

セル式岸壁の最適断面設定方法に関する研究

OPTIMAL DIMENSION DECISION METHOD OF CELLULAR-BULKHEAD QUAY WALL

長尾 毅¹・北村卓也²

Takashi NAGAO and Takuya KITAMURA

¹正会員 工博 国土技術政策総合研究所(〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1)

²正会員 工修 住友金属工業(株) (〒104-6111 東京都中央区晴海 1-8-11)

When designing the cellular-bulkhead quay wall, designers should determine the embedded length and the width of the cellular-bulkhead quay wall. As there are plural design alternatives for these parameters, designers should also calculate the construction costs and find the optimal profiles. In this study, authors present the general rule for the determination of the optimal design for the cellular-bulkhead quay wall. Authors then discuss the effects of these parameters on the earthquake resistant performance of the cellular-bulkhead quay wall by conducting the earthquake response analyses.

Key Words : Cellular-bulkhead quay wall, Earthquake Resistant Design, Optimal Design

1. はじめに

岸壁の設計においては、水深・設計震度・土質条件などの設計条件が与えられれば、断面諸元は一意的に定まることが多い。例えば、ケーソン式岸壁の設計においては、上記設計条件が与えられれば、捨石マウンド形状を所与のものとするれば、滑動・転倒・支持力の各条件に対して所要の安全率を満足するようなケーソン幅が自ずと定まる。矢板式岸壁についても同様で、荷重作用によるタイロッド取付点に関するモーメントの釣合から根入長が定まり、次に荷重作用から最大の断面力が発生する位置が特定され、断面力に対して所要の安全率を満足するような鋼材が求められる。このため、設計に用いる各種計算式に違いがない限り、設計された断面は同じ諸元となることが想定される。

しかしながら、根入を有するセル式岸壁については、構造形式としてはケーソン式などの重力式岸壁と類似であるものの、ケーソン式岸壁などと異なり、根入長、壁体幅の2つの要素を決定する必要があり、同じ壁体幅であっても根入長が異なると断面の持つ荷重抵抗性能が異なる。すなわち、各破壊モードに対する所要の安全率を満足しながら根入長と壁体幅が異なる組み合わせがありえる。このためこれまで設計実務においては、施工費用などを勘案することによって複数の設計代替案の中から最適な断面を決定してきた。これは、設計過程において常に複数の設計代替案を検討しなければならないことを示し、他の構造形式と比較して設計計算のステップ数が多いことを意味する。ところで、現行設計法の規定を満足し、かつ経済的にも最適な断面の決定方法を提示することが可能であれば、設計プロセスが簡素化

されることとなり、構造形式の選定や断面決定行為の効率化に資することとなる。

以上の背景のもと、本研究は、セル式岸壁の最適断面（所要の耐震性能を有する断面のうち、工費の最も低い断面）決定方法について検討するものである。検討においては、水深として11m、地盤条件の影響を考慮するために3種類のモデル地盤を設定して現行設計法による断面を検討した。その際、根入長と換算壁体幅の異なる断面を設定した。設定した各断面について標準的な施工費用を算出することにより、経済的に最も有利な条件を検討し、最適断面の決定方法に関する一般原則の検討を行った。

さらに、根入長や壁体幅が岸壁の耐震性能に与える影響を検討するため、2次元の地震応答解析を解析コード FLIP¹⁾を用いて実施した。現行設計法による安全率を満足しながら根入長と換算壁体幅の異なる断面について地震応答解析を実施することにより、現行設計法において想定している構造物の地震応答と実際の地震応答の比較を行い、セル式岸壁の最適断面設定方法に関して考察を加えた。

2. セル式岸壁の設計法

ここでは、現行設計法²⁾によるセル式岸壁の断面決定法について述べる。

セル式岸壁の設計は、①せん断変形の検討、②地盤支持力の検討、③壁体の滑り出しの検討、④壁体天端の変位の検討、⑤円弧すべりの検討の各項目について照査が行われる。

このうち、①のせん断変形については、常時の土圧などの作用によりセル壁体がせん断破壊しないこ

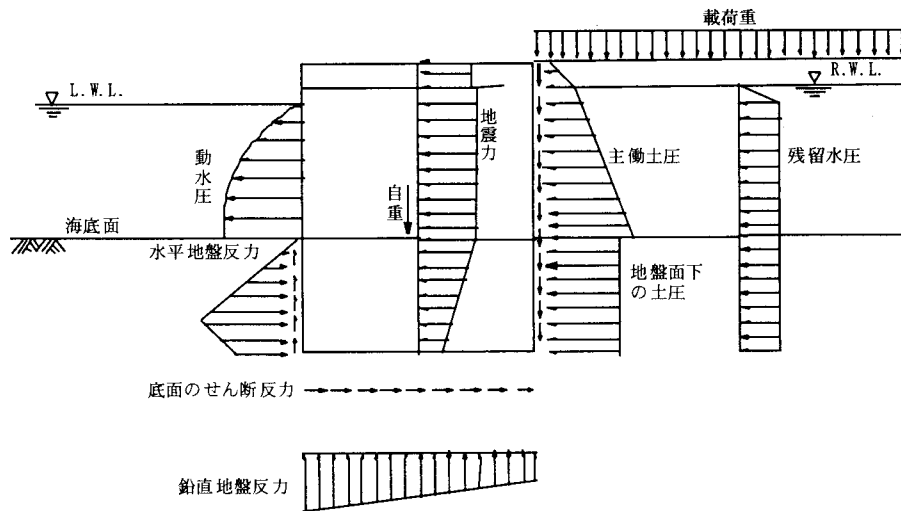


図-1 荷重モデル

天端変位量： $\delta 1$

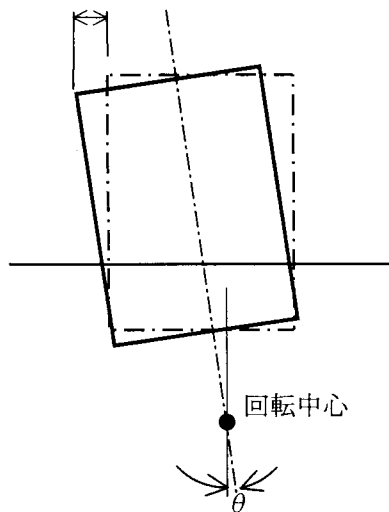


図-2 セル天端変位量

とを照査する。これは、基本的にセル壁体は剛体として挙動することが模型実験などにより確認されているためである。ただし、セル径が極端に小さい場合や中詰土の強度が著しく弱い場合には剛体として挙動することが保証されとは限らないために常時の荷重に対して照査を行う。なおここで、鋼矢板セルと鋼板セルでは照査するポイントが異なり、鋼矢板セルにおいてはセル底面および海底面、鋼板セルについては海底面におけるモーメントをもとにした検討を行う。

地盤の支持力については他の重力式壁体と同様に偏心傾斜荷重作用時の支持力安全性照査としてピシヨップ法を用いた照査が行われる。壁体の滑り出しについても重力式壁体と同様で、壁体底面と地盤の間に働くせん断力とせん断抵抗力の比較が行われる。

壁体天端変形量はセル式構造物に特有の照査項目である。図-1に示すようにセル壁体には様々な荷重が作用するが、これら荷重作用によりセル壁体がある点を中心に回転し、図-2に示すように荷役が行えなくなるほどの残留変形が生じることを回避するための照査である。検討においては、セル壁体の変形量（回転角）に応じた受働側の地盤反力を考慮するが、これが受働土圧を越えない（受働破壊しない）範囲で収束計算を行って壁体天端の変形量を算出する。

3. 現行設計法による最適断面に関する検討

(1) 検討条件

検討は、設計水深として11mとし、地盤条件の影響を考慮する観点から表-1に示すcase1~case3の3種類の地盤を設定した。これは、地盤固有周期がそれぞれ1.2, 0.8, 0.6sとなるように設定したものであり、case1が最も軟弱な地盤モデルとなる。さらに設計震度としては0.1, 0.15, 0.2, 0.25の4ケースを考慮した。以上により検討ケース数は12ケースである。

表-1 地盤のS波速度(m/s)

	case1	case2	case3
埋土上層(+4~-6.5m)	120	180	210
埋土下層(-6.5~-11m)	120	180	250
原地盤上層(-11~-21.5m)	150	190	280
原地盤下層(-21.5~-32.5m)	150	250	450

次に、工費についての考え方は以下の通りである。砂地盤の場合（地盤改良が不要な場合）、根入れ鋼製セルの工費は主に製作費（セルおよびアークの製作費）、打設費（セルおよびアークの打設費）および中詰費の3要素から構成される。このうち打設費は、セルおよびアークを打設するための起重機船の艀装

費(吊り治具の設置, 打設装置の製作/取付, 配線), 運転費(打設日の費用), 休止日費用(荒天時等の拘束料), 回航費(起重機船を打設現場まで曳航する費用また帰港する費用)等, 複雑な要素で構成され, 現場位置による船舶調達の容易度, 護岸延長による設備規模, 現場海域の静穏度等, 様々な要因に支配され, セルの断面形状だけでは経済性を一概に評価できない。従って, 本研究では打設費を以下の考え方で評価した。

- ・施工延長は, 根入れ式鋼板セルの施工実績より標準的な値を採用し, 500m とした。
- ・現場海域の静穏度で決定される船舶の供用係数には, 港湾土木請負工事積算基準³⁾において該当する港湾の数が最も多い1.65を採用した。
- ・船舶調達の容易度は考慮に入れず, 適正な能力の船舶が調達できるものとした。

ただし, 適用する船舶機器の型式は, 船舶および機械器具等の損料算定基準⁴⁾に掲載されるの中から選定した。

- ・工費は直接工事費で評価することとし, 回航費等の間接工事費は対象外とした。

また, 単価及び費用は以下のとおり設定した。

- ・中詰費; 3,500 円/m (材工込み(材質:砂), 数量割増率 20%)
- ・セル, アーク製作費; 建設物価⁵⁾及び根入れ式鋼板セル工法積算マニュアル⁶⁾による。
- ・船舶機器; 船舶および機械器具等の損料算定基準⁴⁾及び建設物価⁵⁾による。

なお, セル及びアークの板厚は, 最小板厚を 8mm として, 設計供用期間を 50 年とした電気防食による腐食厚さを設計上必要となる板厚に加えて設定した。

(2) 検討結果

図-3 に鋼板セルを対象とした検討結果を地盤ケースごとに示す。図は, ●等の記号を線で結んだものが各設計震度に対する現行設計法による設計結果で, 上述のように換算壁体幅と根入れ長の組み合わせによる設計代替案を複数提示している。例えば, case1 で設計震度 0.20 のケースに着目すると, 根入れ長が短い範囲では●で示す滑動で断面が決まるが, 根入れ長が 7.0m 以上になると▲の変位により断面が決まることが分かる。地盤条件の違いによる設計結果の違いに着目すると, case1 と case2 では大きな違いはないが, case3 では支持力により断面が決まる割合が増加する。これは, case3 では地盤のせん断抵抗が大きいいため滑動に対して有利となるが, 支持力の検討ではその影響が少ないため支持力が支配要因となりやすいためである。各破壊モードに着目すると, 滑動については根入れ長を長くすると受動側の抵抗が大きくなるため根入れ長の増加に伴い換算壁体幅は減少する。これに対して支持力については根入の効果は少ないため, 根入の増加に伴う換算壁体幅の変化割合は小さい。変位については, 根入の増加に伴って換算壁体幅が増加する傾向にある。これは, 図-2 の回転中心が壁体底面以深となることが多いため, 根入れ長

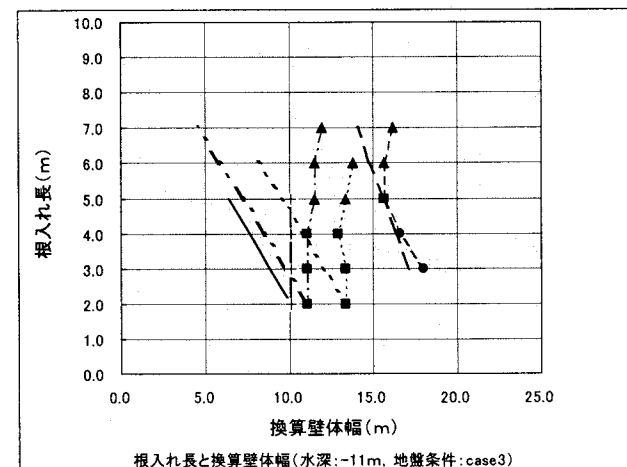
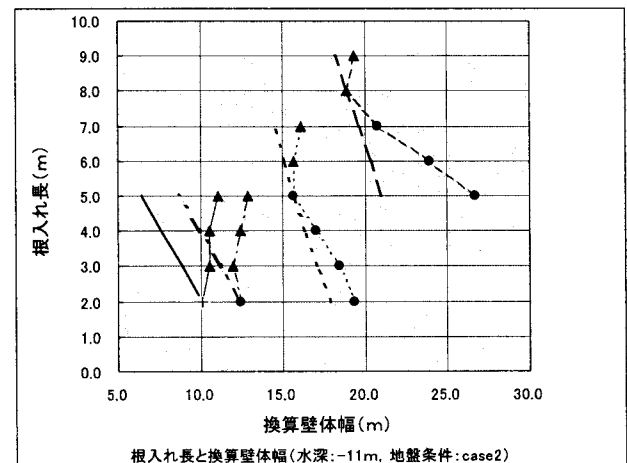
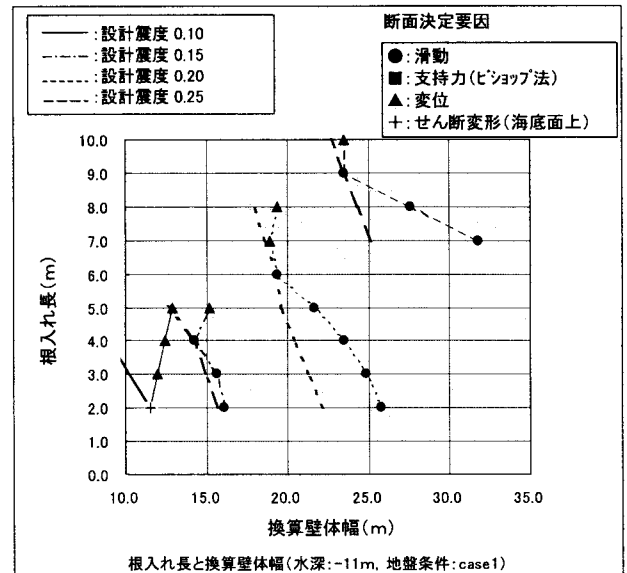


図-3 検討結果

が長くなるほど回転中心位置が深くなり, その結果天端変位量が増加するためである。

図に加えた記号無しの線は等工費線である。各設計震度における設計代替案と等工費線が交わる箇所が現行設計法における最適断面となる。

図-3 より, 以下の知見が得られる。

- ①根入れ地盤の強度が高いほど、最適根入れ長は浅くなる。
- ②設計震度が低いほど、最適根入れ長は浅くなる。
- ③以上の傾向より、地盤条件毎、設計震度毎の最適根入れ長は表-2のとおりとなる。なお、根入れ長が2m以上の範囲で検討しているのは、港湾の施設の技術上の基準²⁾に従い、根入れ比（堤体の壁高に対する根入れ長の比）を1/8以上にしたことによる。また、鋼矢板セルについても検討を行ったが、断面および工費は異なるケースもあるが、鋼板セルと鋼矢板セルで最適根入れ長は等しくなった。

表-2 最適根入れ長

	低 ←---地盤強度---→ 高		
	case1	case2	case3
$k_h : 0.10$	2m	2m	2m
$k_h : 0.15$	4m	2m	2m
$k_h : 0.20$	6m	5m	2m
$k_h : 0.25$	9m	8m	5m

※ …… 最小根入れ長：2m

④工費が等しくなる等工費線について見ると、等工費線の勾配（根入れ長／換算壁体幅）は0.77～1.50で1を越えるケースが多く、換算壁体幅を小さくするより根入れ長を短くした方が工費縮減効果が高い傾向にあることがわかる。

⑤地盤条件および設計震度を固定し根入れ長を変化させると、断面決定要因も変化するが、断面決定要因に滑動が含まれる場合には、滑動で断面が決定される領域は根入れの最も浅い区間に現れる。

⑥地盤条件および設計震度を固定し根入れ長を変化させると、最適根入れ長は、滑動で断面が決定される領域のうち根入れの最も深い地点または滑動以外で断面が決定される領域のうち根入れの最も浅い地点で得られる。ただし、地盤条件 case1, 設計震度 0.15 では、滑動で断面が決定される領域で、より根入れの浅い地点が最適断面になる可能性も示されている。

以上より、最適根入れ長が得られる地点は、(a)滑動が断面決定要因に含まれる場合は、滑動で断面が決定される領域と滑動以外で断面が決定される領域の境界、またはそれより根入れの浅い地点、(b)滑動が断面決定要因に含まれない場合は、根入れの最も浅い地点（壁高の1/8）となる。

この結果は、以下の理由によると考えられる。滑動に関しては根入れを増すと安全率が大幅に高まるため、滑動で断面が決定される領域では断面決定要因における根入れ長／換算壁体幅の勾配が等工費線より小さくなる場合が多い。そのため、この領域では根入れの最も深い地点が経済的になる傾向となる。一方、その他の断面決定要因は根入れ長を増しても安全率の増加が少ないため、断面決定要因における根入れ長／換算壁体幅の勾配が等工費線より大きくなる。そのため、その他の要因で断面が決定される領域では根入れの最も浅い地点が経済的になる。なお、工費については、例えば製作費と中詰費のみを

考慮した場合についても検討したが、結果は同様であった。このため、本研究の知見は、標準的な打設費の範囲では概ね適用性が高いと考えられる。

4. 地震応答解析による耐震性の検討

次に、地震応答解析を行ってセル式岸壁の耐震性能を評価した。用いた地震応答解析コードは FLIP¹⁾である。また、検討は図-4に示す八戸波を用い、最大振幅を100, 200, 350Galに調整して-32.5mの基盤より入射した。

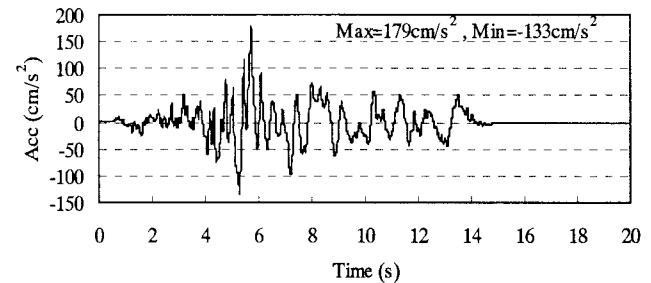


図-4 八戸波

セル式岸壁のモデル化については、北村ら⁷⁾の検討事例がある。これは、円筒型のセル殻を3つの梁でモデル化するものである。本研究では、北村らの考え方に従い、図-5に示すようにセルを3つの梁によりモデル化した。ただし、梁の剛性については、セル式岸壁が基本的に剛体とみなしうるという現行設計法の考え方に従って設定した。

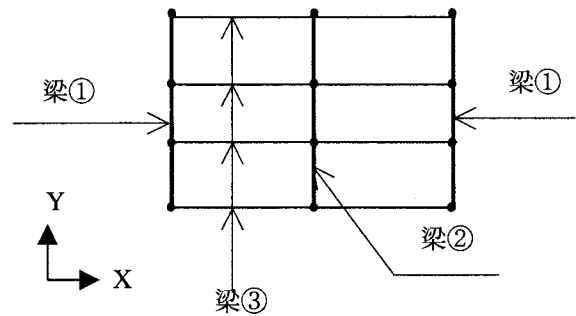


図-5 セルモデル化

検討断面は、case1 および case3 の設計震度 0.2 の条件について、最適断面を含めて換算壁体幅と根入れ長が耐震性能に及ぼす影響を検討する観点から、表-3に示すケースを設定した。case1-1 および case1-3 について、入力加速度最大値が350Galの場合の変形図を図-5に示す。また、各ケースの加速度最大値別の天端変形量を図-6に示す。

図-7(a)は地盤条件が同一の条件において滑動安全率が同じ値となる case1-1～case1-3 の天端変形量を示している。これより、滑動安全率が同じ断面であ

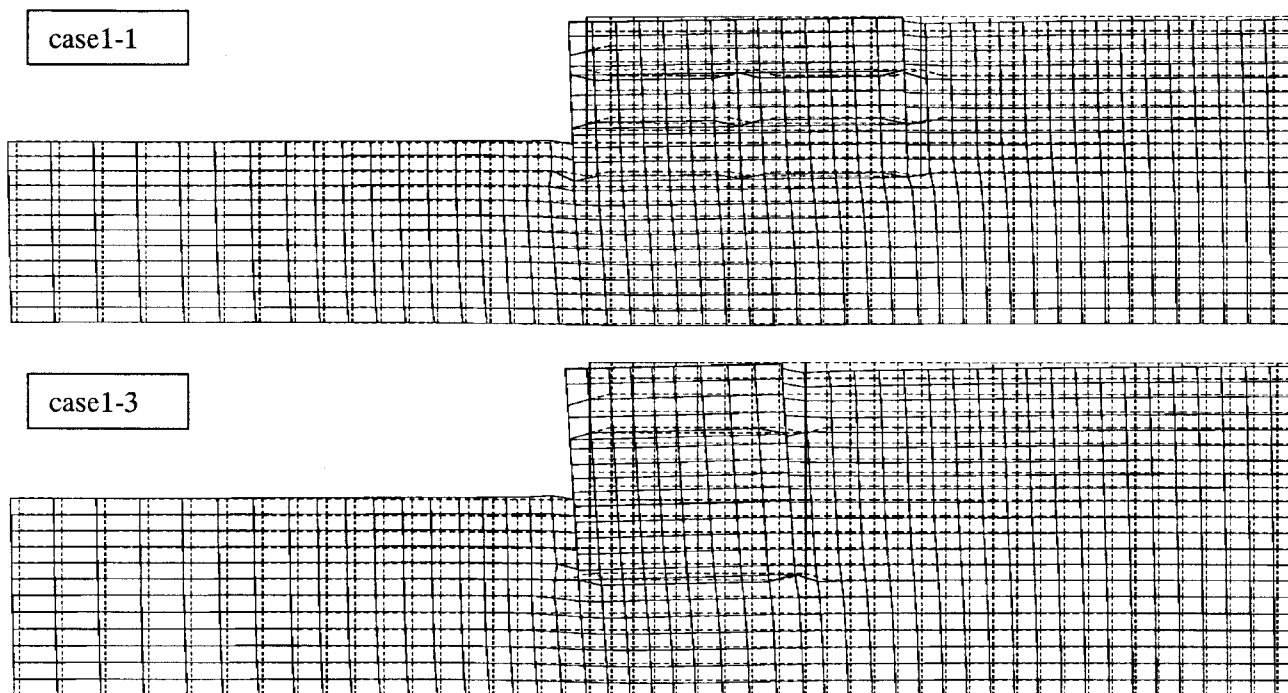


図-6 変形図

表-3 検討条件

検討 CASE	地盤 CASE	断面決定要因	根入長 (m)	換算壁体幅 (m)
case1-1	case1	滑動	4	23.49
case1-2			6	19.34
case1-3			8	15.20
case1-4		変位	4	16.58
case1-5			8	19.34
case3-1	case3	支持力	2	13.36
case3-2			4	12.90
case3-3			6	12.90
case3-4		変位	6	13.82

っても、換算壁体幅が広い断面ほど天端変形量が少ないことが分かる。すなわち、case1-1 では 350Gal 入力時の天端変形量は 25.7cm であるのに対して、case1-3 では 34.1cm であり、30%程度の変形量の違いが生じている。次に図-7(b)は地盤条件が同一で、現行設計法において変位が同じ値となる case1-4 と case1-5 を比較したものである。根入の長い case1-5 の方が天端変形量は小さく、350Gal 入力時の case1-4 の変形量 35.6cm に対して case1-5 では 26.7cm となり、やはり 30%程度の差が生じている。次に、case1-2 と case1-5 を比較する。これらは換算壁体幅が同一で根入長が異なるケースであるが、根入の長い case1-5 の方が変形は少ないものの、その差は 10%未満である。

次に図-7(c)について検討する。これは、地盤条件が同一で支持力安全率が同一となるケースである。図より、根入の最も長い case3-3 が変形量が最も少ないが、根入の最も短い case3-1 との差は 350Gal 入力

時に 15%程度であり、(a)に示した滑動におけるほどの差は生じていない。また、case3-2 と case3-3 の比較から、換算壁体幅が同一で根入長が異なる場合、根入長が長いほど変形は根入効果により抑制されることが分かる。これは case1-2 と case1-5 における結果と同様の傾向である。図-7(d)は支持力で決まる断面と変位で決まる断面の変形量の比較を行ったものである。この結果では case3-4 と他のケースの変形量の差は少ない。

以上の結果より、本研究の検討範囲においては、滑動安全率が同一の断面においては根入長が長いほど地震応答解析による変形量は大きいこと、現行設計法における手法で変位が同じ値と見積もられる断面においては、根入の効果で根入が長いほど地震応答解析より得られる変位は少ないこと、換算壁体幅が同一の条件においても根入長が長いほど地震応答解析による変位は少ないことが分かった。なお、天端変形量のみならず、天端沈下量や残留傾斜角についても整理したが、傾向は天端変形量と同じであった。

地震応答解析結果より得られるこの知見と、3. で検討した現行設計法による最適断面に関する知見を比較検討すると、今回の検討の範囲においては、今後性能設計の体系が採用された場合に、地震応答解析を用いることで工費縮減に資する場合があるといえる。すなわち、性能設計の体系においては設計者が照査に用いる方法には自由度が高くなることが想定され、信頼度の高い方法を用いる場合には現行設計法で採用されている安全率を用いた照査式を必ずしも用いる必要はなくなる。このため、現行設計法において滑動が支配的な要因となるケースや、変

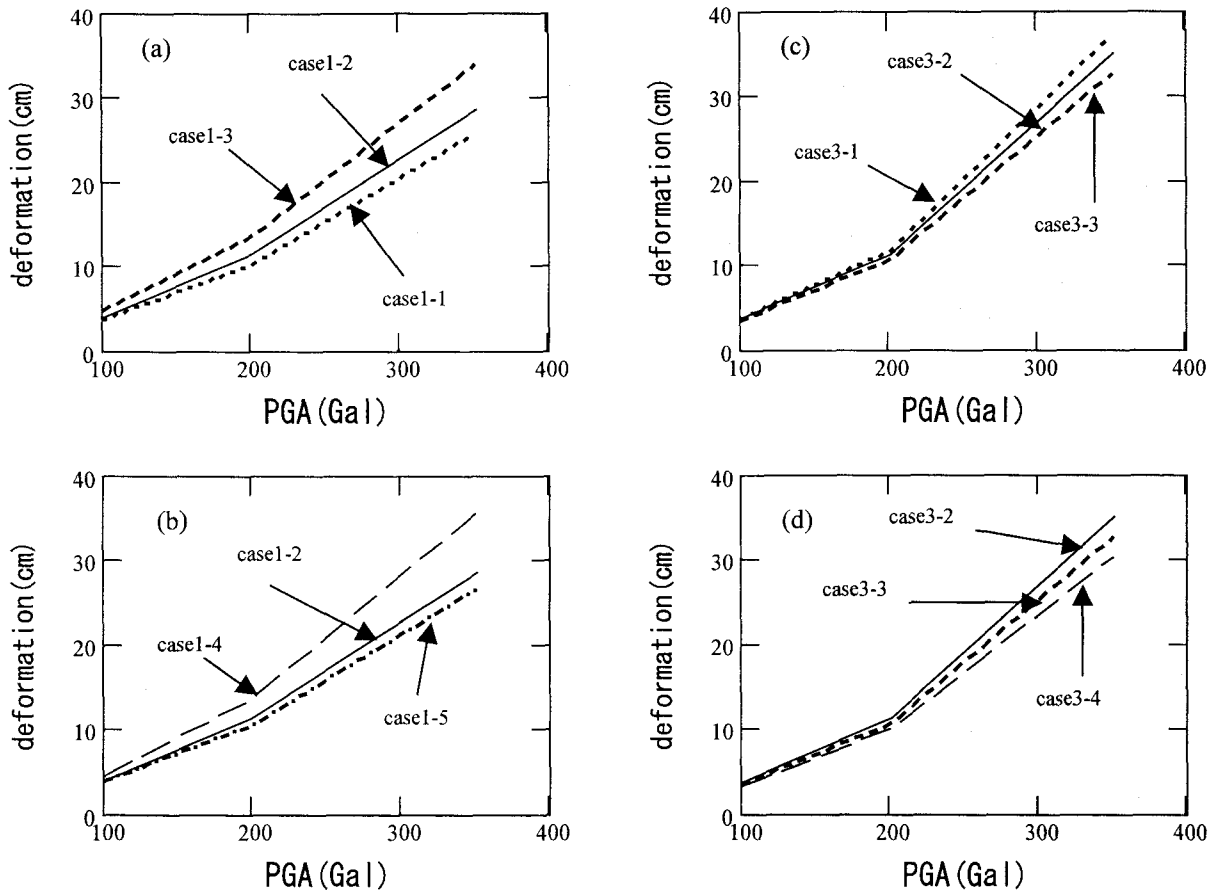


図-7 天端変形量

位が支配的なケースでは、地震応答解析を併用することで工費縮減に資する場合があるといえる。ただし、今回は限られた範囲での検討であるので、今後更に検討が必要であると考えられる。

5. まとめ

本研究による主要な知見は以下の通りである。

- ① 現行設計法で最適根入れ長が得られる地点は、(a) 滑動が断面決定要因に含まれる場合は滑動で断面が決定される領域と滑動以外で断面が決定される領域の境界、またはそれより根入れの浅い地点、(b) 滑動が断面決定要因に含まれない場合は、根入れの最も浅い地点（壁高の 1/8）となる。
- ② 現行設計法において滑動安全率が同一の断面においては根入れが長いほど地震応答解析による変形量は大きい。現行設計法における手法で変位が同じ値となる断面においては、根入れが長いほど地震応答解析より得られる変位は少ない。また、換算壁体幅が同一の条件においても根入れが長いほど地震応答解析による変位は少ない。
- ③ 現行設計法による結果と地震応答解析の結果を比較検討した結果、今回の検討の範囲では、今後性能

設計の体系が採用された場合に、地震応答解析を実施することで工費縮減に資するケースが存在する可能性がある。

②および③については、今後検討ケースを増やして更に検討を行う予定である。

参考文献

- 1) Susumu Iai, Yasuo Matsunaga, Tomohiro Kameoka: Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility, Report of The Port and Harbour Research Institute, Vol.29, No.4, pp.27-56, 1990
- 2) 運輸省港湾局監修: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, (社)日本港湾協会, 1999
- 3) 港湾土木請負工事積算基準: (社)日本港湾協会, 2003
- 4) 船舶および機械器具等の損料算定基準: (社)日本港湾協会, 2002
- 5) 建設物価:(財)建設物価調査会, 2004
- 6) 根入れ式鋼板セル工法積算マニュアル: 根入れ式鋼板セル協会, 2000
- 7) 北村卓也, 由井洋三, 森田年一, 菅野高弘: 兵庫県南部地震における鋼板セル式岸壁の解析的研究, 土木学会第 53 回年次学術講演会, I-B, pp.516-517, 1998