

# 大分港（大在西地区）岸壁の耐震設計について

田代 浩気<sup>1</sup>・甲斐 信治<sup>1</sup>・西ノ園 憲人<sup>1</sup>

<sup>1</sup>九州地方整備局 下関港湾空港技術調査事務所 設計室  
(〒750-0025 山口県下関市竹崎町 4-6-1 下関地方合同庁舎 2階)

大分港は基幹産業が数多く立地し、多くの企業が各地を結ぶ原材料や製品等の輸送拠点として活用し国内の幹線物流の拠点として重要な役割を果たしている。大分港（大在西地区）は、大規模震災時における、これらの幹線貨物の輸送機能の確保とともに、海上からの緊急物資の輸送など円滑な災害支援・救護活動を図れるよう耐震強化岸壁として、港湾計画に位置付けられた。本稿は、耐震強化岸壁として必要な耐震性能を満たすため、耐震設計を行った、大分港（大在西地区）の事例について報告するものである。

キーワード 耐震強化岸壁，地盤改良，CDM工法，地震応答解析

## 1. はじめに

大分港は瀬戸内海の西端，別府湾の中央に位置し古くは南蛮貿易港として栄え，ポルトガルや明と交易を行っていた。現在，大分港（図-1）は東西約 23km の臨海部に石油コンビナートや製鉄所，発電所等の基幹産業が数多く立地する国内有数の臨海工業地帯となり，多くの企業が原材料や製品等の輸送拠点として利用している。また，本州各地と東九州を結ぶ RORO 船（図-2）が就航しており，国内の幹線物流の拠点として重要な役割を果たしている。

その一方で，大分市は別府港から西部にかけて別府一万年山断層帯をはじめとした活断層が点在していることなど，地震に対する不安も大きい地域である。このよう



図-2 荷役作業中の RORO 船

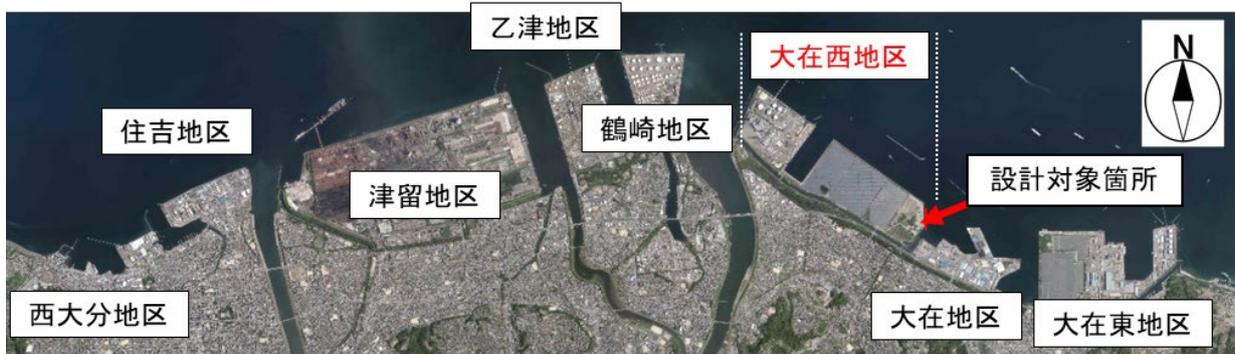


図-1 大分港航空写真

な背景からも、大規模地震が発生した直後においても海上からの緊急物資輸送など円滑な災害支援・救護活動が図れるよう、大分西地区に耐震強化岸壁（水深 9m）

（図-3）が港湾計画に位置付けられた（令和元年 11 月、港湾計画一部変更）。本報告は、大分港大分西地区に新設される耐震強化岸壁 2 バース（460m）のうち 1 バース（240m）を設計するものである。

なお、本岸壁の平常時においては、近年大分港で増便している RORO 船が利用する計画となっており、今回の整備により、バース（係留施設）不足や水深不足、ふ頭用地不足による非効率な荷役活動を解消する目的もある。

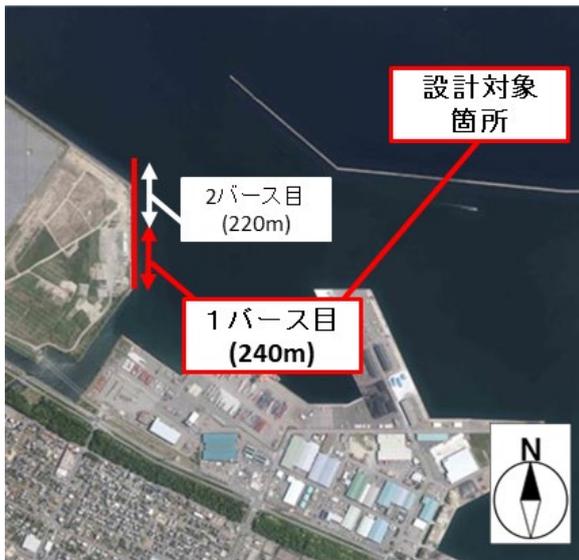


図-3 大分港（設計対象箇所）航空写真

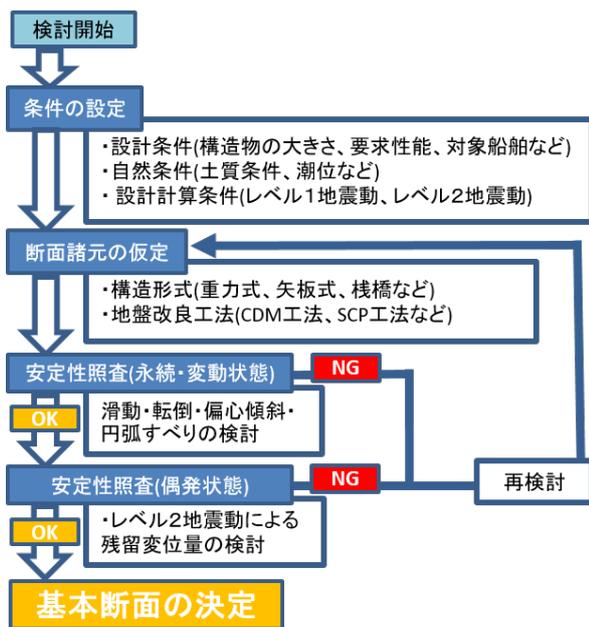


図-4 耐震強化岸壁の設計フロー

## 2. 設計計画

### (1) 耐震強化岸壁の設計フロー

耐震強化岸壁の設計フローを図-4 に示す。まず設定された条件に基づいて断面諸元の仮定を行う。仮定した断面で、永続・変動状態における安定性照査を行い、安定性が確認された場合に、偶発状態における安定性照査（二次元 FEM 有効応力解析）を行う。永続・変動状態、偶発状態どちらでも安定性が確認されるまでこれを繰り返す、最終的な基本断面を決定していく。

### (2) 設計条件

本設計の設計条件を表-1 に示す。また、本設計対象施設は耐震強化施設【緊急物資輸送対応（標準）及び幹線貨物輸送対応（特定）】として設計するものである。

### (3) 緊急物資輸送対応（標準）と幹線貨物輸送対応（特定）について

緊急物資輸送対応（標準）とは、大規模災害等による被災時であっても応急復旧により緊急物資輸送が可能な係留施設であり、想定される最大規模の地震直後の速やかな応急復旧により 7 日程度でその機能を応急的に復旧されることが求められる。一方、幹線貨物輸送対応（特定）は、大規模地震等による被災時であっても構造的な安定が保たれ、速やか（短期間の後）に、船舶の利用及び幹線貨物の荷役を行えることが求められる。

### (4) レベル 2 地震による残留水平変位量の限界値（性能規定）について

本設計対象施設が被災した場合においても耐震強化施設としての性能を満足できるよう被災後の修復性について検討する。

緊急物資輸送対応（標準）におけるレベル 2 地震による残留水平変位量の限界値は、過去の震災時の実績にお

表-1 設計条件一覧

種別	項目	設計条件	備考
一般条件	設計対象位置	大分港大分西地区	
	施設種類	耐震強化施設（標準） 緊急物資輸送対応 "（特定） 幹線貨物輸送対応	
	設計延長	240m	
	現況水深	D. L. -3.0m ~ -7.1m	
	計画水深	D. L. -9.0m (D. L. ± 0.00 = T. P. -1.22m)	
利用条件	設計水深	D. L. -9.5m (重力式)	
	岸壁天端高	D. L. +3.8m ⇒ H. W. L. +2.37m + (1.0 ~ 2.0m)	
	対象船舶	15,000GT (国内 RORO 船) → 接岸速度 0.15 m/sec	
	上載荷重	永続状態 20kN/m <sup>2</sup> 、変動状態 10kN/m <sup>2</sup>	
	荷役機械	なし	
	取扱貨物	雑貨	
	附带施設	防舷材、係船柱、車止め、梯子	
	エプロン	エプロン幅 20m、勾配 1.0%	
	耐用年数	50 年	
	その他	反射波防止要請	なし

いて、地震により岸壁法線に生じる変位が、海側に向かって最大 2m 程度以内の変位であれば、それに伴う岸壁法線に凹凸相対変位（岸壁法線の凹凸）が生じて、係船した実績がある。海側に向かって最大 2m 程度以上の変位になると、船舶が平常時より海側寄りや岸壁法線に対して平面的に無理に傾いて接岸・係留せざるを得ず、船舶の接岸・係留に問題が生じてしまい、地震後の利用が困難となる（図-5）。

また、緊急物資輸送対応（標準）の残留水平変位量の限界値（2.0m程度）であれば、緊急物資輸送対応のための復旧で岸壁とエプロンとの段差は埋め戻すことで、通常荷役のトレーラー等も利用可能となる。

一方で、幹線貨物輸送対応（特定）はレベル2地震による残留水平変位量の限界値は、港湾の施設の技術上の基準・同解説（2018年）にも定められていないが、大分港大在西部地区の場合には平常時の利用対象船舶が RORO 船であることから、図-2 のように船舶から岸壁へ傾斜路を降ろし、トレーラー等の車両が問題なく走行できれば本来の機能を発揮できる。

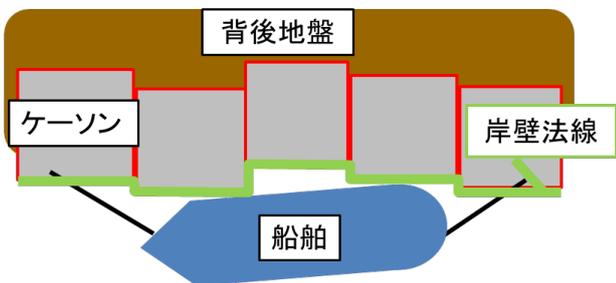
よって、大在西部地区の耐震強化岸壁は、緊急物資輸送対応（標準）としての残留水平変位量の限界値（2.0m程度）を満足できれば、幹線貨物輸送対応（特定）としての機能も満足できるものとした。

### (5) 対象地震動の設定について

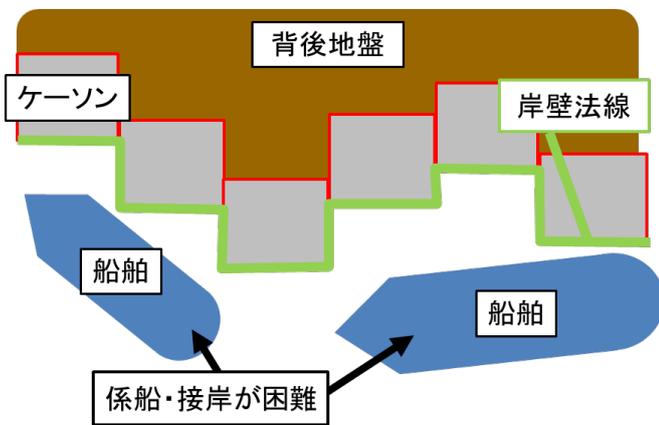
大分港のサイト増幅特性及び地震動については、大分港内の近隣地区である「西大分地区」で既に設定されたものがあるため、常時微動観測により設計対象箇所に適用できるかを判断する。常時微動観測とは、図-6 のように、地震が発生していない状態の遠くの海の波、風の振動、人の振動、工場・車の振動などによって起こされる、一般には感じる事ができないほどの小さなレベルの地盤の振動のことである。常時微動観測結果を基にした H/V スペクトルのピーク周波数と、サイト増幅特性のピーク周波数を比較することで他地区のサイト増幅特性を適用できるかどうか判断することができる。

大在西部地区での常時微動観測結果を基にした H/V スペクトルと、大分港西大分地区のサイト増幅特性を図-7 に示す。その結果、どちらのピーク周波数もほぼ一致していたことから、本設計対象箇所に用いるサイト増幅特性は西大分地区のサイト増幅特性を用いることが可能であるとされた。

レベル2地震動は、2014年に西大分地区のサイト増幅特性を用いて既に算定された地震動（湯布院断層帯東部地震（内陸型）、南海地震（海溝型）、M6.5直下型地震）があるためそれをそのまま適用することとした。



(a)岸壁の変形量が2m程度以内の場合



(b)岸壁の変形量が2m程度以上の場合

図-5 岸壁に変位が生じた場合の係船のイメージ

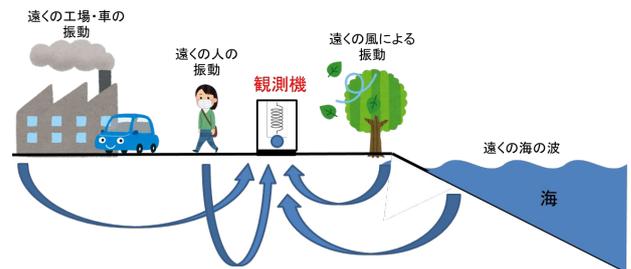


図-6 常時微動観測のイメージ

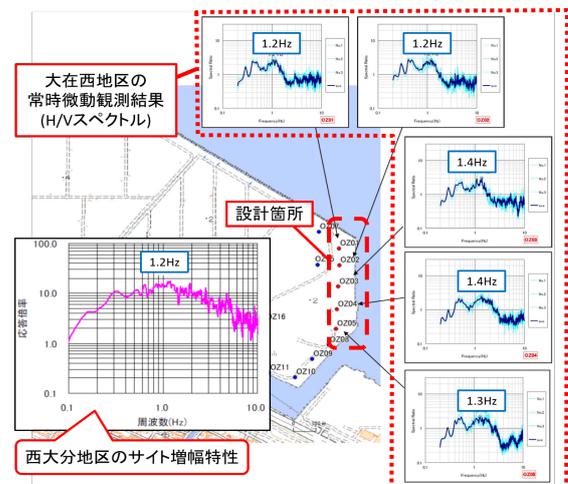


図-7 西大分地区のサイト増幅特性と大在西部地区の常時微動観測結果

(6) 地盤条件について

大在西地区で 2018 年及び令和元年に行われた土質調査のボーリング位置を図-8 に、土質成層図を図-9 に示す。土質成層図によると、既設護岸背後にはシルト砂質土 (Fcs) が厚く堆積している。より安全な設計を行うため、土層モデルを設定する際には、2次元FEM有効応力解析プログラムである FLIP を用いてレベル2地震時の過剰間隙水圧の上昇程度を解析し、検討した (図-10)。その結果、設計対象箇所(No.2)の砂質土 (As2) は過剰間隙水圧の上昇程度が比較的低いことが分かったため、円弧すべり等の安定性が低くなる粘性土 (Ac1, Ac2) を厚く設定することにより、安全側の設計とした。検討した土質モデル図を図-11 に示す。

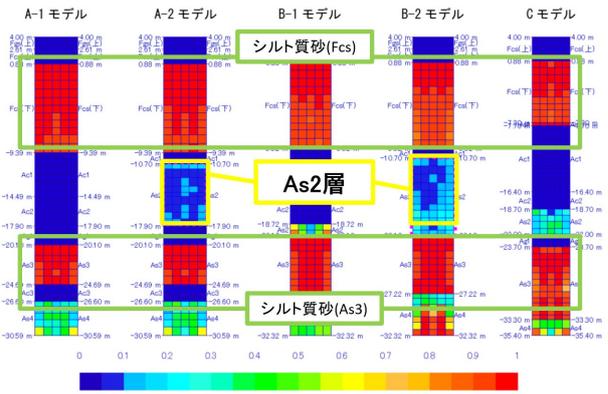


図-10 過剰間隙水圧の解析結果

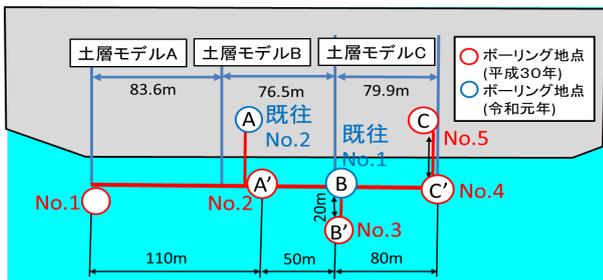


図-8 ボーリング位置図

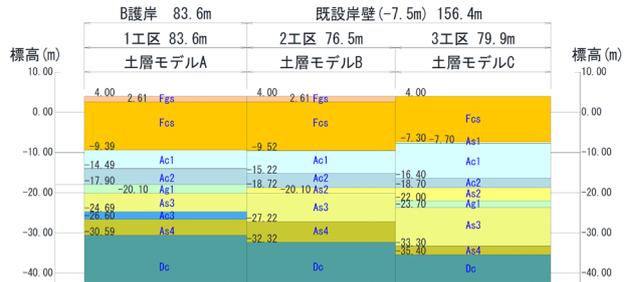
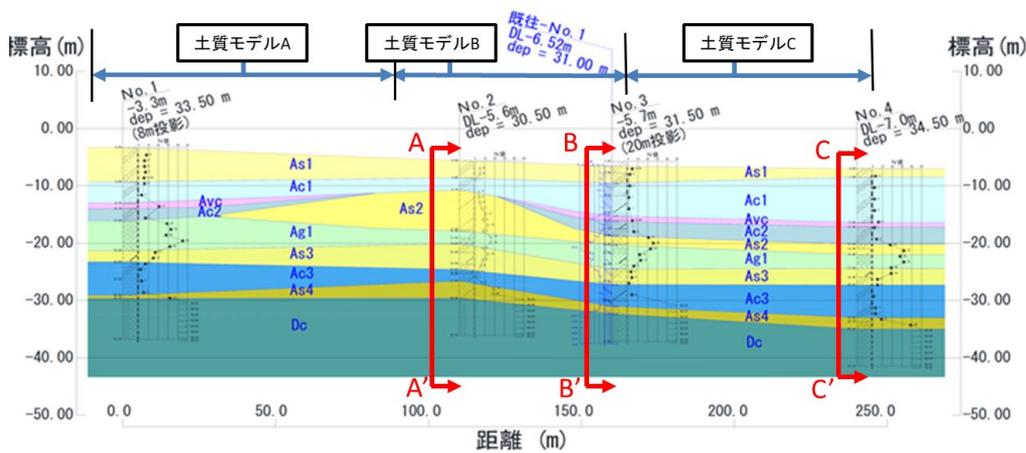
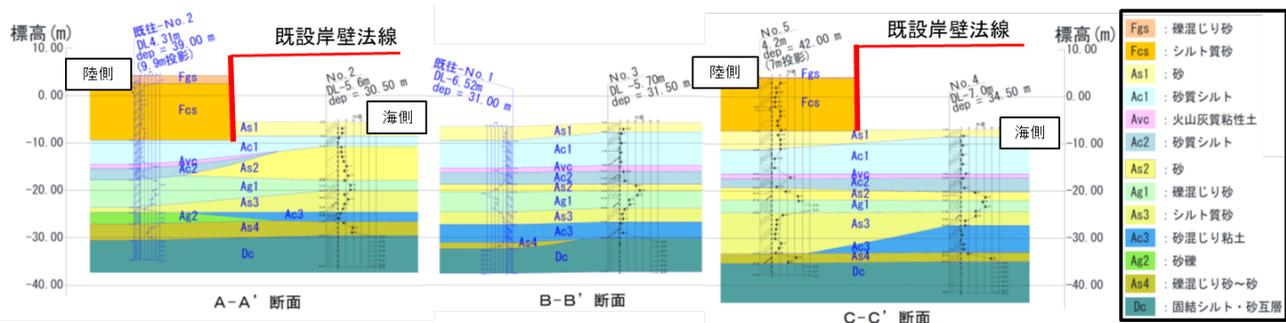


図-11 土層モデル図



(a)法線方向の成層図



(b)法線に対して垂直方向の成層図

図-9 土質成層図

(7) レベル1地震動の液状化判定

土質調査結果をもとに、1次元の地震応答解析によりレベル1地震動における液状化の予想・判定（等価N値および等価加速度による判定）を行ったところ、シルト砂質土（Fcs）が液状化する判定となった。

3. 構造形式の選定

(1) 構造形式

構造形式の選定にあたっては、一般的な構造である重力式、矢板式、栈橋（図-12）を比較し経済性、施工性等に優れた構造形式を設定し、検討を行った。

矢板式に関しては、主働崩壊面に存在するシルト砂質土（Fcs）に対する液状化対策工事が必要になることと、深い土層に弱い砂層があり矢板の規格が増大し、変位量を抑えるために控工周辺の地盤改良も必要となったために経済性で不利となる結果となった。

栈橋に関しても、主働崩壊面に存在するシルト砂質土（Fcs）に対する液状化対策工事が必要になることと、矢板式と同様に弱い砂層によって杭の規格が大きくなり、既設部（土留部）の変位量を抑えるため地盤改良が必要となったため、こちらも経済性で不利となる結果となった。

重力式では、構造安定上必要な範囲にシルト砂質土（Fcs）が入らないため、液状化対策の工事を行う必要が無く他案より経済性で優位であり、また、鋼構造物と違い維持管理も比較的容易であることから矢板式、栈橋に比べ優れているため、本設計対象施設では重力式のRCケーソンを構造形式として選定した。

(2) 地盤改良

選定した重力式（RCケーソン）構造は、主働崩壊面の液状化対策工事は必要ないが、構造物直下を地盤改良しない場合、偏心傾斜（基礎工の安定）及び円弧すべりが安定しないことが分かったため、地盤改良工法を選定する。

a) 地盤改良工法の選定

設計対象箇所では、環境上の制約がないため、地盤改良工法として一般的なサンドコンパクション工法（SCP工法）と深層混合処理工法（CDM工法）の2工法を比較、検討した結果、図-13よりCDM工法の方が、地盤改良単価は高価であるが、施工性、経済性に優れていたことから、CDM工法を採用することにした。

b) CDM工法について

改良深度は、偏心傾斜や、円弧すべりに対応するための永続・変動状態での必要範囲として、深度はDL-20m程度（As2層に着底）までとし、幅は基礎捨石の下端部の長さまでとした。

改良形式については、図-14のように種類があるが、偏心傾斜及び円弧すべりで安定させる場合には、ブロック式、壁式、接円式（接円ラップ）、格子式が挙げられる。2次元FEM有効応力解析プログラムにて内部応力

	深層混合処理工法（CDM工法）	サンドコンパクションバイブル工法（SCP工法）
構造図		
安定性 施工性等	<ul style="list-style-type: none"> <li>照査用震度をSCP工法より低減できるため、ケーソンを小さくできる。</li> <li>→ 床掘土量が最小で済み、既設岸壁に対する対策が必要ない。</li> <li>一般的に盛り上がり土量はSCP工法より少ない。</li> <li>地盤改良単価は、CDM工法が高価。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>CDM工法と比べ照査用震度が大きいため、ケーソンが大きくなる（変動状態の滑動、偏心傾斜への対応）。</li> <li>それに伴い、基礎工が大きくなる（偏心傾斜、円弧すべりへの対応）。</li> <li>→ 基礎工が大きくなるため床掘土量が増加するとともに、既設岸壁を安定させるため仮設矢板が必要となり、施工が煩雑となる。また、地盤改良範囲も広がる。</li> <li>一般的に盛り上がり土量はCDM工法より多い。</li> <li>地盤改良単価は、SCP工法が安価。</li> </ul>
断面単価	1.00	1.16

図-13 地盤改良工法の比較

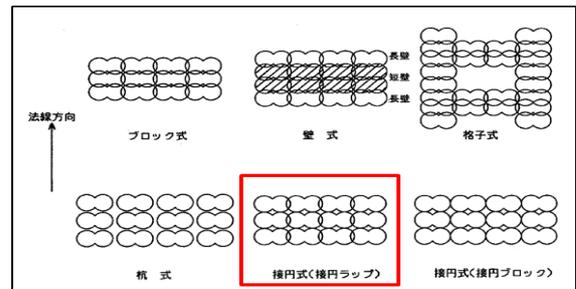
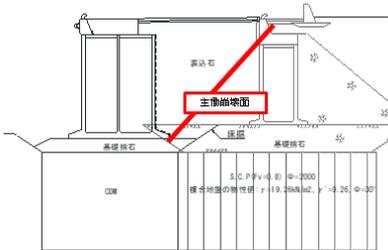
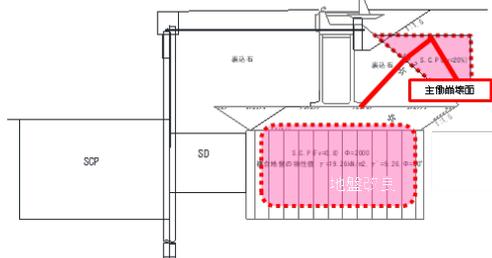


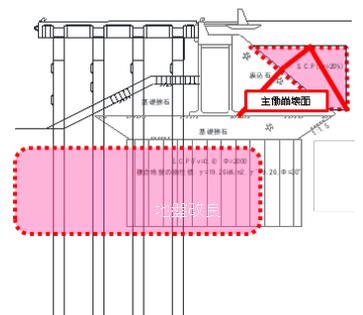
図-14 CDM工法改良形式<sup>1)</sup>



(a) 重力式(RCケーソン)



(b) 矢板式(控え式矢板)



(c) 栈橋(RC栈橋)

図-12 構造形式

の照査をしたところ、経済性が比較的高い格子式、壁式では内部安定が満足せず、ブロック式と接円式（接円ラップ）では、接円式（接円ラップ）の方が経済性が高く、性能を満足したため、接円式（接円ラップ）を採用することとした。

#### 4. 安定性照査

##### (1) 安定性照査（永続・変動状態）

性能規定等に基づき、設定した重力式（RC ケーソン）の構造形式に構造上必要最低限の CDM 改良を実施した断面で、永続・変動状態の安定性の照査を実施し、性能が満足することを確認した。

##### (2) 安定性照査（偶発状態）

永続状態及び変動状態の安定性照査を満足した改良断面において、耐震性能を確認するため、レベル 2 地震動を用いて 2 次元 FEM 有効応力解析プログラム FLIP により解析を実施し、耐震性照査（動的解析）を行った。その結果を図-15、表-2 に示す。岸壁

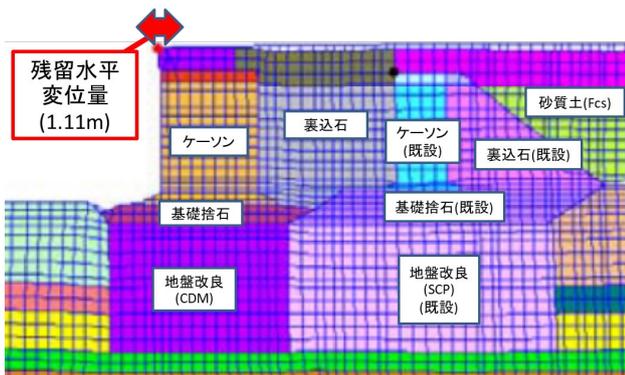


図-15 偶発状態照査結果  
(湯布院断層帯東部（内陸）型）

表-2 解析結果一覧

地震波形	残留水平変位量 (m)			残留傾斜角 (°)		
	解析結果	照査基準	判定	解析結果	照査基準	判定
①湯布院断層帯東部(内陸型)	1.11	2.00	OK	0.42	3.00	OK
②南海地震(海溝型)	0.70	2.00	OK	0.14	3.00	OK
③M6.5直下型地震	1.21	2.00	OK	0.62	3.00	OK

天端に多少の残留水平変形量は生じるものの、3つ全ての地震動（湯布院断層帯東部地震（内陸型）、南海地震（海溝型）、M6.5直下型地震）において、レベル 2 地震動による残留水平変位量の限界値（残留水平変形量）が 2.0m 以下となり、性能規定を十分に満足する結果が得られた。従って、図-16 で示した改良断面を本設計の基本断面として決定した。

#### 5. おわりに

今回の設計対象施設は、耐震強化岸壁の幹線貨物輸送対応（特定）と緊急物資輸送対応（標準）の 2 つの規定が設定されており、それら 2 つの規定の性能を満足する必要があった。その結果、水平変位量については緊急物資輸送対応（標準）の規定を、地震後の復旧作業については幹線貨物輸送対応（特定）の規定を用いることで両方の規定を満足できるとした。

大規模地震の発生する可能性が高まり耐震強化岸壁の整備が急がれつつある昨今、大分港の大在西地区に今回設計された耐震強化岸壁が完成することで海上からの緊急物資の輸送など円滑な災害支援・救護活動を図れるようになればと考える。

#### 出典

- 1) 一般財団法人 沿岸技術研究センター：港湾・空港における深層混合処理方法技術マニュアル

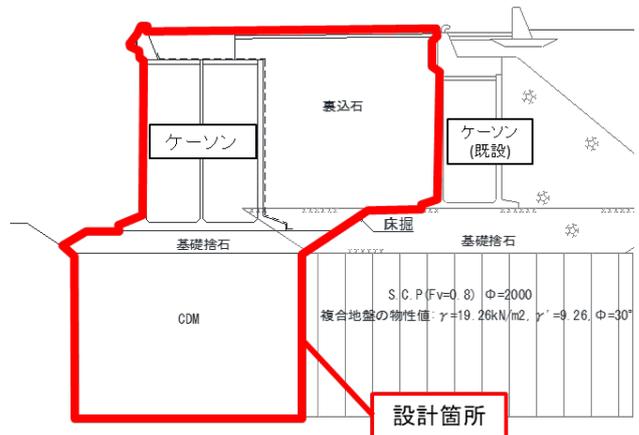


図-16 基本断面図