

1. はじめに

今般、港湾構造物の技術基準が改訂されようとしており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る。性能規定型設計への移行を考えた場合、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必要である。セル式岸壁においても性能規定型設計への移行を迫られることになり、破壊メカニズムとの調和のとれた方法に従って変形量を精度よく算定することが求められる。

現在採用されているセル式岸壁の耐震設計²⁾においては、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。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こととしており、性能設計体系への移行については比較的問題が少ないことが想定される。

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ついて、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の合理的な評価が行われているか確認しておくことが必要と考えられる。現行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⁾⁴⁾⁵⁾を参照して合理的な方法が構築されているといえるものの、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。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ためには、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、その効果を再度確認することは、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⁶⁾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

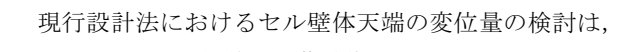
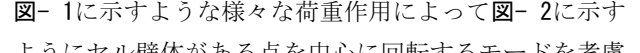
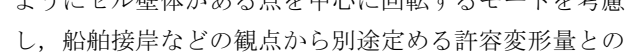

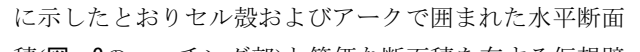
動を対象としており、レベル2地震動のような大きい地震レベルにおける挙動の再現性確認には至っていない。また風間ら⁷⁾は、根入れのある剛体構造物の地震時安定性について、剛体-地盤バネ系にモデル化した解析を行っている。これは自由地盤の応答変位を強制変位として、単位長さ当りの地盤バネを介して構造物に作用させる方法であるが、このモデルについても小規模な地震における線形挙動の範囲内における適用性確認にとどまっている。一方、北村ら⁸⁾は地盤の非線形性を考慮した地震応答解析によって、兵庫県南部地震におけるセル式岸壁の解析を行い、大変形が生じた被災状況を精度良く解析している。

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FLIP⁹⁾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。その上で根入れ効果という観点から、現行設計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の検討は、に示すような様々な荷重作用によってに示すようにセル壁体がある点を中心に回転するモードを考慮し、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。なお、にある換算壁体幅とは、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()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。ここで根入れ長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、回転のモードを考えると、根入れ長が増加しても回転に抵抗するモーメントのアーム長はあまり増加を見込むことができず、根入れ長増加による回転に対する抵抗力の増加が期待できない。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換算壁体幅が増える傾向となっている。

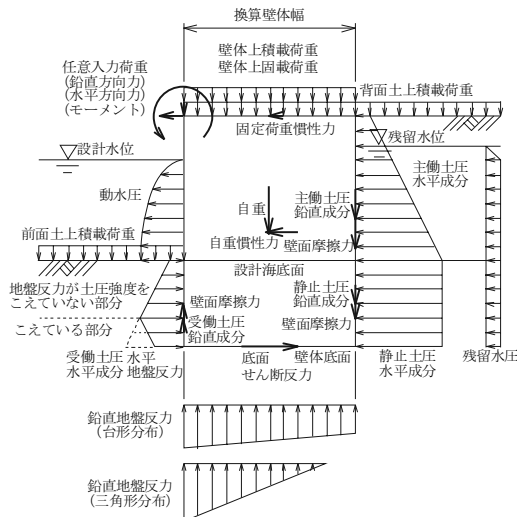


図-1 荷重モデル

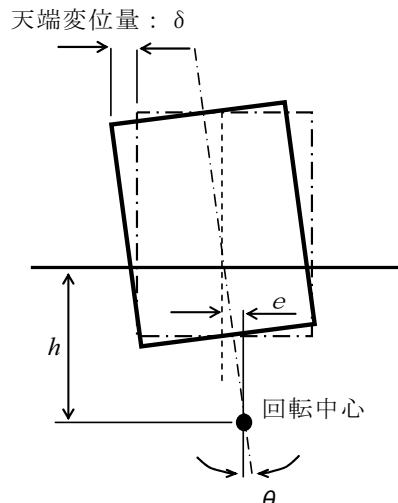


図-2 セルの回転中心

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、回転中心点の位置と回転量を未知数にして、回転中心に対する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し、その変位時における地盤のバネ値を算出し、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。ここでいう回転中心とは、図-2に示す通り、セル壁体の中心軸から偏心量 e 、設計海底面からの深さ h の点を指す。

現行設計法による壁体の変形量の照査式やモデルは、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、円形のセル模型を砂地盤に根入れさせ、油圧ジャッキによってセルが破壊に至るまで水平荷重を行ったものであり、実験結果は図-4に示す通り根入れ比（根入れ長 D ÷ 海底面からのセル壁高 H ）毎に荷重と天端水平変位の関係（ $P-\delta$ 曲線）として整理されている。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¹⁰⁾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 $P-\delta$ 曲線における直線性を保つ範囲については良い一致をみていることがわかっている。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るとしている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。

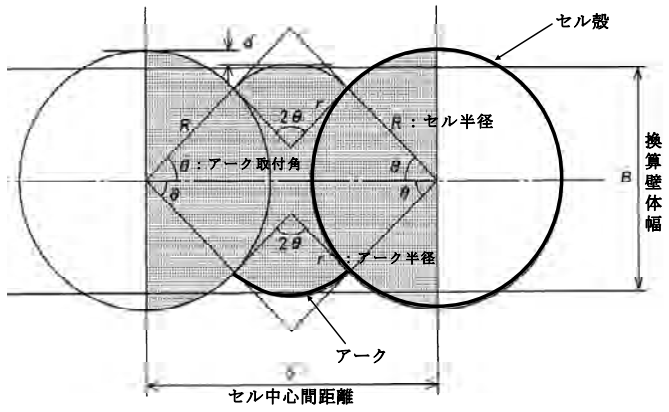


図-3 セルの面積と換算壁体幅

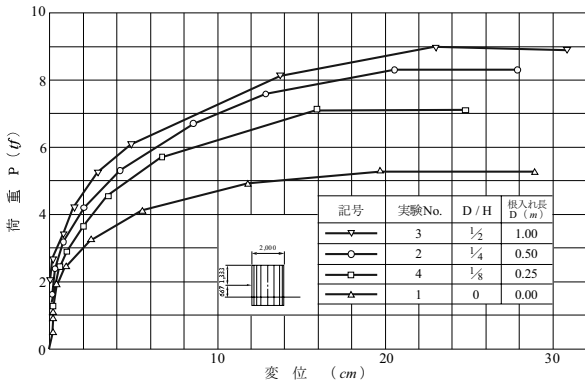


図-4 既往の実験結果³⁾

3. セル式岸壁の変形量

セル式岸壁の変形量について、まず現行設計法によって根入れの異なる断面を設定し、現行設計法における根入れと変形量の関係を確認する。次に現行設計法によって設定された断面を用いて2次元地震応答解析を実施し、根入れと変形量の関係と現行設計法による結果との違いを確認する。

3.1. 検討方法

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 の条件で表-2のように設定した。検討断面の模式図を図-5に示す。地盤条件は、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-3のように設定した。地震応答解析に用いた地盤パラメータは表-1に示す。これは現在 FLIP において、標準的に用いられている設定方法¹¹⁾に従ったものである。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⁸⁾らが実施した検討事例を参考に以下のように設定した(図-6参照)。なお、北村らは兵庫県南部地震で被災したセル式岸壁の再現解析で同様のモデル化を行い、実際の被災状況と整合する結果を得ている。以下に、梁①~③の性状について記す。

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

ここで、梁①の原地盤および中詰砂と接する部分には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。入力加速度波形は図-7に示す正弦波とし、基盤より 2E で入射した。加速度波形の最大振幅は 200Gal、周波数は 0.8Hz、継続時間は 40 秒である。

表-2 検討断面

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-3 地盤のせん断波速度

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

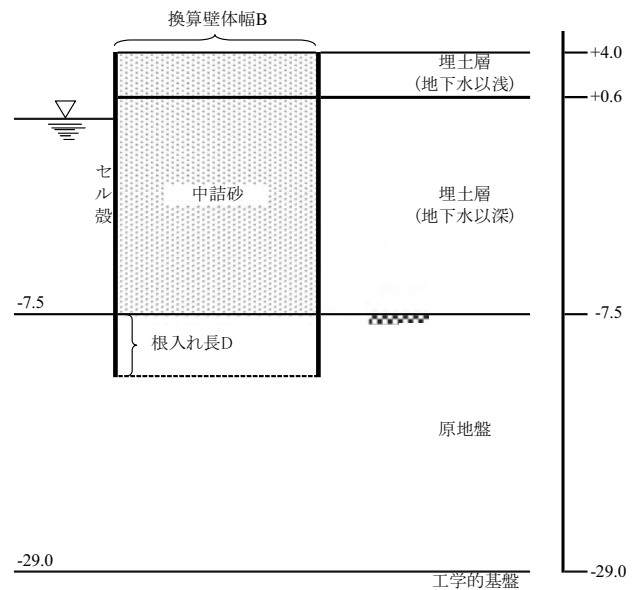


図-5 検討断面模式図

表-1 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 (°)	最大減衰
埋立層	2.0	89.8	25920	67595	0	37	0.24
原地盤層	2.0	239.8	45000	117353	0	38	0.24

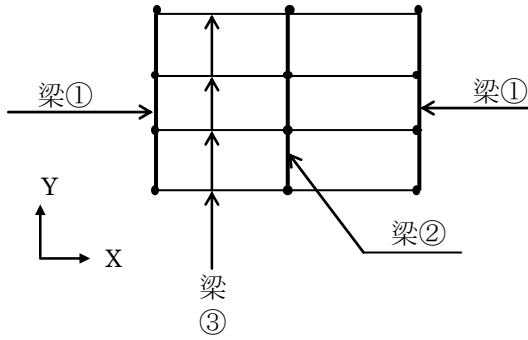


図- 6 FLIPによるセル殻のモデル化

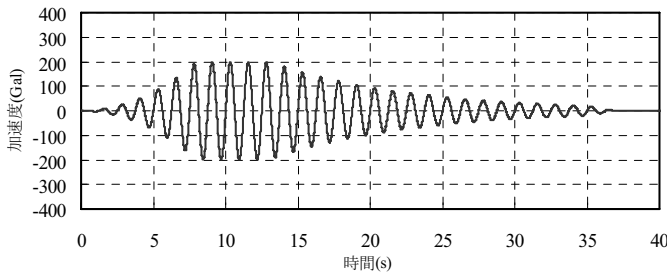


図- 7 入力加速度波形

3.2. 現行設計法による計算結果

表- 2で設定した断面の地震時の天端変形量と傾斜角について現行設計法によって求めた結果を表- 4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)と天端変形量 δ の比であり、現行設計法における許容値は1.5%以下となっている。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- 4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、根入れ長の増加に伴って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しなければならない。

次に、換算壁体幅について根入れ長 2m の条件における現行設計法による値($B=8.75\text{m}$)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- 5に示す。この場合は、表- 4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、現行設計法では同じ作用(設計震度)の場合、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震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。

表- 4 現行設計法によるセル変形量計算結果

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 (%)	0.02	0.01	0.01
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- 5 現行設計法による天端変位と傾斜角(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

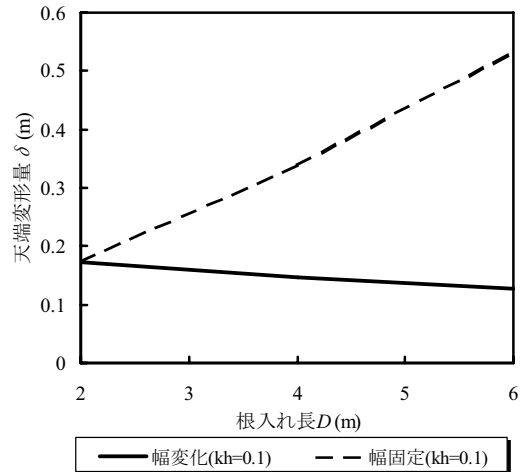


図- 8 現行設計法による天端変形量比較

3.3. 地震応答解析による計算結果

3.2で用いた断面について、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。解析結果は表- 6に示す。ここで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。先にも示した通り地震応答解析における入

力地震動は最大加速度値 200gal の正弦波である。よって、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）とは異なるものとなっており、解析結果における天端変形量やセル傾斜角の値そのものは 3.2 で示した値とは異なる。ただし、根入れ長の増加に伴い天端変形量やセル傾斜角が減少する傾向については、前出の現行設計法による計算結果と同じ傾向を示しているが、根入れ長 D や換算壁体幅 B の増加に伴う変形の減少率は、3.2 の場合よりも高い。

次に、3.2 と同様に換算壁体幅を固定して根入れ長のみを変化させた場合を考え、その解析結果を表-7 に示す。ここでは換算壁体幅を現行設計法において設定された根入れ長 $D=4\text{m}$ の断面における値($B=10.13\text{m}$)に固定して、地震応答解析を実施した。この場合は、現行設計法による評価とは結果が異なり、根入れ長の増加に伴って天端変形量が減少する結果となった。これは、2.2 で述べた既往の実験結果と調和する結果である。

表-6 地震応答解析による天端変位と傾斜角

セル壁高 $H(\text{m})$	11.5		
根入れ長 $D(\text{m})$	2	4	6
換算壁体幅 $B(\text{m})$	8.75	10.13	11.05
天端変形量 $\delta(\text{m})$	0.864	0.710	0.609
セル傾斜角 $\theta(^{\circ})$	1.72	1.32	1.10
傾斜による変形量 (m)	0.407	0.356	0.337

表-7 地震応答解析による天端変位と傾斜角(幅固定)

セル壁高 $H(\text{m})$	11.5		
根入れ長 $D(\text{m})$	2	4	6
換算壁体幅 $B(\text{m})$	10.13		
天端変形量 $\delta(\text{m})$	0.774	0.710	0.650
セル傾斜角 $\theta(^{\circ})$	1.39	1.32	1.25
傾斜による変形量 (m)	0.328	0.356	0.383

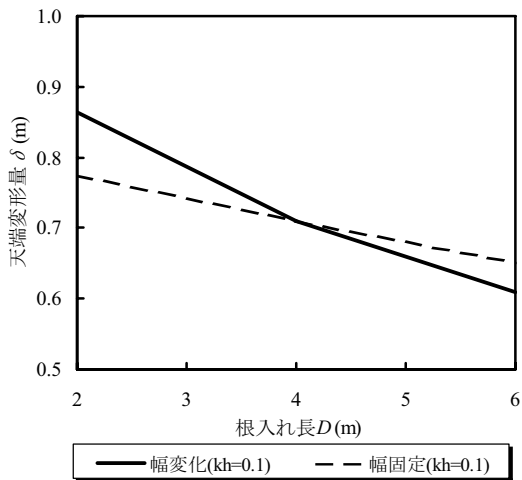


図-9 地震応答解析の天端変形量と根入れ長の関係

3.4. 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、表-8 に換算壁体幅を固定した場合の変形量を示す。ここで、傾斜による変形量が根入れ長の増加に伴って増加しているのは、根入れの増加によって傾斜角自体は減少するものの、剛体として挙動するセル殻の寸法が大きくなるためであると考えられる。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。

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

なお、 δ_1 は FLIP による地震応答解析の結果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。セルの天端変形量に関しては、傾斜による成分は根入れ長の増加に比例するが、地盤による成分は根入れ長の増加に反比例し、結果的に両者の合成である天端変形量は、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入れていないと考えられる。

表-8 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

3.5. 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. 根入れによる効果

ここでは、地震応答解析の結果からセルの根入れが変形に与える効果について述べる。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。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、以下では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についてまとめる。

4.1. 自重解析時の地盤の応力状態

根入れ長による違いによる地震作用前の地盤の初期応力状態について、各応力の深度分布を、図-10～図-12に示す。図-10(a)と図-11(a)から、セル前面の各根入れ下端付近における地盤では、 $K_0=1.0$ となっている。また、図-12(a)を見るとセル前面の根入れ下端付近では、根入れの大きさを問わず地震作用前から比較的大きめのせん断応力が発生している。これは、セル前面の根入れ下端付近は、主働土圧によって押されたセルに対して地盤が抵抗する箇所なので応力は集中する。

次に、図-10(b)と図-11(b)からセル直下中央部の各応力状態は、根入れの大きさによる違いが少ない。また、図-12(b)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、根入れ長が大きくなると、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と考えられる。よって根入れが大きい場合は、受働抵抗も大きくなるので、セル下端付近のせん断応力も小さくなる。表-9に各断面における主働土圧合力、受働土圧合力およびその差を示す。なお、これらの土圧は3.1検討方法において現行設計法による断面設定の際に計算された値である。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じという条件では、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。

表-9 土圧合力

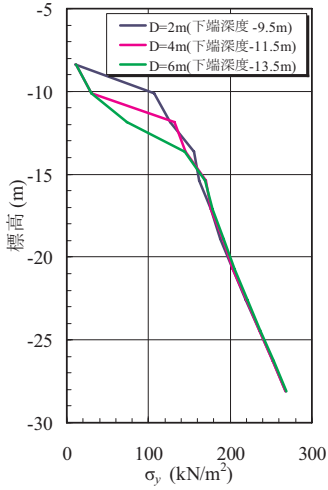
根入れ長 $D(m)$	2	4	6
主働土圧合力 $P_a(kN/m)$	557.5	711.4	865.0
受働土圧合力 $P_p(kN/m)$	75.29	321.2	677.6
差(P_a-P_p)	482.1	390.2	187.4

4.2. 応答加速度時刻歴と変位時刻歴

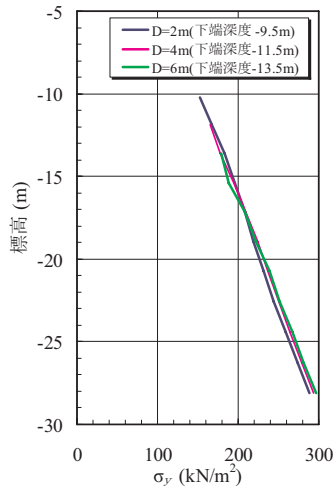
図-13～図-15に根入れ長別の各着目点における応答加速度時刻歴を示す。着目点は、セル中心線に沿った地盤と中詰砂を構成する各要素の節点とセル天端海側のセル殻の節点である。これらを見ると、基盤から入力された地震動は原地盤内で増幅しながら伝播し、セル下端付近で一旦減衰する。セルへ入力した後の加速度は、セル天端へ行くにしたがって大きくなっており、セルは地盤の揺れよりもやや長く揺れ続けている。これはセルの根入れ長に関係なく同様の傾向を示す。ここで、各根入れ長のケースの(d)着目点3に注目する。着目点3は、標高-7.5mの原地盤面のレベルであるが、根入れ長が大きい場合の方が、同箇所における加速度の応答値が大きいことがわかる。また、(a)着目点1および(b)着目点2のセル天端においても根入れが大きい断面の方が応答加速度の最大値が大きく、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と比較してセル壁体の応答加速度が大きいことがわかる。

次に、図-16～図-18に根入れ長別の各着目点における応答水平変位時刻歴を示す。各着目点は、加速度時刻歴と同様である。これらを見ると、原地盤からセル天端へ向かうにつれて水平変位量は一律に増加しており、これは根入れ長の大小によらず共通の傾向である。ただし、各ケースにおける根入れ下端より上の水平変位時刻歴をみると、根入れ長が大きい場合の方が、変位量は減少しており残留変位量についても小さい。

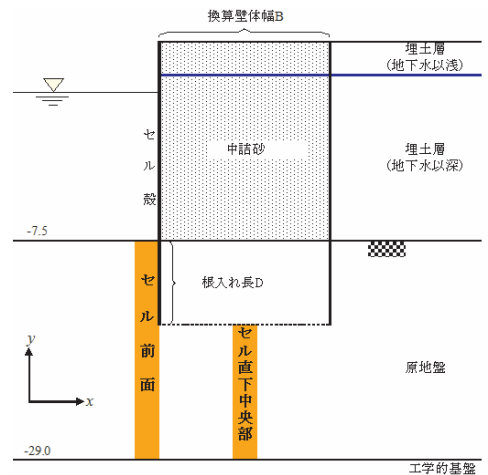
図-19に、根入れ長別の各着目点における応答鉛直変位時刻歴を示す。着目点は、セル天端の海側と陸側のセル殻の節点である。根入れ長の大小に関わらず、海側の鉛直変位量が陸側よりも大きい結果となる。また、水平変位と同様に根入れが大きい場合の方が変位量は小さい。一方、海側と陸側の鉛直変位時刻歴波形を見ると、根入れ長の大小に関係なく両者の位相が 180° ずれていることが確認できる。これは、地震動によってセル本体がロッキングを起こしていることを示唆している。



(a) セル前面

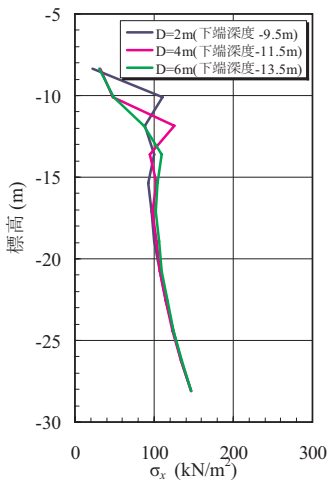


(b) セル中央部直下

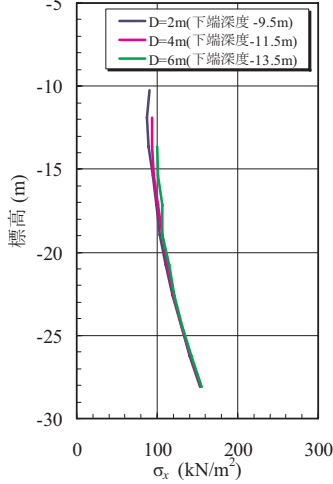


着目位置図

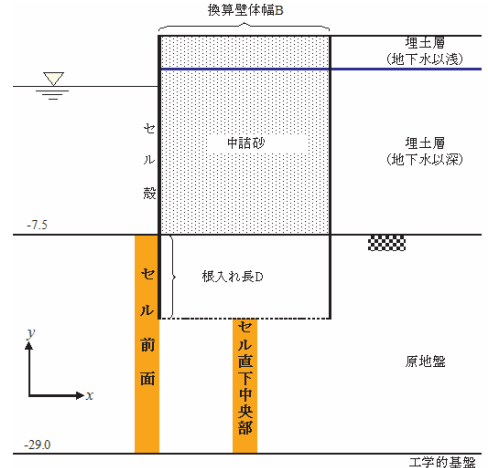
図-10 自重解析後の σ_y 深度分布



(a) セル前面

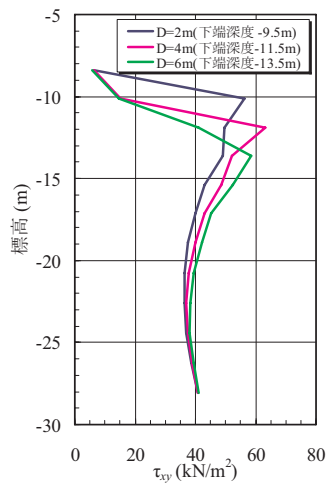


(b) セル中央部直下

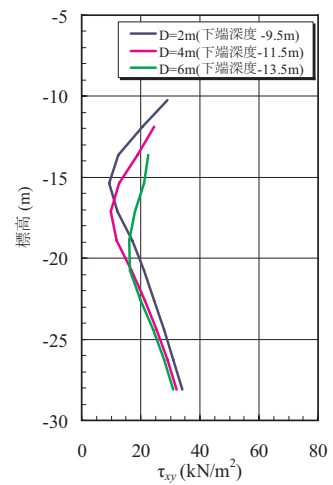


着目位置図

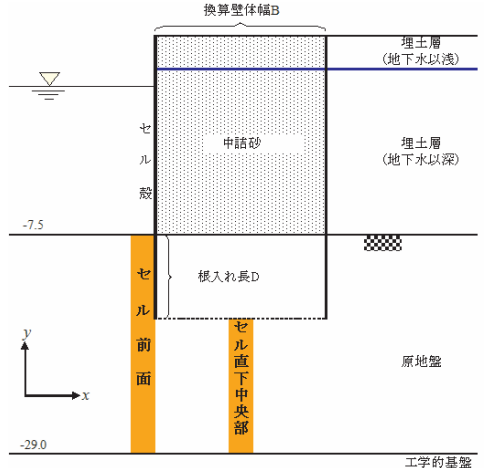
図-11 自重解析後の σ_x 深度分布



(a) セル前面



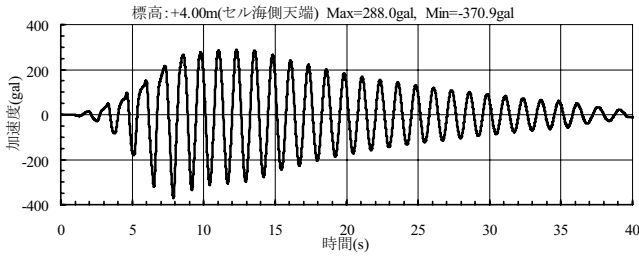
(b) セル中央部直下



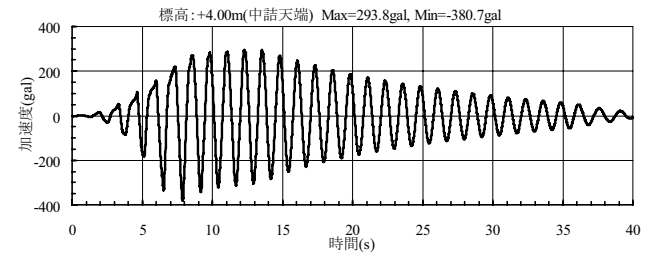
着目位置図

図-12 自重解析後の τ_{xy} 深度分布

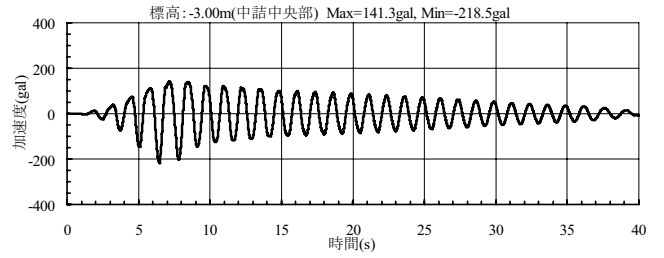
(a) 着目点 1-1



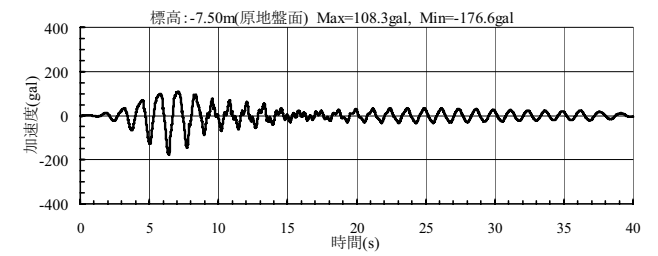
(b) 着目点 1-2



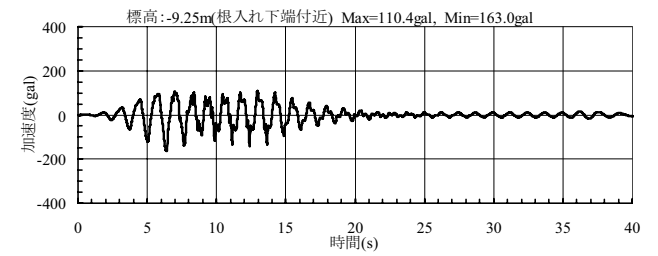
(c) 着目点 2



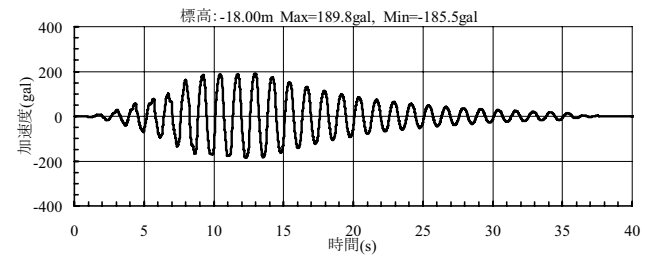
(d) 着目点 3



(e) 着目点 4



(f) 着目点 5



(g) 着目点 6

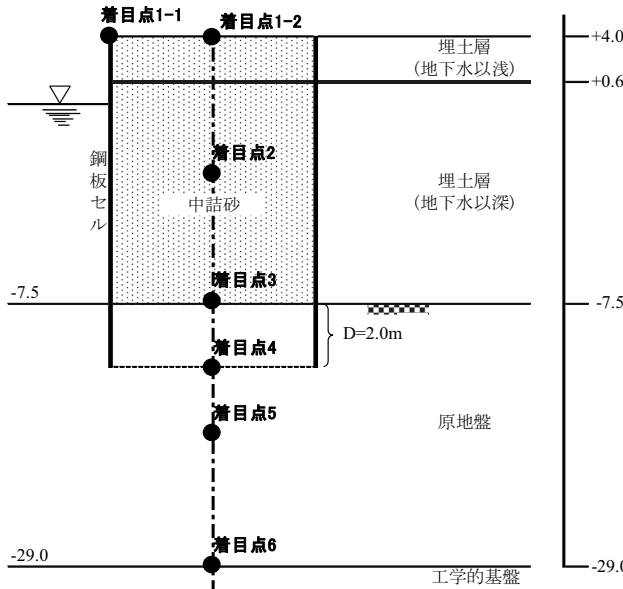
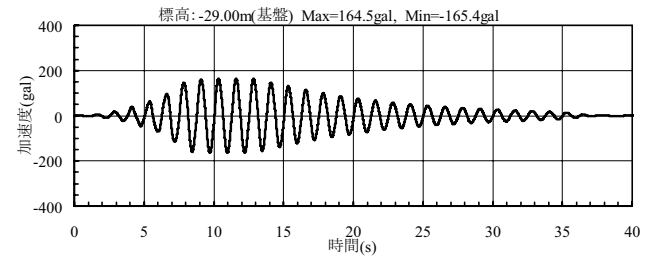
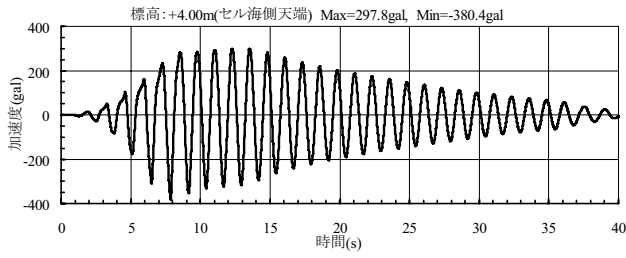
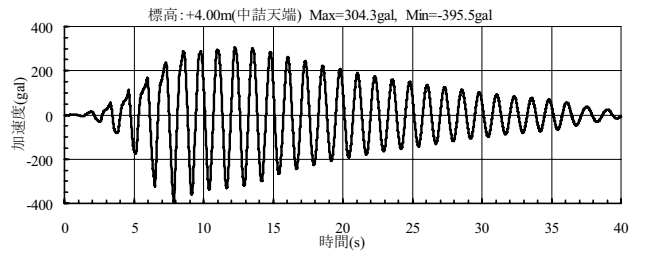


図- 13 応答加速度時刻歴 (D=2.0m)

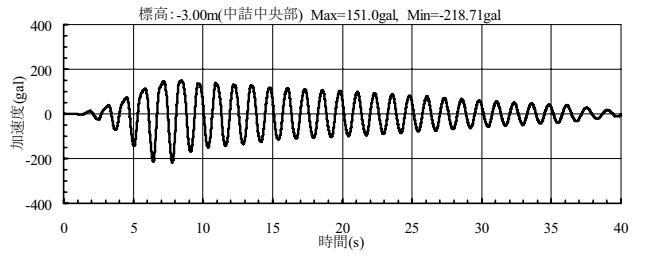
(a) 着目点 1-1



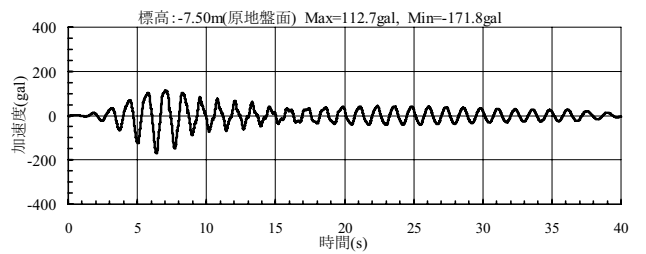
(b) 着目点 1-2



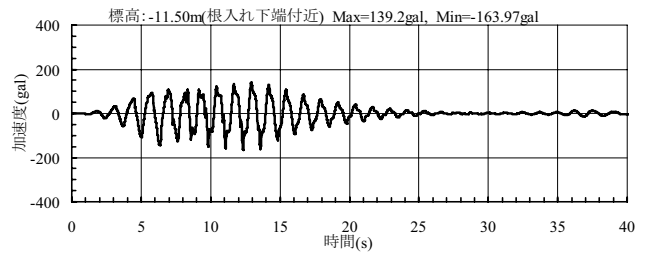
(c) 着目点 2



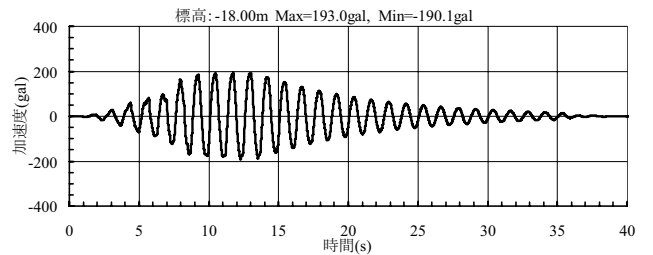
(d) 着目点 3



(e) 着目点 4



(f) 着目点 5



(g) 着目点 6

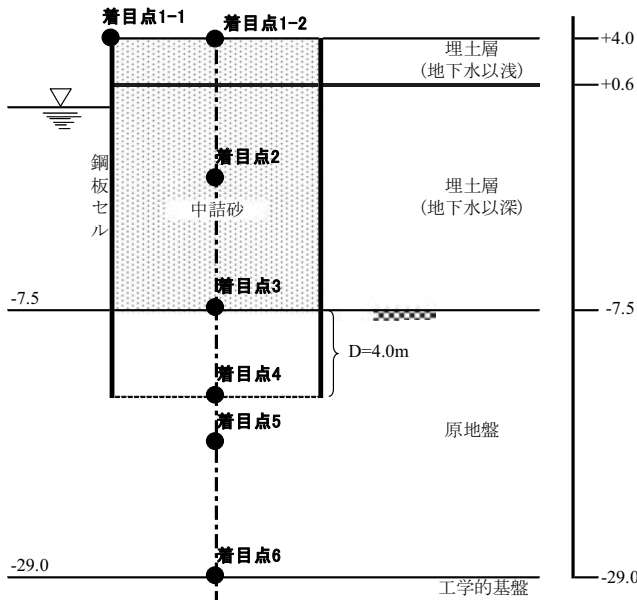
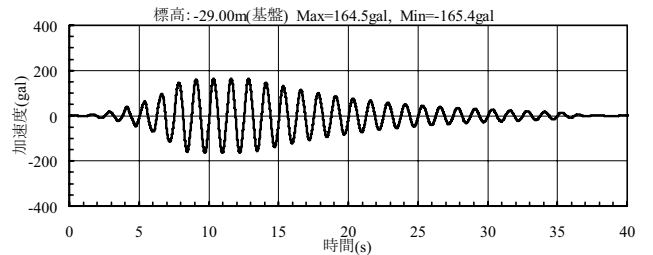
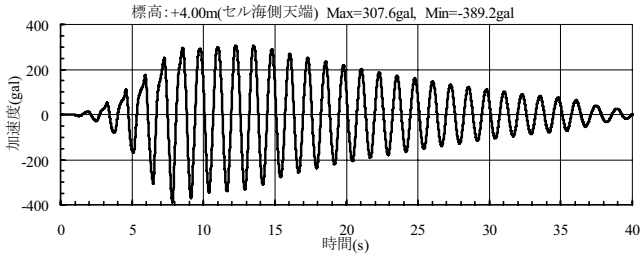
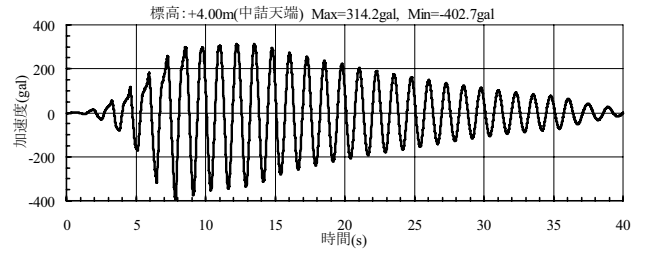


図- 14 応答加速度時刻歴 (D=4.0m)

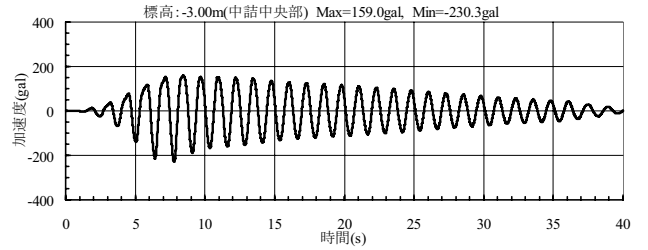
(a) 着目点 1-1



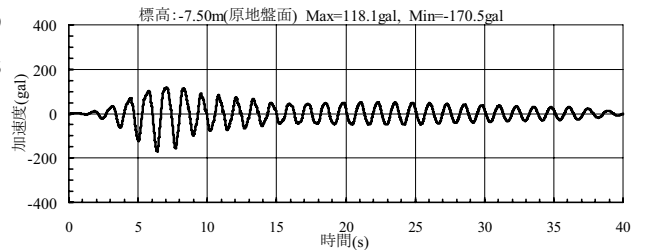
(b) 着目点 1-2



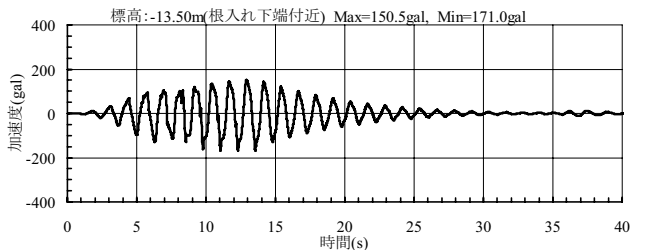
(c) 着目点 2



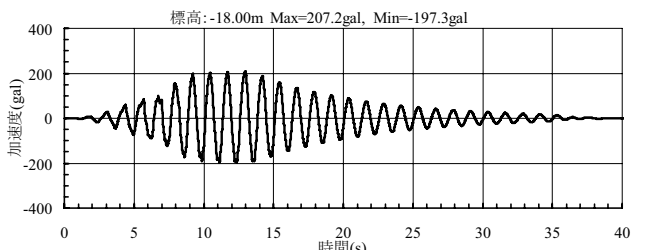
(d) 着目点 3



(e) 着目点 4



(f) 着目点 5



(g) 着目点 6

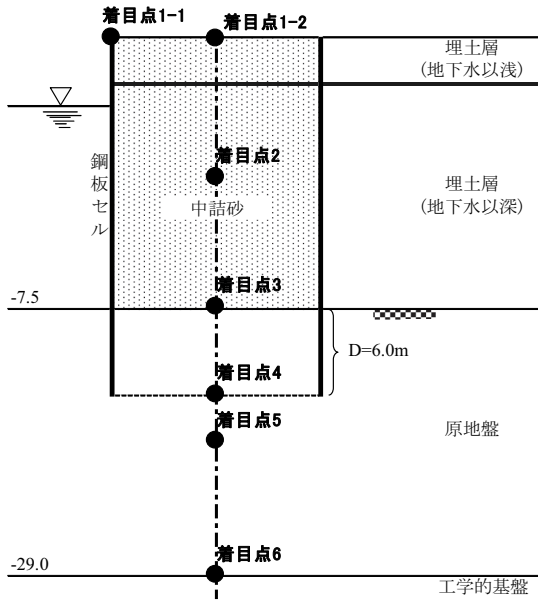
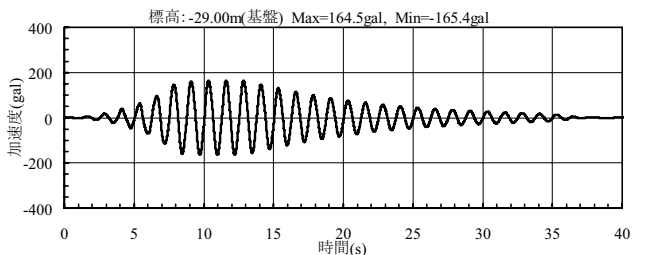
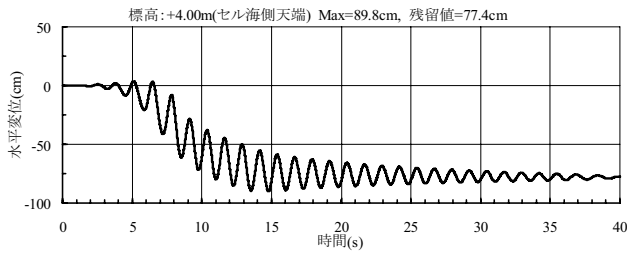
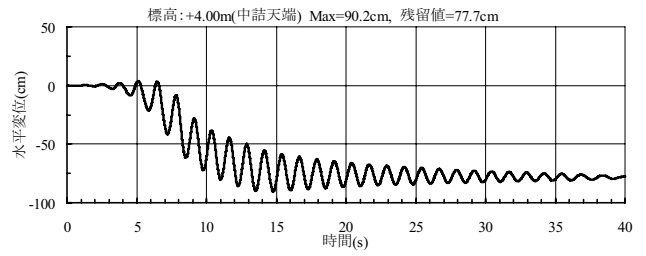


図- 15 応答加速度時刻歴 (D=6.0m)

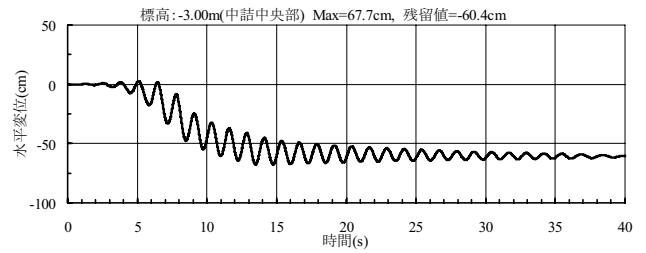
(a) 着目点 1-1



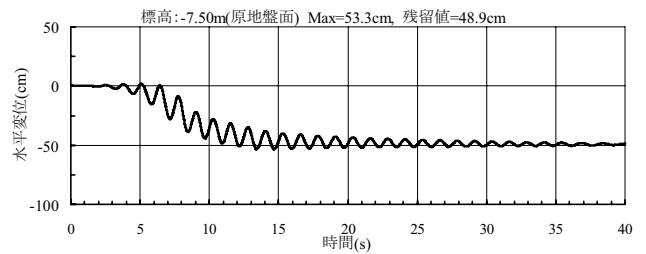
(b) 着目点 1-2



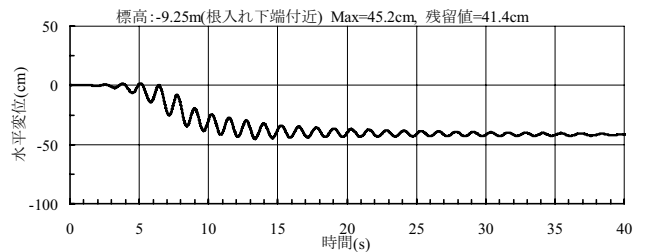
(c) 着目点 2



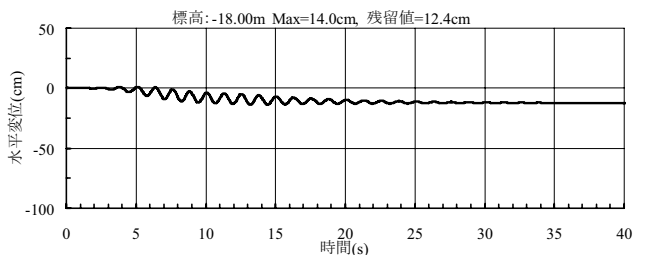
(d) 着目点 3



(e) 着目点 4



(f) 着目点 5



(g) 着目点 6

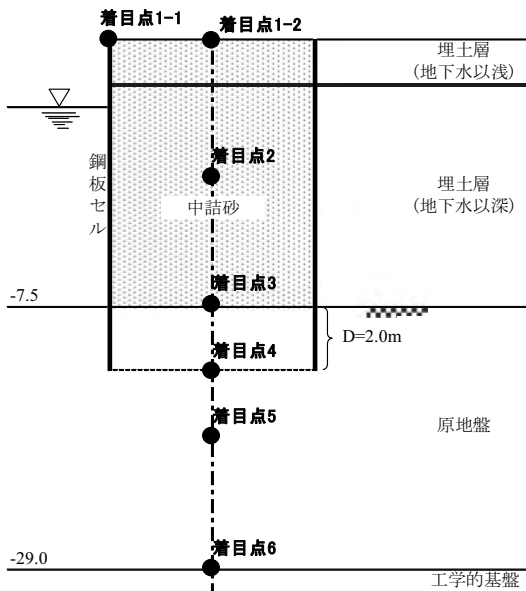
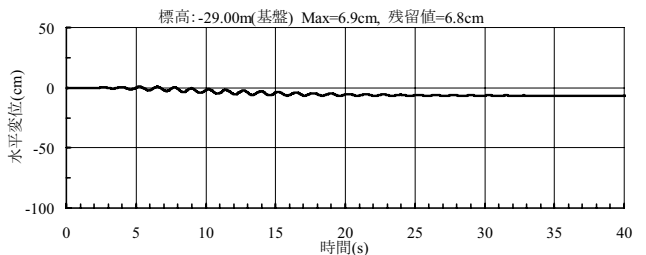
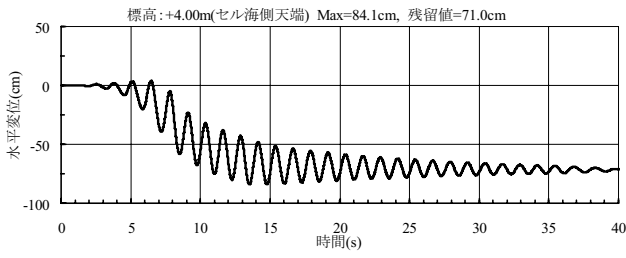
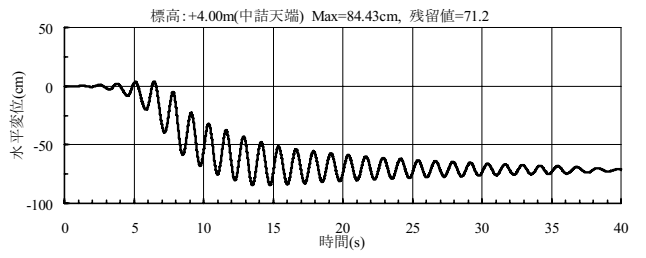


図- 16 水平変位時刻歴 (D=2.0m)

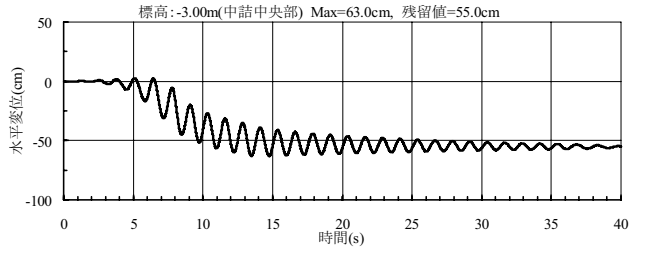
(a) 着目点 1-1



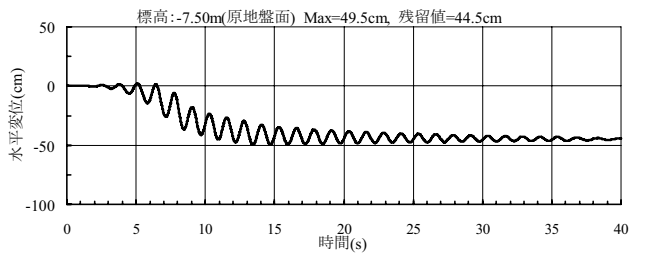
(b) 着目点 1-2



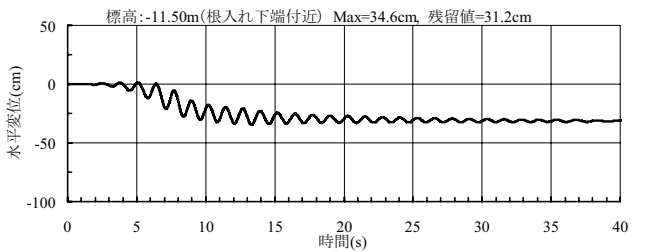
(c) 着目点 2



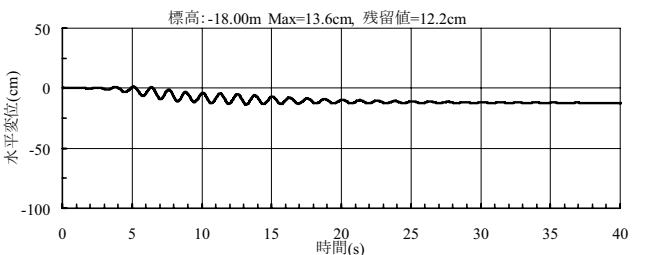
(d) 着目点 3



(e) 着目点 4



(f) 着目点 5



(g) 着目点 6

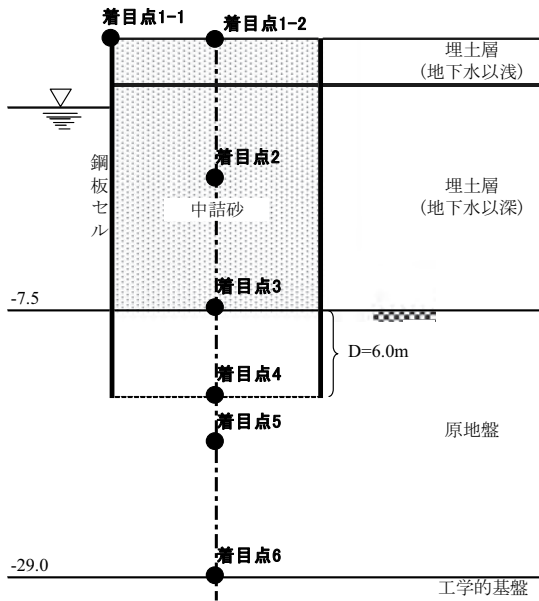
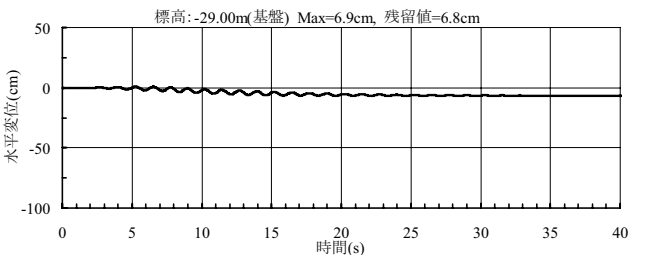
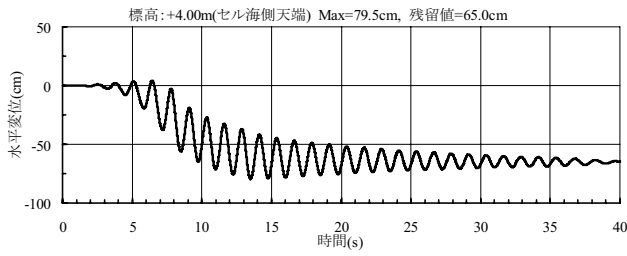
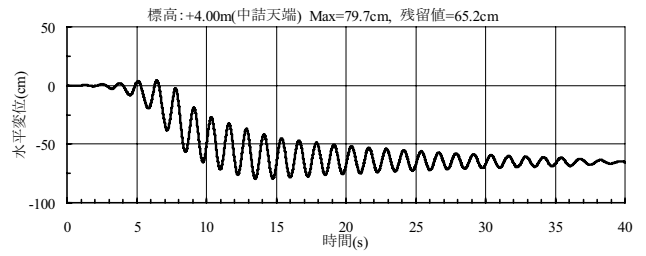


図- 17 水平変位時刻歴 (D=4.0m)

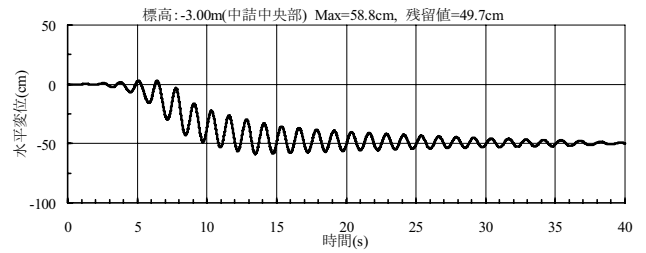
(a) 着目点 1-1



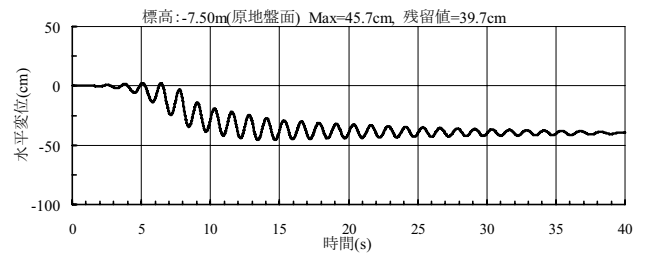
(b) 着目点 1-2



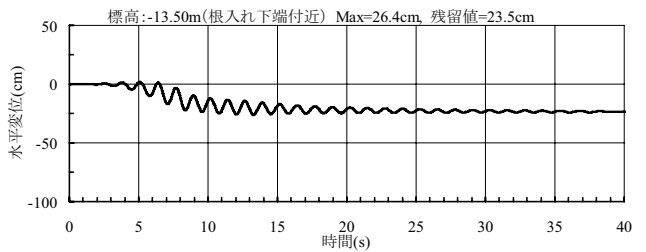
(c) 着目点 2



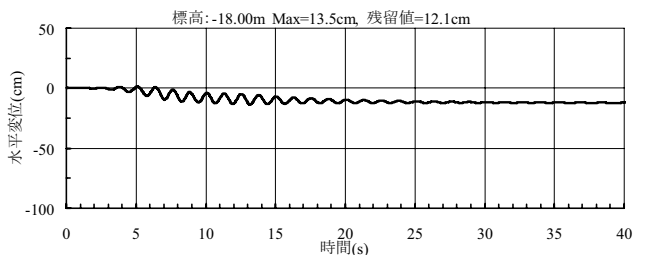
(d) 着目点 3



(e) 着目点 4



(f) 着目点 5



(g) 着目点 6

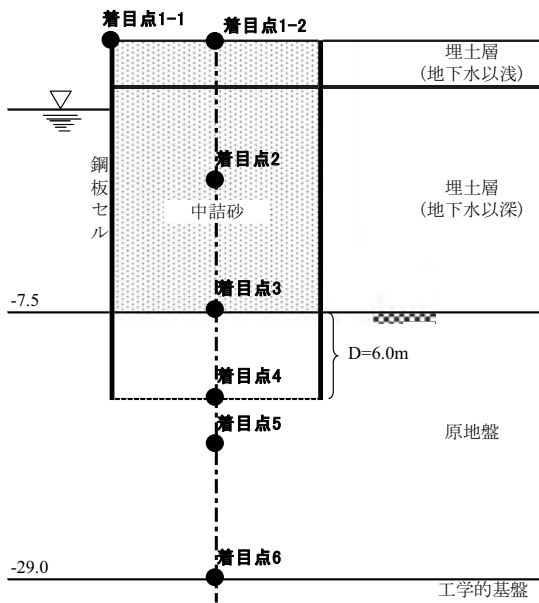
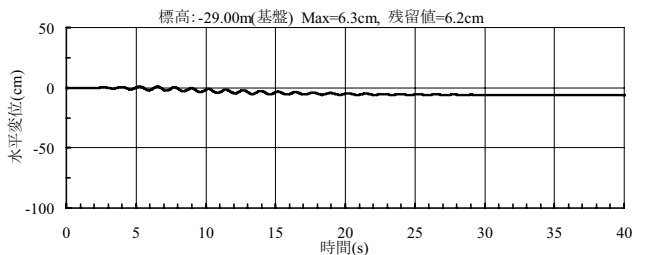
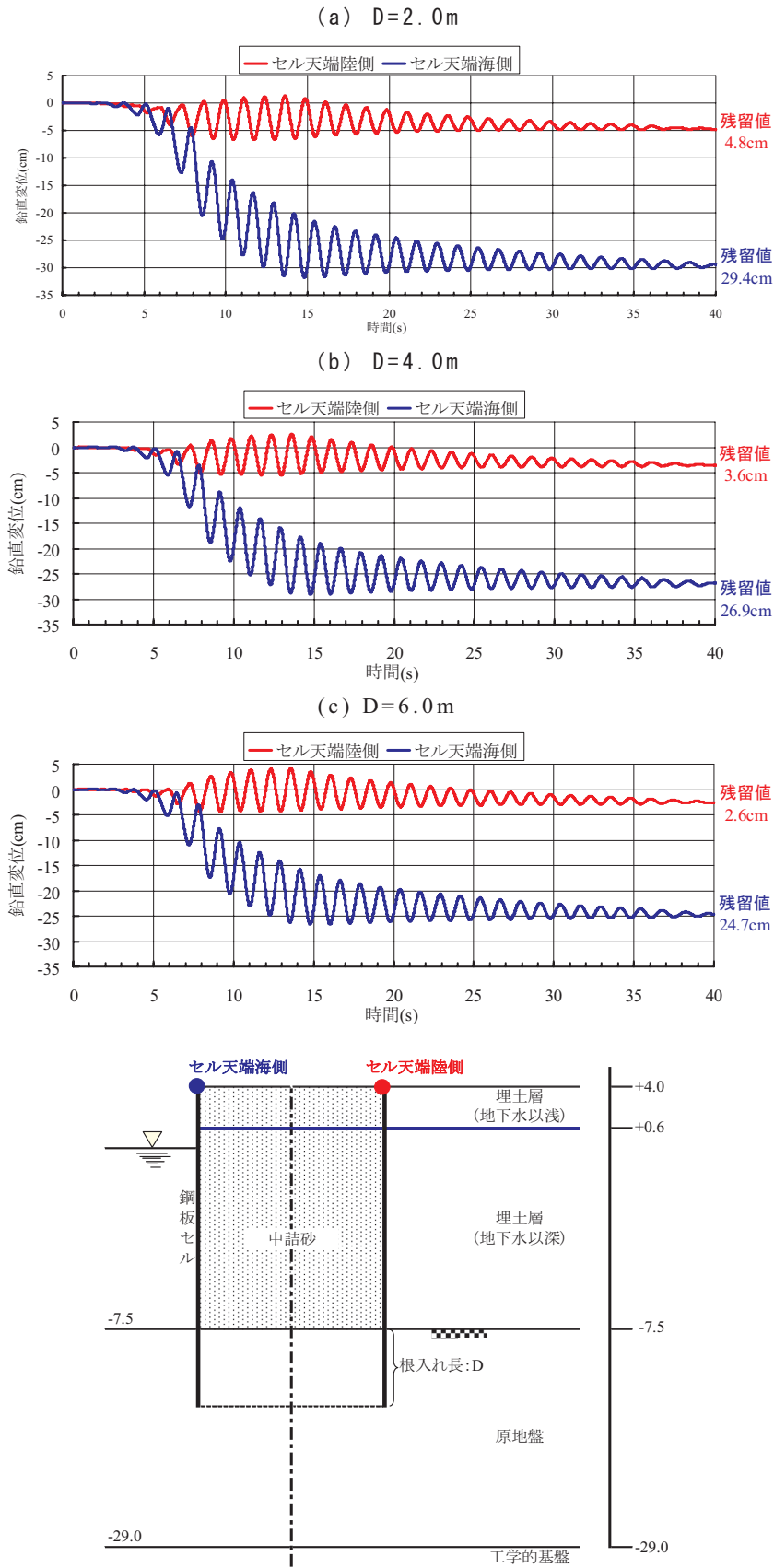


図- 18 水平変位時刻歴 (D=6.0m)



鉛直変位時刻歴の着目点

図-19 鉛直変位時刻歴

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-20および図-21にセル前面とセル中央部直下の残留せん断応力の深度分布を示す。自重解析時との比較のため、自重解析後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違いがない。

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 3m~5m 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-22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、根入れの大きな場合では根入れ下端の地盤が地中の深い位置にあるため、有効拘束圧が高くせん断強度も大きい。よって、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。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。

4.5. せん断応力・ひずみ曲線

図-23に根入れ長 2m と 6m の場合の τ_{xy} - γ_{xy} 曲線を示す。なお、着目箇所はせん断ひずみ時刻歴と同じで、それぞれの骨格曲線（黒太線）を併記している。また、 τ_{xy} - γ_{xy} 曲線中の□印は初期値、○印は残留値を示している。骨格曲線は以下に示す双曲線モデル (H-D モデル)¹²⁾を用いて設定している。

$$\tau = \frac{G_m \gamma}{1 + \gamma/\gamma_m} \quad (3)$$

ここで、 G_m はせん断剛性、 γ_m は基準ひずみを表す。基準ひずみ γ_m は以下のようなになる。

$$\gamma_m = \frac{\tau_m}{G_m} \quad (4)$$

τ_m はせん断強度であり、今回は自重解析の σ_x と σ_y

から有効拘束圧 σ'_m を求めてせん断強度を算出した。なお、その際の内部摩擦角は表-3にある内部摩擦角を使用した。せん断剛性 G_m については、以下に示す拘束圧依存式に従って計算した。なお、 G_{ma} と σ_{ma} は、それぞれ基準せん断剛性と基準有効拘束圧を表し、表-3にある値を使用した。

$$G_m = G_{ma} \cdot \left(\frac{\sigma'_m}{\sigma_{ma}} \right)^{0.5} \quad (5)$$

セル前面の根入れ下端の地盤は、根入れの大小によらずせん断強度 τ_m に達しているが、根入れ 6m の場合の τ_m が根入れ 2m の場合に比べて大きく、同じレベルの応力に対してはひずみが小さい。セル中央直下では、セル前面と比較して τ_m が大きくせん断ひずみの発生量は小さいが、根入れの違いによる傾向は、セル前面と同様である。

4.6. 根入れがセルの変形に与える効果

これまでの結果から根入れがセルの変形に与える効果についてまとめる。

地震作用時、セルの根入れ下端では地盤にせん断応力が発生し、そのせん断応力は根入れの大小に依らず同レベルである。一方、根入れを大きくすれば、セル根入れ下端に作用するせん断応力の発生位置を下げるができる。地盤のせん断応力の発生箇所を下げる事ができれば、せん断強度の大きな地盤で、せん断応力を受け持たせることができ、せん断ひずみの発生を減少させ地盤変形の抑制に効果がある。

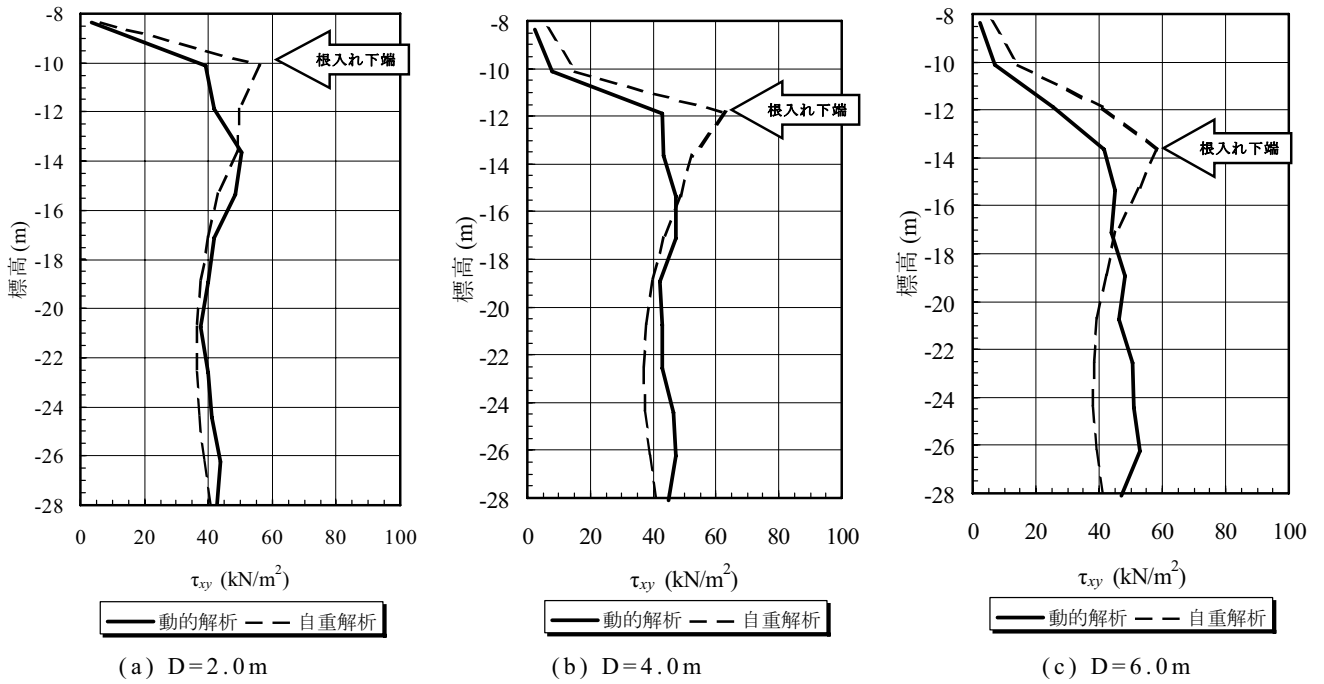


図- 20 セル前面におけるせん断応力深度分布

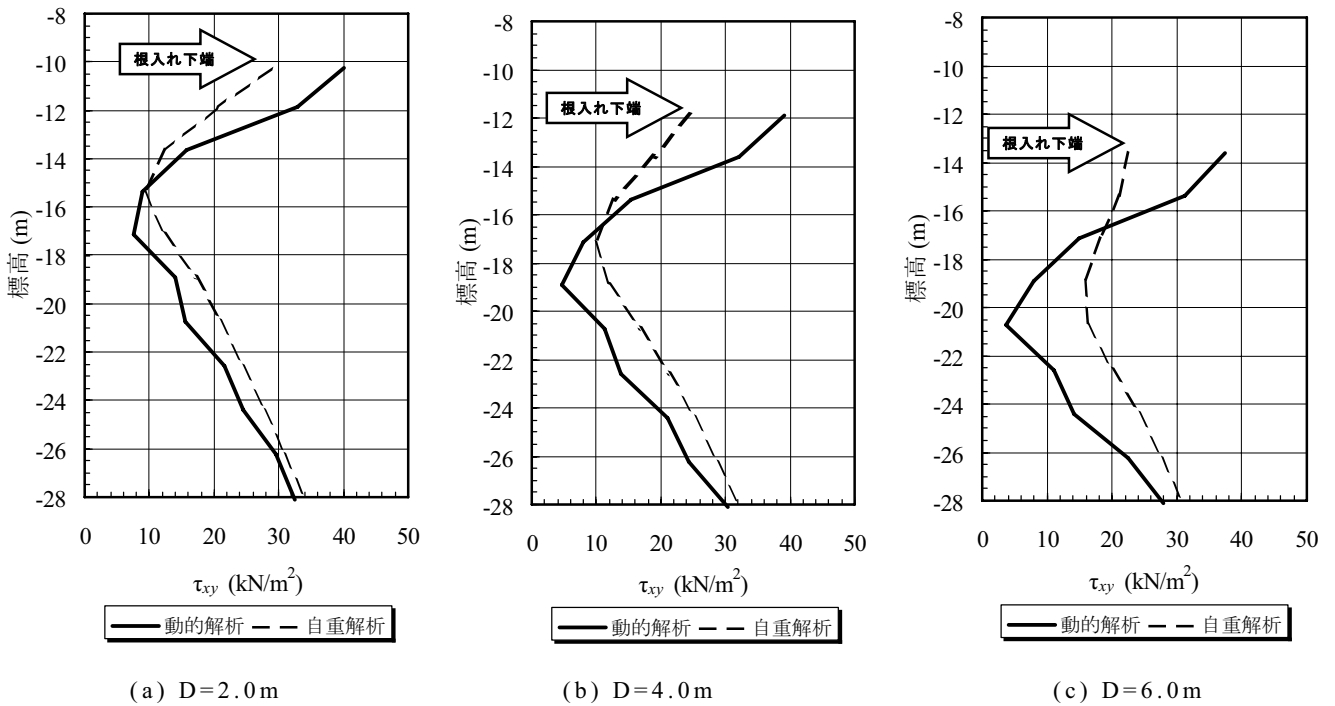
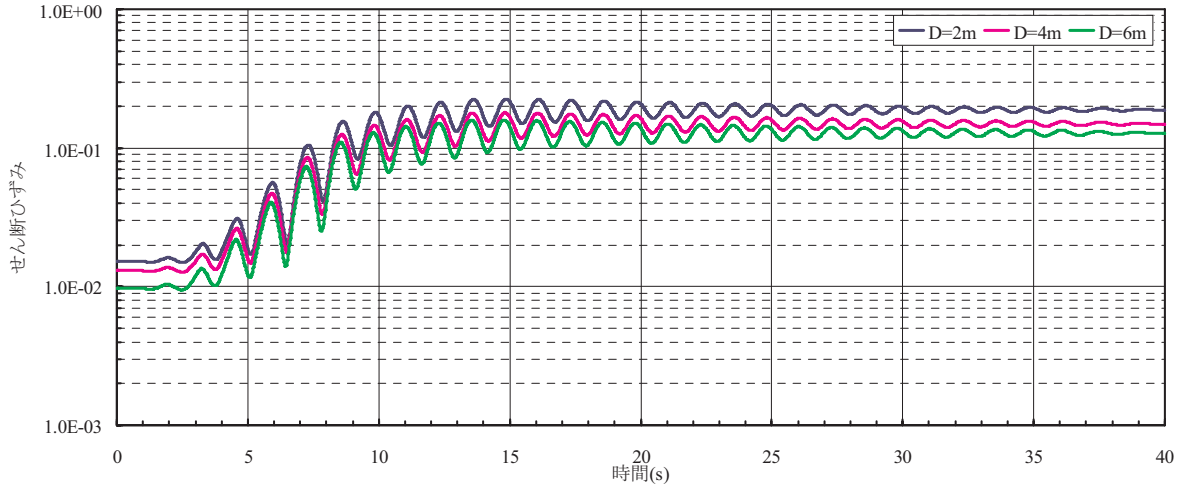
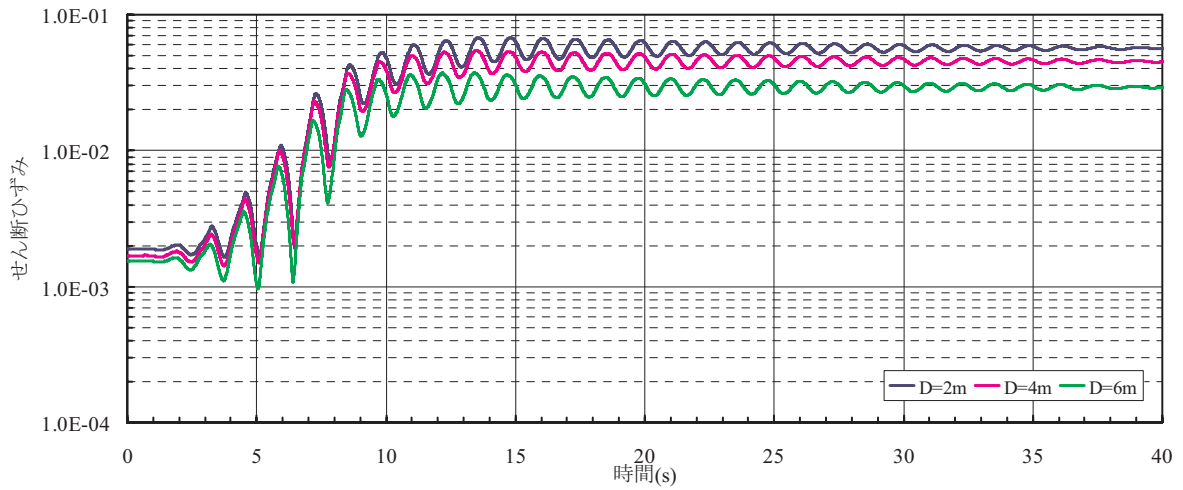


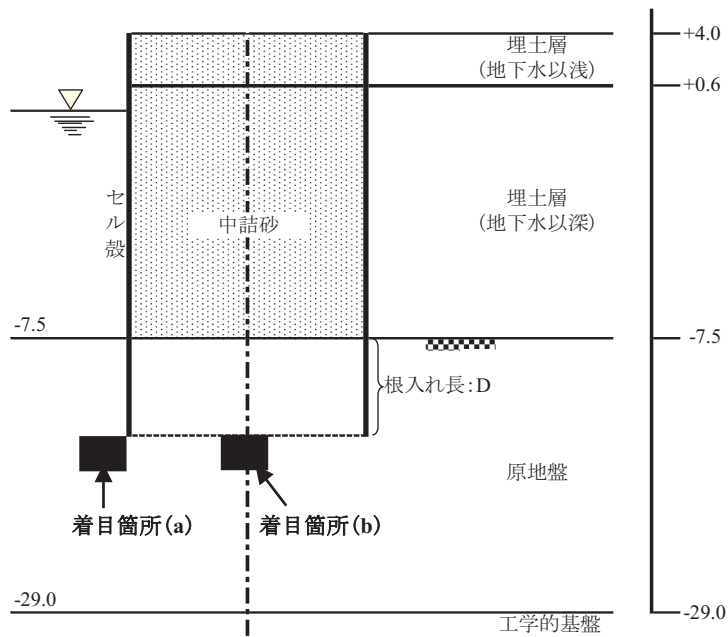
図- 21 セル中央部直下におけるせん断応力分布



(a) セル前面の根入れ下端

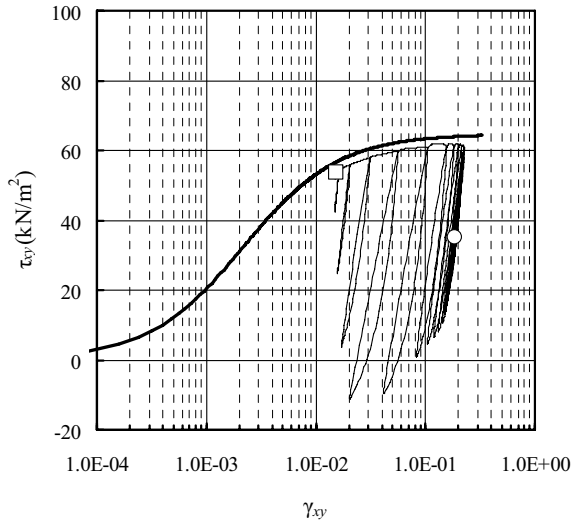


(b) セル直下中央部の根入れ下端

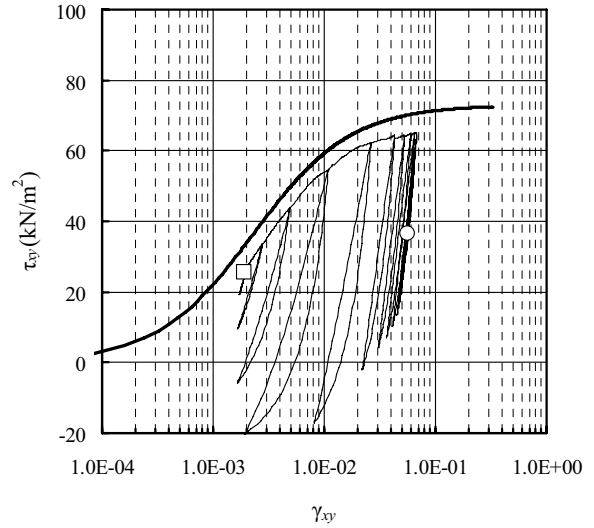


ひずみ時刻歴着目箇所

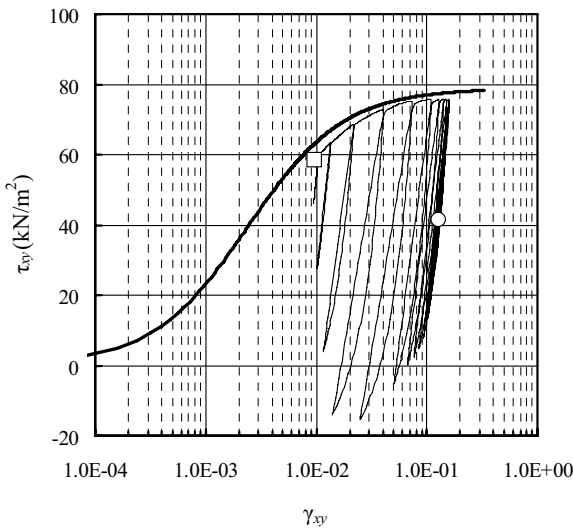
図- 22 せん断ひずみ時刻歴



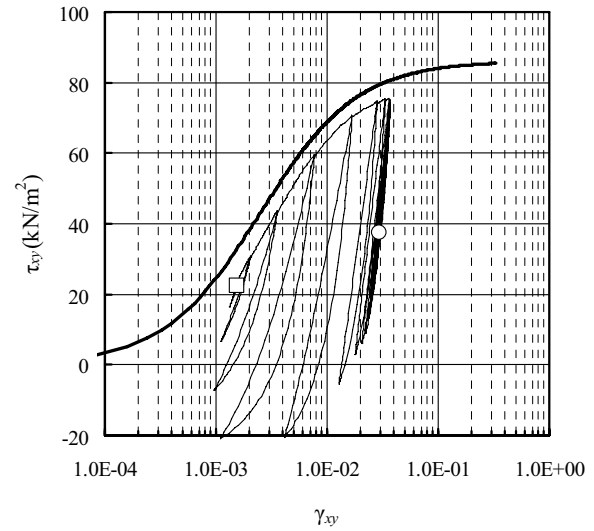
(a) D=2.0m セル前面



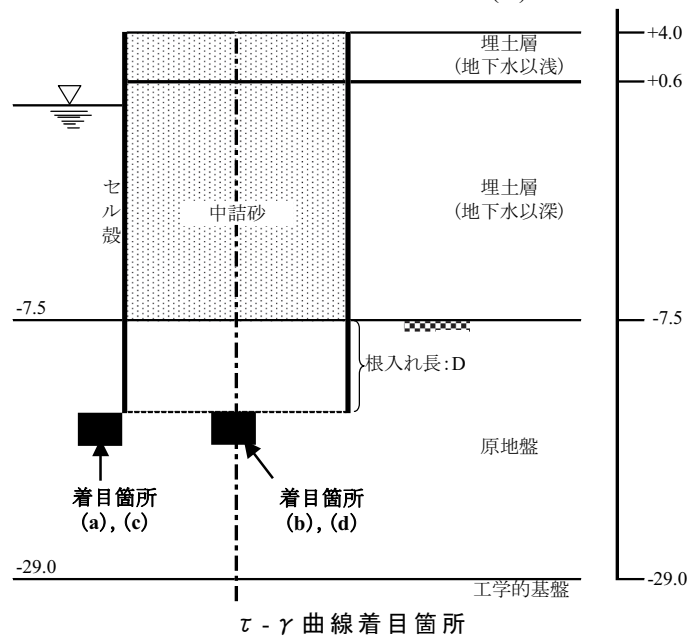
(b) D=2.0m セル直下中央



(c) D=6.0m セル前面



(d) D=6.0m セル直下中央



τ - γ 曲線着目箇所

図-23 τ - γ 曲線

5. まとめ

現行設計法による天端変形量の算定方法は、セルの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、天端変形量をセル壁体の傾斜（回転）による変形量のみを考慮し、地盤の変形量をうまく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。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。

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 FLIP などによる 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、現行設計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。

(2006 年 11 月 17 日受付)

参考文献

- 1) 長尾 毅, 川名 太: 港湾構造物の設計法の性能規定化について, 第 60 回土木学会年次学術講演会, 2005
- 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, 高橋邦夫, 神田勝巳, 寺崎滋樹, 三浦聡, 水谷太作: 鋼矢板セル模型の水平載荷実験—その 2 動的挙動—, 港湾技研資料, No.639, 1989
- 6) 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
- 7) 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, 土木学会論文集, 第 410 巻/I-12, pp.425-434, 1989
- 8) 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
- 9) 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
- 10) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 IV 下部工編, 1980
- 11) 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
- 12) 運輸省港湾局監修: 埋立地の液状化対策ハンドブック (改訂版), (財)沿岸開発技術研究センター, 1997