

セル式岸壁の根入れが耐震性能に与える影響について

A study on the effect of the embedment of cellular bulkheads to the seismic stability

住谷圭一*・長尾 毅**

Keiichi Sumiya and Takashi Nagao

*東亜建設工業株式会社, 土木事業本部設計部 (〒102-8241 東京都千代田区四番町5丁目)

** 工博 国土技術政策総合研究所, 港湾研究部, 港湾施設研究室 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

This study aims at clarifying the effect of embedment of cellular bulkheads on the seismic stability by using the two-dimensional earthquake response analyses. We classified the deformation of cellular bulkheads into two portions: deformation in the foundation ground and the deformation by the inclination of the wall body. We found that deformation in the foundation ground is reduced and that by the inclination of the wall body is increased in accordance with the embedded length. We discussed the reason by observing the shear stress and the shear strength of the ground. We also found that the deformation mechanism was not necessarily in harmony with that by the present design code from the viewpoint of the effect of embedment.

Key Words: cellular bulkhead quay wall, embedded length, earthquake response analysis

キーワード: セル式岸壁, 根入れ長, 地震応答解析

1. はじめに

今般, 港湾構造物の技術基準の改訂により¹⁾, 設計体系が仕様規定から性能規定へ変更され, 構造物は要求される性能を満たすように設計することが必要となった. 性能規定型設計への移行として, 岸壁の耐震性能については具体的に変形量の許容値を設定し, 入力地震動の作用に対して変形量がそれを上回らないことを確認する照査体系の導入がなされた. 本研究で対象とするセル式岸壁の耐震設計については, セル壁体を剛体, 地盤をバネと考えてそれを支持するモデルに, 設計震度に基づいて算定される作用を考慮して岸壁の安定性を検討する方法が採用されている. そして, その際にケーソン式等のその他の構造形式の岸壁とは異なり, セル式岸壁では変形量を算出して許容値との比較を行う方法が旧基準²⁾より用いられてきた.

しかしながら, セル式岸壁の設計法の性能設計体系への移行にあたり, セル式岸壁の特徴である根入れが耐震性能に与える影響について合理的な評価が行われているか再度確認しておくことが必要と考えられる. 従来の設計法におけるセル式岸壁の変形量算出方法は, 各種の実験結果^{3)~5)}を参照して構築されている. このうち, 動的特性の把握のために正弦波による模型震動実験が行われたが, 実験結果に対する地震応答解析による再現は行われていない⁵⁾. 現行設計法は実績もあり概ね合理的であると考えられてきたものの, 根入の耐震性能に及ぼす影

響については, 同じ地震レベル(設計震度)で根入れ長の短い条件と長い条件を比較すると, 根入れ長が長い条件のほうがセルの回転中心位置が深くなり, セルの変形量が増える結果となる⁶⁾. さらに, 根入れ長を増加させたことによって増えた変形量を抑える為には, セルの壁体幅(セルの径)を増やすことが要求される. このように, セルの根入れ長を長くすることによる岸壁の変形量抑制効果が必ずしも十分に表現できていない可能性がある. 根入れ長は, セル式岸壁の変形メカニズムを考えたとき変形量に最も影響を与える要因の一つと考えられ, その効果を明らかにしておくことは, セル式岸壁の適切な変形量の算定および耐震性向上の方策を検討する上で重要である. また, 現行設計法は模型実験を基本に構築されているが, 地震工学の発展で応答解析により変形を精度良く算定することが可能となり, セルの変形を解析的に議論する環境が整ってきた. 野田ら⁷⁾は既設の根入れ鋼板セル護岸の地震時挙動の観測結果について等価線形法による地震応答解析を実施し良い再現性を得ている. しかしこれは小規模な地震動における挙動を対象としており, 設計地震動レベルの入力における挙動の再現性確認には至っていない. また風間ら⁸⁾は, 根入れのある剛体構造物の地震時安定性について, 剛体-地盤バネ系にモデル化した解析を行っている. これは自由地盤の応答変位を強制変位として, 単位長さ当りの地盤バネを介して構造物に作用させる方法であるが, このモデルについても小規模な地震における線形挙動の範囲内における適用性確認

にとどまっている。一方、北村ら⁹⁾は地盤の非線形性を考慮した地震応答解析によって、兵庫県南部地震におけるセル式岸壁の解析を行い、大変形が生じた被災状況を精度良く解析している。

以上のような背景から、本研究では、セル式岸壁の性能設計体系構築の端緒として、セルの根入れ長が岸壁の変形挙動に与える影響について検討を行ったものである。検討においては、2次元地震応答解析を実施し、その解析結果を用いて考察した。なお、使用した解析コードはFLIP¹⁰⁾である。考察に際しては、変形量をセル直下の地盤の変形量とセルの傾斜による変形量に分けて考え、根入れ長を変化させることで、発生するせん断応力やせん断ひずみ等がどのように変化するか、或いはセル天端の変形量に対してどのような変化を与えるのかを調べた。その上で根入れの効果という観点から、従来法がセル式岸壁の変形メカニズムについて調和のとれたものになっているかどうかの検証を行った。

2. セル式岸壁の現行設計法

2.1 現行設計法の概要

最初に、現行設計法によるセル式岸壁の断面設定法に

ついて述べる。セル式岸壁の設計は、永続作用に対する照査項目としてセル壁体のせん断変形、円弧すべりの検討、全ての作用に対する照査項目として壁体の滑動、壁体天端変位、地盤支持力に対する照査を行うこととなっている。

現行設計法におけるセル壁体天端の変位量は、図-1に示すような様々な荷重作用に対して、図-2に示すようにセル壁体が、セル中心軸からの偏心量 e 、設計海底面からの深さ h の点を中心に回転するモードを考え、船舶接岸などの観点から別途定める許容変形量との比較を行うことで検討される。なお、図-1にある換算壁体幅とは、図-3に示したとおりセル殻およびアークで囲まれた水平断面積(図-3のハッチング部)と等価な断面積を有する仮想壁体の壁体幅である。また、セル前面の水平地盤反力は、受働土圧強度を超えないものとしている。

現行設計法では、ある作用(設計震度)の条件下で荷重水平成分に対する滑動抵抗力が不足した場合、根入れ長もしくは堤体幅を増やすことを要求する。ここで堤体幅一定の条件で根入れ長のみを増やす場合を考えると、受働抵抗が増加し滑動に対する安全率は上がる傾向にある。一方、現行設計法における回転のモードに関しては、根入れ長の増加に対して、回転に抵抗するモーメントのアーム長が、わずかな増加しか見込むことができない。

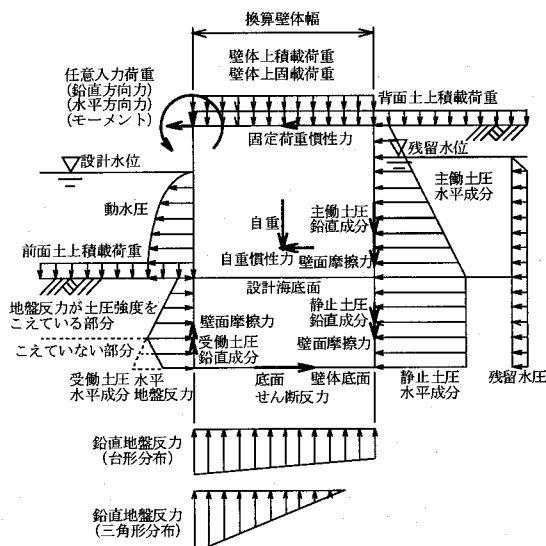


図-1 荷重モデル

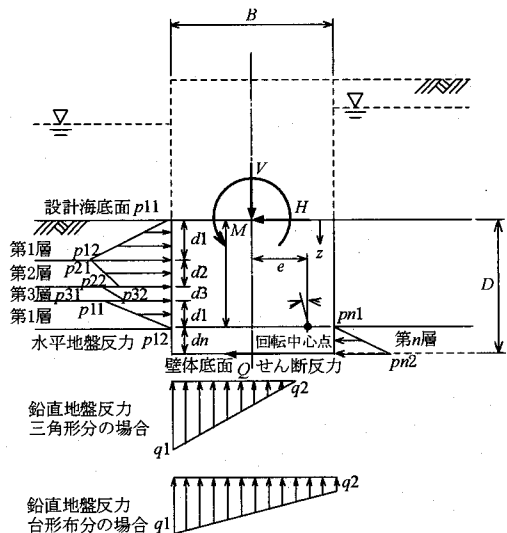


図-2 セル壁体変位の計算モデル

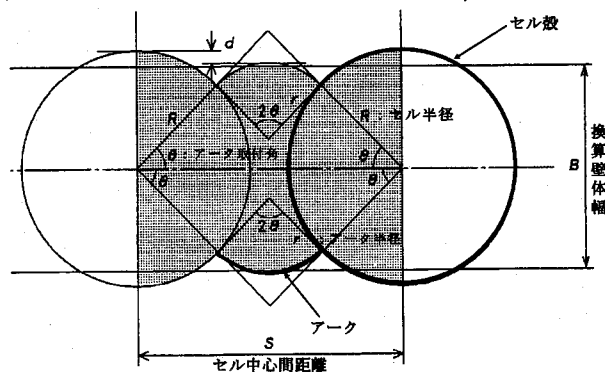


図-3 セルの面積と換算壁体幅

また、根入れ長の増加によって回転中心位置が下がりセル壁体の傾斜による天端変形量は増えることになる。結果的に回転に対して許容値を満足することができず、抵抗モーメントを増やすために換算壁体幅の増加を要求することになる。以上のことから、現行設計法では同じ作用（設計震度）に対して、根入れ長を増やすと同時に、換算壁体幅も増える傾向となっている。

2.2 現行設計法による天端変形量の算定

現行設計法による壁体の変形量の算定は、図-2 に示す回転中心点の位置（ e 、 h ）と回転量（ θ ）を未知数にして、設計海底面高さにおける壁体底面中央での力の釣り合い式を解くことにより計算する。最初にセル前面地盤での変位および回転角を仮定する。続いて、その時の変位における水平および鉛直地盤反力を算出し、仮定した変位と算出した変位が等しくなるまで繰り返し計算をする。よって回転中心点の位置（ e 、 h ）は、この計算の結果として決定されることになる。

現行設計法による壁体の変形量の照査式やモデルは、先にも述べた通り、既往の模型実験結果^{3)~5)}に基づいて構築されている。ここで模型実験とは、砂地盤に根入れさせた円形のセル模型に対して、油圧ジャッキによってセル天端に大きな水平変形量が生じ破壊に至るまで水平載荷を行ったものや振動台による振動実験である。図-4 は水平載荷試験の結果であり、根入れ比（根入れ長 D ÷ セルの壁高 H ）毎に荷重と天端水平変位の関係（ P - δ 曲線）として整理されている。

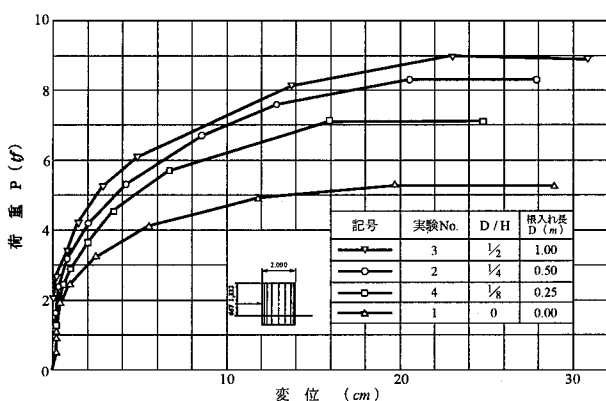


図-4 既往の実験結果³⁾

この実験結果に対して、セル壁体を剛体と考え地盤反力をバネで評価するケーソン基礎の設計法（以下、「剛体バネモデル」と称す）を用いてセルの天端変形量を求めて実験結果と比較している。このときのケーソン基礎の設計法としては道路橋示方書¹¹⁾に示されたものを使用しており、両者の比較の結果、計算されたセル天端変形量が、実験結果の P - δ 曲線における荷重 $3tf$ 程度までの直線性を保つ範囲については良い一致をみているとして

いる。また、根入れ比が小さい ($D/H=1/8$ 以下) 場合では、計算値が測定値に対して危険側を与える場合があるが、その他の場合ではセルの挙動を安全側で評価でき、ケーソン基礎の設計法による天端変形量算定手法が、実用上十分な精度でセルの挙動を把握できている³⁾。しかし、既往の実験結果を見ると、根入れ比が大きくなれば、同一荷重における天端変形量は減少する結果を得ており、根入れがセルの変形に対して耐荷能力を向上させる効果があることが認められる。以下では、設計震度と地盤条件を同一にし、現行設計法によって根入れ長の異なるセル式岸壁の断面を設定した上で、それらの断面について現行設計法と地震応答解析による天端変形量を求め、両手法による天端水平変形量と根入れ長の関係を調べた。

3. セル式岸壁の天端変形量の検討

3.1 検討概要

本節では、最初に現行設計法によって根入れの異なる断面を設定し、それらの断面について現行設計法による天端変形量を求め、変形量と根入れ長との関係を確認した。次に、同じ断面について2次元地震応答解析を実施して天端変形量を求め、同様に変形量と根入れとの関係を確認した。その上で両者の傾向の違いを検証した。

現行設計法によって設定した検討断面は、水深-7.5m、壁高 11.5m、設計震度 0.10 の条件で設定し、根入れ長の種類は表-1 に示す3種類とした。検討断面の模式図は図-5 の通りである。地盤条件は全国の強震観測地点の S 波速度構造から固有周期を整理した結果に基づき、地盤の固有周期は緩い地盤で 1.0~1.4 秒、締まった地盤で 0.6 秒以下、その中間の地盤で 0.6~1.0 秒程度と考えられたため、根入れ式セルが通常建設される軟弱な地盤を想定し、砂地盤として地盤の固有周期が 1.2 秒程度となるようにせん断波速度を表-2 のように設定した。なお、表-2 に示した条件は、旧港湾基準における第Ⅲ種地盤に相当する。

地震応答解析に用いた地盤パラメータは、FLIP の標準的な設定法¹²⁾に従い、表-3 のように設定した。なお、本研究では土のダイレイタンスに関するパラメータは考慮していない。また、FLIP におけるセル殻のモデル化は、セル壁体が剛体として挙動するように、北村⁹⁾らが実施した検討事例を参考に図-6 のように設定した。ここで、梁①の原地盤および中詰砂と接する部分には表-4 に示すようなジョイント要素を挿入しており、梁②と梁③については地盤と独立である。なお、ジョイント要素の物性値は既往の解析例¹³⁾を参考に設定した。入力加速度波形は、既往の模型実験⁵⁾における基盤入力地震動を参考にして、図-7 に示す正弦波を用いた。また、参考として実際の観測波形を入力した場合の応答を調べるために、

表-1 根入れ長と換算壁体幅

No.	根入れ長 $D(m)$	換算壁体幅 $B(m)$
1	2.0	8.75
2	4.0	10.13
3	6.0	11.05

表-2 地盤条件

No.	土層区分	せん断波速度 (m/s)
1	埋土層	120
2	原地盤	150

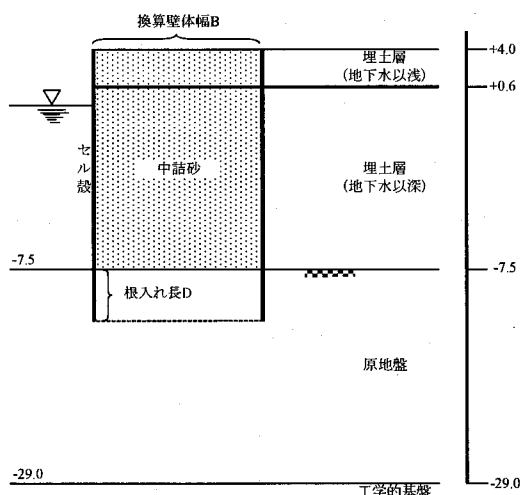


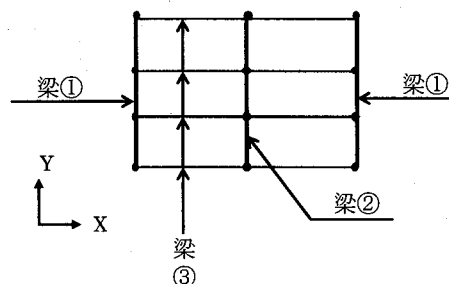
図-5 検討断面模式図

表-3 FLIP 入力パラメータ

土層区分	湿潤密度 (t/m^3)	基準有効拘束圧 (kN/m^2)	基準せん断剛性 (kN/m^2)	基準体積剛性 (kN/m^2)	粘着力 (kN/m^2)	内部摩擦角 ($^{\circ}$)	最大減衰
埋土層	2.0	89.8	25920	67595	0	37	0.24
原地盤層	2.0	239.8	45000	117353	0	38	0.24

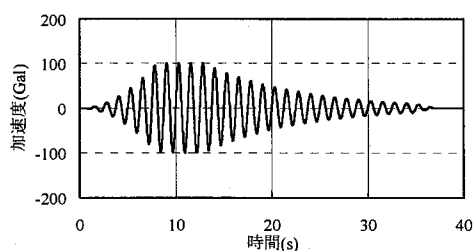
表-4 ジョイント要素のパラメータ

垂直方向剛性 (kN/m^2)	せん断方向剛性 (kN/m^2)	摩擦角 ($^{\circ}$)
1.0×10^6	1.0×10^5	15

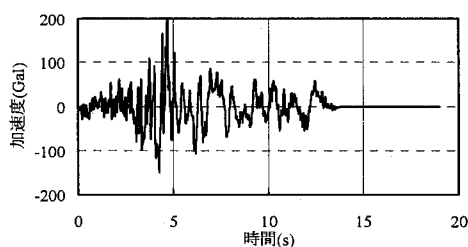


- 梁①: 「セル殻+アーク鋼板の堤体中心軸回りの単位奥行き当り剛性」の1/2の剛性を有し、断面積が十分小さい仮想梁
 梁②: 「セル殻+アーク鋼板の単位奥行き当り断面積」と等しい断面積を有し、剛性が十分小さい仮想梁
 梁③: 仮想梁①～②～①を水平方向につなぐ剛性が十分に大きく断面積が十分に小さい仮想梁

図-6 FLIP によるセル殻のモデル化



(a) 正弦波(周波数: 0.8Hz)



(b) 八戸波

図-7 入力加速度波形

港湾の耐震設計で従来から用いられてきた八戸波¹⁴⁾ (1968年十勝沖地震の際に八戸港で観測された地表での記録波形から引き戻した基盤入射波)も併せて使用した。これらの波形は基盤より2Eで入射している。正弦波は継続時間が40秒、主要動継続時間を5秒に調整して、

主要動の前後はコサイン状のテーパをかけた波形を使用し、周波数は0.6～1.0Hzとした。なお、各波形の最大振幅は既往の実験⁵⁾や研究¹⁵⁾を参考にして100Galおよび200Galに調整している。

3.2 変形量の計算結果

(1) 現行設計法による変形量

現行設計法によって設定した断面の地震時の天端変形量と傾斜角について計算結果を表-5に示す。表中のはらみ出し量とは、セル殻の高さ（セル壁高 H + 根入れ長 D ）と天端の水平変形量 δ の比であり、従来はこれが1.5%以下となるように制御してきた²⁾。なお、セル壁高 H とはセルの天端から原地盤までの高さを意味する。また、セル回転中心深さ h とは海底面から回転中心までの深さを意味し、セル中心からのずれ e は、変形前のセル壁体中心軸とセル回転中心のずれ量であり、値が正であった場合はセルの回転中心がセル殻中心軸よりも主働側（埋立側）へ、負であった場合はセル回転中心がセル壁体中心軸よりも受働側（海側）へずれていることを意味する。表-5 から天端変形量、傾斜角ともに根入れ長の増加に伴い減少していることがわかる。しかしその反対に、換算壁体幅が増加していること、およびセル回転中心の深さが深くなっていることに注意が必要である。

表-5 現行設計法によるセル変形量

セル壁高 H (m)	11.5		
根入れ長 D (m)	2	4	6
換算壁体幅 B (m)	8.75	10.13	11.05
天端変形量 δ (m)	0.173	0.147	0.127
天端はらみ出し (%)	1.50	1.28	1.10
セル傾斜角 θ (°)	0.55	0.42	0.34
セル回転中心深さ h (m)	6.45	8.57	9.74
セル中心からのずれ e (m)	1.29	2.25	3.23

表-6 現行設計法によるセル変形量(幅固定)

セル壁高 H (m)	11.5		
根入れ長 D (m)	2	4	6
換算壁体幅 B (m)	8.75		
天端変形量 δ (m)	0.173	0.338	0.533
天端はらみ出し (%)	1.50	2.94	4.63
セル傾斜角 θ (°)	0.55	1.05	1.59
セル回転中心深さ h (m)	6.45	6.94	7.73
セル中心からのずれ e (m)	1.29	-0.06	-0.75

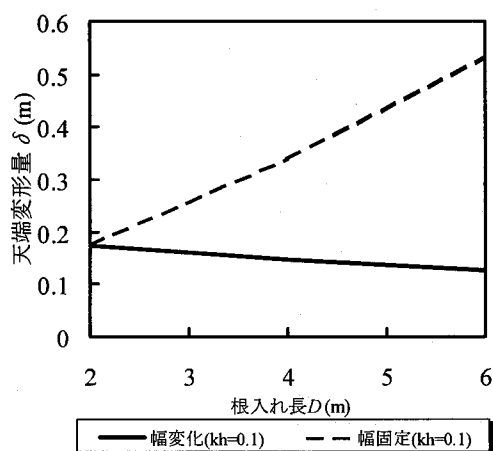


図-8 現行設計法による天端変形量と根入れ長の関係

次に、換算壁体幅を根入れ長 2m の条件($B=8.75m$)に固定し、根入れ長のみを変化させた場合の計算結果を表-6に示す。この場合は、表-5 の結果とは逆に天端変形量と傾斜角が根入れ長の増加と共に増える結果となる。天端変形量に関する両者の比較を図-8に示す。

これらの結果から、現行設計法では作用（設計震度）が同じ場合、根入れ長を増やすと天端変形量および傾斜角が増える結果となり、変形を抑えるために換算壁体幅を増やすことが要求されていることがわかる。しかし既往の実験結果では、壁体幅一定の条件で根入れ長を増やした場合、水平荷重に対するセルの耐荷性能は向上するという結果を得ており、現行設計法の変形量算定法が実際の現象と調和のとれていないものになっている可能性がある。

(2) 地震応答解析による変形量

(1)の断面について、FLIPによる地震応答解析を実施し、天端変形量とセル傾斜角等を求めた。入力地震動は、正弦波3種類と八戸波の4波形としたが、そのうち正弦

表-7 地震応答解析によるセル変形量

セル壁高 H (m)	11.5		
根入れ長 D (m)	2	4	6
換算壁体幅 B (m)	8.75	10.13	11.05
天端変形量 δ (m)	0.620	0.479	0.381
セル傾斜角 θ (°)	1.221	0.862	0.667
傾斜による変形量 (m)	0.287	0.233	0.204

表-8 地震応答解析によるセル変形量(幅固定)

セル壁高 H (m)	11.5		
根入れ長 D (m)	2	4	6
換算壁体幅 B (m)	10.13		
天端変形量 δ (m)	0.538	0.479	0.42
セル傾斜角 θ (°)	0.948	0.862	0.786
傾斜による変形量 (m)	0.223	0.233	0.24

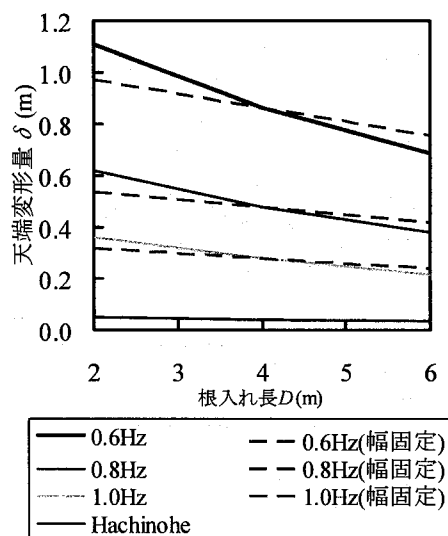


図-9 地震応答解析による天端変形量と根入れ長の関係

波 0.8Hz(100Gal)を入力した結果を表-7 に示す。表-8 は、換算壁体幅($B=10.13\text{m}$)を固定し根入れのみを変化させた場合の結果であり、図-9 は変形量と根入れ長の関係を入力波形別に示したものである。なお、傾斜による変形量とは、セルの傾斜角と根入れ長を含むセル殻全体の高さから求めた変形量である。ここで、現行設計法による断面設定の際に仮定した作用（設計震度）と地震応答解析による作用（入力地震動）は、一致するものではないため、ここでは天端変形量やセル傾斜角について根入れ長の増減等に伴う変形量の増減の傾向に着目する。

図-9 から、入力地震動の周波数の違いによって天端変形量の値には大きな差があり、低周波成分(長周期)の波形を入力した場合では大きな変形量が発生している。卓越周波数が 0.4Hz 程度の八戸波を入射した場合では、変形量が小さいが、これは地震の継続時間の影響があると思われる。表-7 に示した地震応答解析結果による根入れと天端変形量の関係は、表-5 の従来法によって計算した変形量と根入れの関係と同様の傾向を示す。一方、換算壁体幅を固定した場合では、従来法によって計算した変形量の傾向とは異なり、根入れ長の増加に伴って天端変形量が減少する結果を得た。これは、2.2 に示す既往の実験結果と調和する結果である。

(3) 天端変形量の成分

地震応答解析結果からセル直下中央部の根入れ下端における地盤の水平変形量と、セル壁体の傾斜による水平変形量に着目して、天端変形量の成分について検討した。表-9 に換算壁体幅($B=10.13\text{m}$)を固定した場合の変形量を示す。なお、入力地震動は正弦波 0.8Hz(200Gal)である。表-9 から、根入れの増加によって、天端変形量全体とセル直下中央部の地盤変形量は減少していることがわかる。一方、

傾斜による変形量は増加している。ここで天端変形量 δ 、セル直下中央部の地盤変形量 δ_1 および傾斜による変形量 δ_2 に着目すると、概ね次のように考えることができる。

$$\delta \approx \delta_1 + \delta_2 \quad (1)$$

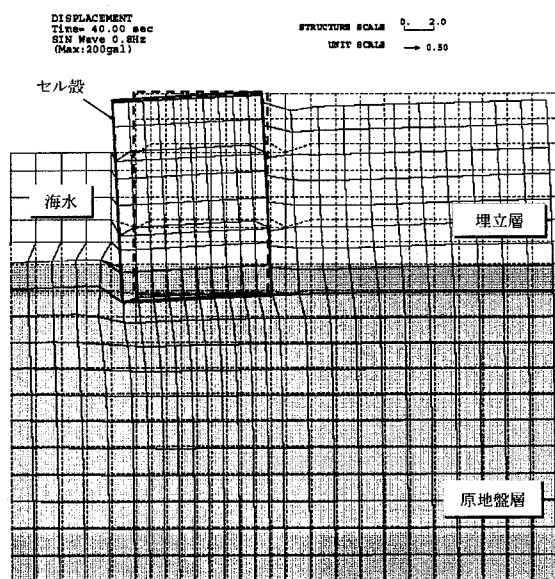
なお、 δ_1 は FLIP による地震応答解析の結果から求められた地盤変形量であり、 δ_2 とはセル壁高 H 、根入れ長 D および地震応答解析の結果によるセル傾斜角 θ によって以下のように求められる。

$$\delta_2 = (H + D) \cdot \theta \quad (2)$$

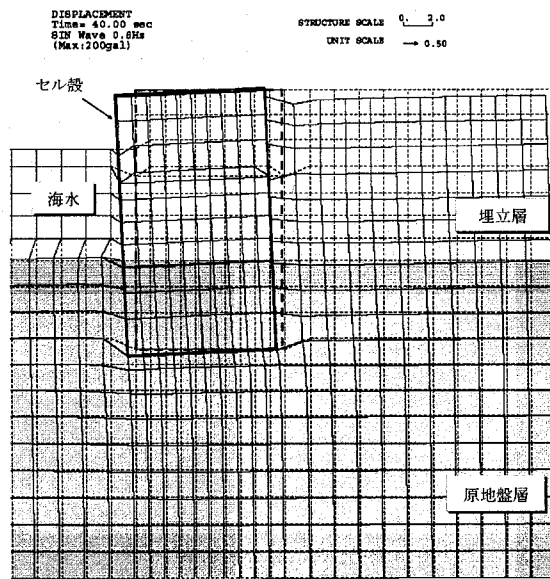
(1) 式は、セルの天端変形量にはセル直下の地盤変形量とセル殻の傾斜による変形量の 2 つの成分が含まれていることを示している。表-9 よりわかるように、セルの天端変形量には、根入れの増加によって減少する成分 δ_1 と増加する成分 δ_2 の合成によって決まっており、天端変形量は、結果的に根入れの増加によって減少している。ここで表-8 の傾斜による変形量 δ_2 の傾向に着目すると、現行設計法による根入れと変形量の関係と同じ傾向であり、現行設計法ではセルの傾斜（回転）の変形量しか考慮しておらず、地盤変形の成分を十分に取られていないと考えられる。

表-9 地震応答解析結果(換算壁体幅 $B=10.13\text{m}$)

根入れ長 $D(\text{m})$	2.0	4.0	6.0
天端変形量 $\delta(\text{cm})$	77.4	71.0	65.0
セル直下中央部の地盤変形量 $\delta_1(\text{cm})$	36.0	25.0	19.0
傾斜による変形量 $\delta_2(\text{cm})$	32.8	35.6	38.3



(a) $D=2.0\text{m}$, $B=10.13\text{m}$, $H=11.5\text{m}$



(b) $D=6.0\text{m}$, $B=10.13\text{m}$, $H=11.5\text{m}$

図-10 残留変形図の一例

次に、図-10に残留変形図の一例を示す。変形図からもセルの天端変形量がセル殻の傾斜のみではなくセル直下の地盤の変形も影響していることは明らかである。また、根入れの大きい断面（図-10(b)）は、根入れの小さい断面（図-10(a)）と比較してセル直下中央部の地盤変位が小さいことがわかる。

(4) 変形量についてのまとめ

セルの現行設計法による変形量と地震応答解析による変形量を比較した。その結果、現行設計法による変形量の計算結果は、根入れを増加させると変形量が増加する結果を得ることがわかった。また、その問題の原因は、現行設計法ではセルの変形量としてセルの傾斜（回転）による変形量のみを考え、地盤の変形量成分を取り入れていないところにある。

4. セル式岸壁の根入れ効果の検討

以下では、主に地震応答解析の結果からセルの根入れが岸壁の変形に与える効果について述べる。入力地震動としては正弦波 0.6, 0.8, 1.0Hz, 不規則波としては八戸波を用いた検討を行っているが、全て類似の傾向を示したので、ここでは代表として正弦波 0.8Hz (200Gal) を入力した結果を示す。主な着目箇所はセル前面とセル直下中央部の地盤である。なお、セルの根入れ長が岸壁の変形に与える効果を際立たせるために、換算壁体幅を一定にして根入れ長を変化させた場合の解析結果を用いる。

4.1 地震作用前の地盤の応力状態

根入れ長の違いによる地震作用前の地盤の初期応力状態について、図-11に示す着目点における応力深度分布を、図-12～図-13に示す。図-12の τ_{xy} の深度分布からセル前面の根入れ下端付近では地震作用前から比較的大きなせん断応力が発生している。同箇所は、主働土圧によって押されたセル壁体に対して地盤が抵抗する箇所なので、応力が集中することは自然であるが、根入れによる差の傾向はばらついている。

次に、図-13の τ_{xy} の深度分布からセル根入れ下端付近で大きなせん断応力が発生していることがわかり、根入れ長が増加すると、若干ながらせん断応力が減少する傾向にある。根入れ下端付近で大きなせん断応力が発生している理由は、セルに作用する土圧が、セル底面を介してせん断応力（土圧合力/セル壁体幅）として地盤に作用していることによるものと考えられる。根入れが増加すると、セルに作用する主働土圧が増加するものの、受働抵抗も増加するので、セル壁体に作用する土圧合力

は減少するものと考えられる。表-10に3.1における現行設計法による断面設定の際に計算した主働土圧、受働土圧の各合力およびその差を示す。主働および受働土圧合力の差は根入れが小さい場合程大きい。この土圧合力の差が、セル底面を介して地盤へ作用するせん断力と考えれば、底面の幅すなわち換算壁体幅が同一の条件では、根入れが小さい方が大きなせん断力を受けることになる。よって、同じ換算壁体幅を有する断面では、根入れの小さい断面の方が、地震作用前に根入れ下端付近の地盤で大きなせん断応力が発生する傾向にある。

表-10 セル壁体に作用する土圧合力

根入れ長 $D(m)$	2	4	6
主働土圧合力 $P_a(kN/m)$	557.5	711.4	865.0
受働土圧合力 $P_p(kN/m)$	75.29	321.2	677.6
差($P_a - P_p$)	482.1	390.2	187.4

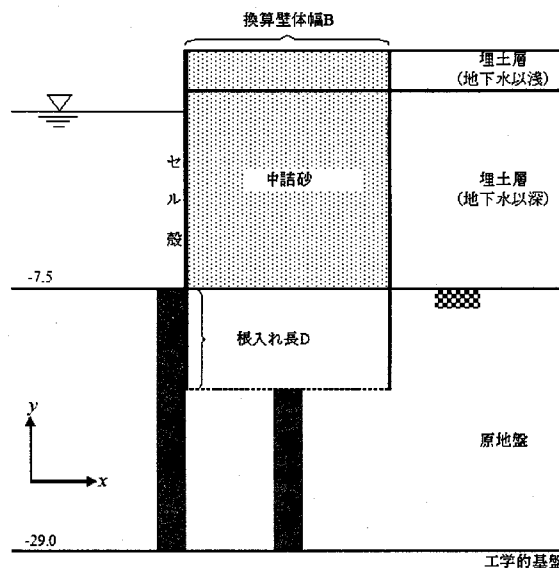


図-11 自重解析結果の着目箇所

4.2 応答加速度時刻歴

図-14の着目点における応答加速度時刻歴について検討した。着目点は、セル中心線に沿った地盤および中詰砂を構成する各要素の節点である。図-15に根入れ長 $D=2.0m$ と $D=6.0m$ の各着目点の応答加速度時刻歴を示す。これらを見ると、基盤から入力された地震動は原地盤内で増幅しつつ伝播し、根入れ下端付近で一旦減衰するが、セルへ入力した後は、セル天端へ行くにしたがって大きくなっている。また、セルは地盤の揺れよりもやや長く揺れ続けており、これはセルの根入れ長に関係なく同様の傾向を示す。着目点1（セル天端）における応答加速度

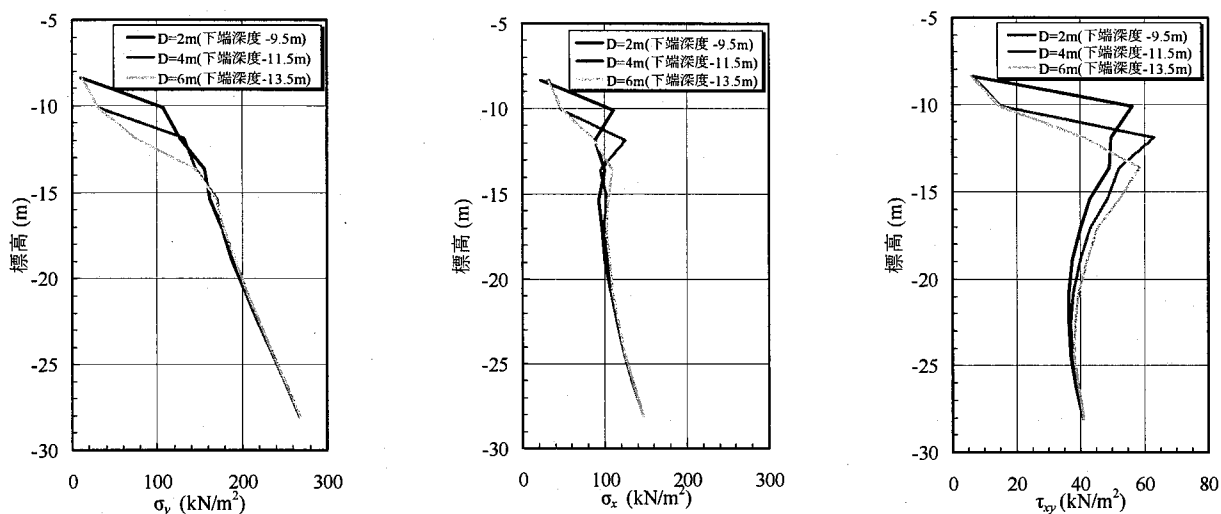


図-12 セル前面における地震作用前の地盤応力深度分布

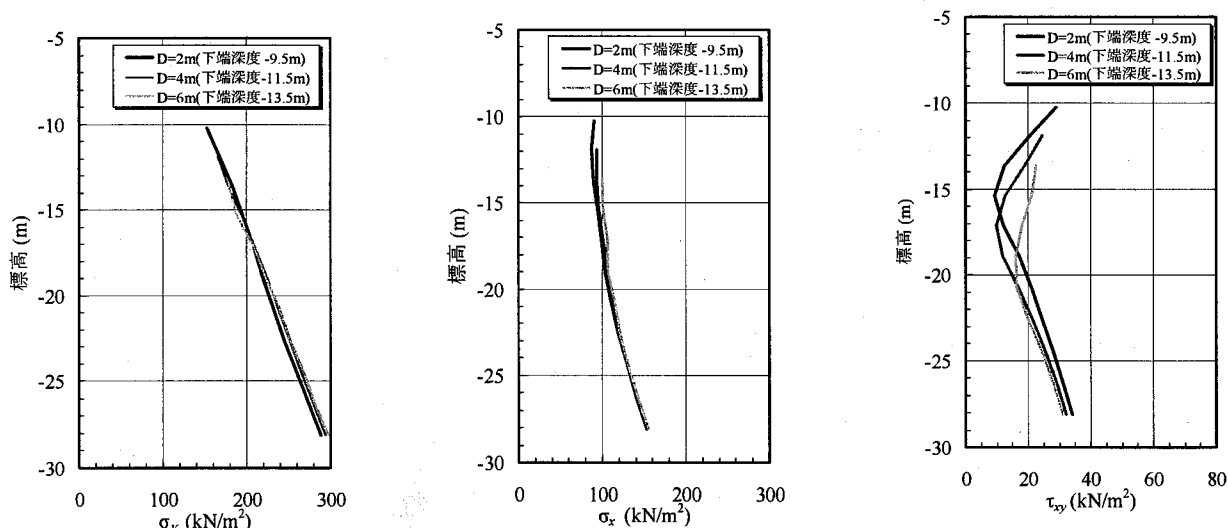


図-13 セル中央部直下における地震作用前の地盤応力深度分布

の最大値は、根入れの大きい断面の方が大きく、同レベルの地震動が作用した場合は、根入れの大きい断面の方が根入れの小さい断面よりもセル壁体に作用する慣性力が大きくなることがわかり、これにはセル壁体のロッキングの影響も考えられる。なお、ロッキングについては、セル天端の海側と陸側の節点における鉛直変位の時刻歴から両者の時刻歴波形の位相が 180° ずれることにより確認している。セル壁体に作用する慣性力は、セルの傾斜に寄与すると考えられ、根入れを増やした場合に傾斜による変形量が増加する一つの理由と考えられる。

4.3 地震応答解析後のせん断応力

地震応答解析後の地盤の応力状態について根入れ長との関係の観点から調べた。図-16 に示す着目箇所における残留せん断応力の深度分布を図-17 に示す。比較のため自重解析時の応力分布も併記した。実線が地震応答解析後、破線が自重解析後の値である。地震応答解析後に

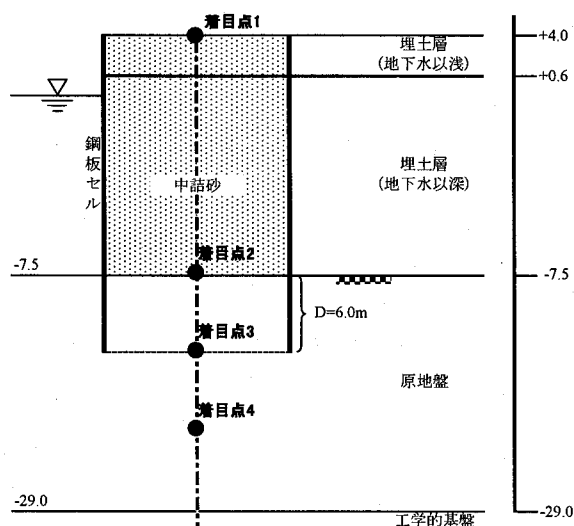
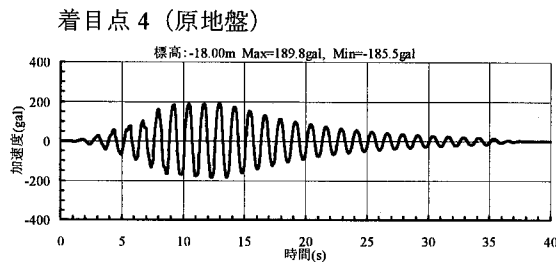
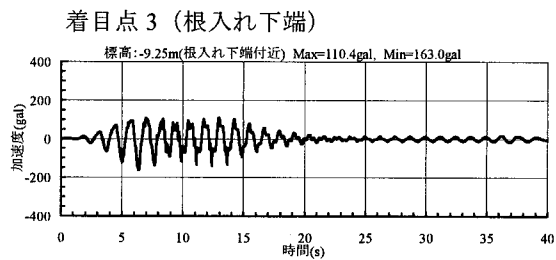
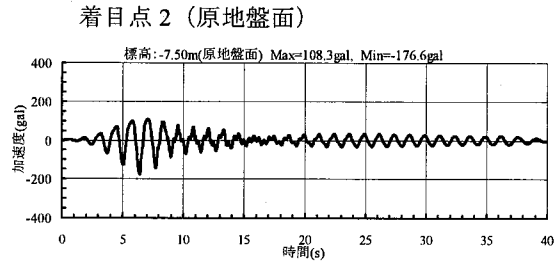
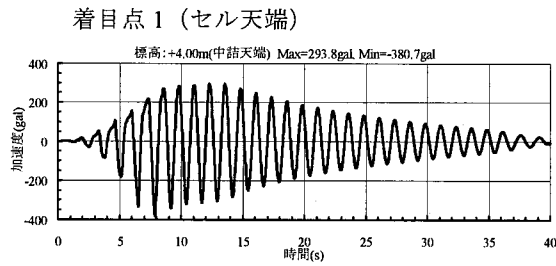
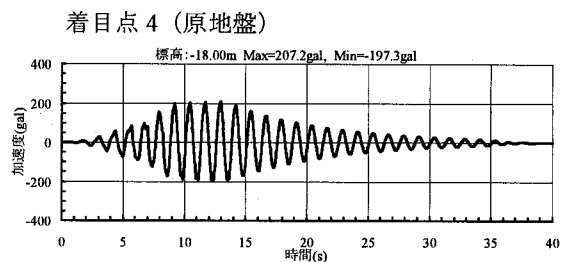
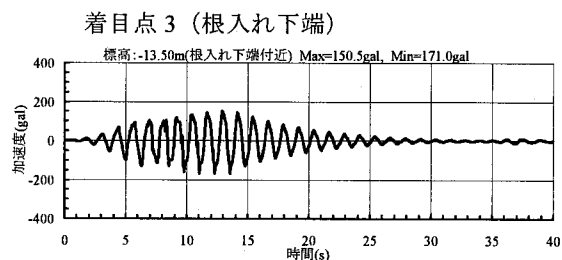
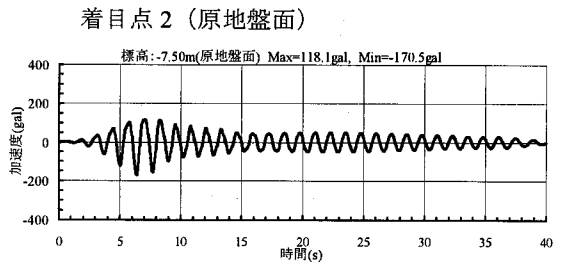
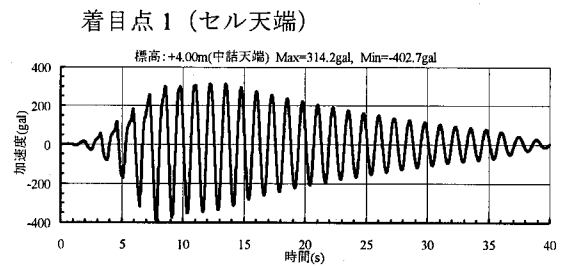


図-14 加速度時刻歴の着目点



(a) 根入れ長 $D=2.0\text{m}$



(b) 根入れ長 $D=6.0\text{m}$

図-15 応答加速度時刻歴

セル前面において発生する τ_{xy} は、根入れ下端付近で自重解析時と比較して減少し、応力レベルは根入れ長による差がない。セル中央部直下において発生する動的解析後の τ_{xy} は、自重解析後と比較してそれぞれの根入れ下端から $3\text{m} \sim 5\text{m}$ 付近までは増加するがそれ以深では逆に減少する。また、自重解析後の深度分布と違い、根入れ長の違いによる根入れ下端付近での τ_{xy} の差は減少しており、根入れ長に関係なく同程度のせん断応力が発生している。

4.4 せん断ひずみ時刻歴

図-18 にせん断ひずみ時刻歴を示す。着目箇所はセル前面とセル中央部直下の根入れ下端の地盤である。せん断ひずみの初期値および残留値は、根入れの大きな場合の方が小さいことがわかる。これは、根入れの大きな場

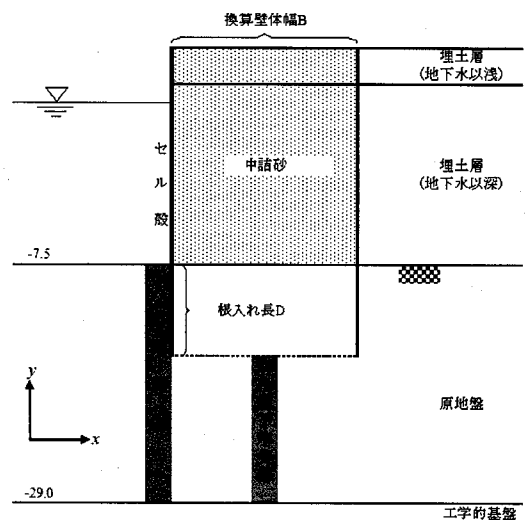
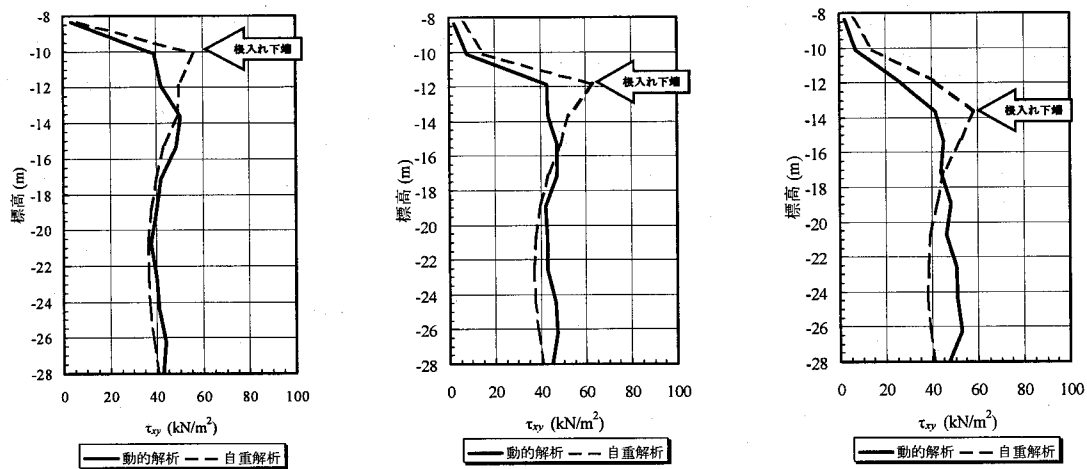
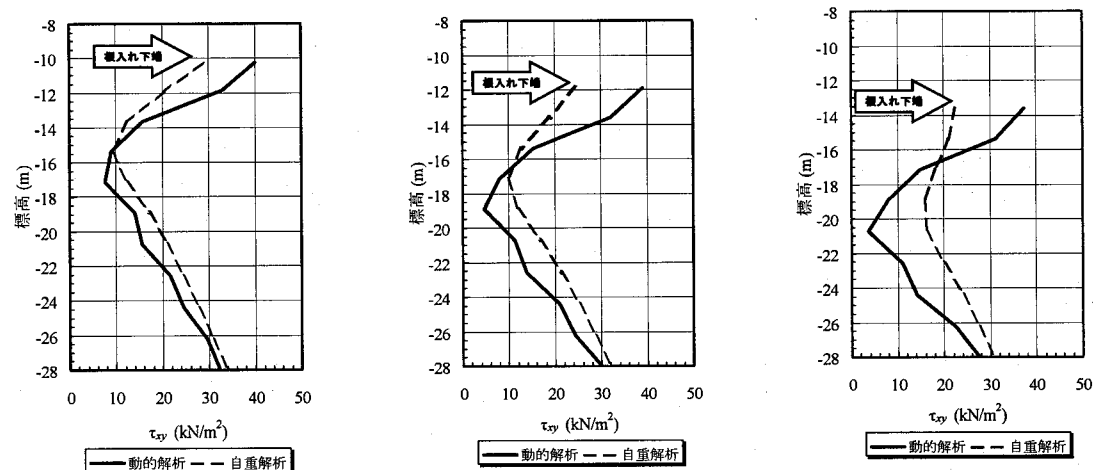


図-16 せん断応力深度分布の着目箇所



(a) セル前面



(b) セル中央部直下

図-17 せん断応力の深度分布

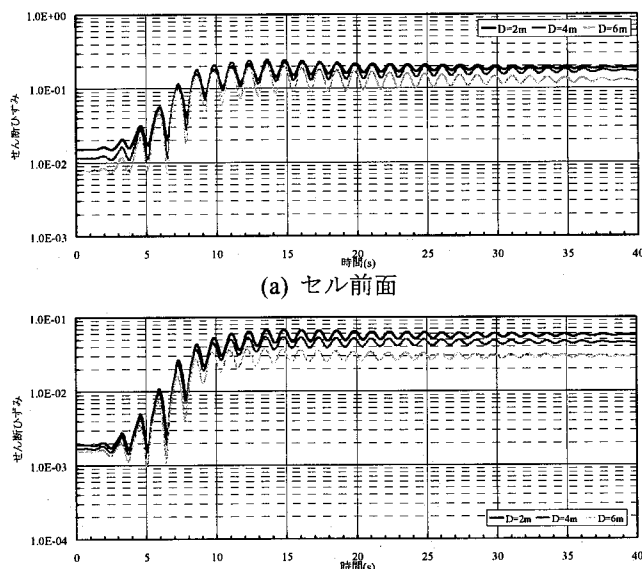


図-18 せん断ひずみ時刻歴

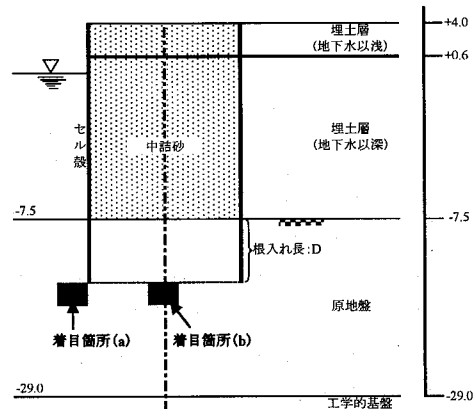


図-19 せん断ひずみ時刻歴の着目箇所

合では根入れ下端の地盤が地中の深い位置にあるため、砂質土では有効拘束圧が高くせん断強度も大きい。よつ

て、根入れ下端付近に同程度のせん断応力が発生した場合、根入れの小さい場合の方が変形しやすいことになる。

セルの根入れがセル壁体下部の地盤変位量の抑制に効果がある理由は、この点から説明できると考えられる。また、セル前面とセル中央部直下のひずみレベルを比較するとセル中央部直下の方が小さい。これは、セル壁体の上載荷重によってセル中央部直下の地盤が、セル前面の地盤に比べて有効拘束圧が高いことが理由に考えられる。

5. まとめ

セルの従来法による天端変形量の算定方法は、破壊メカニズムとの調和性に欠ける可能性がある。それは、天端変形量としてセル壁体の傾斜（回転）による変形量のみを考慮し、地盤の変形量を適切に取り込めていないことが原因と思われる。セルの天端変形量については、セル壁体の傾斜（回転）による成分と、セル直下の地盤変形の成分に分けて考え、両者の和をもって議論することが妥当である。

セルの耐震性能に与える根入れの効果の一つは、地盤のせん断応力の発生箇所を、地中の深い位置に下げることにある。砂質土を考えた場合、地中の深い位置では有効拘束圧が高く、地盤のせん断強度が大きい。根入れ下端では、地震によって発生するせん断応力に、根入れによる差は少なく同程度の応力が作用することを考えれば、せん断応力の発生位置を地中の深い位置へ下げ、強度の高い箇所でせん断応力を受け持たせることは、地盤の変形に対して効果があると考えられる。

今後の課題としては、セルの根入れの効果が十分に考慮された照査用変形量の算定法の提案が挙げられる。変形量の算定については FEM による 2 次元地震応答解析を実施することが望ましいが、設計実務の面からはやや難がある。そこで設計実務に適した簡便な照査用変形量の算定法の提案が求められる。例えば、セル壁体の傾斜による変形量については、従来法のようなスキームで変位を評価し、それにセル直下の地盤変形量を付加するようなハイブリッド案が考えられる。セル直下の地盤変形量については、初期せん断応力を与えて 1 次元の非線形応答解析により変形量を算定する方法の確立が課題となる。

参考文献

- 1) 国土交通省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説，(社)日本港湾協会，2007（印刷中）
- 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) 北島昭一，野田節男，中山種清：根入れ鋼板セルの静的挙動，港湾技研資料，No.375，1981
- 4) 高橋邦夫，野田節男，神田勝巳，三浦聡，水谷太作，寺崎滋樹：鋼矢板セル模型の水平載荷実験－その 1 静的挙動－，港湾技研資料，No.638，1989
- 5) 野田節男，北澤壮介，飯田 毅，森 信夫，田淵 博：根入れ鋼板セルの耐震性に関する実験的研究，港湾技研所報告，第 21 巻，第 3 号，pp.79-167，1982
- 6) 長尾 毅，北村卓也：セル式岸壁の最適断面設定方法に関する研究，海洋開発論文集，第 20 巻，pp.203-208，2004
- 7) 野田節男，飯田 毅，倉田栄一，武藤裕之，森 信夫，田淵 博：根入れ鋼板セル護岸の地震時挙動の観測，第 7 回日本地震工学シンポジウム論文集，pp.1945-1950，1986
- 8) 風間基樹，稲富隆昌：剛体－地盤ばねモデルを用いた根入れのある剛体構造物の地震応答解析，土木学会論文誌，第 410 巻/I-12，pp.425-434，1989
- 9) 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
- 10) Iai, S, Matsunaga, Y and Kameoka, T : Strain space plasticity model for cyclic mobility, Soils and Foundations, Vol .32, No.2, pp.1-15, 1992
- 11) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 IV 下部工編，1980
- 12) 森田年一，井合 進，H. Liu，一井康二，佐藤幸博：液状化による構造物被害予測プログラム FLIP において必要な各種パラメタの簡易設定法，港湾技研資料 No.869，1997
- 13) 一井康二，井合 進，森田年一：有効応力解析によるケーソン式岸壁の被災原因分析，阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集，pp.397-404，1996
- 14) 沿岸開発技術研究センター：埋立地の液状化対策ハンドブック（改訂版），1997
- 15) 長尾 毅，岩田直樹：重力式及び矢板式岸壁のレベル 1 地震動に対する耐震性能照査用震度の設定方法，構造工学論文集 Vol.53A，pp.339-350，2007

（2007 年 4 月 12 日 受付）