傾斜式護岸の耐震性能設計体系構築に向けての基礎的考察

住谷　圭一[1]・長尾　毅[2]

[1]東亜建設工業（株）　土木事業本部設計部（〒102-8241 東京都千代田区四番町５）
E-mail:k_sumiya@toa-const.co.jp
[2]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）
E-mail:nagao-t92y2@ysk.nilim.go.jp

わが国では，沿岸部を津波や高潮から防護するための施設として各種形式の護岸が整備されてきたが，近年，地震時における沈下による計画護岸高の不足から防災機能の低下が懸念されている．また，構造物の設計法が性能規定体系へ移行しつつあり，耐震設計に関しては作用によって構造物に生じる変形量が変形量許容値を上回らないことを確認する照査体系が必要となってきた．本研究では傾斜式護岸の耐震性能設計構築への端緒として，2次元の地震応答解析を実施し，傾斜式護岸の法勾配と壁高の変化が護岸の変形特性に及ぼす影響について議論した．さらに，地震動の周波数特性と護岸の変形特性の関係を調べた.

Key Words : *slope-type revetment, earthquake-resistant design , earthquake response analysis*

１．はじめに

近い将来，発生が予想されている東海地震等の日本近傍の海溝型の巨大地震，また 2004 年に発生したスマトラ島沖地震に伴うインド洋沿岸部の津波被害などに鑑み，沿岸部の津波防災に感心が高まっている．我が国では，沿岸部を津波または高潮から防護するための施設として様々な形式の護岸が整備されてきた．しかし近年，地震時の護岸全体の沈下による護岸の背後地防護機能の低下が懸念されている．

一方，構造物の設計法が仕様規定体系から性能規定体系へ移行しつつあり，2007 年度より施行された港湾基準においては，地震動はレベル 1・レベル 2 地震動ともに，震源特性，伝播経路特性，サイト特性を考慮した工学的基盤における時刻歴波形 [1)]とすることとなった．さらに，岸壁の耐震設計については，レベル 1 地震動に対しても，地震動の作用に対する変形量を許容値以下に収めるような照査体系 [2)]が導入されることとなった．護岸に対する技術基準である海岸保全施設の技術上の基準・同解説 [3)]はすでに性能規定化に向けた改訂が行われているが，実際には護岸前面の法勾配等が基準に明記されているなど仕様規定体系の色合いが強く，本格的な性能設計体系への移行が急がれる．ただし，特に延長の長い護岸の特徴を考慮すると，詳細な 2 次元地震応答計算を設計実務に適用することは現実的ではなく，特にレベル 1 地震動に対しては，簡易でありながらも護岸の変形をある程度の精度で評価しうる性能照査体系が必要と考えられる．

ここで，様々な構造形式がある護岸のうち，直立壁を有する形式の護岸の耐震性能照査については，類似の形式の岸壁の知見を援用することにより可能になると考えられるが，傾斜式護岸については研究事例が少ないのが現状である．例えば，中原ら [4)]は，傾斜式護岸の耐震性能評価に関して，模型実験によって液状化発生時の護岸の変形挙動などを検討している．また，東島ら [5)]は，代表的な護岸断面について数多くの地震応答解析を実施しておき，その解析結果を整理することで護岸の変形量を簡易に求めることができるシステムの検討を行っている．しかしながら，当該システムは既存の護岸について地震対策の必要性判定のための安全側のスクリーニングを行うためのシステムとしての性格が強く，設計実務への適用性については問題点が残っていると考えられる．類似の構造的特徴を有する構造物に目を転じると，例えば鉄道の耐震基準 [6)]では，盛土構造物の耐震設計に関して，地震時の残留変形量を Newmark 法 [7)]により照査する方法が提案されているほか，地

震動の作用によるせん断剛性の低下などに伴う沈下量を累積損傷度理論を用いて累積ひずみの近似式によって評価する[8]方法も提案されている．ただし，Newmark 法の適用は基本的にレベル 2 地震動に対するものであり，レベル 1 地震動に対しては静的な円弧すべり法の適用が位置づけられている[6]．これは設計実務への負荷を考慮したものであると考えられるが，この方法では安全率が求められるだけで，変形量については議論できない．上述のように新港湾基準[2]では，レベル 1 地震動に対する岸壁の耐震性能照査に際しても変形量を考慮した手法が採用されているため，岸壁と同じ構造形式である直立式護岸は，今後，岸壁と同様な方法で設計されることが想定される．従って，傾斜式護岸についても，同じようなスキームで簡易に変形量を考慮した設計を行うことができれば，設計時の混乱は少ないと考えられる．

本研究では傾斜式護岸の耐震設計に着目し，本格的な性能設計移行への端緒として，2 次元地震応答解析によって，まず傾斜式護岸の諸元（勾配・護岸高）の変化に伴う護岸の耐震性能の変化について考察する．さらに，地震動の周波数特性と傾斜式護岸の変形特性の関係について基礎的な研究を行った．

検討にあたり，全国の護岸構造集覧[9]を参考にモデル断面を作成し，正弦波を入力地震動とした地震応答解析結果から緩傾斜護岸の周波数特性や護岸の諸元と地盤の応力ひずみ状態などの関係を議論した．解析に用いたコードは FLIP[10]である．なお，護岸の地震動による変形は液状化の発生の有無によって大きく変化すると考えられる．従って，耐震性能評価の高度化のためには液状化の影響を考慮した解析を行うべきであるが，今回は護岸周辺において液状化対策が実施されており，護岸の変形量が比較的小さい状態における性能保持について議論することとした．液状化の影響を含めた性能については今後の課題とする．

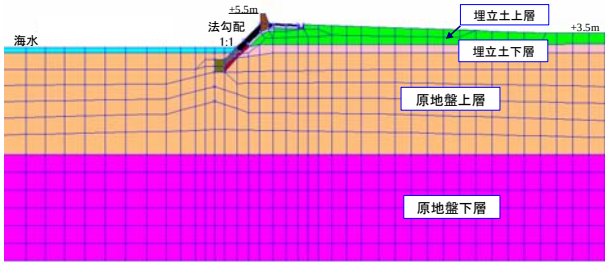
２．検討方法

(1) 検討断面の設定

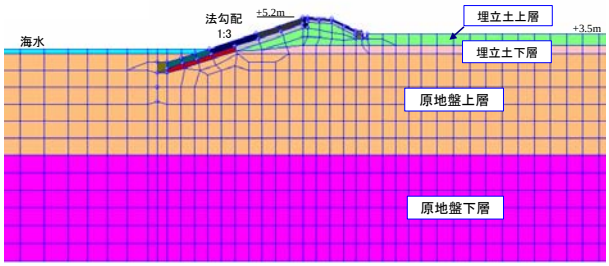
検討断面は，全国の護岸構造集覧[9]の中にある設計断面より傾斜護岸の各諸元を抽出して統計をとり，前面水深，天端高，背後地盤高などについて代表的な値を決定した．今回設定した断面諸元を**表−1**に示し，**図−1**～**図−4**に解析断面図を示す．ここで，傾斜式護岸の法勾配は1:1とする事例が比較的多いことから勾配1:1の断面を基本とし，前面水深として-1.5

表−1　検討断面

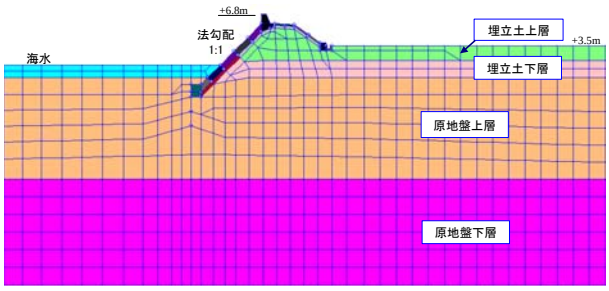
前面水深 (m)	各標高 (m)	前面法勾配	
		1:1	1:3
-1.5	海底面 護岸高	+2.0 +5.5	+2.0 +5.2
-2.8	海底面 護岸高	+1.5 +6.8	- -
-4.0	海底面 護岸高	+1.5 +7.0	- -



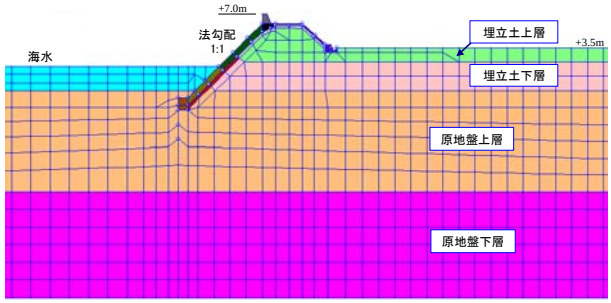
図−1　解析断面図（前面水深-1.5m，法勾配 1:1）



図−2　解析断面図（前面水深-1.5m，法勾配 1:3）



図−3　解析断面図（前面水深-2.8m，法勾配 1:1）



図−4　解析断面図（前面水深-4.0m，法勾配 1:1）

表-2　地盤物性

地盤条件	土層区分	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	S波速度 (m/s)
Case1	埋土	上層(気中)	1.8	89.3	25920	67595	0	37	0.24	120
		上層(水中)	2.0							
		下層								
	原地盤	上層	2.0	239.8	45000	117353	0	38	0.24	150
		下層								
Case2	埋土	上層(気中)	1.8	89.3	58320	152089	0	38	0.24	180
		上層(水中)	2.0							
		下層								
	原地盤	上層	2.0	198.5	72200	188286	0	38	0.24	190
		下層		279.2	125000	325980		39		250

～-4.0mの条件を設定した．護岸の天端高さは，越波流量が許容値以下であることが求められるが，前面水深によって越波流量は変化する．各水深毎の護岸の天端高が異なっているのはこのためである．また，自由地盤部に相当する背後地盤の標高は各条件とも+3.5mで共通とした．護岸背面の形状については，背面にも前面と同程度の勾配をつけて背後地盤とのすりつけを行うケースと，護岸部から背後地盤に向かって徐々に標高が低くなるようなすりつけを行うケースを設定している．後者は，必要天端高と背後地盤の標高に大きな差がない場合に用いられることが多いケースである．また，親水性機能への要求の高まりを踏まえて近年建設事例が増加しつつある緩傾斜式護岸（法勾配1:3）も条件に加えた．

地盤条件は，全国の港湾の強震観測地点の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，固有周期として緩い地盤（港湾基準における第Ⅲ種地盤相当）で1.2秒，中間の地盤（第Ⅱ種地盤相当）で0.8秒と設定した．なお今回の検討では締まった地盤のケースは除外した．

表-2に解析断面の地盤物性を示す．表中にある地盤条件のCase1は第Ⅲ種地盤相当，Case2は第Ⅱ種地盤相当の地盤物性を示している．なお，地盤物性の与え方は，今回の検討で用いた地震応答解析コードFLIPにおける標準的な方法[11)]に従っている．また，FLIPは港湾構造物の設計実務に広く用いられているコードであり，堤防など盛土構造物の地震時被災事例解析[12)]においても実績があるので今回の検討でも採用した．

(2)　入力地震動

検討に用いた入力地震動は正弦波である．周波数として様々なものを用いたが，**図-5**に示す通り，継続時間の影響の条件を揃えるために，継続時間を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ーをかけた波形を用いた．

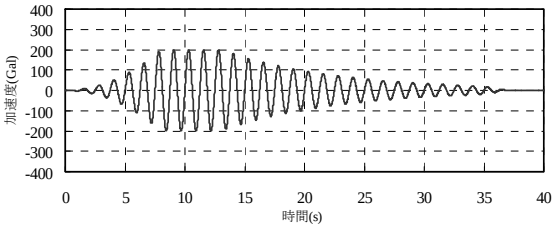


図-5　入力波形の一例（正弦波：周波数 0.8Hz）

表-3　護岸天端の沈下量

勾配	水深　-1.5m		水深　-2.8m		水深　-4.0m	
	100Gal	200Gal	100Gal	200Gal	100Gal	200Gal
1:1	11.3cm	19.8cm	26.2cm	41.5cm	38.2cm	54.8cm
1:3	17.3cm	30.0cm	－	－	－	－

表-4　護岸天端の水平変形量

勾配	水深　-1.5m		水深　-2.8m		水深　-4.0m	
	100Gal	200Gal	100Gal	200Gal	100Gal	200Gal
1:1	15.1cm	25.7cm	12.8cm	15.3cm	20.8cm	19.5cm
1:3	12.7cm	21.4cm	－	－	－	－

３．法勾配等の断面諸元が耐震性能に及ぼす影響

ここではまず，護岸の法勾配や護岸前面水深（護岸壁高さ）が耐震性能に及ぼす影響について検討する．入力地震動は周波数0.8Hzの正弦波で，振幅を100Galおよび200Galとして入力したものを用いた．護岸天端における沈下量と水平変形量を**表-3**および**表-4**に示す．また，**図-6**と**図-7**に各着目点における

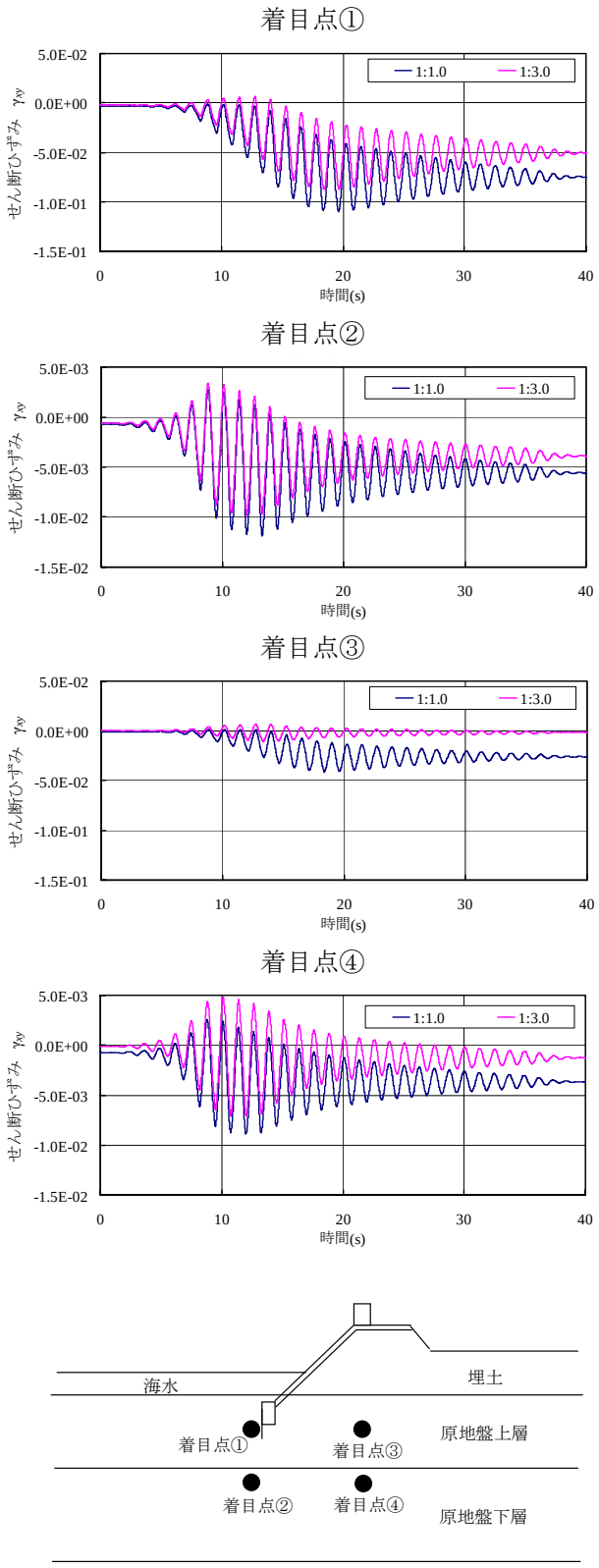


図-6　せん断ひずみ時刻歴（前面法勾配別）

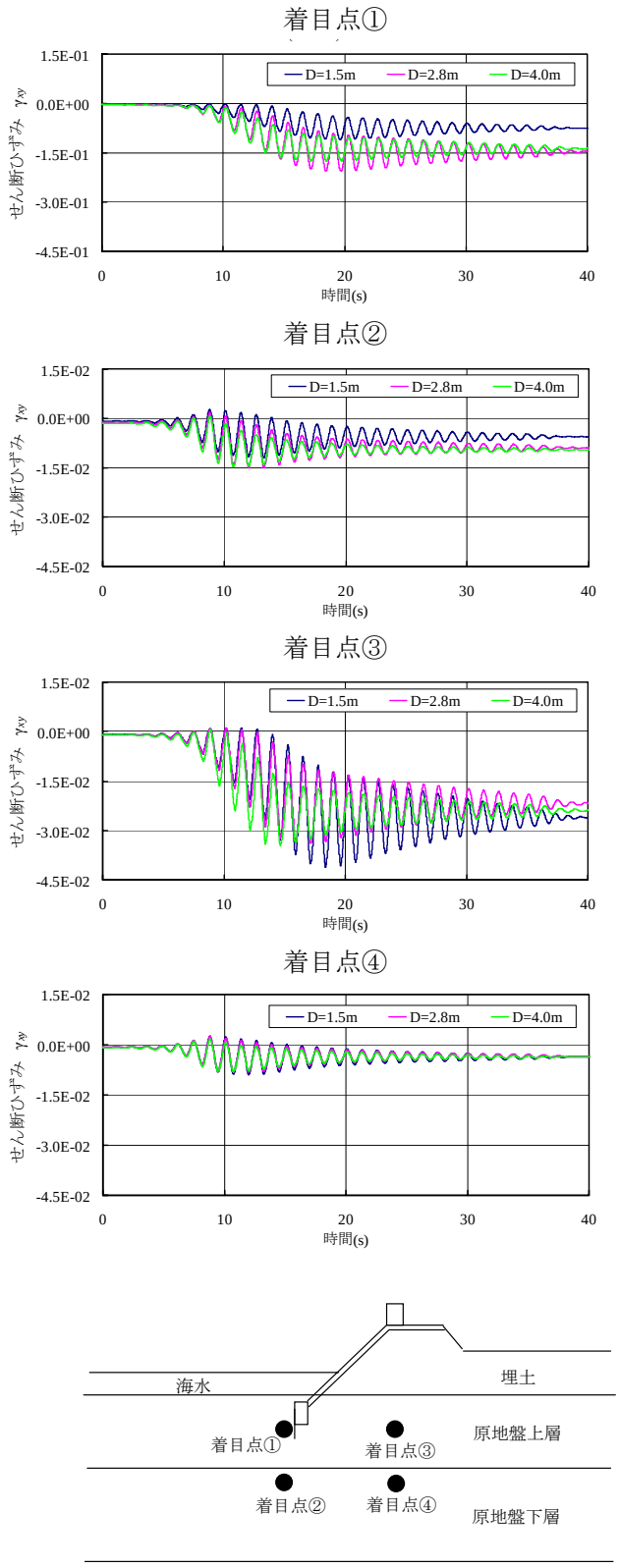


図-7　せん断ひずみ時刻歴（前面水深別）

せん断ひずみの時刻歴を示す．**図-6**は前面法勾配の違いにより，**図-7**は前面水深の違いにより整理したものである．なお，このせん断ひずみ時刻歴は，周波数0.8Hzの正弦波を振幅100Galとして入力した場合の結果で，地盤条件はCase1である．まず法勾配について検討する．**表-3**から沈下量に着目すると前面法勾配が急な断面では緩い断面よりも小さいことがわかる．水平変形量については**表-4**から逆の傾向があることがわかり，**図-6**からもその傾向は裏付けられている．法勾配が緩やかな断面の方が急な断面

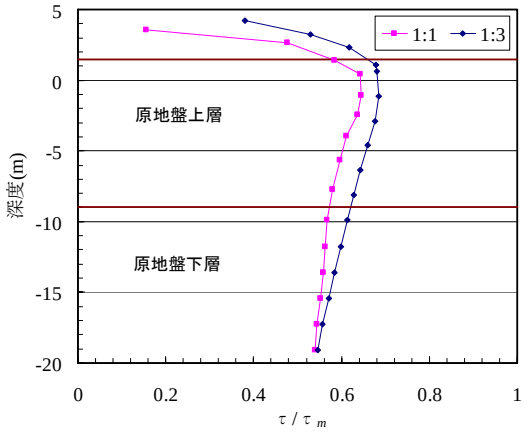


図-8　自重解析時の τ / τ_m の深度分布
（護岸法線直下，前面法勾配別）

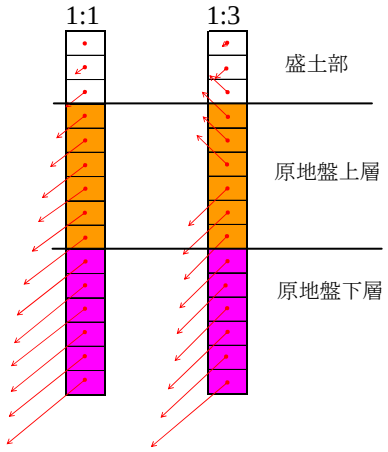


図-9　自重解析時の τ の作用方向
（護岸法線直下，前面法勾配別）

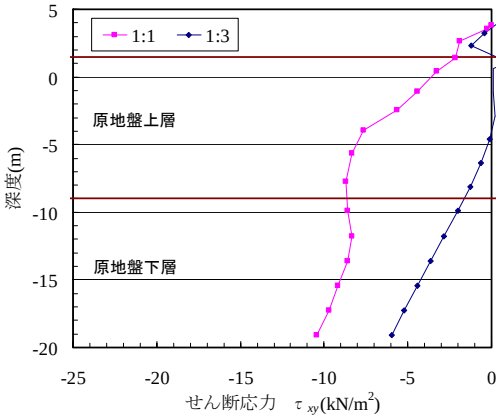


図-10　自重解析時の τ_{xy} の深度分布
（護岸法線直下，前面勾配別）

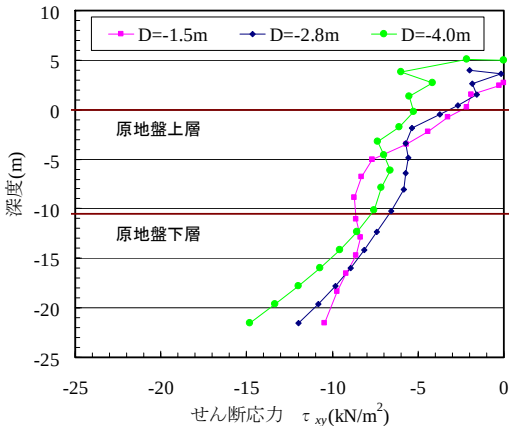


図-11　自重解析時の τ_{xy} の深度分布
（護岸法線直下，前面水深別）

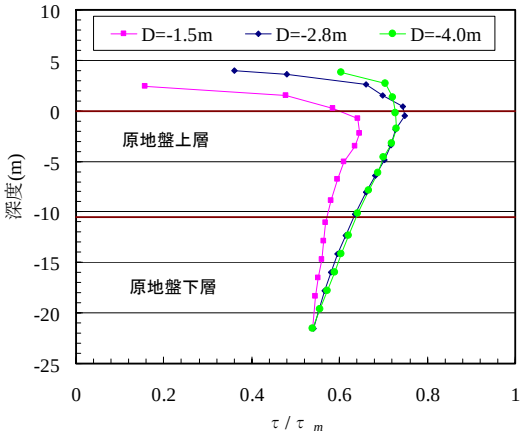


図-12　自重解析時の τ / τ_m の深度分布
（護岸法線直下，前面水深別）

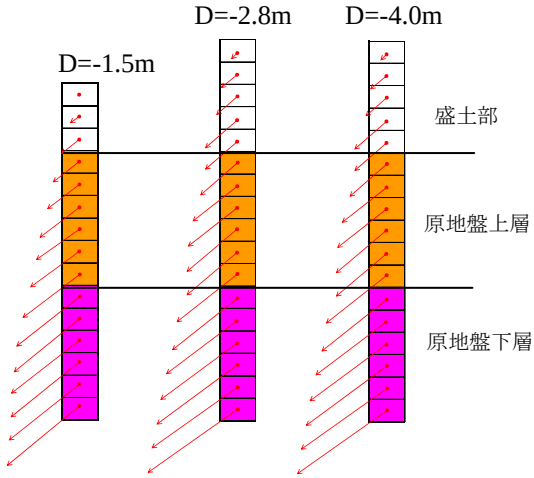


図-13　自重解析時の τ の作用方向
（護岸法線直下，前面水深別）

の場合よりも沈下量が大きくなることについては，今回設定した断面の影響が考えられる．解析断面の護岸法線付近の形状に着目すると，緩勾配の断面は急勾配の断面に比べて盛土高が高く上載荷重が大きい．これに加えて背面の勾配の影響で，水平方向の拘束性が弱いので，その差が当該箇所における沈下量の差になって現れたと考えられる．

また，水平変形量の傾向については，自重解析時

の最大せん断応力τとせん断強度τ_mのせん断強度比(τ/τ_m)およびτの方向により議論する．τ/τ_mの着目箇所は一般性を考慮して，護岸法線直下地盤とした．**図-8** より，τ/τ_mは，急勾配が若干小さいもののその差は大きいとはいえない．また，**図-9** から，τの方向に大きな違いは認められない．これに対してせん断応力τ_{xy}は**図-10** に示すように急勾配の断面のほうが緩勾配断面と比較して顕著に大きく，この差が水平変形量の差の原因の一つであると考えられる．

次に前面水深による違いを検討する．沈下量に着目すると前面水深が深い（護岸高が高い）断面は，浅い断面と比較して大きな沈下量が発生していることがわかるが，水平変形量についての傾向にはばらつきがある．沈下量については，水深の深い断面は，堤体高が高く上載荷重も大きいので沈下量が大きくなることは自然である．水平変形量に関して傾向がばらつくことについては，**図-11**および**図-12**に示す自重解析時のせん断応力τ_{xy}の深度分布，せん断強度比(τ/τ_m)の深度分布から，水深-1.5mの断面とその他の断面で，傾向が異なることがわかる．特に，水深-1.5mの自重解析時のτ_{xy}は，ある深度では他の二つの断面のτ_{xy}よりも大きくなる場合がある．この理由は，護岸タイプ（水深-1.5m）と堤防タイプ（水深-2.8m，-4.0m）の断面形状の違いによるものと考えられる．今回，水深の深い断面では堤防タイプの断面形状となっている．堤防タイプでは堤体の裾幅が広く土圧によって堤体直下の地盤に作用するせん断力分担幅が大きい．また，今回の解析断面のように原地盤が砂質土の場合は，護岸高が高いと堤体直下の原地盤の拘束圧が高くなりせん断剛性も高い状態であるので，原地盤の変形は抑制される傾向にあり，変形については盛土部分が支配的になると考えられる．なお，**図-13**に示すように，τの方向に大きな違いは認められなかった．

４．地震動の周波数特性と護岸の変形特性の関係

岸壁の残留水平変形量は地震動の周波数特性に依存し，正弦波を用いた検討では，ある一定の変形が生じる入力地震動最大値は，1Hz以下では大きな差がないものの，1Hzよりも高周波領域では急激に大きくなる[2)]ことがわかっている．

護岸においては，その要求性能から，鉛直方向の変形量に対する性能が強く求められると考えられる．そこで，0.2，0.3，0.4，0.6，0.8，1.0，1.5，2.0，3.0，4.0Hzの10種類の周波数を持つ正弦波を振幅調整し，護岸天端の沈下量が10cmとなる条件を探索した．周波数毎の入力加速度最大値を**図-14**および**図-15**に示す．**図-14**は地盤条件がCase1，**図-15**はCase2である．

岸壁の残留水平変形量と同様に，10cmの沈下が生じる入力地震動最大値は1Hz以下では大差がなく，1Hz以上では急激に大きくなることがわかる．岸壁の耐震性能照査については，この点を踏まえて地震動の周波数特性を考慮した性能照査用震度を算出す

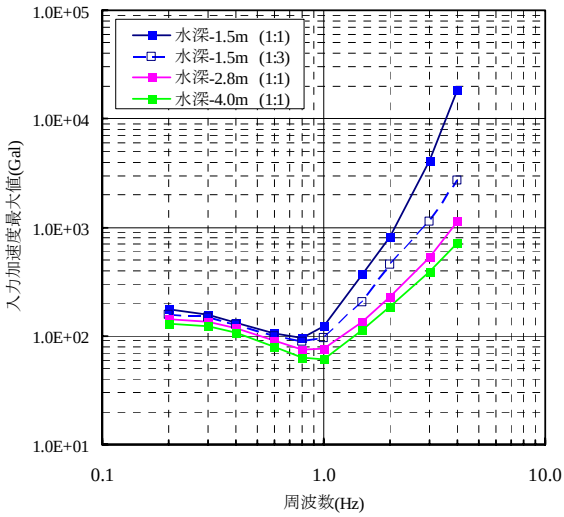


図-14　10cm 沈下時の周波数と入力加速度最大値の関係（地盤 Case1）

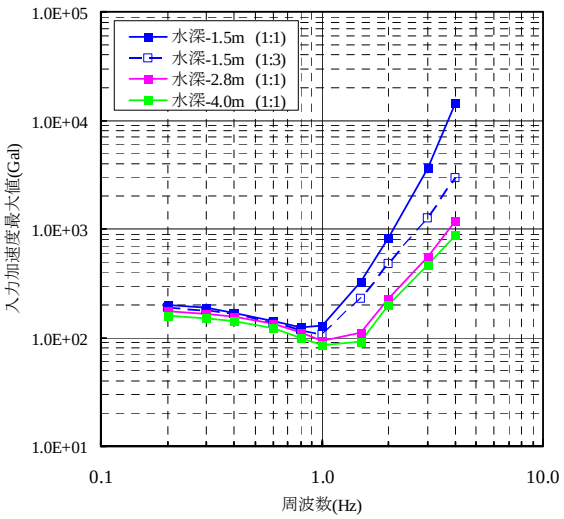


図-15　10cm 沈下時の周波数と入力加速度最大値の関係（地盤 Case2）

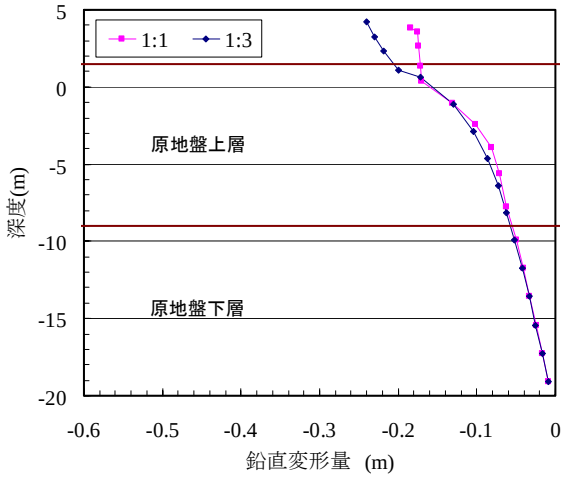


図-16　前面法勾配別に整理した累積沈下量

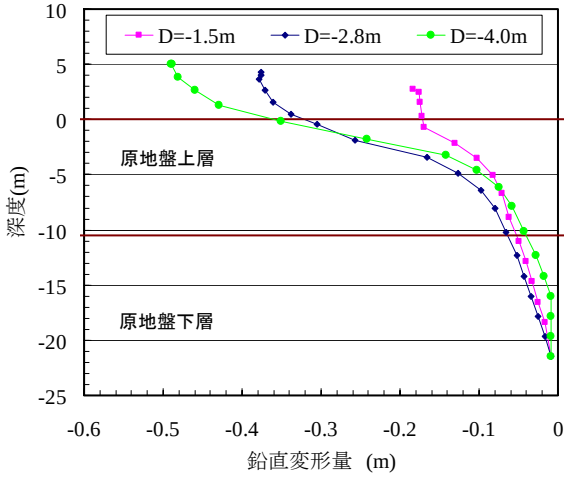


図-17　前面水深別に整理した累積沈下量

ることとしている．即ち，一次元の地震応答計算による地表面の加速度応答に対して1Hz以下ではフラット，1Hz以上では急激に小さくなるフィルターを乗じることにより一様変形スペクトルを求め，これをもとにすることによって残留変形量に対応した性能照査用震度を算定する[2)]ものである．護岸の耐震性能照査についても同様の考え方を適用できる可能性があることがわかる．

次に地盤条件の違いについて検討すると，入力地震動の周波数が1Hz以下の領域を除くと，地盤条件の違いによる差は少ないことが分かる．特に1Hz以上の領域ではほとんど差が見られない．次に地盤条件以外の点について検討すると，沈下量が大きくなるのは順番に水深-4.0m，水深-2.8m，水深-1.5m（法勾配1:3），水深-1.5m（法勾配1:1）である．

この理由を検討するため，0.8Hz，100Gal入力の条件において地震応答解析結果より鉛直ひずみを抽出し，要素の高さを乗じることにより沈下量を算出した．地盤Case1の条件について，累積沈下量として表現したものが**図-16**および**図-17**である．全体の沈下量のうち，原地盤下層で生じている残留沈下量の割合は少なく，沈下の大部分は埋土部分で生じていることがわかる．また，-4.0m以下の累積沈下量にはほとんど差がない．埋土部分の沈下量の違いは，**３．**で議論したことが原因で生じていると考えられる．ただし，**図-2～4**の形状と比較すると，同一の形状では沈下量は少ないものの，水平変形量は大きい．従って，沈下量と水平変形量の両方を制御する設計法が必要であると言える．

５．まとめ

本研究では，傾斜式護岸の耐震性能設計体系の構築に向けた端緒として，2 次元地震応答解析によって，傾斜式護岸の勾配・壁高さおよび地震動の周波数特性が傾斜式護岸の変形特性におよぼす影響について検討した．本研究の主要な結論は以下のとおりである．

①傾斜式護岸の断面諸元が耐震性能に与える影響に関しては，前面水深が深く護岸高が高くなる構造は沈下量が大きくなる傾向にある．また，前面法勾配が急な断面は，緩やかな断面と比較して地震作用前に大きなせん断応力を生じており水平変形が生じやすい構造となっている．

②傾斜式護岸に一定の沈下が生じる入力地震動最大値は 1Hz 以下では大差がなく，1Hz 以上では急激に大きくなる．これは岸壁の残留水平変位と同様の傾向であり，傾斜式護岸でも岸壁と同様な地震動の周波数特性を考慮した耐震性能照査方法を適用できる可能性がある．

③傾斜式護岸の沈下量には，護岸の壁高さと併せて，護岸の形状（前面勾配および背面勾配）が影響を及ぼしている．また，海底面より下の地盤の条件にはあまり依存しない．

参考文献

1) 長尾　毅，山田雅行，野津　厚：フーリエ振幅と群遅延時間に着目した確率論的地震ハザード解析，土木学会論文集，No.801，Ⅰ-73，pp.141-158，2005

2) 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
3) 海岸保全施設技術研究会：海岸保全施設の技術上の基準・同解説，2004.
4) 中原知洋，一井康二，三藤正明，秋本哲平：地盤の透水性と地震動の継続時間を考慮した緩傾斜式護岸構造物の耐震性能評価，土木学会地震工学論文集，第28巻，e00185p，CD-ROM，2005.
5) 東島義郎，藤田郁夫，一井康二，井合　進，菅野高広，北村道夫：沿岸構造物のチャート式耐震診断システムの開発，海洋開発論文集，第22巻，pp.511-516，2006.
6) 鉄道総合研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説（耐震設計），1999
7)Makdisi, F. I. and Seed, H. B. : Simplified procedure for estimating dam and embankment earthquake-induced deformations, Jornal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol.104, No. GT7, pp.849-867, 1978
8)堀井克己，館山　勝，小島謙一，古関潤一：砂質土盛土の地震による残留沈下予測，土木学会第52回年次学術講演会，1997
9) 柴田鋼三・上田　寛・大堀晃一：海岸堤防・護岸構造集覧　港湾技研資料No.448，1983.
10) 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.
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) 井合　進，竹島康人，沢田俊一，杉山　弥，小堤治：1995年兵庫県南部地震で被災した河川堤防の解析検証事例，第26回地震工学研究発表会講演論文集，pp549-552，2001.

A FUNDAMENTAL STUDY TOWARD PERFORMANCE-BASED EARTHQUAKE-RESISTANT DESIGN METHODOLOGY OF SLOPE-TYPE REVETMENT

Keiichi SUMIYA and Takashi NAGAO

This paper presents a fundamental study as a first step to establish the performance-based earthquake resistant design method of slope-type revetment. One of the performance requirements for slope-type revetment is to prevent the coastal area from storm surge and tsunami disasters. Therefore, precise evaluation of the residual deformation of slope-type revetment is necessary in the performance-based earthquake-resistant design framework. We conducted two-dimensional earthquake response analyses and discussed the earthquake resistant performance of the slope-type revetment form the viewpoint of the effect of slope gradient and wall height. We furthermore studied the effect of frequency characteristic of earthquake ground motion on the residual deromation of the revetment.