻歴のピーク時刻が若干異なることから、抽出する時刻は複数選定することが必要としている。

なお、2 次元モデルでは中詰砂の軸差せん断による変形が大きいですが、3 次元モデルでは敷石の単純せん断変形が支配的であり、セル殻自体がより剛体的な挙動を示すメカニズムを明らかにしている。また、2 次元および 3 次元解析の比較から、菅野モデルは中詰土のみでせん断力を負担するものであるが、実際にはセル側面部分がある程度せん断力を負担するので、2 次元モデルでの傾斜角は大きく評価され安全側となることを明らかにしている。

以上から、現行基準による設計方法は概ね安全側の結果を与えるものの、円周方向および鉛直方向の連成挙動には十分注意する必要があることを結論としている。

第 6 章「結論」では、本研究によって得られた結論を述べている。基礎地盤が CDM 改良されていても菅野モデルは適用可能であることが 1G 場および 50G 場の模型振動実験で確認された。また、現行基準による設計結果は若干安全側ではあるものの妥当であること、さらに、変位時刻歴と加速度時刻歴、ひずみ時刻歴の関係から、中詰砂や埋立土が液状化しない条件では、3 次元静的解析を用いた応答変位法は有用な手段であるとしている。

今後の課題として、3 次元地震応答解析はセル構造物の地震時挙動を忠実に表現する方法のひとつであるが、解析精度向上のためにはプログラムやコンピュータの高速化、大容量化の改善が必須であることを指摘している。次に、地震発生前の初期応力状態が厳密には不明であり、長期安定問題から液状化を含めた地震応答解析まで連続した解析が可能なプログラムの整備が必要であることを記述している。さらに、中詰土の過剰間隙水圧が上昇した場合であっても、外部に流出することがなければ、構造体の形状が保持され安定性が確保されるため、既設構造物の耐震対策費の合理化につながる可能性を指摘している。加えて、構造形式の異なる区間との接続部や地盤条件の変化部あるいは岸壁、護岸法線の隅角部に応力が集中する可能性があり、広範囲の埋立地を対象とした検討が今後必要になる可能性を指摘している。

「付録資料」には鋼矢板および鋼板セル構造物の 2 次元地震応答解析に適用可能な修正菅野モデルが示されている。

## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名 佐藤 成 印

(2014年 6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) 査読	鋼板セル式岸壁の地震時挙動に関する研究 土木学会論文集 A1, Vol. 70, No. 2, pp.190-209, 2014.5 <u>佐藤成</u> , 竹信正寛, 小濱英司, 清宮理
○2) 査読	鋼板セル式岸壁の地震時挙動に関する研究 土木学会構造工学論文集, Vol.55A, pp.435-448, 2009.4 <u>佐藤成</u> , 竹信正寛, 小濱英司, 清宮理
○3) 査読	大型セル式岸壁の地震時の挙動に関する数値解析 海洋開発論文集, 第 24 巻, pp.207-211, 2008.7 諸星一信, 小濱英司, 渡部昌治, 清宮理, 山本修司, <u>佐藤成</u>
○4) 査読	大型鋼板セル岸壁の耐震設計における数値解析及び模型実験の適用 海岸工学論文集, 第 55 巻, pp.936-940, 2008.11 諸星一信, 小濱英司, 渡部昌治, 清宮理, 菅野高弘, 宮田正史, 山本修司, <u>佐藤成</u>
②講演会	
○1)	鋼板セル式岸壁の遠心場模型実験の 3 次元地震応答解析によるシミュレーション 土木学会年次学術講演会講演概要集 第 1 部 Vol.66, I-047, pp.93-94, 2011.9 <u>佐藤成</u> , 清宮理
○2)	鋼板セル式岸壁の遠心場模型実験のシミュレーション 土木学会年次学術講演会講演概要集第 1 部 Vol.65, I-657, pp.1313-1314, 2010.9 <u>佐藤成</u> , 清宮理
③その他	
1) 査読	Liquefaction-induced damage to structures during the 2011 Great East Japan Earthquake Journal of JSCE, vol.1, pp181-193, 2013, Special Topic-2011 Great East Japan Earthquake (Invited Paper) Susumu YASUDA, Ikuo TOWHATA, Ichiro ISHII, <u>Shigeru SATO</u> , Taro UCHIMURA
2)	2011 年東北地方太平洋沖地震の本震と余震を考慮した埋立地盤の地震応答解析 第 48 回地盤工学研究発表会, pp1729-1730, 2013. 7 <u>佐藤成</u> , 影地良昭, 仲摩貴史, 細尾敦, 飛田哲男
3)	東日本大震災における宅地の液状化被害の再現性に着目した液状化被害可能性の簡易判定手法の構築（その 1） 土木学会年次講演会, vol. 68, pp. 115-116, III-058, 2013. 9 西丸あずさ, <u>佐藤成</u> , 加藤永, 吉田桂治, 東畑郁生
4)	東日本大震災における宅地の液状化被害の再現性に着目した液状化被害可能性の簡易判定手法の構築（その 2） 土木学会年次講演会, vol. 68, pp. 117-118, III-059, 2013. 9 <u>佐藤成</u> , 西丸あずさ, 加藤永, 吉田桂治, 東畑郁生
5)	液状化を生じる緩傾斜護岸の アンカー補強に関する数値解析 土木学会年次学術講演会講演概要集 第 6 部, Vol.65, VI-476, pp.951-952, 2010.9 橋本真, 清宮理, <u>佐藤成</u>

## 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）
6)	解析プログラム FLIP における砂の解析定数簡易設定法の事例解析-ケーソン岸壁- 第 46 回地盤工学研究発表会, pp1645-1646, 2011.7 <u>佐藤成</u> , 井合進, 一井康二, 由井陸粋
7)	液状化を生じる緩傾斜護岸のアンカー補強に関する数値解析 土木学会年次学術講演会講演概要集 第 2 部, Vol.66, II-241, pp.481-482, 2011.9 橋本真, 清宮理, <u>佐藤成</u>
8)	グラウンドアンカーによる耐震補強効果の検討 土木学会年次学術講演会講演概要集 第 1 部 Vol64, I-259, pp.517-518, 2009.9 矢野良尚, 清宮理, <u>佐藤成</u>
9)	二次元有効応力解析法の解析精度向上に関する検討-重力係船岸を対象として- 第 39 回地盤工学研究発表会発表講演集, pp1841-pp1842, 2004.7 森玄・ <u>佐藤成</u> ・小堤治・一井康二・塩崎禎郎・井合進
10) 査読	地中埋設管の液状化時浮上量の FEM による予測精度について 第 48 回地盤工学シンポジウム, pp225-pp232, 2003 <u>佐藤成</u> , 一井康二, 西山誠治, 大島貴充, 井上陽介, 佐藤誠一, 池田隆明, 荒木繁雄, 兵頭武士, 梅木康之, 井合進
11)	開削地下構造物の耐震性能を考慮した継手構造について 土木学会年次学術講演会講演概要集 第 1 部, Vol.57, pp1397-pp1398, I -699, 2002 山下 知之, 築山有二, 野田誠司, 佐藤諭一, <u>佐藤成</u>
12)	部材厚の薄い矩形トンネルの耐震検討 (横断方向) 土木学会年次学術講演会講演概要集 第 1 部 Vol.57, pp1393-pp1394, I -697, 2002 榎本 浩, 小田桐直幸, 林博志, <u>佐藤成</u> , 峯谷明
13) 査読	非排水有効応力地震応答解析における捨石材のモデル化に関する検討 第 46 回地盤工学シンポジウム, pp25-pp30, 2001 <u>佐藤成</u> , 大塚夏彦, 森浩章, 小堤治, 井合進, 安田進
14)	非排水有効応力地震応答解析における捨石材のモデル化に関する検討 (その 1) 地震工学研究発表会講演論文集 Vol.26, pp677-pp680, 2001 <u>佐藤成</u> , 大竹省吾, 亀山和弘, 佐藤靖彦, 飯田典生, 大塚夏彦, 土屋善浩, 森浩章, 小堤治, 井合進, 安田進
15)	非排水有効応力地震応答解析における捨石材のモデル化に関する検討 (その 2) 地震工学研究発表会講演論文集 Vol.26, pp681-pp684, 2001 <u>佐藤成</u> , 林家祥, 亀山和弘, 佐藤靖彦, 飯田典生, 大塚夏彦, 土屋善浩, 森浩章, 小堤治, 井合進, 安田進
16)	SCP で改良された粘性土地盤上の重力式岸壁の地震時有効応力解析(その 2: ケーススタ ディ) , 第 35 回地盤工学研究発表会発表講演集, pp2057-pp2058, 2000 <u>佐藤成</u> , 吉田晃, 飯田典生, 丹下英雄, 井合進, 森浩章

## 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）
17)	周辺地盤との滑りや剥離を考慮した地下構造物の耐震設計法(その2) 土木学会年次学術講演会講演概要集第1部(B), Vol.54, pp906-pp907, I -B455, 1999 <u>佐藤成</u> , 山本一敏, 劉如山, 市川衡
18)	周辺地盤との滑りや剥離を考慮した地下構造物の耐震設計法(その1) 土木学会年次学術講演会講演概要集第1部(B), Vol.54, pp904-pp905, I -B454, 1999 劉如山, <u>佐藤成</u> , 山本一敏, 市川衡
19)	地下構造物の横断方向の耐震設計における静的FEM解析法の適用性について 第33回地盤工学研究発表会発表講演集, pp2007-pp2008, 1998 <u>佐藤成</u> , 劉如山
20)	動的解析における基礎地盤の剛性および減衰の変動による影響について 地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集 Vol.2, pp367-pp370, 1998, 森伸治, <u>佐藤成</u>
21)	RC単柱橋脚の地震時保有水平耐力法プログラムのベンチマークテスト 地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集 Vol.1, pp227-pp230, 1998, 藤田義人, <u>佐藤成</u> , 諏訪部政誉, 田中樹由, 川崎巖, 謝嬋娟, 須 田隆文, 藤江和久, 田中達朗, 薄葉淳, 水谷美登志
22)	連壁本体利用構造に応答変位法を用いる場合の根入れ部などの取扱いに関する研究 土木学会年次学術講演会講演概要集第1部(B) Vol.52, pp894-pp895, 1997 小坂彰洋, 石川幸彦, 中島信, <u>佐藤成</u>
23) 査読	コンクリート構造物のクリープ解析における微分方程式と弾性床上の梁への適用 プレストレストコンクリート Vol.35, No.5 pp45-pp53, 1993 <u>佐藤昇</u> , 吉川一成, <u>佐藤成</u>
24) 査読	Determination of applied compressive stress in concrete structure by acoustic emission measurement, Prog. Acoustic Emission III (1986), pp. 538-545. Uomoto Taketo, <u>Sato Shigeru</u> and Yamamoto Sadaaki
25)	AE計測によるコンクリートの履歴最大圧縮応力推定方法に関する研究 生産研究 vol.39, No.2, pp66-pp69, 1987 魚本健人, <u>佐藤成</u>
26) 査読	AE法によるコンクリートの最大履歴応力推定手法に関する研究, コンクリート工学年次 講演会論文集 vol.8, pp397-pp400, 1986 <u>佐藤成</u> , 魚本健人
27)	埋設管の側方拘束土圧に関するモデル実験 土木学会年次学術講演会講演概要集第3部, Vol.39, pp563-pp564, III-282, 1984 <u>佐藤成</u> , 三木公一, 大川秀雄