

海域施設の耐震設計

Seismic Design of Coastal Structures

井 合 進
Susumu IAI

1. 海岸施設の構造分類

海岸施設には堤防をはじめとする種々の施設があるが、それらの施設のうち地震時挙動に対する考慮が必要なものは、堤防、護岸、胸壁等の海岸保全施設と、水門、閘門、樋門・排水機場、陸こう等の付帯施設である。これらの施設は、地震時挙動の視点からは、表-1 に示すとおり、土木的要素の強い施設と、機械・電機設備の比重が大きい施設に大別して性格付けすることができる。土木的要素の強い施設では、地震によりある程度の変形や被害が発生しても、海岸施設としての当面の機能を維持できるものが多い。これに対して、機械・電機設備の比重が大きい施設では、土木構造物部分の変形・被害が機械・電機設備の機能の喪失につながる恐れがあり、土木的要素の強い施設とは異なる視点で、その地震時挙動を捉える必要がある。以下では、土木的要素の強い施設に焦点を当て解説する。これらの施設は、その構造的特徴に基づいて表-2 のように分類される。

表-1 海岸施設の施設別分類

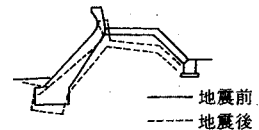
構造上の特徴	構造物の例
土木的要素が強い施設	堤防、護岸、胸壁など
機械・電機設備等の比重が大きい施設	閘門、水門、排水機場など

2. 土堰堤式構造物の地震時挙動

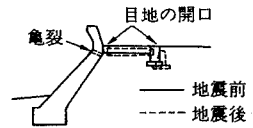
土堰堤式構造物は土質材料を主体とした構造物であり、主に土質材料のせん断抵抗によって重力や地震力に対する安定を保つ。重力および地震力の合力によって土堰堤内に生じるせん断応力が、土質材料のせん断抵抗を上回るレベルに達すると、土堰堤式構造物に変形が発生する。変形が発生する限界は、外力と抵抗限界との相対関係で定まるので、例えば、液状化の発生などにより土質材料のせん断抵抗が低下した場合にも同様の変形が発生する。過去の地震被害事例から分類した土堰堤式構造物の被害形態は図-1 に示すとおりである。これらの被害形態は、土堰堤の幾何的形状のみならず、土堰堤内の土質材料の力学的性質や地下水位に著しく依存する点に注意したい。

3. 重力式構造物の地震時挙動

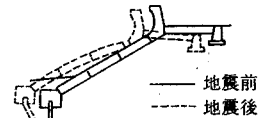
重力式構造物は、海浜または海底地盤の上にケーソンなどの重力式壁体を設置し、主に壁体底面の摩擦力によって、壁体背後（陸側）の土砂を支える構造である。地震時の変形形態としては、基礎地盤（海



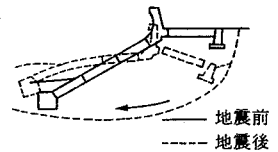
(a) 堤体の沈下



(b) 亀裂・破損



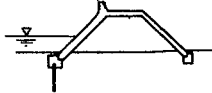
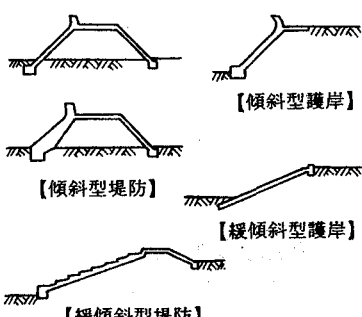
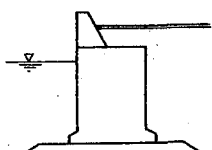
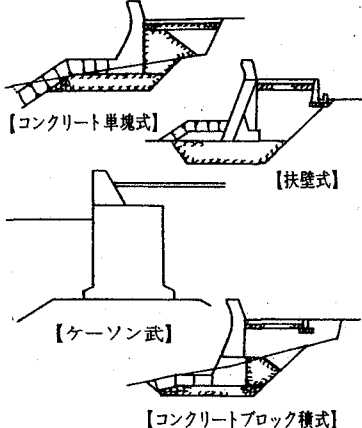
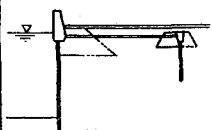
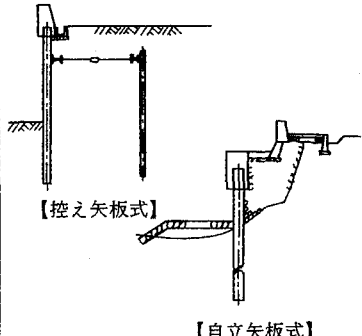
(c) 法面の滑動

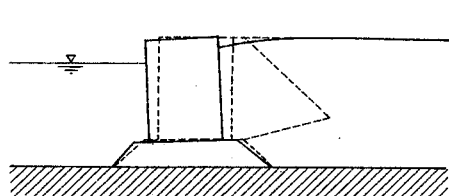


(d) すべり破壊

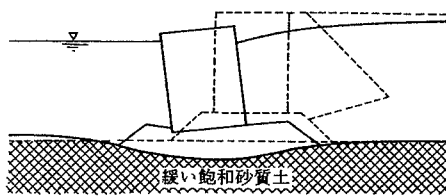
図-1 土堰堤式構造物の変形形態

表-2 堤防、護岸、胸壁の構造上の分類

分類名	特徴	代表的な型式
土堰堤式構造物 	① 土質材料を主体とするため、材料が入手しやすく経済的で、施工や補修が容易。 ② 特別な基礎を必要とせず、比較的緩い勾配の法面を有している。 ③ 波浪や越波による侵食や土砂の流失を防止するため、通常はいわゆる三面張り構造を採用している。 ④ 海域に面する表法面は直接波浪にさらされるので、堅固な構造となっている。 ⑤ 波浪による洗掘を防止するため前面に大規模な根固工や消波工が設置されているものが多い。 ⑥ 設計にあたっては地震による影響を考慮していないのが普通である。	 【傾斜型護岸】 【傾斜型堤防】 【緩傾斜型護岸】 【緩傾斜型堤防】
重力式構造物 (コンクリート重力式構造物) 	① 型式にはコンクリート単塊式、扶壁式、ケーソン式、コンクリートブロック横式がある。 ② 躯体がコンクリートであるため、比較的堅固で耐久性に優れている。 ③ 自重により安定する構造であることから、背後に土砂がない場合でも波力、水圧に対して抵抗できる。 ④ 設置水深が大きい場合にも基礎マウンドを築造して混成型式として対応できるので、汎用性が高い。 ⑤ 堤体数幅は狭くてよいが、荷重が集散的に作用するので、地盤の要箇所では基礎が大規模になることがある。 ⑥ 地耐力を期待できない軟弱地盤では、地盤改良を施す必要がある。 ⑦ 通常は地震による影響を考慮して設計されている。	 【コンクリート単塊式】 【扶壁式】 【ケーソン式】 【コンクリートブロック横式】
矢板式構造物 	① 型式には控え矢板式と自立矢板式がある。 ② 矢板材料は鋼矢板が一般的である。 ③ 腐食に対応するため、防食対策あるいは腐食を見込んだ矢板断面となっている。 ④ 壁体が軽量で弾性に富み、変形に対しては比較的柔軟である。 ⑤ 施工設備が比較的簡単で、急速施工が可能である。 ⑥ 裏込めのない状態では波浪に対して弱い。 ⑦ 止水性に優れている。 ⑧ 軟弱地盤にも適用できるが、改良を必要とすることがある。 ⑨ 地震力を考慮して設計されていることが普通である。	 【控え矢板式】 【自立矢板式】



(a) 基礎地盤が堅固な場合



(b) 基礎地盤が緩い飽和砂質土の場合

図-2 重力構造物の変形形態

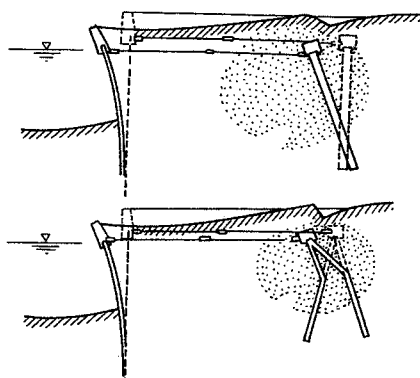
底地盤) が十分に堅固な場合には、図-2(a)に示すように、壁体の海側への水平変位ないし傾斜が発生する。また、基礎地盤がゆるい砂質土地盤のように地震時に軟弱化する場合には、同図(b)に示すように、基礎地盤を含む地盤全体の変形に伴って壁体の海側への変位、傾斜、沈下が発生する。一般に、壁体高さに対する相対的な壁体幅が小さくなるにつれて、変形形態は水平変位よりも傾斜のモードが支配的となる。壁体の海側への傾斜が著しくなると、地震後残留安定性が低下するので、構造安定上の観点からは、この点に対する検討が重要である²⁾。

4. 矢板式構造物の地震時挙動

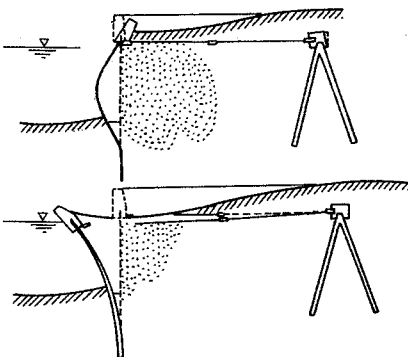
矢板式構造物は、基本的には、矢板壁本体が根入れされた基礎地盤の抵抗によって、矢板壁本体背後(陸側)の土砂を支える構造となっている。矢板式構造物には表-2 に示すとおり控え矢板式と自立矢板式があるが、このうち控え矢板式構造物は、矢板壁本体の根入れ部分の抵抗に加え、タイロッド、控え工の抵抗によって安定を保つ構造となっている。地震時の変形形態としては、地盤条件および構造条件によって、図-3 に示すように種々の形態がある。矢板式構造物では、変形とともに構造部材応力状態も重要なポイントとなる²⁾。特に、塑性化する部位およびその程度の評価が重要となる。

5. 耐震性能を考慮した設計の概要

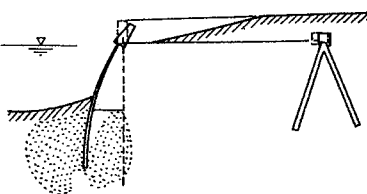
1995年の阪神・淡路大震災を契機として、土木・建築構造物の既往の耐震設計法に対する根本的な見直しの機運が高まってきた。この中で、性能設計の考え方に基づく新たな耐震設計法の



(a) 控え工の支持力不足による場合



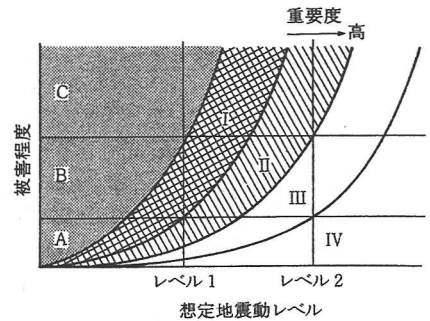
(b) 矢板本体ないしタイロッドの耐力不足の場合



(c) 矢板の根入れ部分の支持力不足の場合

図-3 矢板式構造物の変形形態

導入がきわめて重要であることが広く認識されるようになってきた³⁾。これまでの耐震設計では、基準に示された設計震度等で代表される想定地震動に対して力の釣合いを検討し、所用の安全率を確保することが目的とされ、想定地震動を上回る場合の検討は行わなかった。耐震性能を考慮した設計では、レベル1、レベル2の2段階を考慮して想定地震動に幅を持たせるとともに、それぞれの地震動レベルに応じて適切に許容被害程度を設定することにより、構造物の持つ耐震性を総合的かつ具体的に規定するものとなっている。このような耐震性能設計の導入により、対象構造物の果たす役割に応じて耐震性が明確に規定され、その信頼性が高まるとともに、その役割に応じて対象構造物の耐震レベルが柔軟に設定できるようになり、所期の機能の確保と同時に建設コスト縮減の追求にも応え得るものと期待される。



被害程度

- A：無被害または較微な被害
- B：短期間の応急復旧で機能回復
- C：著しい被害を受けるが崩壊はしない

図-4 耐震性能の概念図

耐震性能の概念は図-4のように示すことができる⁴⁾。同図の横軸は想定地震動レベルを、縦軸は構造物の許容被害程度を示している。許容被害程度は、同図では定性的な表現により3段階を規定しているが、具体的には構造形式ごとに構造物の機能低下の影響及び本格復旧の難易度（費用・時間）の2つの要因を考慮して規定する。耐震性能はこれらの地震動レベルと許容被害程度の両座標軸上で規定され、図-4では4段階の耐震性能グレードを示している。図から理解されるように各グレードは次のような耐震性能を意味する。

IV：レベル2地震動に対して被害程度Aにとどまる。

III：レベル1地震動に対しては被害程度A、レベル2地震動に対しては被害程度Bにとどまる。

II：レベル1地震動に対しては被害程度A、レベル2地震動に対しては被害程度Cにとどまる。

I：レベル1地震動に対して被害程度Bにとどまる。

なお、レベル2地震動に対しては万一施設の崩壊があった場合でも、これにより周辺に影響を与えない。

このように規定された耐震性能グレードは構造物の重要度と密接に関係し、一般に構造物の重要度が高いほど耐震性能のグレードも高いものが要求される。

以下には、これらの新たな考え方に基づいた海岸施設の耐震設計の考え方を示す。ただし、一挙に理想的耐震性能設計法を示しても、海岸施設の耐震設計の現状からは導入が困難な面があることから、以下では耐震性能を考慮した設計法の導入段階としての性格を有する方法を解説することとした。すなわち、耐震性能照査をレベル2地震動のみに限定し、レベル1地震動に対する耐震性能については、現行設計法（震度法）により概ね保証されているものとのスタンスをとり、その照査を省略することとした。さらに、レベル2地震動に対する照査を実施するケースを、対象施設の重要度などの諸条件をもとに、絞込んでいくための方策を示している。

6. 想定地震動

想定地震動として考慮するレベル1、2地震動の強さは、以下のとおりに性格付けされる³⁾。

レベル1：供用期間内に1～2度発生する確率を持つ地震動強さ

レベル2：発生確率は低いがいきわめて激しい地震動強さ

これらの地震動強さを再現期間で示せば、それぞれ、75年および数百年に該当する。なお、兵庫県南部

地震のようないわゆる内陸型の直下型地震の発生のある地域では、再現期間によらず、このような直下型地震をレベル2地震動として考慮する。

レベル1地震動に対応する再現期間75年の地震動は、対象構造物の耐用年数が50年の場合、耐用期間中にこれを上回る地震動の遭遇確率が50%に相当する。これは、阪神・淡路大震災以前に、重要度が標準的な構造物の設計に用いられてきた地震動レベルであり、各種設計基準類などに、設計震度または基盤最大加速度と地震動波形の組み合わせの形で示されている^{4,6,7)}。

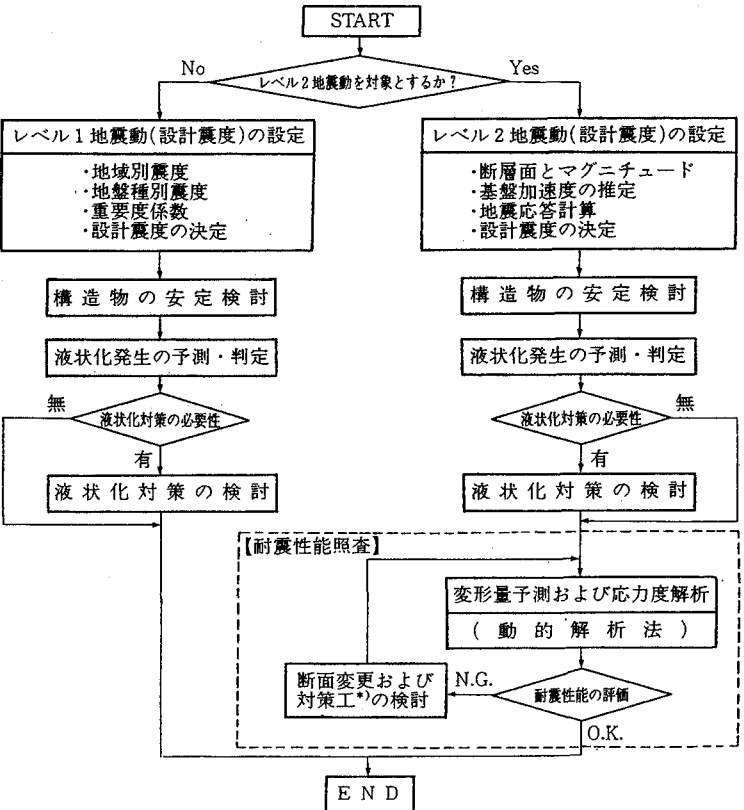
レベル2地震動の設定においては、地域防災計画で位置づけられた想定地震動を参照し、地域防災全体としての整合性を図ることがのぞましい。なお、地域防災計画で特定の地震が想定されていない場合には、参考文献5, 8, 9)などを参照して、想定地震のマグニチュード、想定地震断層から建設地点までの距離などに基づいて設定する。

7. 耐震設計の手順

海岸施設には種々のものがあるが、設計上、その地震時挙動に対する考慮が必要となるものは、1章に述べたとおり、堤防、護岸、胸壁等の土木的要素の強い施設と、水門、閘門、樋門・排水機場などの機械・電機要素の強い施設に大別される。

a) 堤防、護岸、胸壁等

堤防、護岸、胸壁等の土木的要素の強い施設は、地震により施設にある程度の変形が発生しても、所期の機能を維持することができるものが多い。そこで、これらの施設の耐震設計は、図-5に示すとおり、まず、レベル1地震動について現行設計法（震度法）による耐震設計および液状化の検討を行って基本構造断面を決定した後、この設計断面がレベル2地震動に対して、十分な耐震性能を有する否かについて照査する（耐震性能照査）ことにより、完了する。耐震性能照査の結果、所期の機能を維持できないと判断される場合には、必要に応じて断面変更・地盤改良を含む対策工の検討を行う。



注) 対策工の検討*: 構造形式変更および液状化対策等を含む

図-5 堤防・護岸・胸壁の設計手順

b) 閘門、水門、排水機場等

閘門、水門、排水機場等の機械・電機設備の比重の高い海岸施設は、土木構造部分のわずかな変形・被害が機械・電機設備の機能喪失につながる恐れがあり、土木的要素の強い施設とは異なる視点で耐震設計することが必要である。これらの施設の耐震設計では、図-6 に示すとおり、構造物の重要度などに基づいて、まず、レベル2地震動を設計で考慮するか否かについて決定する。レベル2地震動を設計で考慮しない場合には、レベル1地震動に対する従来型の耐震設計および液状化の検討を行うことにより設計が完了する。他方、レベル2地震動を考慮する場合には、構造物の設計断面をレベル1地震動ではなく、レベル2地震動に対して行い、必要に応じてこの設計断面に対して耐震性能照査によりレベル2地震動に対する所期の耐震性能を有することを確認する。

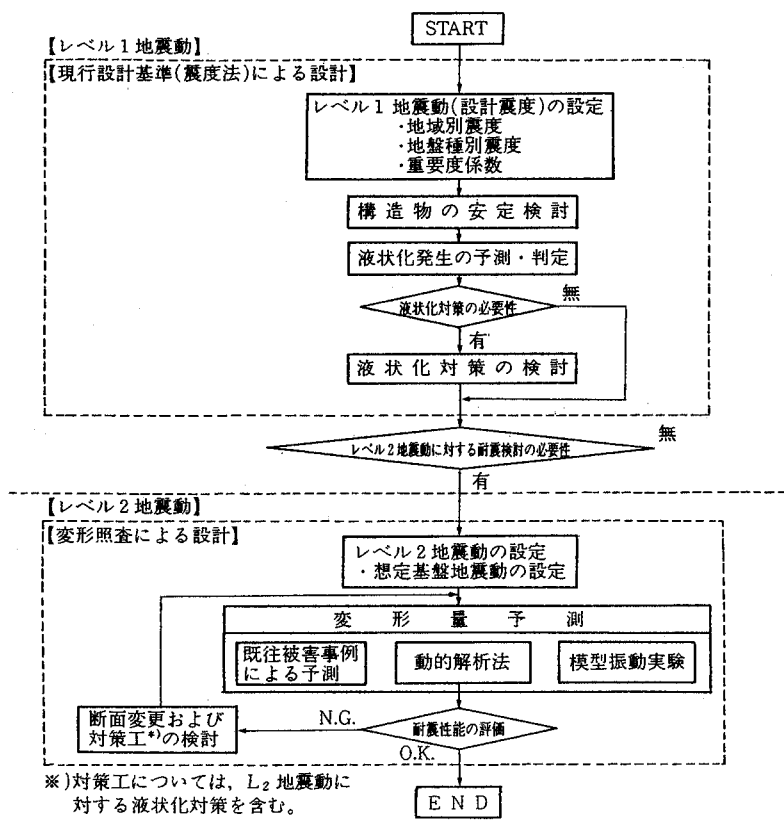


図-6 閘門、水門、排水機場の設計手順

8. 耐震性能照査

海岸施設の施設延長は一般に長いので、全延長にわたって同レベルの耐震性能を保持しようとする、経済的な負担が過大となるか、耐震性能が過小となるかのいずれかの結果をもたらす可能性が高い。このような問題を解消するためには、対象施設の機能および背後地の重要度を考慮し、特に必要性の高い区間に焦点を絞ってレベル2地震動に対する耐震性能照査を行い、これらの区間に対して重点的に耐震性能の強化を図るという方策が必要となる。

具体的な一つの方法として、以下のようなものが考えられる。まず、レベル2地震動に対する耐震性能照査の必要性が特に高いと判断される条件として、背後地の重要度、地形的条件(背後地地盤高)および直下型大地震の可能性の3条件を考慮し、それぞれ表-3 のとおり2ランクずつに分類する。これらの条件の組合わせに基づいて、レベル2地震動に対する耐震性能照査の有無の観点から、実際に実施する耐震検討を表-4 のとおりに絞込んで耐震設計を行う。

9. 許容変形量

耐震性能照査においては、さきに述べたとおり、対象施設の耐震性能が満たされているかどうかを照査する。堤防、護岸、胸壁等の土木的要素が強い施設の場合には、対象施設の耐震性能は主に地震後の残留変形量で規定される。地震後の残留変形形態は2-4章に示したとおりであり、耐震性能照査における照査項目の候補としては、沈下、傾斜、海側への変位、目地開き、躯体の損傷(ひび割れ)などが挙げられる。これらの諸項目のうち、堤防、護岸、胸壁及び陸側等の海岸施設は、背後地への浸水阻止を第一義の機能とするものであることから、施設の沈下(浸水阻止のための必要天端高の維持)に着目して許容変形量を規定することが適当と考えられる。なお、浸水の大きな要因として目地開きも挙げられるが、これは過去の地震被害調査事例結果から、沈下量との相関が認められることから、沈下量を代表的な照査項目として選定することに矛盾するものではない。

表-3 海岸施設の重要度などのランク付け

海岸保全施設背後の重要度	
Aランク=重要度(高い)	人口が集中、資産が集積、重要施設がある地区で、地震により多大な人命・財産の喪失及び震災復興に重要な役割を果たす地域
Bランク=重要度(通常)	Aランク以外の地域

地形的要因の区分	
低地盤高	朔望平均満潮位(H.W.L.)より低い地盤高区域
高地盤高	朔望平均満潮位(H.W.L.)以上の地盤高区域

直下の大地震の判定	
ランクⅠ=直下の大地震をレベル2地震動とする場合(直下型地震発生の有無を判定するための活断層の分類で、領域Aに属する場合)	
ランクⅡ=直下の大地震以外をレベル2地震動とする場合(直下型地震発生の有無を判定するための活断層の分類で、領域Bに属する場合)	

表-4 耐震性能照査対象ケースの優先度(絞込み)

(1) 海岸保全施設(開門、水門、排水機場等)の場合

		背後地重要度	
		A	B
直下の大地震の判定	Ⅱ	L_2	$L_1(L_2)$
	Ⅰ	$L_1(L_2)$	L_1

注) L_1 : レベル1地震動に対して設計する。

L_2 : レベル2地震動に対して設計し、変形・応力度照査を行う。

$L_1(L_2)$: レベル1地震動に対して設計するが、レベル2地震動(直下型地震の他、海洋プレート境界型も含む)にて変形・応力度照査することが望ましい。

ただし、開門、水門、排水機場等施設であっても、簡易な構造で損傷を受けた場合でも復旧が容易な施設にあっては、この分類から除くものとする。

(2) 海岸保全施設(堤防、護岸、胸壁および陸側等)の場合

背後地重要度		A		B	
		低地盤高	高地盤高	低地盤高	高地盤高
直下の大地震の判定	Ⅰ	L_2	$L_1(L_2)$	$L_1(L_2)$	L_1
	Ⅱ	$L_1(L_2)$	L_1	L_1	L_1

注) L_1 : レベル1地震動に対して設計する。

L_2 : レベル1地震動に対して設計することを基本とするが、必ずレベル2地震を対象に変形照査を行うことを原則とする。

$L_1(L_2)$: レベル1地震動に対して設計し、レベル2地震動(直下型地震の他、海洋プレート境界型も含む)にて変形照査することが望ましい。

許容沈下量を設定するための具体的な一つの方法として、高潮および波浪に起因する浸水防止を目的として、次式による設定が考えられる。

許容沈下量 ≤ |設計高潮位－朔望平均満潮位| + 10 年確率波に対する必要高クリアランス … (1)

なお、津波対策としての海岸施設は、変形後天端高がレベル2地震動により生起する津波に対する必要高を満足していることを確認することが必要である。式(1)における 10 年確率波は、復旧にかかる期間が1年程度の場合、この期間の遭遇確率が10%程度の低い値となる。

10. 耐震性能照査の例

耐震性能照査は、地震時の地盤の変形・強度特性などを考慮した有効応力解析法をはじめとする信頼性の高い動的解析法または模型振動実験により行われる⁴⁾。解析的な手法を用いる場合には、検討対象構造物あるいは類似する構造物の被災事例・模型振動実験などにより適用性が確認された手法を用いる。適用性が確認されていない場合には、耐震性能照査に先立ち手法の適用性について検討・確認することが必要となる。また、新形式構造物などのような既往の被災事例データがない場合は、新規に模型振動実験を実施するなどの方法で適用性を確認することがのぞましい。

耐震性能照査の一例として、図-7 に示す兵庫県内の海岸護岸に関する検討例を示す。同図に示すとおり、同護岸は小規模な護岸で、地盤も比較的堅く締まった状態となっている。兵庫県南部地震においても無被害であった。耐震性能照査のため、有効応力解析法として実績のある FLIP⁴⁾を用いて解析を行った。入力地震動としては、直下型地震の代表的な波形である兵庫県南部地震でのポートアイランドの基盤(-79m)で記録された地震波形を用いた。解析の結果、地震後の残留変形は図-8(a)に示すとおりとなり、護岸天端の残留変位は、水平 30cm、沈下 3cm 程度と算定され、兵庫県南部地震における無被害の状況と整合する結果が得られた。

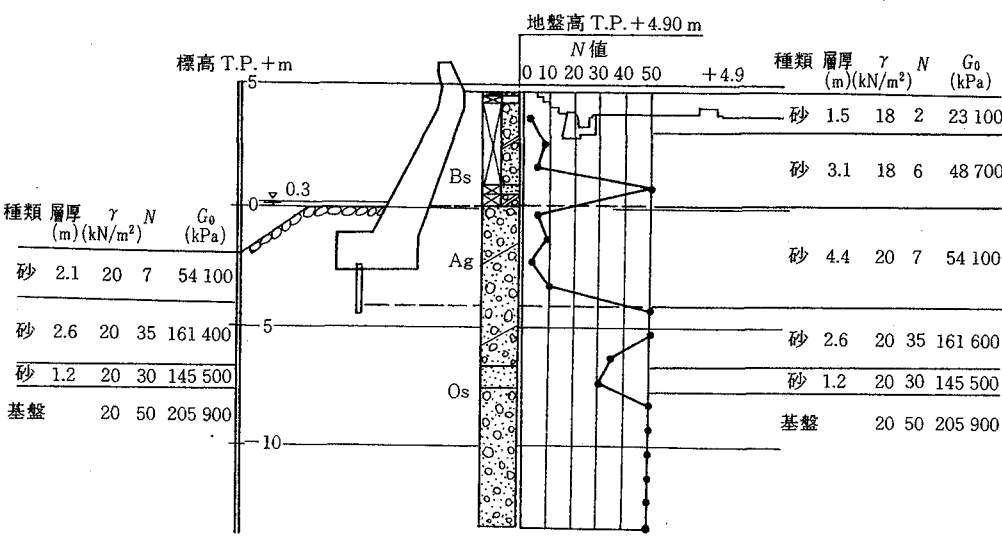
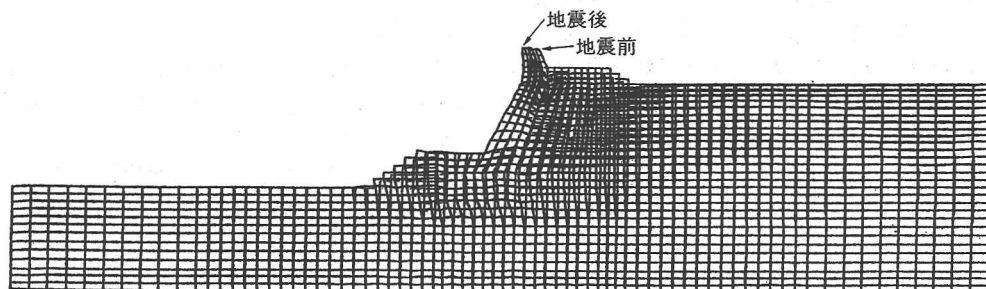
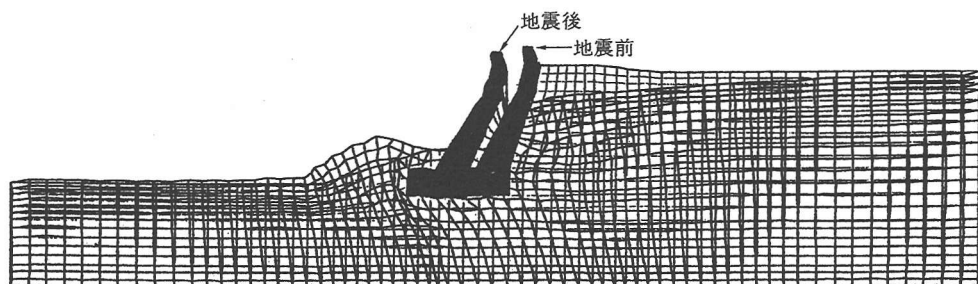


図-7 耐震性能照査の対象断面

試みに、地盤が N 値 10 程度のゆるい砂地盤の場合を想定し、同じ護岸断面について解析したところ、地震後の残留変形は図-8(b)に示すとおりとなり、護岸天端の残留変位は、水平 130cm、沈下 30cm 程度となった。本護岸の場合には、比較的小規模な護岸で、壁体の重量も軽いため、著しい沈下は発生しない結果となっている。比較のため、同様の地盤条件のもとで、やや重い壁体断面の護岸を解析した結果は図9のとおりとなり、この場合の護岸天端の残留変位は、水平変位 40cm、沈下 110cm 程度と、沈下が卓越する変形形態が得られた。以上のとおり、護岸断面、地盤条件により、変形形態、変形程度は著しく異なる。耐震性能照査の重要性が明らかに見て取れる。



(a) 現地盤での条件の解析結果



(b) 地盤が緩い($N=10$ 程度)砂層を想定した場合の解析結果

図-8 有効応力解析による地震の残留変形 (その1)

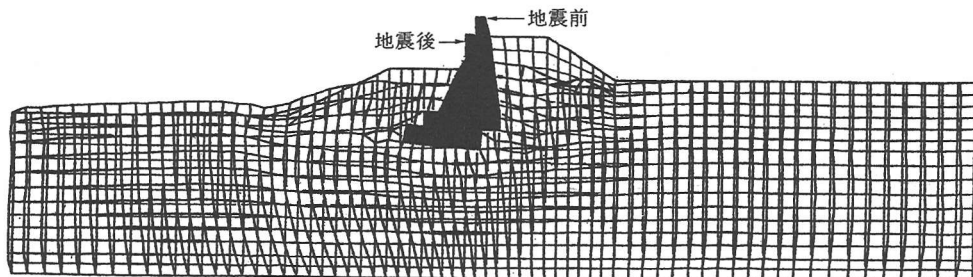


図-9 有効応力解析による地震後の残留変形 (その2)

参考文献

- 1) 農林水産省・水産庁・運輸省・建設省(1996): 海岸保全施設の耐震性に関する技術検討委員会報告書, 46p.
- 2) 小泉哲也・山本修司・竹地晃一郎・門脇陽治(1998): 被災した係留施設の残存耐力の評価手法の開発, 港研資料 No.912, 95p.
- 3) 土木学会(1996): 耐震基準等に関する提言集, 土木学会, 92p.
- 4) 運輸省港湾局監修(1997): 埋立地の液状化対策ハンドブック (改訂版), 沿岸開発技術研究センター, 421p.
- 5) 土木学会地震工学委員会地震荷重研究小委員会(1997): レベル2地震動と設計地震荷重の課題—地震荷重研究小委員会の活動報告—, 土木学会, 228p.
- 6) 運輸省港湾局監修(1999): 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 日本港湾協会
- 7) 建設省河川局監修(1997): 改訂新版建設省河川砂防技術基準(案)同解説, 設計編[I], 山海堂, 251p.
- 8) 野津 厚・上部達生・佐藤幸博・篠澤 巧(1997): 距離減衰式から推定した地盤加速度と設計震度の関係, 港研資料 No.893, 104p.
- 9) 寺内 潔(1996): 耐震強化岸壁の設計法, Coastal Development, No.24, 沿岸開発技術研究センター, pp.34~41.