

島根原子力発電所第2号機 審査資料	
資料番号	NS2-他-203
提出年月日	2022年9月14日

防波壁における基礎捨石及び被覆石の取扱いについて

2022年9月

中国電力株式会社

島根原子力発電所では、施設護岸は複数のセルラーブロック及び上部コンクリートにより構成されており、施設護岸の前面及び基礎に基礎捨石（200～250mm，30kg/個以上）及び被覆石（700～800mm，1.5t/個）を使用している。

津波防護施設である防波壁と施設護岸の配置について、全体平面図を図1に、防波壁（多重鋼管杭式擁壁）における断面図を図2に、防波壁（逆T擁壁）における断面図を図3に、防波壁（波返重力擁壁）における断面図を図4に示す。

防波壁（多重鋼管杭式擁壁）は、施設護岸背面又は前面に設置され、基礎捨石及び被覆石は防波壁から離れた位置に設置している断面と、防波壁の鋼管杭が基礎捨石を貫通している断面がある。

防波壁（逆T擁壁）は、施設護岸背面に設置され、基礎捨石及び被覆石は防波壁から離れた位置に設置している。

防波壁（波返重力擁壁）の周囲に施設護岸はなく、基礎捨石及び被覆石は存在しない。

よって、防波壁（多重鋼管杭式擁壁）及び防波壁（逆T擁壁）においては、防波壁の周囲に基礎捨石及び被覆石を設置していることから、防波壁の解析モデルに取り入れる必要がある。

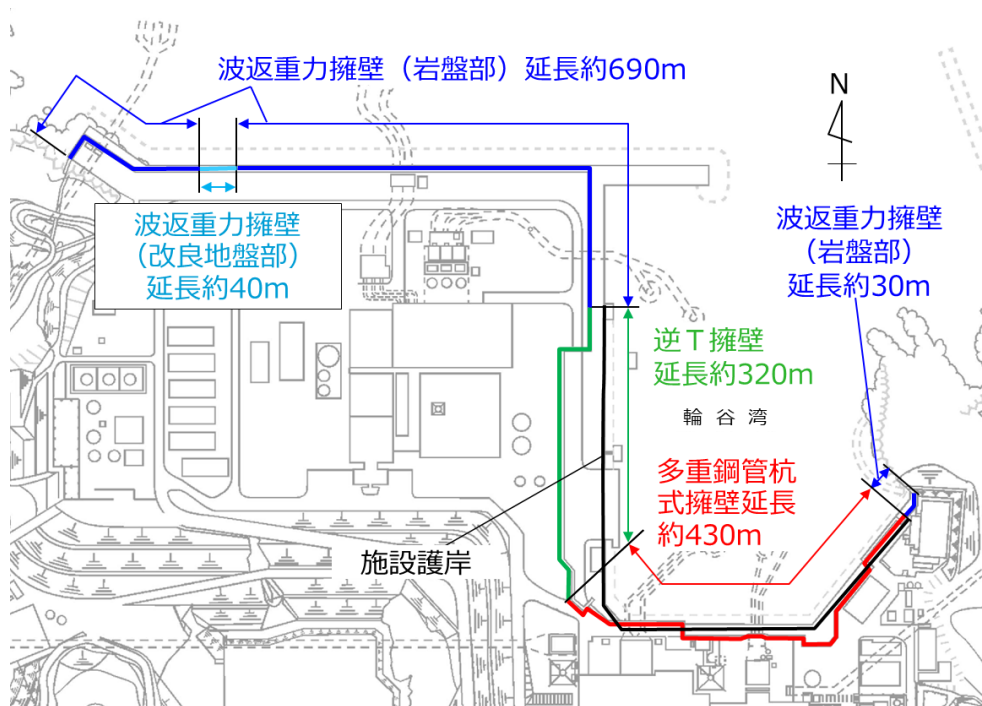
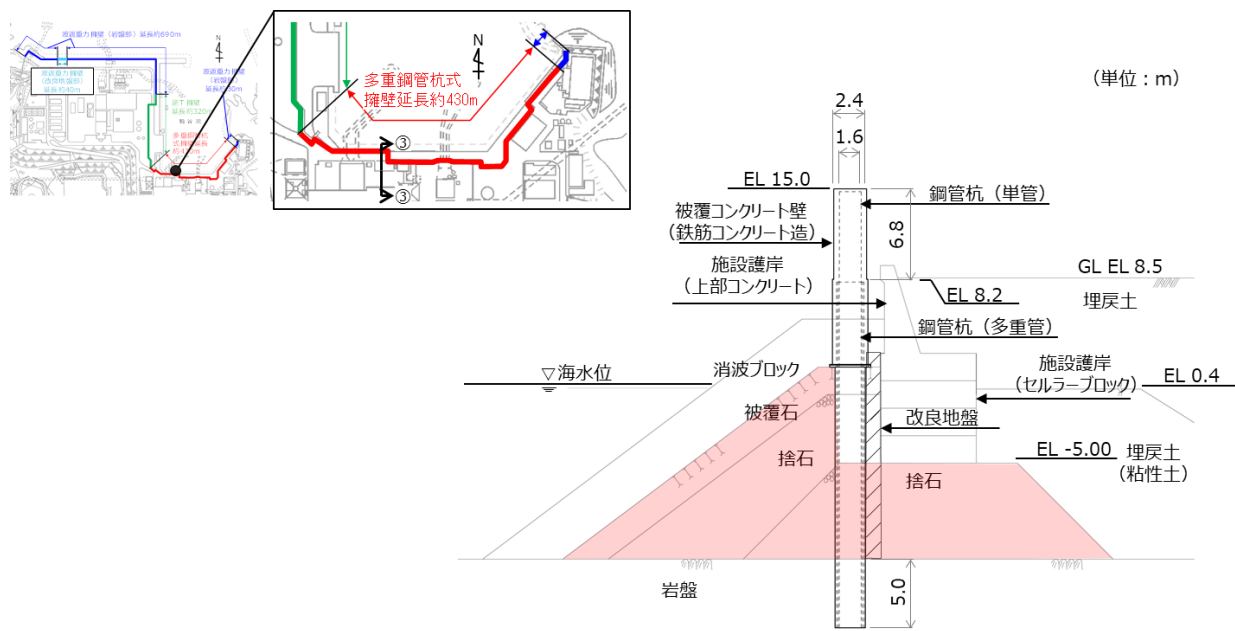
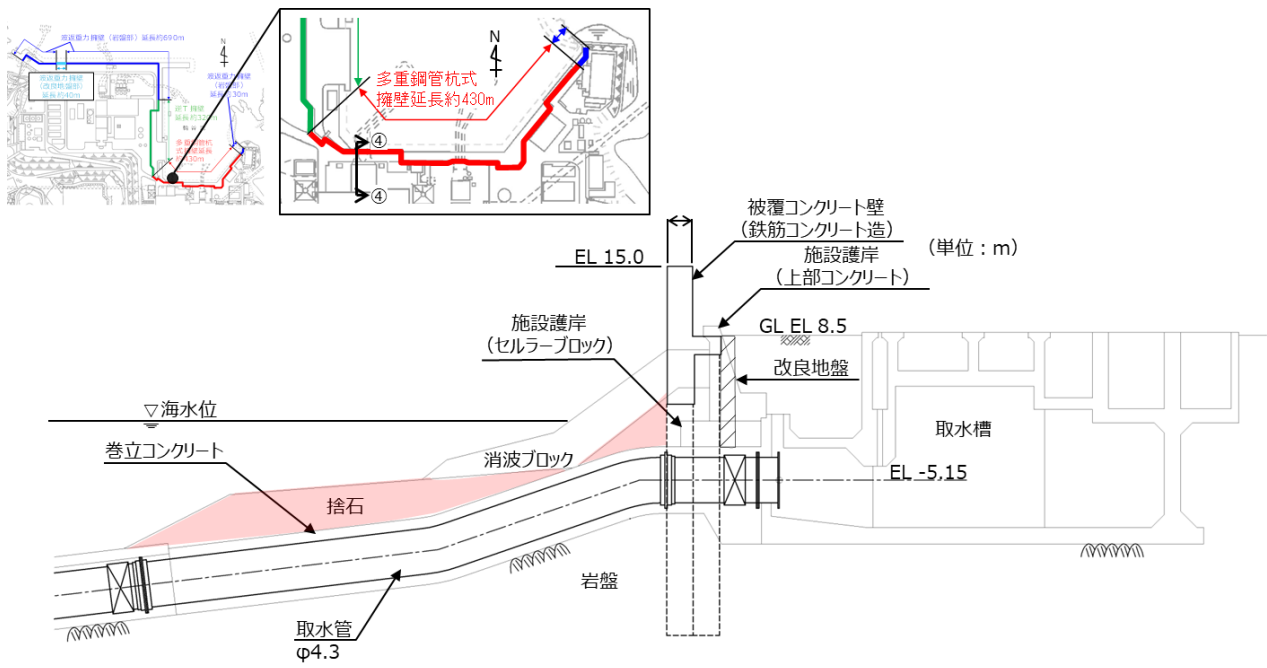


図1 防波壁と施設護岸の配置（全体平面図）



③-③断面

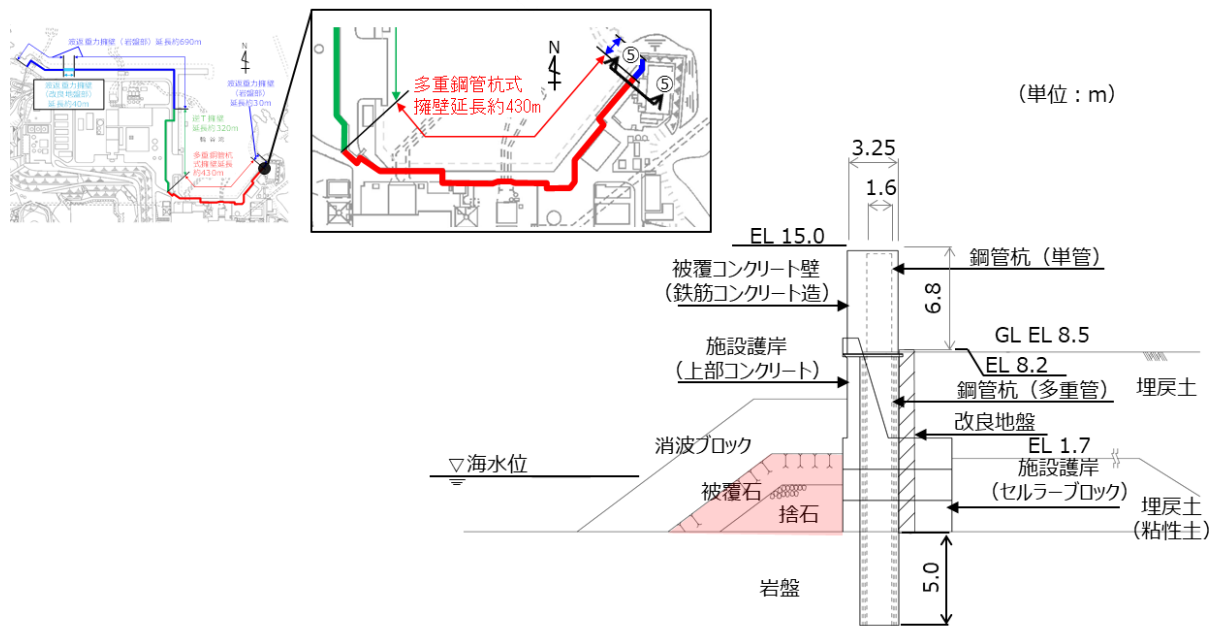
(防波壁の鋼管杭が基礎捨石を貫通している)



④-④断面

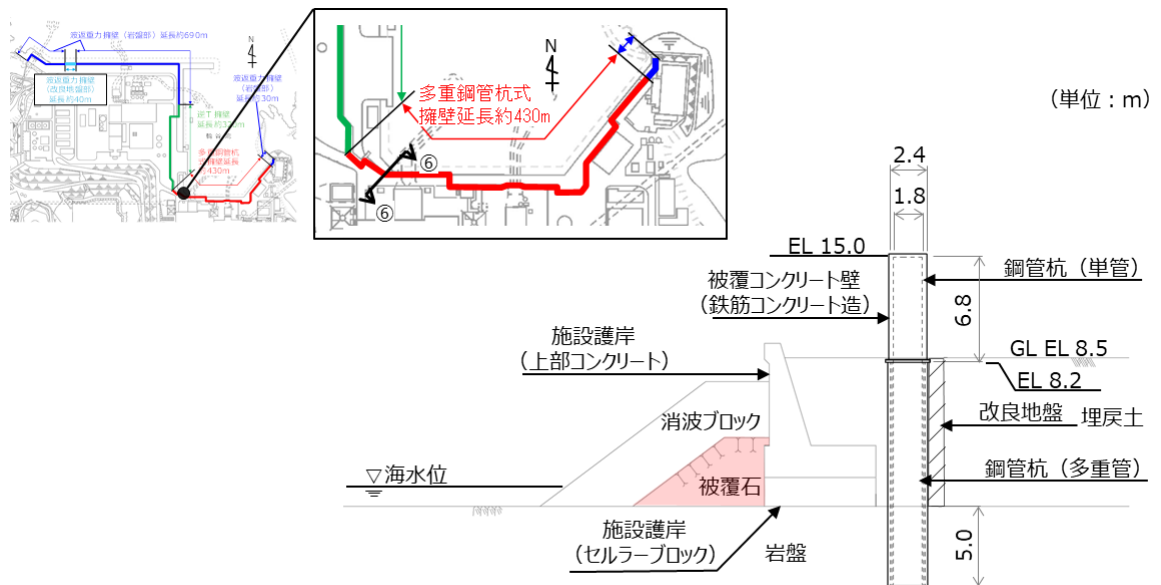
(防波壁の鋼管杭が基礎捨石を貫通している)

図2 防波壁（多重鋼管杭式擁壁）における基礎捨石及び被覆石の配置（2 / 3）



⑤-⑤断面

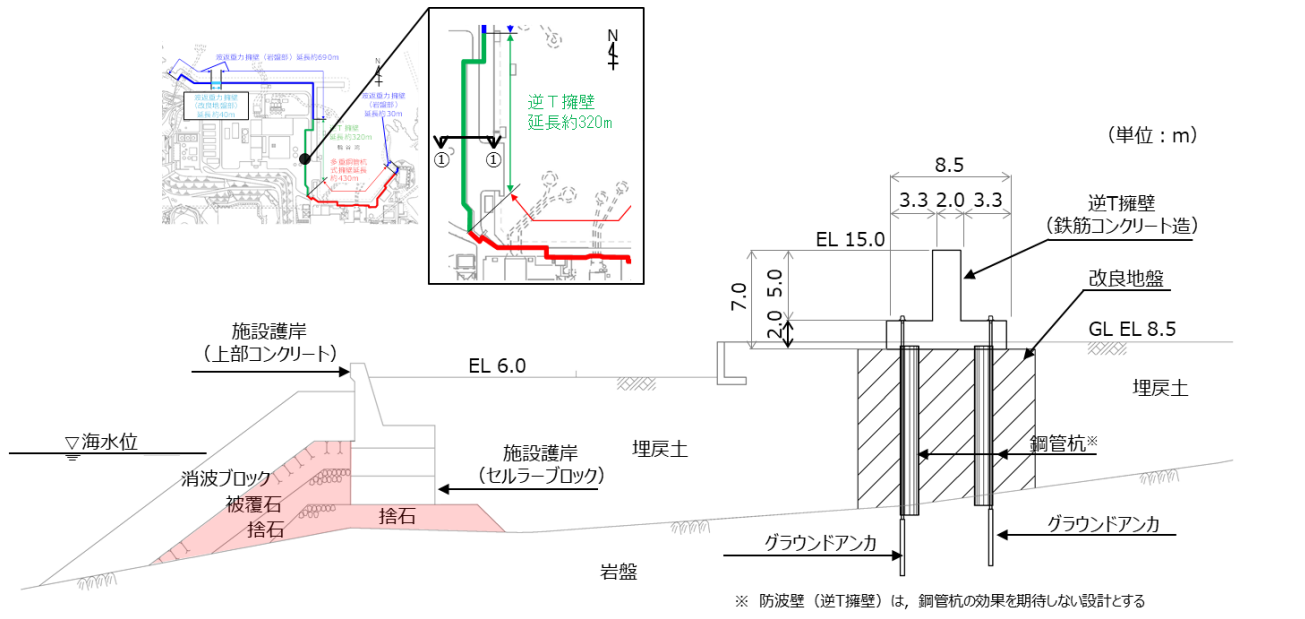
(基礎捨石及び被覆石は防波壁から離れた位置に設置している)



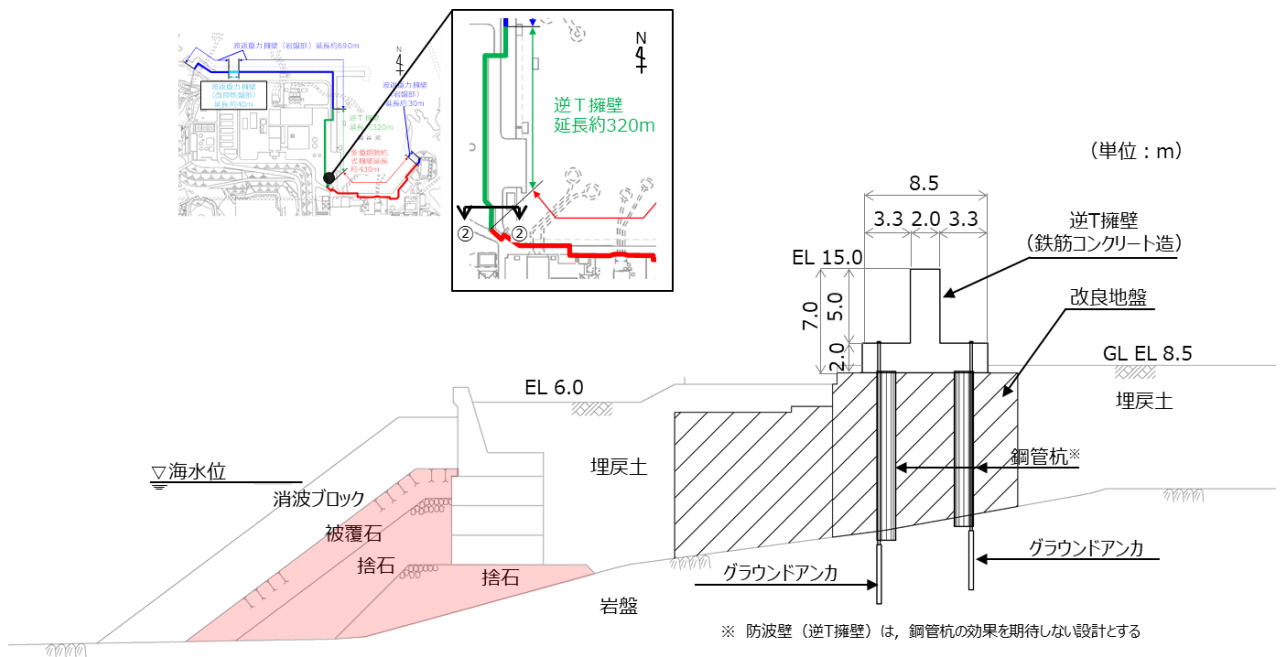
⑥-⑥断面

(基礎捨石及び被覆石は防波壁から離れた位置に設置している)

図2 防波壁(多重鋼管杭式擁壁)における基礎捨石及び被覆石の配置(3/3)

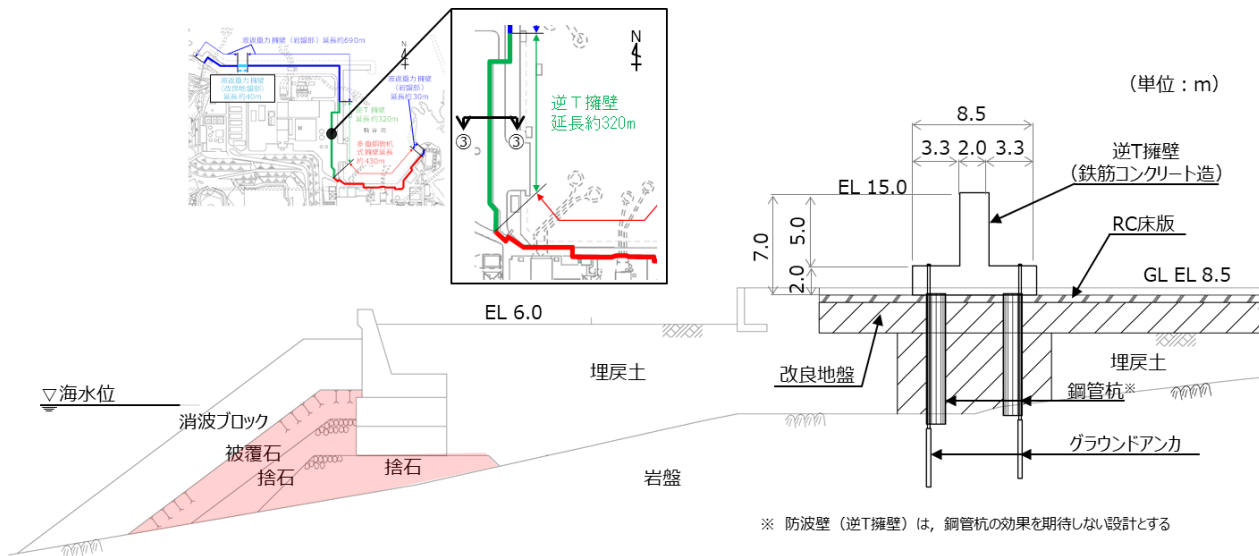


①-①断面

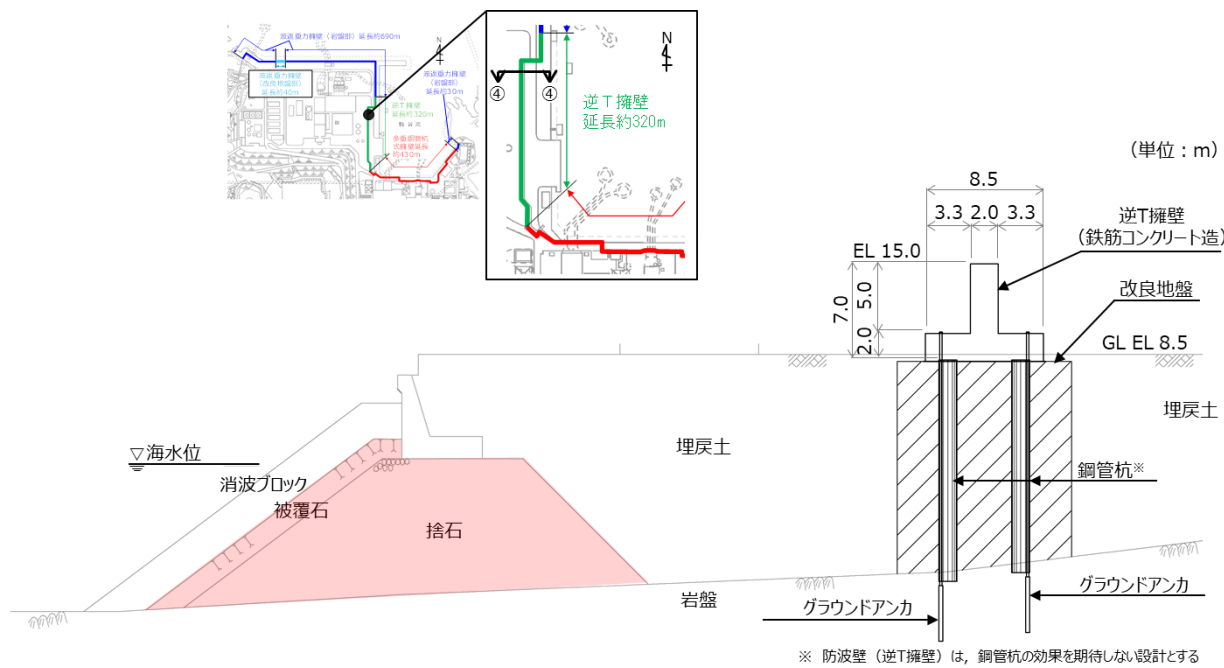


②-②断面

図3 防波壁 (逆T擁壁) における基礎捨石及び被覆石の配置 (1 / 3)

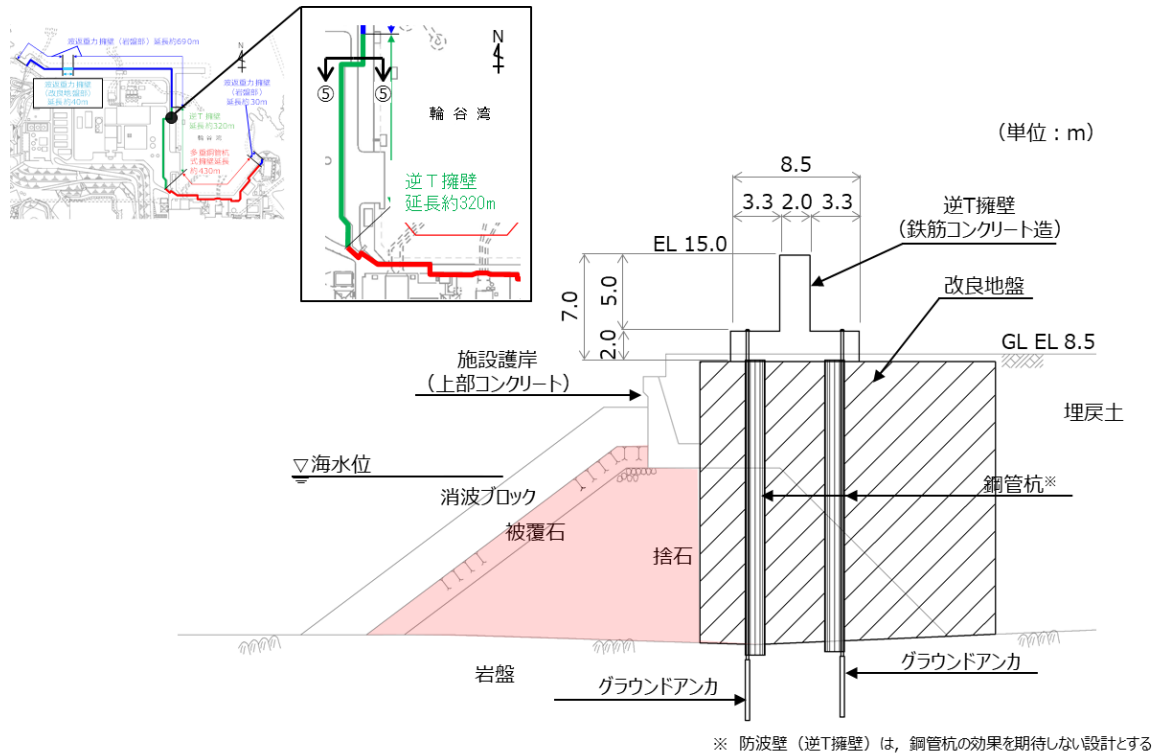


③-③断面

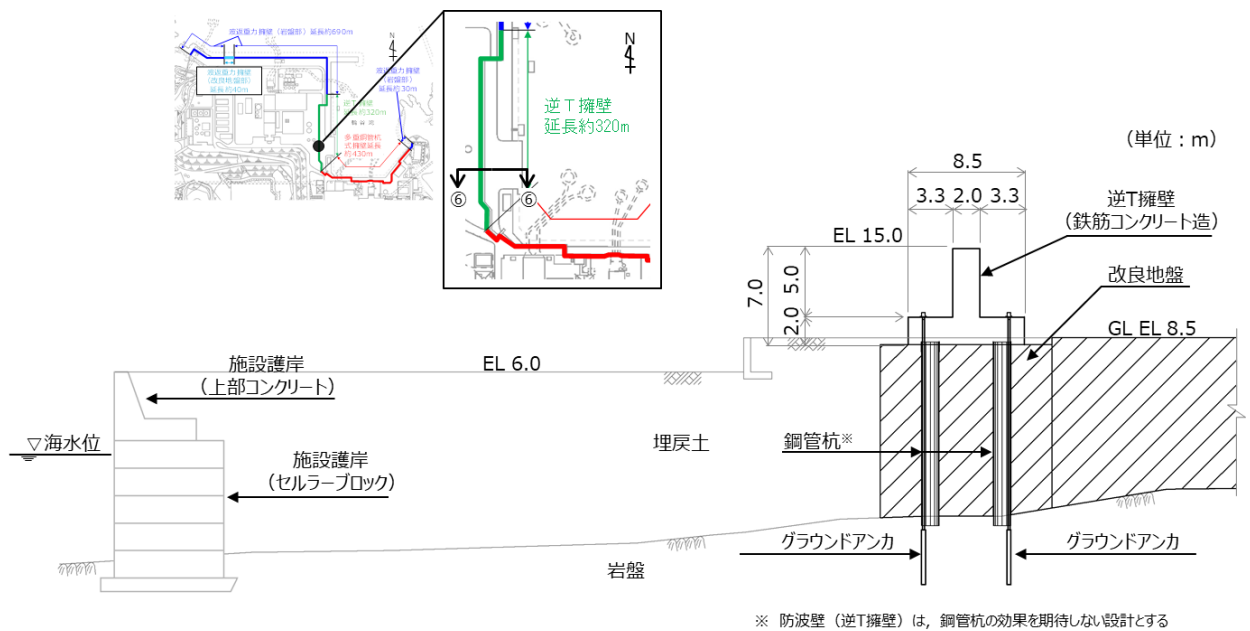


④-④断面

図3 防波壁 (逆T擁壁) における基礎捨石及び被覆石の配置 (2 / 3)

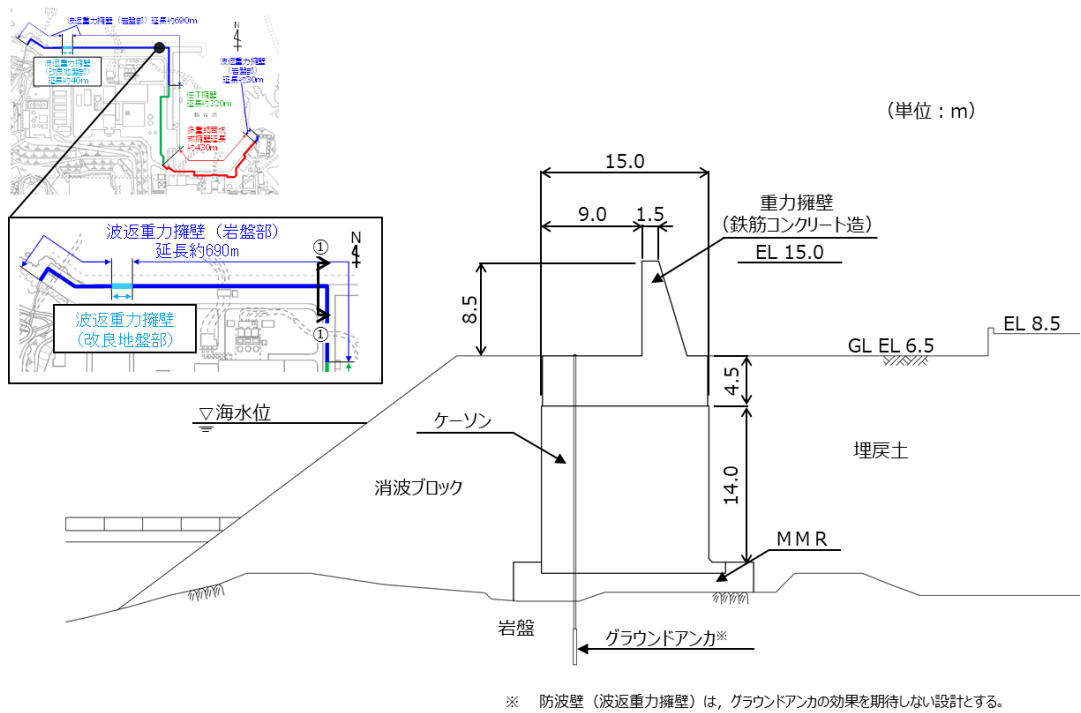


⑤-⑤断面

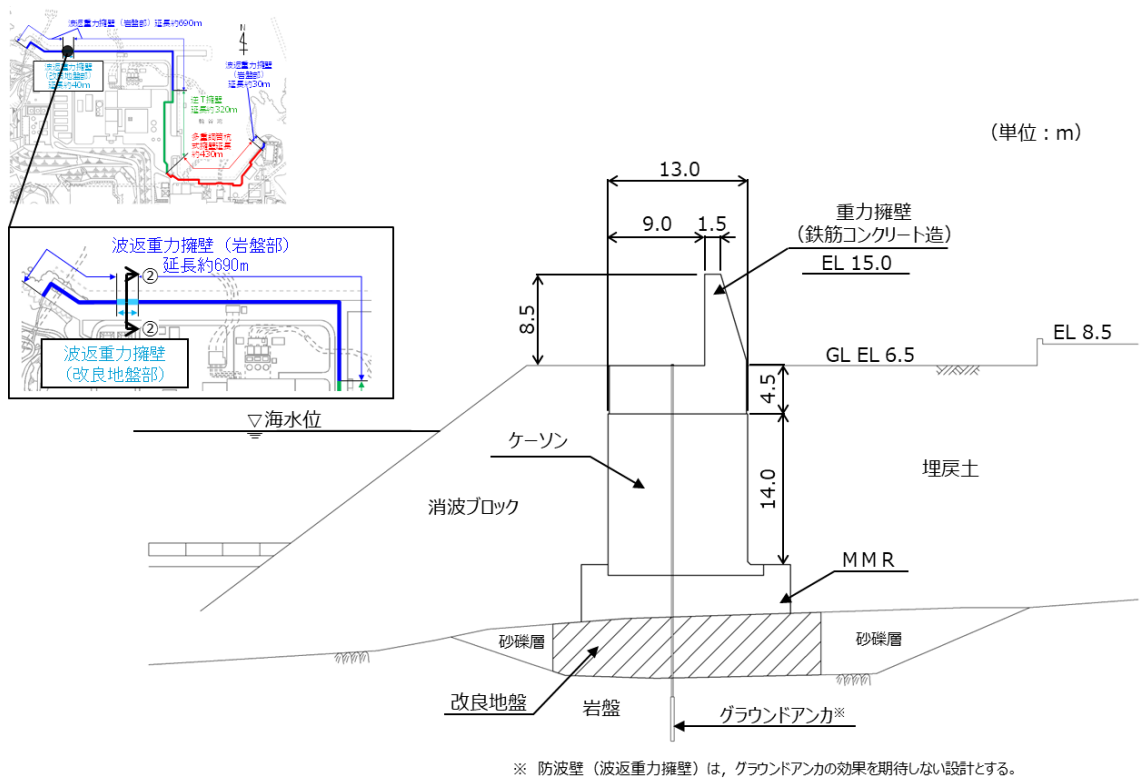


⑥-⑥断面

図3 防波壁 (逆T擁壁) における基礎捨石及び被覆石の配置 (3 / 3)



①－①断面



②－②断面

図4 防波壁（波返重力擁壁）における基礎捨石及び被覆石の配置（1／3）

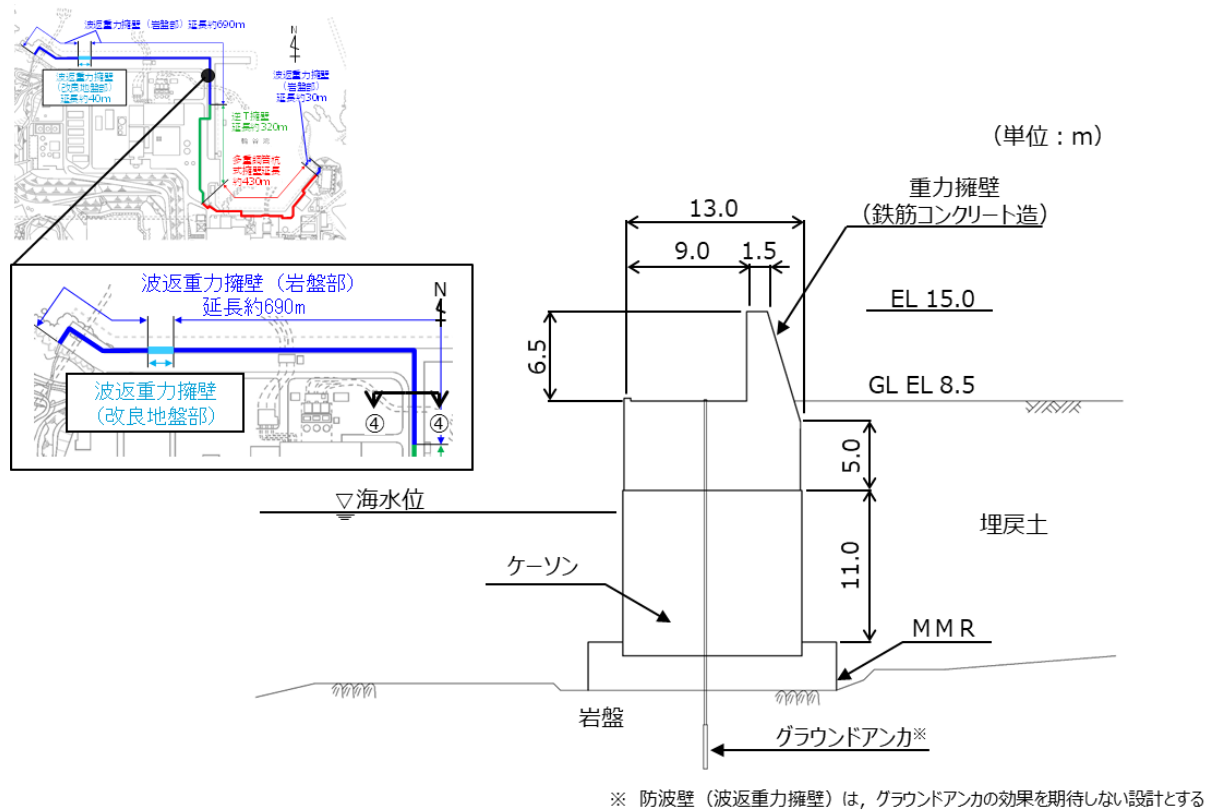
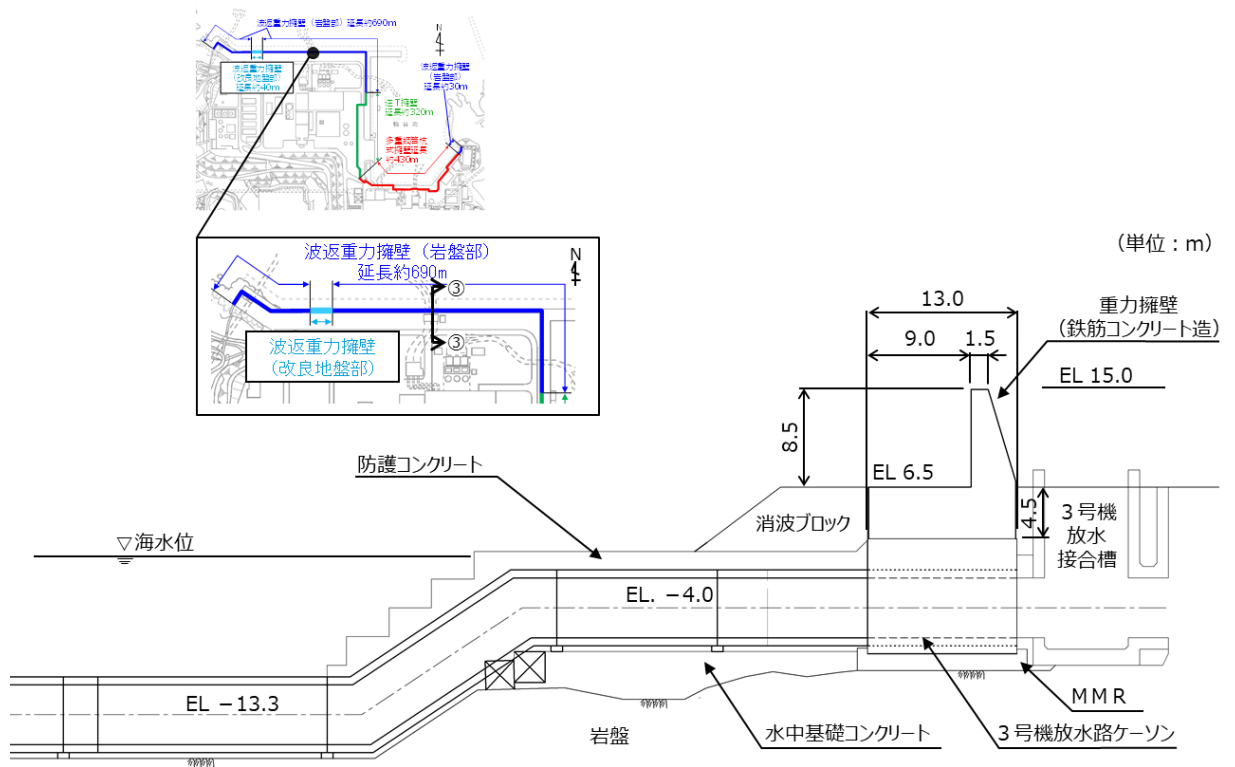
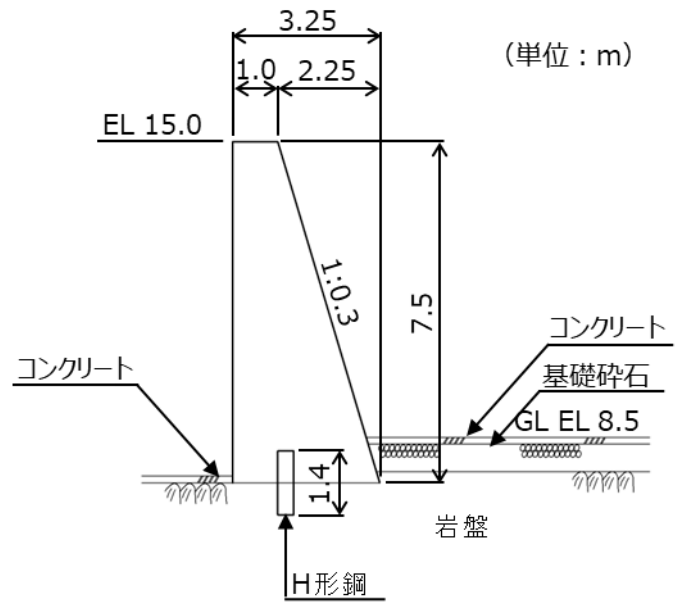
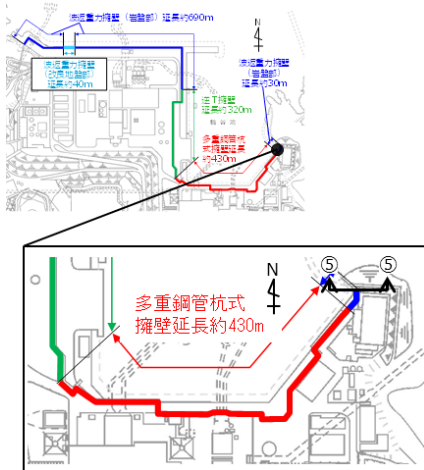
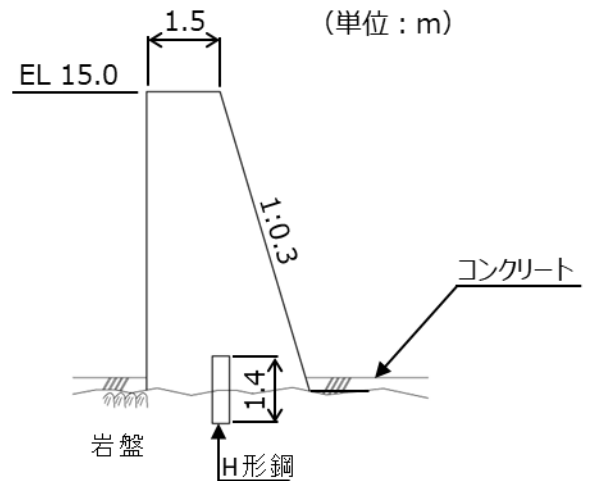
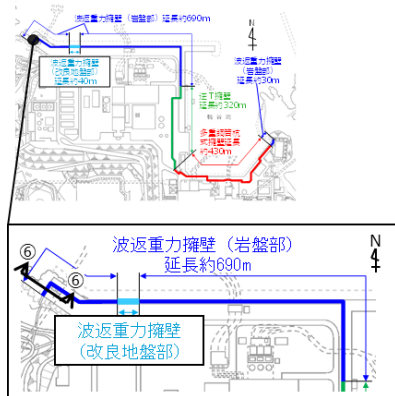


図4 防波壁 (波返重力擁壁) における基礎捨石及び被覆石の配置 (2 / 3)



⑤-⑤断面



⑥-⑥断面

図4 防波壁（波返重力擁壁）における基礎捨石及び被覆石の配置（3／3）

島根原子力発電所において使用している基礎捨石及び被覆石は、粒径が大きく、室内試験が非常に困難であることから、VI-2-1-3「地盤の支持性能に係る基本方針」において、「港湾の施設の技術上の基準・同解説」及び「港湾構造物設計事例集」に基づき、表1に示す解析用物性値を設定することを基本とする。「補足 023-01 地盤の支持性能について」における基礎捨石及び被覆石の解析用物性値に関する資料を、参考資料に示す。

なお、表1に示す解析用物性値を用いて、既往の文献において被災事例の事例検証が行われており、特に残留変形量については、観測値と解析結果が良く適合していることが確認されている。

表1 基礎捨石及び被覆石の解析用物性値

		基礎捨石及び被覆石
物理特性	密度 ρ (g/cm ³)	2.04 【1.84】
	間隙率 n	0.45
変形特性	動せん断弾性係数 G_{ma} (kN/m ²)	180,000
	基準平均有効拘束圧 σ_{ma}' (kN/m ²)	98
	ポアソン比 ν	0.33
	減衰定数の上限値 h_{max}	0.24
強度特性	粘着力 c' (kN/m ²)	20
	内部摩擦角 ϕ' (°)	35

注：括弧内【】の数字は地下水位以浅の数値を示す。
動せん断弾性係数及び基準平均有効拘束圧は代表的な数値を示す。

しかしながら、表 1 に示す物性値を用いた被災事例の事例検証において地震後の残留変形量の適合が確認されているが、島根原子力発電所に使用されている基礎捨石及び被覆石の物性値は室内試験による確認ができていないため、地震による時々刻々と変化する基礎捨石及び被覆石の応力状態の不確かさが懸念される。また、図 1 に示すように、防波壁（多重鋼管杭式擁壁）においては、基礎捨石を貫通するように鋼管杭を設置しており、基礎捨石による鋼管杭への影響が懸念される断面がある。

よって、鋼管杭への影響が懸念される断面については、室内試験により物性値を確認した結果、動せん断弾性係数 G_{ma} は表 1 に示す値と同程度であり、強度特性は保守的な設定となる埋戻土（粘性土）の解析用物性値（表 2）を代用して評価を実施する。

表 2 基礎捨石及び被覆石の解析用物性値（代用値）
（埋戻土（粘性土））

		埋戻土（粘性土）
物理特性	密度 ρ (g/cm^3)	2.07 【2.03】
	間隙率 n	0.55
変形特性	動せん断弾性係数 G_{ma} (kN/m^2)	186,300
	基準平均有効拘束圧 σ_{ma}' (kN/m^2)	151.7
	ポアソン比 ν	0.33
	減衰定数の上限値 h_{max}	0.095
強度特性	粘着力 c' (kN/m^2)	0
	内部摩擦角 ϕ' ($^\circ$)	30

注：括弧内【】の数字は地下水位以浅の数値を示す。
動せん断弾性係数及び基準平均有効拘束圧は代表的な数値を示す。

防波壁（多重鋼管杭式擁壁）及び防波壁（逆T擁壁）における基礎捨石及び被覆石の配置状況及びそれを踏まえた解析用物性値の設定方針について、表3に示す。

表3 基礎捨石及び被覆石の配置状況を踏まえた解析用物性値の設定方針

	断面	基礎捨石及び被覆石 配置状況	基礎捨石及び被覆石 解析用物性値
防波壁 (多重鋼管杭式擁壁)	①-①断面 ③-③断面 ④-④断面	防波壁と離れた位置 に設置	表1のとおり設定
	②-②断面 ⑤-⑤断面 ⑥-⑥断面	鋼管杭が貫通	表2のとおり設定 (埋戻土(粘性土) で代用)
	全ての断面	防波壁と離れた位置 に設置	表1のとおり設定
防波壁 (逆T擁壁)	全ての断面	防波壁と離れた位置 に設置	表1のとおり設定

(参考資料) 基礎捨石及び被覆石の解析用物性値について

1. 島根原子力発電所における基礎捨石及び被覆石について

島根原子力発電所の護岸において、基礎捨石（200～250mm，30kg/個以上）及び被覆石（700～800mm，1.5t/個）を使用している。

津波防護施設である防波壁（多重鋼管杭式擁壁），防波壁（逆T擁壁）及び防波壁（波返重力擁壁）の周囲に，基礎捨石及び被覆石が分布しており，防波壁の解析モデルに取り入れる必要があることから，適切な解析用物性値を設定する。

島根原子力発電所において使用している基礎捨石及び被覆石は，「港湾の施設の技術上の基準・同解説」（以下「港湾基準」という。）及び「港湾構造物設計事例集」（以下「港湾設計事例集」という。）に記載される解析用物性値を設定することから，その適用性を判断する。

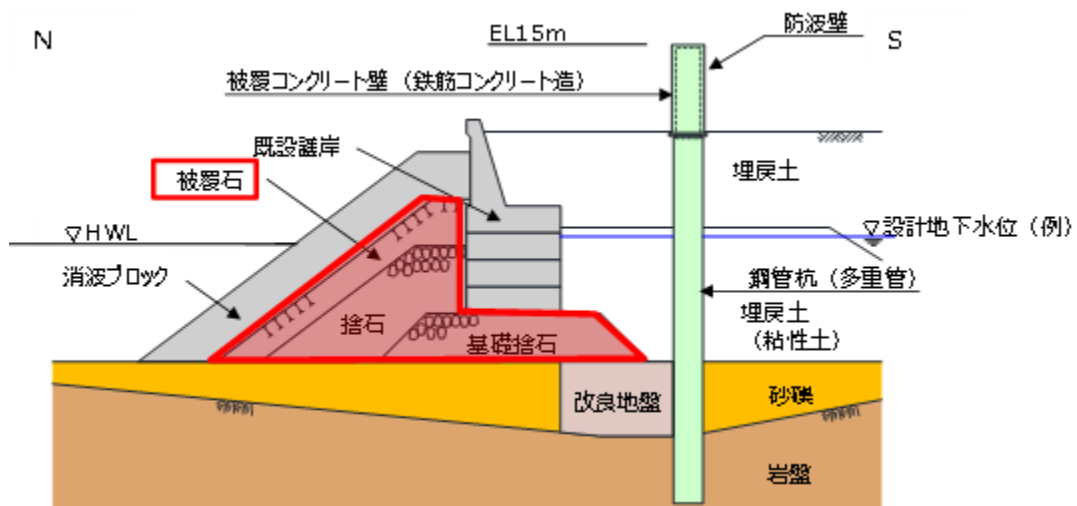


図 1-1 防波壁周囲の基礎捨石及び被覆石の分布例

2. 基礎捨石及び被覆石の解析用物性値の設定

2.1 設定方針

基礎捨石及び被覆石の解析用物性値については、現地の基礎捨石及び被覆石は粒径が大きく、室内試験が非常に困難であることから、一般的に、標準的なパラメータを用いて解析が実施されている。

基礎捨石及び被覆石の強度特性は、港湾基準では粘着力 $C=20\text{kN/m}^2$ 、せん断抵抗角 $\phi=35^\circ$ が標準の値とされており、表 2-1 に示す港湾設計事例集に記載される解析用物性値が一般に使用されている。

したがって、島根原子力発電所の基礎捨石及び被覆石について、港湾設計事例集で記載される解析用物性値の適用性を確認し採用する。

2.2 解析用物性値について

島根原子力発電所における基礎捨石及び被覆石の解析用物性値を表 2-2 に示す。

表 2-2 基礎捨石及び被覆石の解析用物性値

		基礎捨石及び被覆石
物理特性	密度 ρ (g/cm^3)	2.04 【1.84】
	間隙率 n	0.45
変形特性	動せん断弾性係数 G_{ma} (kN/m^2)	180,000
	基準平均有効拘束圧 σ_{ma}' (kN/m^2)	98
	ポアソン比 ν	0.33
	減衰定数の上限値 h_{max}	0.24
強度特性	粘着力 c' (kN/m^2)	20
	内部摩擦角 ϕ' ($^\circ$)	35

注：括弧内【】の数字は地下水位以浅の数値を示す。
動せん断弾性係数及び基準平均有効拘束圧は代表的な数値を示す。

3. 基礎捨石及び被覆石の解析用物性値の妥当性について

3.1 妥当性の確認方針

港湾基準に記載されている内容について、その引用文献の目的、結果を整理するとともに、地震時の動的挙動への適用性についても文献の内容を検討する。また、先行炉における基礎捨石等の解析用物性値を確認し、基礎捨石及び被覆石の解析用物性値の妥当性を確認する。

3.2 港湾設計事例集に記載される解析用物性値の妥当性

港湾設計事例集に記載される解析用物性値のうち主要な物性値について、島根原子力発電所の基礎捨石及び被覆石に適用することの妥当性を確認する。

(1) 強度特性

港湾基準では、図 3-1 に示すとおり基礎捨石及び被覆石の強度特性として、粘着力 $C=20\text{kN/m}^2$ 、せん断抵抗角 $\phi=35^\circ$ が記載されている。

(6) マウンド材及び基礎地盤の強度定数

① マウンド材

偏心傾斜した作用を受ける支持力の模型実験及び現地実験の結果によれば、三軸圧縮試験から求められた強度定数を用いてビショップ法による円弧滑り解析を行えば精度の高い結果が得られることが明らかになっている⁵⁾。また、砕石の大型三軸圧縮試験から、粒径の大きい粒状体の強度定数は均等係数の等しい相似粒度の材料から求められる値にほぼ等しいことが確認されている⁶⁾。したがって、捨石の強度定数を正確に推定するには相似粒度の試料を用いた三軸圧縮試験を実施することが望ましいが、強度試験を行わない場合には、一般に用いられている通常の捨石に対する標準的な強度定数として粘着力 $c_D=20\text{kN/m}^2$ 、せん断抵抗角 $\phi_D=35^\circ$ の値が用いられている。実際の捨石においては現地での捨石の密度に対応して強度に相違が生じることが予想されるが、現地での捨石の状態を把握することは非常に困難であるので、標準的な強度定数の値が設定されている。

標準値は砕石の大型三軸圧縮試験の結果からやや安全側に求めた値であり、既存防波堤及び係留施設の解析結果からも妥当な値である。なお、強度定数として粘着力 $c_D=20\text{kN/m}^2$ としているが、これは砕石のせん断抵抗角 ϕ_D の拘束圧による変化を考慮するための見掛けの粘着力である。図-2.2.7 は各種の砕石に関する三軸試験結果をまとめたものであるが⁵⁾、拘束圧が大きくなるとともに粒子破砕によって ϕ_D は減少する。図中に実線で示された値は見掛けの粘着力 $c_D=20\text{kN/m}^2$ 、 $\phi_D=35^\circ$ とした値であるが、見掛けの粘着力を考慮することによって ϕ_D の拘束圧依存性が反映されている。母岩の一軸圧縮強さと強度定数の関連を調べた結果によると、これらの標準値が適用できるのは母岩の一軸圧縮強さが 30MN/m^2 以上の石材である。母岩の強度が 30MN/m^2 以下である弱い石材をマウンドの一部として用いる場合、強度定数はほぼ $c_D=20\text{kN/m}^2$ 、 $\phi_D=30^\circ$ となる⁷⁾。

図 3-1 港湾基準における捨石の強度特性の設定方法

(港湾基準より引用・一部加筆)

港湾基準の引用文献である「港湾技術研究所報告 捨石マウンドの支持力の新しい計算法(1987.6)」(以下「文献①」という。)では、捨石マウンド上に重力式構造物が設けられる場合における捨石の力学的特性の検討を目的とした実験が行われている。

ここで、文献①では、直轄港湾工事に用いられる基礎捨石に対して質量～粒径換算を行い、それらと同程度の強度・比重を有する「砕石 ($D_{max}=25\text{mm}\sim 200\text{mm}$: 砂岩と花崗岩の2種類)」を対象に、試験条件として均等係数 U_c 、拘束圧及び締固め程度を変化させた供試体を準備し、直径 $60\text{cm}\cdot$ 高さ 120cm の供試体では中型三軸圧縮試験、直径 $120\text{cm}\cdot$ 高さ 240cm の供試体では大型三軸圧縮試験をそれぞれ実施して捨石の力学特性を検討している。文献①の三軸圧縮実験ケース及び実験結果を図 3-2 に示す。

上述の試験結果より、「捨石の強度定数は粘着力 $C=2\text{tf}/\text{m}^2$ 、せん断抵抗角 $\phi=35^\circ$ を標準とする」とされている。

表-5 実験ケース

岩種	試験機	D_{max} (mm)	料試名	U_c	拘束圧 α_3 (kgf/cm ²)			
					粗締	中締	密締	
花崗岩	中	25.4	A 1	1.2	2.4			
			A 2	2.8	2.4			
			A 3	5.0	2.4			
	型	63.5	B 1	1.2	2.4	1	1, 2, 4	
			B 2	2.8		1, 2, 4	1, 2, 4	
			B 3	5.0	1, 2, 4		1, 2, 4	
			B 4	8.0	1, 2, 4	1, 2, 4	1, 2, 4	
			B 5	15.0		1, 2, 4	1, 2, 4	
	大	100	C 1	1.2	2			
			C 2	2.8	2			
		150	D 1	1.2	2, 4, 8	1, 2, 4, 8		
			D 2	2.8	2			
			D 3	5.0	2			
		200	E 1	1.2	2			
			E 0	2.0			4	
E 2			2.8		4	1, 2, 4		
E 3	5.0	2						
	硬質砂岩	中	25.4	F 1	1.3	2, 4, 8	0.5, 1, 2, 4, 8, 14	2, 4, 8
							63.5	G 1
大型	150	H 1	1.2		2, 4, 8			

文献①の三軸圧縮実験ケース

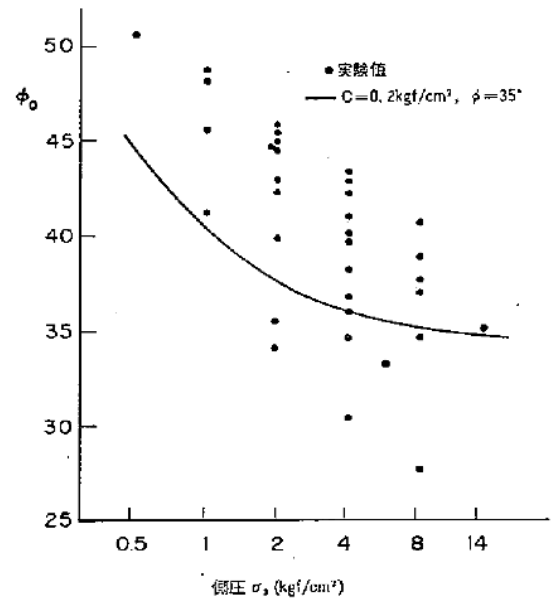


図-19 見掛けの粘着力を考慮した場合の ϕ_0 と σ_3 の関係

文献①の三軸圧縮実験結果

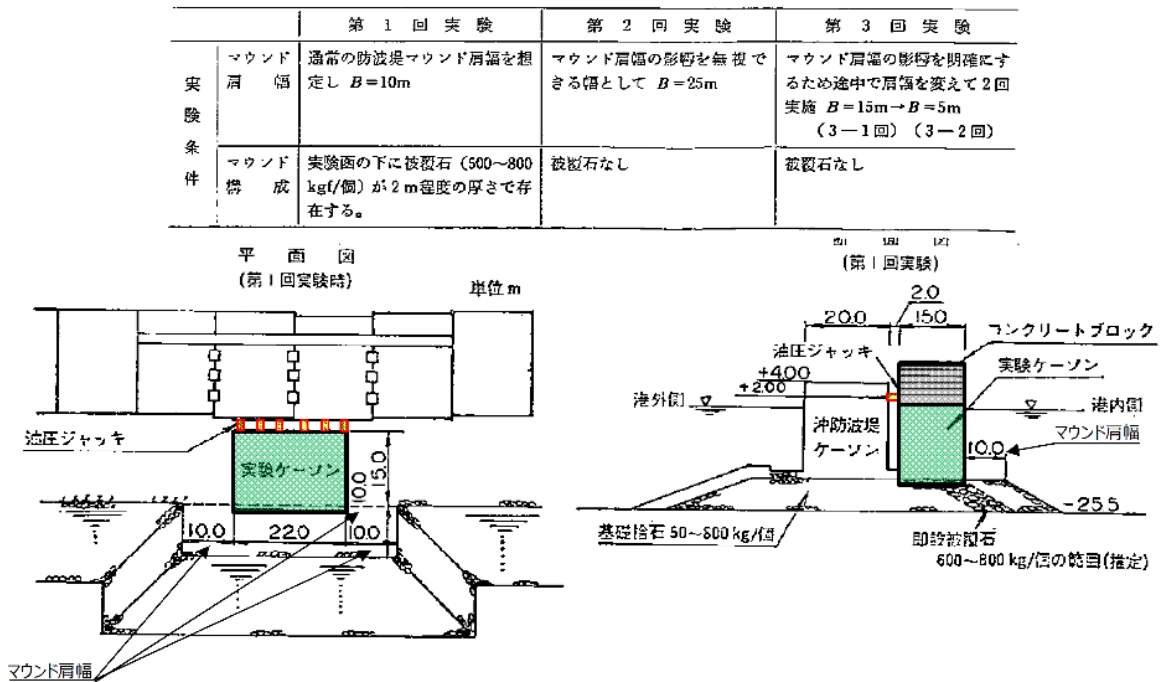
図 3-2 文献①の三軸圧縮実験ケース及び実験結果

(文献①より引用)

文献①は、捨石マウンドにおける支持力の新しい計算方法の提案を目的に、捨石マウンド上の重力式構造物の安定性（静的）に関して現地実験（小名浜港：基礎捨石 50kg～800kg/個，被覆石 600kg～800kg/個（推定））が行われている。

現地実験は、マウンド肩幅を 10m から 25m, 15m, 5m に変更した 4 ケースで行われており、実験ケーソン（幅 22m×奥行 15m）に油圧ジャッキで水平力を与えてマウンド及び基礎地盤に偏心傾斜荷重を加えることで、実験ケーソンの回転角や水平変位が計測されている。

現地実験から得られた最大水平力を用いた円形すべり計算結果によると、「捨石の三軸試験による強度定数 $C=2tf/m^2$ ， $\phi=35^\circ$ を用いたビショップ法の結果が実験結果と良く一致する」とされている。小名浜港の現地試験の概要図を図 3-3 に示す。



小名浜港現地試験概要図
 (文献①「港湾技術研究所報告 捨石マウンドの支持力の新しい計算法 (1987.6)」より引用)

図 3-3 小名浜港現地試験概要図

「港湾技研資料 マウンド用石材の大型三軸試験による強度特性（1991.3）」（以下「文献②」という。）では、「品質が劣ると考えられてきた石材の強度特性を明らかにする」ことを目的として、文献①で用いた比較的良質な花崗岩等よりも性質が劣る石灰岩及び軟質な砂岩等について、一軸圧縮強度に着目した分類で大型三軸圧縮試験（供試体寸法：直径 30 cm，高さ 60 cm）が行われている。また，一軸圧縮強度との相関関係を得るため，幅広い範囲の一軸圧縮強度を持つ特殊モルタルも使用している。

大型三軸圧縮試験の結果，「母岩の一軸圧縮強度が 300kgf/cm² 以上であれば，文献①で報告された捨石の標準値である $C=2tf/m^2$ ， $\phi=35^\circ$ をほぼ満足する」とされている。

文献②の三軸圧縮実験ケース及び実験結果を図 3-4 に示す。

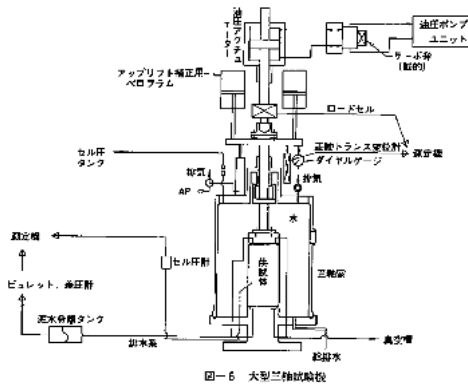
表-3 砕石母岩の材料特性

岩種	試料名	表乾比重 D_s	飽和比重 D_b	吸水率 Q (%)	一軸圧縮強度 σ_c (kgf/cm ²)
石灰岩	石灰岩 I	2.696	2.689	0.284	700以上
	石灰岩 II	2.617	2.588	1.129	600
	石灰岩 III	2.698	2.679	0.717	700以上
花崗岩	花崗岩 I	2.653	2.632	1.59	800以上
	花崗岩 II	2.593	2.567	1.03	1,130
砂岩	砂岩 I	2.338	2.117	10.5	155
	砂岩 II	2.363	2.173	8.75	99
	砂岩 III	2.367	2.160	9.58	180

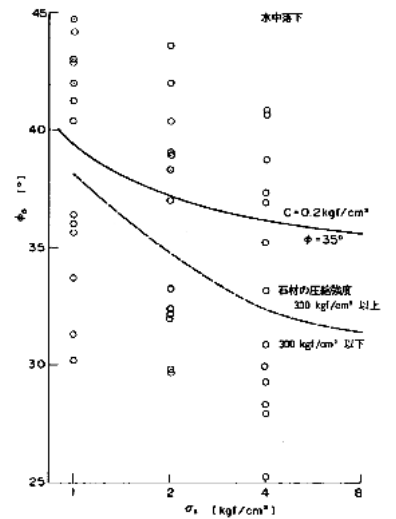
表-4 特殊モルタル試料の材料特性

岩種	試料名	表乾比重 D_s	飽和比重 D_b	吸水率 Q (%)	一軸圧縮強度 σ_c (kgf/cm ²)
特殊モルタル	モルタル40	1.710	1.160	47.38	43.2
	モルタル70	1.721	1.225	40.58	70.5
	モルタル100	1.810	1.336	35.46	106
	モルタル300	2.226	2.013	10.63	320
	モルタル700	2.372	2.205	7.52	665

文献②の三軸圧縮実験ケース



大型三軸圧縮試験機



文献②の三軸圧縮実験結果

図表は文献②「港湾技研資料 マウンド用石材の大型三軸試験による強度特性（1991.3）」より引用

図 3-4 文献②の三軸圧縮実験ケース及び実験結果

工藤ら(1985)^{*1}は、既往のケーソン式防波堤基礎捨石の粒度とほぼ相似な、均等係数 $U_c=2.3$ の 3 種類(15mm, 25mm, 30mm)の相似粒度の試料を用いて三軸圧縮試験を実施し、図 3-5 に示すように、内部摩擦角 ϕ はゆる詰めでも密詰めでも $35^\circ\sim 36^\circ$, 粘着力 c はゆる詰めでも 0.2kgf/cm^2 (約 20kN/m^2) \sim 密詰めでも 0.6kgf/cm^2 (約 60kN/m^2)との結果を得ている。

捨石の標準的なモデル化案である内部摩擦角 $\phi=35^\circ$, 粘着力 $c=20\text{kN/m}^2$ は図 3-5 において間隙比 $e_i=0.9$ 程度のかかなり空隙の多い状態を想定したせん断強度となっており、保守的な設定となっていることが分かる。なお、島根原子力発電所の基礎捨石及び被覆石について、輪谷湾内の 1・2 号機エリアは昭和 45 年(1970 年)12 月竣工、3 号機エリアは平成 22 年(2010 年)3 月竣工と年月を経ており、ある程度締まった密な状態であると考えられることから、この強度特性は保守的な設定と判断する。

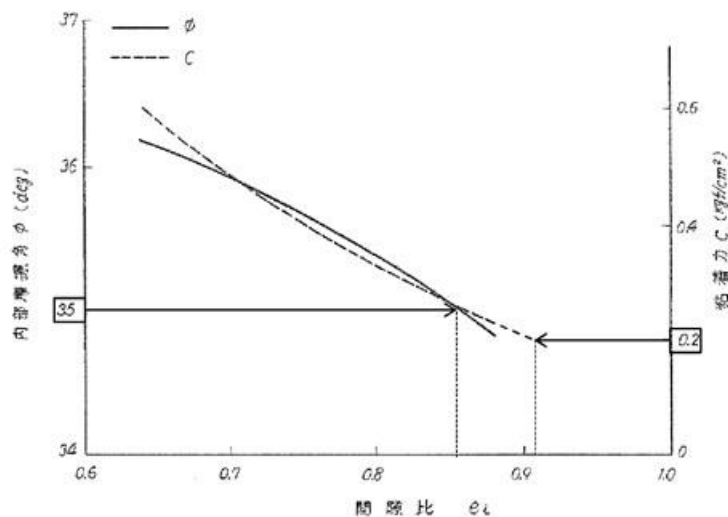


図 3-5 間隙比 e_i に対する粘着力 c と内部摩擦角 ϕ の推定図表
(工藤ら(1985)^{*1}より引用・加筆)

注記*1:工藤康二, 西好一, 田中幸久, 国生剛治:護岸基礎捨石マウンドの沈下予測
(その1) 捨石マウンド材料の物理特性ならびに静的力学特性, 電力中央
研究所報告, 研究報告 384030, 1985 年

(2) 動せん断弾性係数

埋立地の液状化対策ハンドブック(改訂版)(財団法人沿岸開発技術研究センター, 平成 9 年)には、「混成防波堤における地震観測結果から得られた算定式により水深 -10m 程度の大型岸壁における捨石のせん断波速度として $V_s=300\text{m/s}$ を用いる。」との記載があり、算定式については、上部ら(1983)^{*2}に記載されている表 3-1 を指していると考えられる。表 3-1 は沢田ら(1977)^{*3}による国内の複数のロックフィルダム

における弾性波測定結果から得られた速度分布モデルであり、ロック材における深さ 0~10m の S 波速度 V_s の平均値が約 300m/s となり、5m 以深は深いほど V_s は増加する (図 3-6)。

島根原子力発電所における基礎捨石の分布範囲は、おおむね深さ 15m の範囲内に分布することから、せん断波速度は $V_s=300\text{m/s}$ を上回るが、港湾設計事例集に記載の $V_s=300\text{m/s}$ を採用することは保守的な設定と判断する。

表 3-1 ロックフィルダムの一般的物性値を与える速度分布モデル
(上部ら(1983)*²より抜粋・一部加筆)

物性値の種類	現地のゾーン 材料の 状態 深さ (m)	ロック		コア	
		不飽和	飽和	S波速度の大きい材料 の分布	S波速度の小さい材料 の分布
S波速度	0-5	$V_s = 245$		$V_s = 210$	
	5-30	$V_s = 250Z^{0.20}$	$V_s = 250Z^{0.20}$	$V_s = 180Z^{0.35}$	$V_s = 140Z^{0.34}$
	30-	$V_s = 200Z^{0.315}$			
ポアソン比	全体	$\nu = 0.375 - 0.006Z^{0.58}$	$\nu = 0.49 - 0.01Z^{0.95}$	$\nu = 0.45 - 0.006Z^{0.60}$	

V_s : S波速度 (m/s)
 ν : ポアソン比
 Z : 深さ (m)

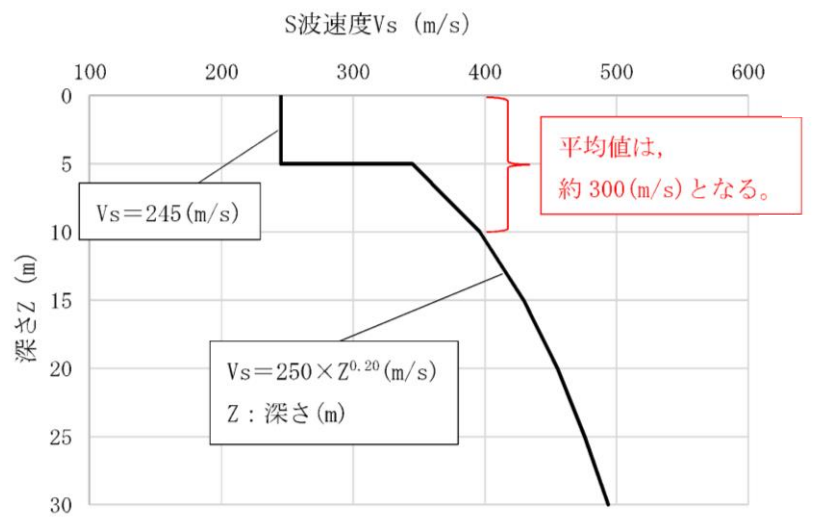


図 3-6 ロック材の S 波速度について
(表 3-1 におけるロック材の S 波速度をグラフ化)

注記*2 : 上部達生, 土田肇, 倉田栄一, 国生剛治 : 大型混成式防波堤の強震記録に基づく水-構造物連成系の地震応答解析, 港湾技術研究所報告, 第 22 巻, 第 2 号, 1983 年, pp289-326

*3： 沢田義博，高橋忠，桜井彰雄，矢島浩：ロックフィルダムの物性値分布特性および堤体の動的特性－弾性波動に基づく考察－，電力中央研究所報告，研究報告 377008，1977 年

3.2 地震時の検討における基礎捨石及び被覆石の物性に関する文献調査

島根原子力発電所での適用性を目的として，地震時（動的）の検討で用いられる基礎捨石及び被覆石の解析用物性値について，文献調査を行った。

捨石の動的挙動に関して検討している文献「捨石のモデル化に関する検討報告書（FLIP研究会 企画委員会捨石作業部会，平成 13 年 5 月）」（以下「文献③」という。）によると，港湾設計事例集に示される捨石の解析用物性値が用いられた事例検証が行われている。

事例検証は 1995 年兵庫県南部地震における六甲アイランド RF3 岸壁及び神戸港第 7 防波堤の被災事例と，1993 年釧路沖地震における釧路港北埠頭の被災事例を対象に行われており，簡易モデルによる検討やパラメトリックスタディーを踏まえ，表 2-1 に示すパラメータを捨石の標準的なパラメータとして提案している。

文献③では、1995年兵庫県南部地震における神戸港六甲アイランドRF-3岸壁の被災断面を検討対象としている。六甲アイランドRF3岸壁の検討用地震動及び検討対象断面を図3-7に、検討結果を表3-2に示す。検討結果において、表2-1に示すパラメータを捨石の解析用物性値として設定したCASE4では観測値の変位を再現できている。

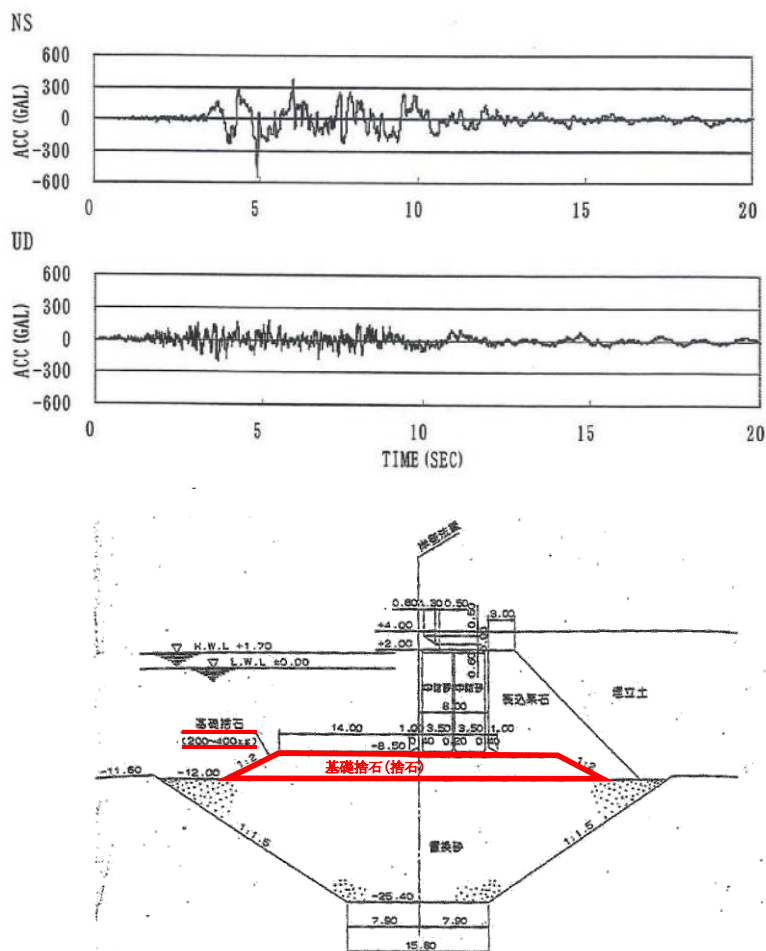


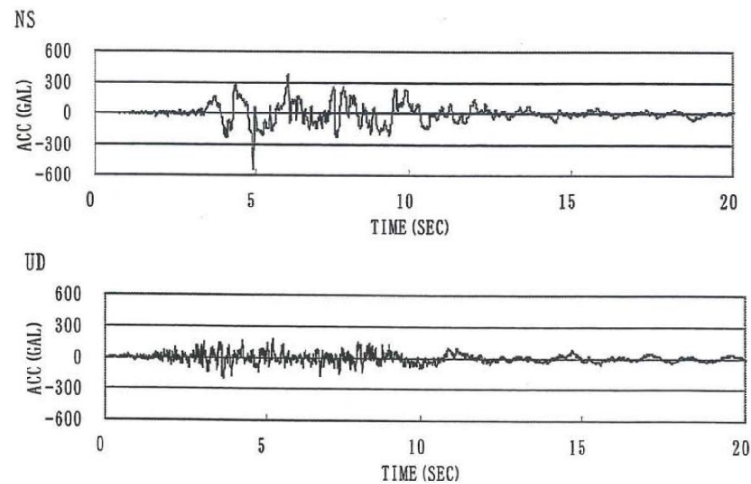
図3-7 六甲アイランドRF3岸壁の検討用地震動及び検討対象断面
(文献③より引用・一部加筆)

表3-2 六甲アイランドRF3岸壁の検討結果
(捨石は主に200kg~400kg/個程度)

検討ケース*	せん断強度特性		残留変位量			備考
	C(kN/m ²)	Φ (°)	水平 (m)	鉛直 (m)	傾斜 (°)	
CASE3	0	40	6.10	2.11	10.6	従来方法
CASE4	20	35	4.33	2.00	4.69	提案方法
観測値			4.1~4.6	1.7~2.0	4.1~5.1	

注記*: 結果は捨石強度特性のみが異なるCASE3(従来方法)とCASE4(提案方法)のみ抜粋している。

文献③では、常時土圧の作用を受けない構造物として、1995年兵庫県南部地震における神戸港第七防波堤の被災断面を検討対象としている。神戸港第七防波堤の検討用地震動及び検討対象断面を図3-8に、検討結果を表3-3に示す。検討結果において、表2-1に示すパラメータを捨石の解析用物性値として設定したCASE4では観測値の変位を再現できている。



検討用地震動 ポートアイランド鉛直アレー地震観測網のGL-32mに設置の加速度計による1995兵庫県南部地震の際の観測記録

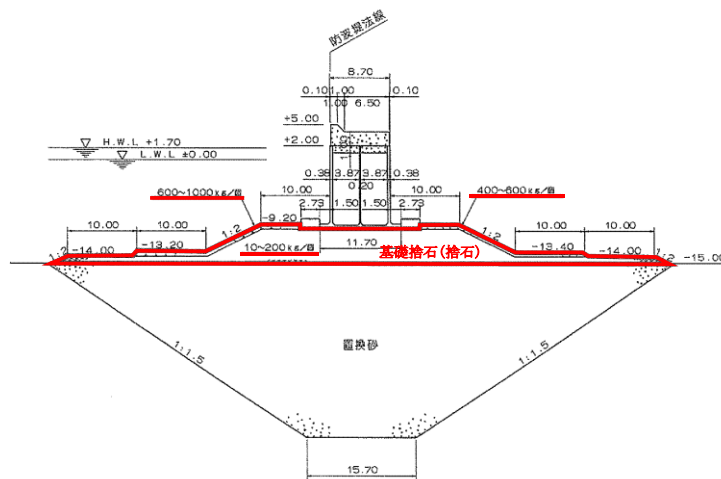


図3-8 神戸港第七防波堤の検討用地震動及び検討対象断面
(文献③より引用・一部加筆)

表 3-3 神戸港第七防波堤の検討結果

(捨石は主に 10~200kg/個程度)

検討ケース*	せん断強度特性		残留変位量		備考
	C(kN/m ²)	Φ (°)	水平 (m)	鉛直 (m)	
CASE2	0	40	0.04	4.39	従来方法
CASE4	20	35	0.00	2.26	提案方法
観測値			-	1.4~2.6	

注記*：結果は捨石強度特性のみが異なる CASE2（従来方法）と CASE4（提案方法）のみ抜粋している。

文献③では、1993年釧路沖地震における釧路港北埠頭岸壁の被災断面を検討対象としている。釧路港北埠頭岸壁の検討用地震動及び検討対象断面を図3-9に、検討結果を表3-4に示す。検討結果において、表2-1に示すパラメータを捨石の解析用物性値として設定したCASE3では観測値の変位を再現できている。

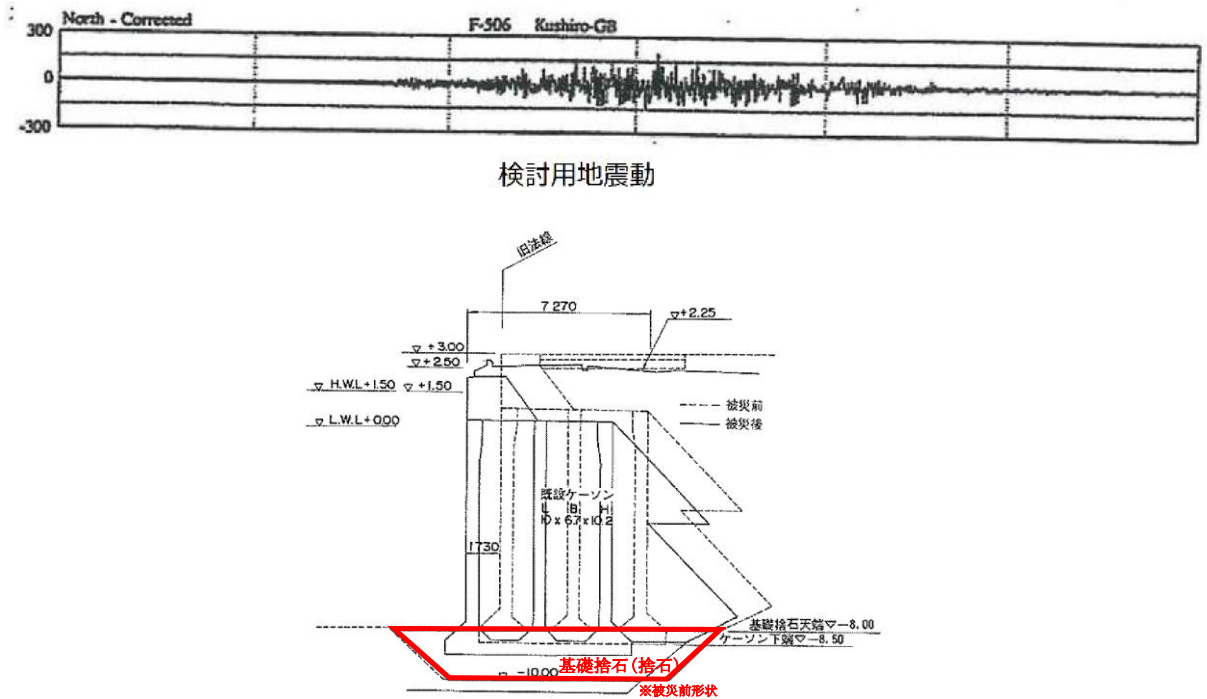


図3-9 釧路港北埠頭岸壁の検討用地震動及び検討対象断面
(文献③より引用・一部加筆)

表3-4 釧路港北埠頭岸壁の検討結果

検討ケース*	せん断強度特性		残留変位量		備考
	C(kN/m ²)	Φ (°)	水平 (m)	鉛直 (m)	
CASE1	0	40	0.89	0.21	従来方法
CASE3	20	35	1.28	0.22	提案方法
観測値			0.8~1.6	0.2~0.5	

注記*：結果は捨石強度特性の設定の違いに着目し、CASE1（従来方法）とCASE3（提案方法）のみ抜粋している。

文献③で検討した事例は、いずれも重力式岸壁あるいはケーソン式防波堤であることから、鋼管杭を使用した構造物を対象とした被災事例の再現解析における捨石の解析用物性値の設定状況についても確認した。

「二次元有効応力解析による直杭式横棧橋の被災事例の再現解析(2009)」(以下「文献④」という。)では、1995年兵庫県南部地震による神戸港T棧橋の被災事例を対象とした再現解析が行われた際、港湾設計事例集に示される捨石の解析用物性値が設定されている。解析断面図を図3-10に、解析用物性値を表3-5に示す。文献④において、鋼管杭の座屈位置という被災事例を再現できたとされている。

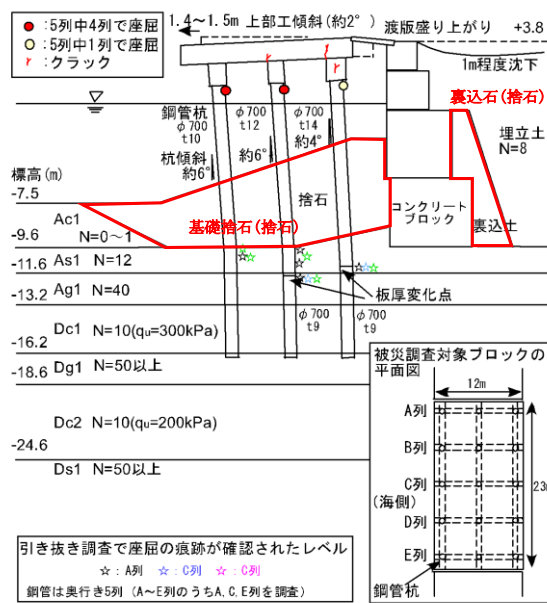


図3-10 断面図(神戸港T棧橋)

(文献④より引用・一部加筆)

表3-5 FLIPにおける解析用物性値(神戸港T棧橋)

(文献④より引用・一部加筆)

土層名	湿潤密度	間隙率	変形特性					履歴減衰上限値
			初期せん断剛性	基準化拘束圧	拘束圧依存係数	内部摩擦角	粘着力	
			G_{ma} (kPa)	σ'_{ma} (kPa)	m	ϕ_f ($^{\circ}$)	c (kPa)	
As1	1.8	0.45	111900	98.0	0.5	40.7	0	0.24
Ag1	2.0	0.45	226500	98.0	0.5	44.4	0	0.24
Dc1	1.9	0.44	51000	43.4	0.0	0.0	150	0.20
埋立土	1.8	0.45	65840	98.0	0.5	38.9	0	0.24
捨石	2.0	0.45	180000	98.0	0.5	35.0	20	0.24
裏込土	2.0	0.45	180000	98.0	0.5	35.0	20	0.24
Ac1	1.5	0.67	3750	5.0	0.5	25.0	0	0.20
Dc2	1.7	0.55	34000	86.4	0.0	0.0	100	0.20
Dg1	2.0	0.45	228200	98.0	0.5	44.5	0	0.24

「2011年東北地方太平洋沖地震において地震動により被災した小名浜港5号埠頭耐震強化岸壁(-12m)の再現解析(2014)」(以下「文献⑤」という。)では、2011年東北地方太平洋沖地震による小名浜港5号埠頭耐震強化岸壁の被災を対象とした再現解析が行われた際、港湾設計事例集に示される捨石の解析用物性値が設定されている。なお、当該岸壁の基礎捨石は30~200kg/個とされている。解析断面図を図3-11に、解析用物性値を表3-6に示す。文献⑤において、岸壁背後の沈下等の被災結果に調和的な変形を再現可能であるとされている。

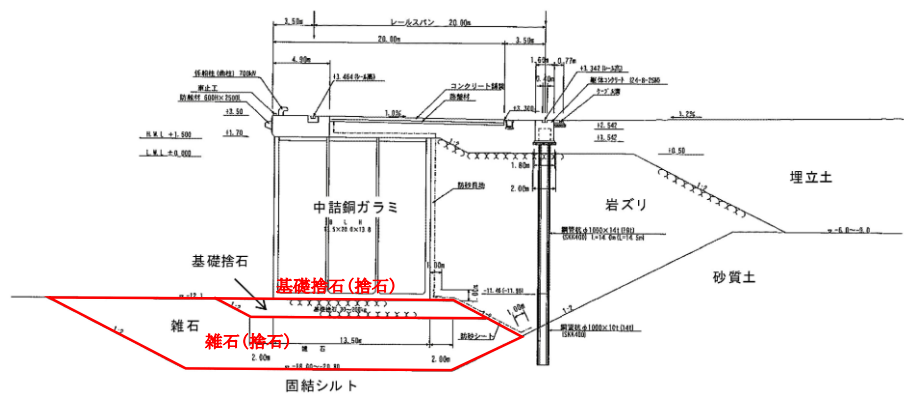


図3-11 断面図(小名浜港5号埠頭耐震強化岸壁)
(文献⑤より引用・一部加筆)

表3-6 FLIPにおける解析用物性値
(小名浜港5号埠頭耐震強化岸壁)
(文献⑤より引用・一部加筆)

地層名	N65	ρ_t (t/m ³)	ρ_{sca} (t/m ³)	σ'_{ma} (kN/m ²)	G_{ma} (kN/m ²)	ν	K_{ma} (kN/m ²)	C (kN/m ²)	ϕ (°)	n	h_{max}
埋立土	8.3	1.8	2.0	98	75400	0.33	196600	-	39	0.45	0.24
岩ズリ	10.4	1.8	2.0	98	86600	0.33	225800	-	39	0.45	0.24
砂質土	22.2	-	2.0	98	140600	0.33	366700	-	41	0.45	0.24
固結シルト (風化部)	-	-	1.8	171.88	10200	0.33	26600	30	-	0.55	0.20
基礎捨石	-	-	2.0	98	180000	0.33	469400	20	35	0.45	0.24
雑石	-	-	2.0	98	180000	0.33	469400	20	35	0.45	0.24

「相馬港 2 号埠頭-12m 岸壁を対象とした事例解析(2012 年度)」(以下「文献⑥」という。)では、2011 年東北地方太平洋沖地震による相馬港 2 号埠頭-12m 岸壁の被災を対象とした再現解析が行われた際、港湾設計事例集記載の値におおむね近い捨石の解析用物性値が設定されている。断面図を図 3-12 に、解析用物性値を表 3-7 に示す。文献⑥において、被災状況や背後地盤の沈下や段差について再現できたとされている。

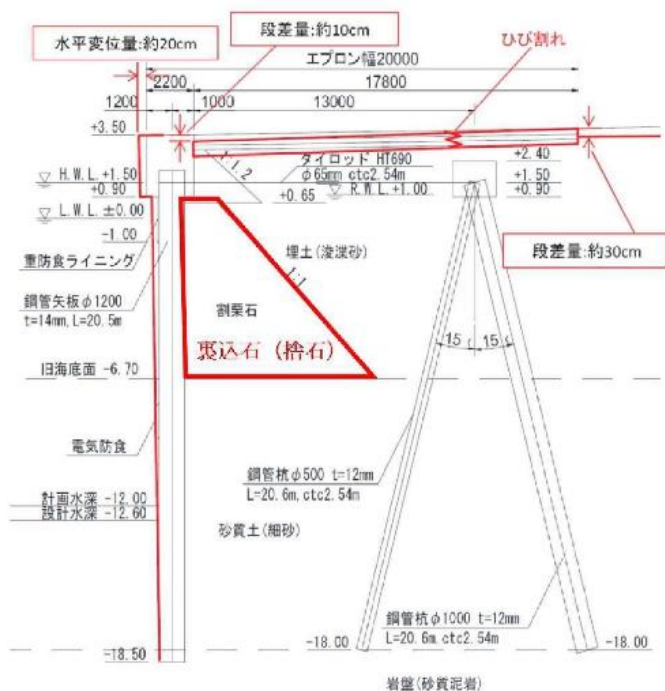


図 3-12 断面図 (相馬港 2 号埠頭-12m 岸壁)

(文献⑥より引用・一部加筆)

表 3-7 FLIP における解析用物性値 (相馬港 2 号埠頭-12m 岸壁)

(文献⑥より引用・一部加筆)

記号	土質	ρ (t/m^3)	σ_{ma} (kN/m^2)	V_s (m/s)	G_{ma} (kN/m^2)	m_G	K_{ma} (kN/m^2)	m_K	c (kN/m^2)	ϕ_f	h_{max}	n	E (kN/m^2)
B	埋土 (浚渫砂)	1.80	98	162	75246	0.5	196230	0.5	0.0	39.38	0.24	0.45	
		2.00											
A_s	砂質土 (細砂)	2.00	98	269	125095	0.5	326228	0.5	0.0	41.33	0.24	0.45	
R	岩盤 (砂質泥岩)	1.73											1392000
	裏込石	2.00	98		101300	0.5	264000	0.5	20.00	35.00	0.24	0.45	

捨石の動的挙動について、重力式岸壁、ケーソン式防波堤及び鋼管杭を使用した構造物を対象とした被災事例の事例検証が行われており、港湾設計事例集に示される捨石の解析用物性値を設定した場合、解析結果はそれぞれの観測値と適合性が良いとされている。

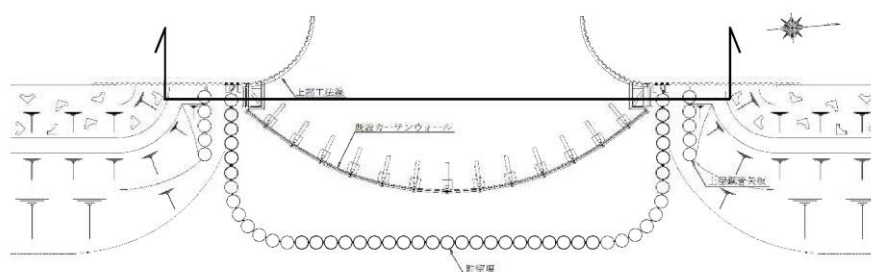
以上より、港湾設計事例集に示される捨石の解析用物性値は妥当であると判断した。

3.3 先行炉における基礎捨石等の解析用物性値

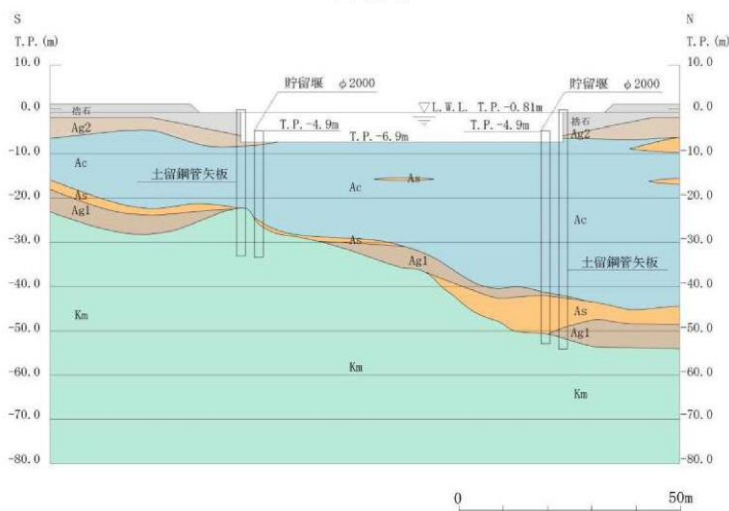
島根原子力発電所における基礎捨石及び被覆石の解析用物性値の妥当性を判断するため、先行炉における基礎捨石等の解析用物性値を確認する。なお、先行炉の情報に係る記載内容については、審査資料等をもとに独自に解釈したものである。

(1) 東海第二発電所

東海第二発電所において、図 3-13 に示すとおり、津波防護施設である貯留堰の外側に位置する土留鋼管矢板の背面に捨石が分布していることから、解析断面にモデル化している。



(平面図)



(断面図)

図 3-13 東海第二発電所 貯留堰の周辺地盤における捨石の施工状況

東海第二発電所の捨石は主に 100kg～500kg／個程度の質量を有するとしており、基礎捨石の解析用物性値については、現地の捨石での試験が非常に困難であることから、表 3-8 に示すとおり、港湾設計事例集に記載される値を用いている。

表 3-8 東海第二発電所 捨石の解析用物性値

パラメータ				捨石
物理特性	密度 () は地下水位以浅	ρ	g/cm ²	2.04 (1.84)
	間隙比	e	—	0.82
変形特性	ポアソン比	ν_{CD}	—	0.33
	基準平均有効主応力 () は地下水位以浅	σ'_{ma}	kN/m ²	98
	基準初期せん断剛性 () は地下水位以浅	G_{ma}	kN/m ²	180000
	最大履歴減衰率	h_{max}	—	0.24
強度特性	粘着力	C_{CD}	N/mm ²	0.02
	内部摩擦角	ϕ_{CD}	度	35

(2) 高浜発電所

高浜発電所において、津波防護施設である放水口側防潮堤周辺の改良地盤の前面において基礎捨石及び被覆石が分布していることから、解析断面にモデル化している。

高浜発電所における基礎捨石等の解析用物性値については、FLIP 研究会が推奨する手法*、港湾基準及び「埋立地の液状化ハンドブック（改訂版）（沿岸開発技術研究センター，平成9年）」等から、表3-9に示す解析用物性値を設定している。

注記*：例えば、液状化解析プログラム FLIP による動的解析の実務

FLIP 研究会の14年間の研究成果 平成23年8月3日

第四期 FLIP 研究会14年間のまとめWG（財）沿岸技術研究センター

表3-9 高浜発電所 基礎捨石等の解析用物性値

飽和密度 ρ (g/cm ³)	間隙率 n	動せん断弾性係数 G_{sa} (kN/m ²)	体積弾性係数 K_{sa} (kN/m ²)	ポアソン比 v	基準拘束圧 σ_{sa}' (kN/m ²)	粘着力 c (kN/m ²)	内部摩擦角 ϕ_f (°)	最大減衰比 h_{max}
2.04	0.45	1.80×10^5	4.69×10^5	0.33	98	20	35	0.24

3.4 基礎捨石及び被覆石の解析用物性値の妥当性

島根原子力発電所の基礎捨石及び被覆石と文献に記載された捨石の諸元の比較を表3-10に示す。島根原子力発電所の基礎捨石は、文献に記載された捨石の諸元の範囲内であることから、港湾設計事例集で示される解析用物性値を島根原子力発電所の基礎捨石に適用することは妥当と判断する。被覆石については、文献に記載された捨石の諸元の範囲を超えているが、礫径の大きい被覆石は比較的礫径の小さい捨石より粘着力、せん断抵抗角共に大きいと考えられ、港湾設計事例集で示される捨石の解析用物性値を被覆石に適用することにより保守的な評価になるため妥当と判断する。

また、島根原子力発電所の基礎捨石及び被覆石の解析用物性値は、先行炉である東海第二発電所及び高浜発電所の基礎捨石等の解析用物性値と同じである。したがって、島根原子力発電所の基礎捨石及び被覆石の解析用物性値は妥当と判断した。

表3-10 島根原子力発電所の基礎捨石及び被覆石と
文献に記載された捨石の諸元の比較

	島根原子力発電所	文献に記載された値
一軸圧縮強さ	30N/mm ² 以上	30MN/m ²
D _{max}	200～250mm (基礎捨石) 700～800mm (被覆石)	25～200mm
質量	30kg以上/個程度 (基礎捨石) 1.5t/個 (被覆石)	<ul style="list-style-type: none"> ・六甲アイランドRF3岸壁 200～400kg/個程度 ・神戸港第七防波堤 10～200kg/個程度 ・小名浜港5号埠頭耐震強化岸壁 30～200kg/個程度

(補足1) 島根原子力発電所の岩石試験

島根原子力発電所の石材(基礎捨石及び被覆石)は主に発電所敷地内の凝灰岩を使用しており、これについて実施した岩石試験の概要を示す。

ボーリングコアから採取した試料を用いて一軸圧縮試験を実施した結果、 $30\text{N}/\text{mm}^2$ を上回る結果となった。一軸圧縮試験概要を図1-1、岩石試料採取位置図を図1-2に示す。

供試体サイズ		直径 : 50mm 高さ : 100mm
最大能力		980kN(100t)
原子炉建物 基礎地盤	試料採取ホ-リング	306,308,309,310,316
	試験個数	18個
	一軸圧縮強度	$82.57\text{N}/\text{mm}^2$
原子炉建物 西側切取斜面	試料採取ホ-リング	324,319,328,329
	試験個数	10個
	一軸圧縮強度	$122.98\text{N}/\text{mm}^2$

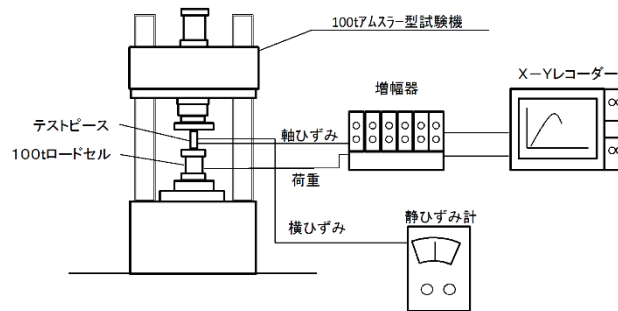


図1-1 一軸圧縮試験概要

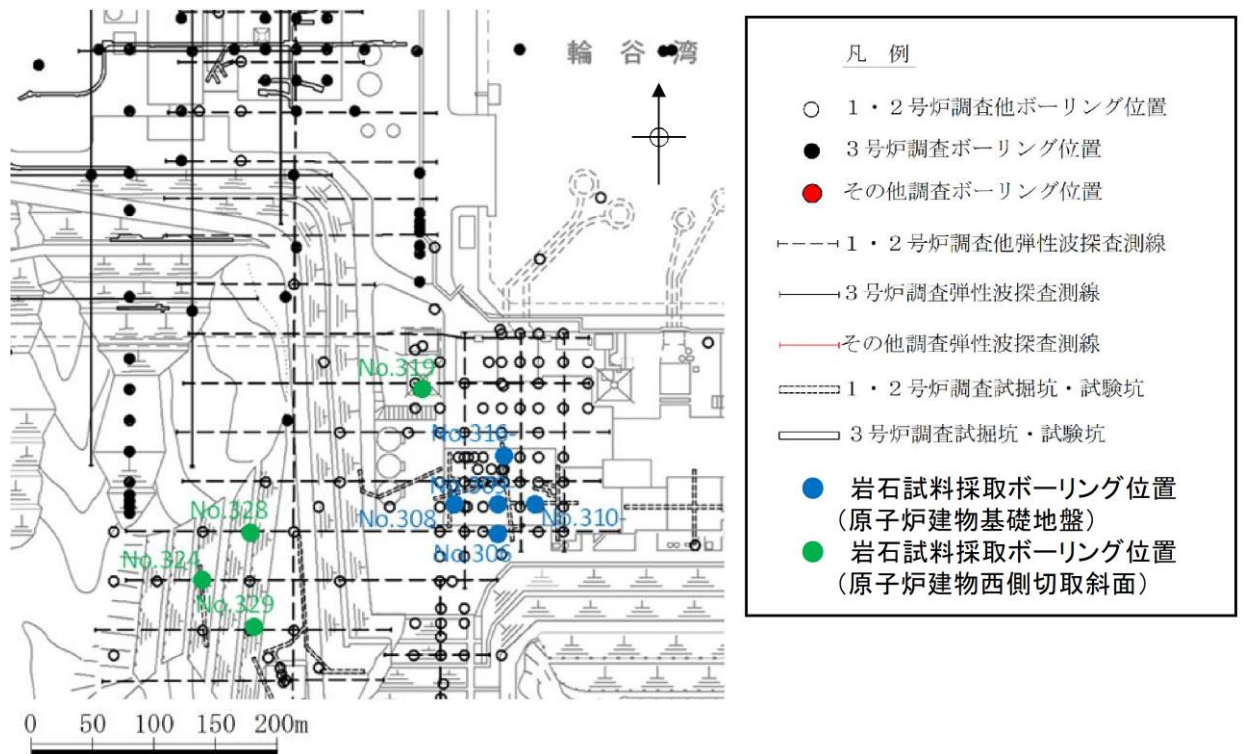


図 1-2 岩石試料採取位置図

(補足 2) 島根原子力発電所の押し崩し試験

独立行政法人土木研究所では、ロックフィルダムの主要築堤材料として使用されるロック材料のせん断強度の評価について、原位置における表層すべり試験（切り崩し試験及び押し崩し試験）を実施し、原粒度条件下でのロック材料のせん断強度の評価を論文「拘束圧依存性を考慮したロック材料の強度評価（山口ほか）」で示している。

ロック材料を 100t 級大型ブルドーザで静かに谷に押し崩す「押し崩し試験」を実施して、安息角を計測しているが、「得られた平均 38.5°の結果は、大型三軸圧縮（CD）試験により求められた内部摩擦角 41.0°とほぼ同等の値である」とされている。

島根原子力発電所にて、押し崩し試験を模擬した安息角の現地試験を実施した。現地試験には基礎捨石と同様の石材（凝灰岩主体： $D_{max}=200\sim 250\text{mm}$ 程度）を用いて、40t ダンプにて平坦な場所でダンプアップすることで試料塊を作り、ダンプが逃げる方向以外の 3 辺を測線として試料塊の角度計測を行った。

試験は 3 回行い、合計 9 測線から得られた平均値は 38.5°であり、文献①のせん断抵抗角 $\phi=35^\circ$ と同等な結果となった。

試験の概要を図 2-1 に、試験結果を表 2-1 に示す。



図 2-1 試験の概要

表 2-1 安息角試験 試験値一覧表

試験	測線	角度	平均角度
1回目	①	35.2	38.5
	②	36.8	
	③	46.3	
2回目	①	29.8	
	②	37.8	
	③	35.3	
3回目	①	44.4	
	②	36.3	
	③	44.8	