

博士論文 審査報告書

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12月

申請者は、本論文の背景について以下のように説明している。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、大水深の施設が構築されるようになってきた。このような重要な施設では、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。これらの周囲は護岸や岸壁であり、重力式ケーソン式、緩傾斜捨て石式などで構築される。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と述べている。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と述べている。

申請者の研究は、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っている。

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と述べている。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。兵庫県南部地震では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述べている。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と述べている。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従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/mm²と使用材料 SM490、SS400 の降伏強度 315N/mm²、235 N/mm²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述べている。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比較的良き一致していることを述べている。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 $4.1 \times 10^{-3} \text{rad} (=0.23^\circ)$ の残留変位量であり、これはセル高の 4%程度の残留水平変位量で、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ており、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ことを指摘している。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シーモデルを用いた解析などが必要であることをのべている。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している。また、前面側セル殻先端周辺の敷石、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ている。

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を述べている。残留水平変位量は実寸換算で 1.57m、傾斜角 $2.4 \times 10^{-2} \text{rad}$ であり、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、これも良く一致している結果が得られたことを述べている。

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ことを指摘している。

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 143N/mm^2 であり、使用材料 SM490, SS400 の降伏強度 315N/mm^2 , 235N/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 128N/mm^2 、鉛直方向応力 143N/mm^2 に対し、3 次元地震応答解析では各々 144N/mm^2 , 93N/mm^2 と同程度の値であったことを述べている。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と指摘し、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述べている。

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、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指摘している。

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、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述べている。

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。

以上を要約するに、本論文は、大水深でのセル式護岸の地震時の挙動を載荷試験と数値解析により確認している。また従来の設計法はセルの地震時の抵抗機構を説明しておらず、本論文で提案している三次元動的解析モデルにより挙動を合理的に説明できることを示している。本論文で得られた成果は、地震工学と港湾工学に有用な情報を与えるだけでなく、構造工学の発展に大いに寄与し、今後の大規模地震に対する臨海部の防災について工学的に有用な情報を提供しており高く評価できる。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。

主査	早稲田大学教授	工学博士	(東京工業大学)	清宮 理
副査	早稲田大学教授	工学博士	(早稲田大学)	赤木寛一
	早稲田大学教授	博士(工学)	(早稲田大学)	小峯秀雄

2014年11月