

島根原子力発電所2号炉 地震による損傷の防止 (耐震設計の論点)

[建物・構築物の地震応答解析における入力地震動の評価]

令和元年8月
中国電力株式会社

No.	論点	回答頁
論点[Ⅱ]既工認と今回工認の手法の相違点の整理に基づく論点		
＜建物・構築物＞		
1	[論点Ⅱ－4：建物・構築物の地震応答解析における入力地震動の評価] ・入力地震動の評価手法は既工認において採用実績のある1次元波動論又は2次元FEM解析を採用する。 ・解析モデルは建設時以降の敷地内の追加地質調査結果等に基づき設定する。	2～18

論点Ⅱ-4 建物・構築物の地震応答解析における入力地震動の評価（1）

■ 耐震設計の論点

【論点Ⅱ-4：建物・構築物の地震応答解析における入力地震動の評価】（論点の重み付け：A）

- 入力地震動の評価手法は既工認において採用実績のある1次元波動論又は2次元FEM解析を採用する。
- 解析モデルは建設時以降の敷地内の追加地質調査結果等に基づき設定する。

■ 論点に係る説明概要

建物・構築物の地震応答解析における入力地震動の評価の方針を以下に示す。

- 建設時の工事計画認可申請書（「既工認」）
 - ・原子炉建物等の地震応答解析における入力地震動は1次元波動論，2次元FEM解析又は直接入力（以下「1次元波動論又は2次元FEM解析等」という。）により評価を実施している。
 - ・解放基盤表面で定義される基準地震動 S_1 及び S_2 を基に，対象建物・構築物の地盤条件を適切に考慮したうえで，地震応答解析モデルの入力位置で評価した入力地震動を設定している。
- 今回の工事計画認可申請（「今回工認」）
 - ・既工認において採用実績のある1次元波動論又は2次元FEM解析等を採用する方針とする。
 - ・解放基盤表面で定義される基準地震動 S_s 及び弾性設計用地震動 S_d を基に，対象建物・構築物の地盤条件を適切に考慮したうえで，地震応答解析モデルの入力位置で評価した入力地震動を設定する。
 - ・解析モデルの設定にあたっては，既工認のモデルを基本とし，建設時以降の追加地質調査結果等の最新データを基に，より詳細なモデル化を行う。
- 先行プラント実績
 - ・なし（プラント固有の地質調査結果に基づき，解析モデルを作成している）

論点Ⅱ-4 建物・構築物の地震応答解析における入力地震動の評価（2）

- 本資料は原子炉建物を代表として、既工認と今回工認の入力地震動の評価手法および解析モデルを示す。原子炉建物以外の建物・構築物及び土木構造物に用いる解析モデルについては、詳細設計段階で示す。

（なお、原子炉建物を含む建物・構築物及び土木構造物の入力地震動評価手法の概要について補足1（P6～10）に示す。）

1. 原子炉建物の入力地震動の評価

- 今回工認の入力地震動の評価手法は、既工認と同様に1次元波動論及び2次元FEM解析を採用する。
- 解析モデルについては、建設時以降の敷地内の追加地質調査結果の反映等により、最新のデータを基に、より詳細にモデル化したものである。
- 入力地震動を算定する計算機コードとして、先行プラントで使用実績があるSuperFLUSHを採用する。
- 既工認と今回工認の評価手法及び解析モデルの比較を次ページ以降に示す。

2. 原子炉建物以外の建物・構築物及び土木構造物の入力地震動の評価

- 原子炉建物と同様に、既工認において採用実績のある1次元波動論又は2次元FEM解析等を採用する方針とし、解析モデルは建設時以降の敷地内の追加地質調査結果等に基づき設定する。

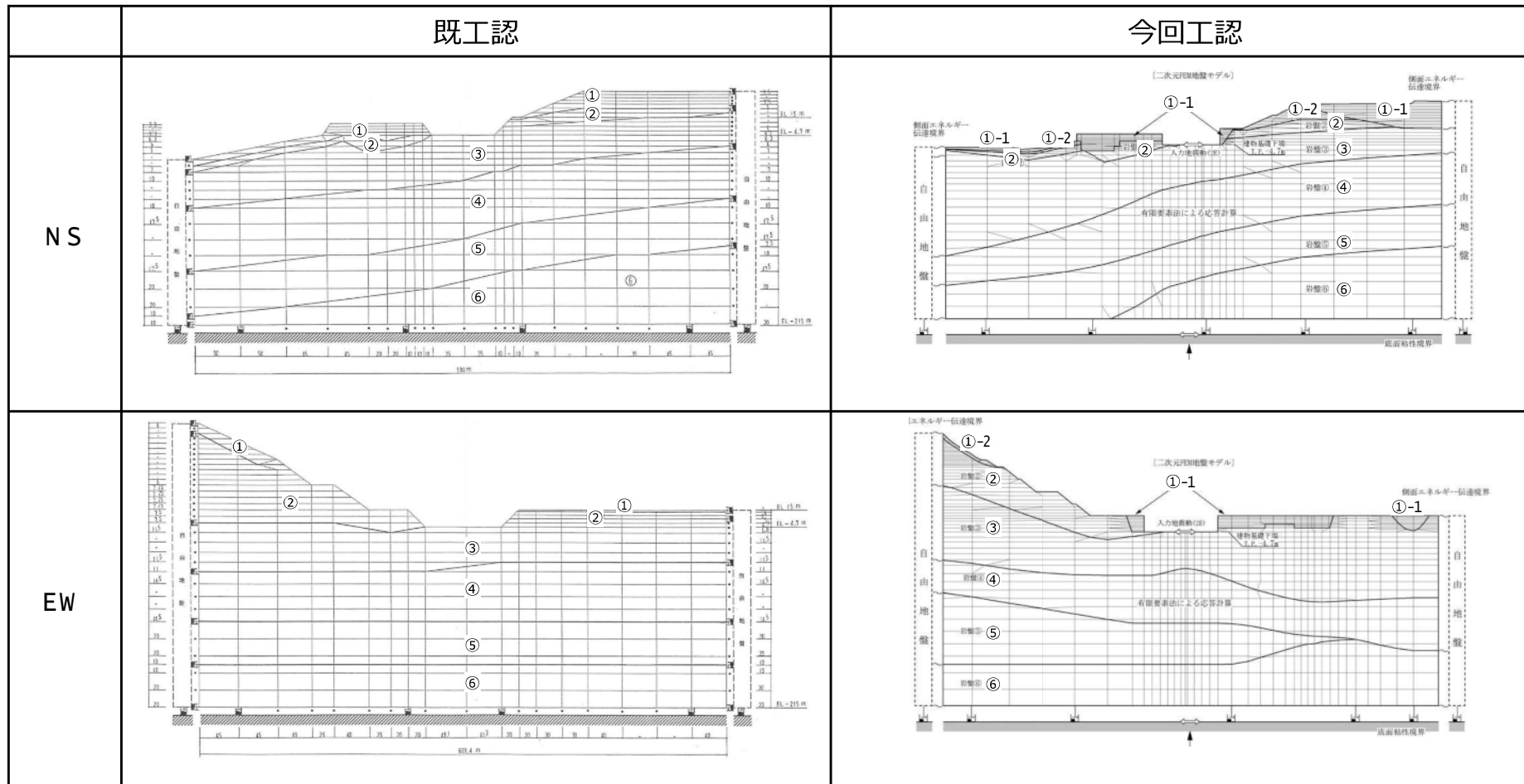
論点Ⅱ-4 建物・構築物の地震応答解析における入力地震動の評価（3）

原子炉建物の地震応答解析に用いる入力地震動の評価手法及び解析モデルの比較（主な解析条件）

		既工認	今回工認
入力地震動の評価 (概要)		<p>(NS方向)</p>	<p>(NS方向)</p> <p>※解放基盤表面からT.P.-215mまでの1次元モデルは既工認と同じ。</p>
評価手法	解析方法	周波数応答解析	同左
	入力地震動の算定方法 [計算機コード]	<ul style="list-style-type: none"> 引下げ：1次元波動論[SHAKE] 引上げ：2次元FEM解析[VESL-DYN] 	<ul style="list-style-type: none"> 引下げ：1次元波動論[SHAKE] 引上げ：2次元FEM解析[SuperFLUSH]
解析モデル	モデル化範囲	<ul style="list-style-type: none"> 引下げ：解放基盤表面(T.P.-10m)からT.P.-215mまでをモデル化 引上げ：幅は約600mの範囲とし、高さはT.P.-215m以下をモデル化 	<ul style="list-style-type: none"> 引下げ：同左 引上げ：同左
	速度層区分	建設時の地質調査結果に基づき設定	建設時の地質調査結果に加えて、建設時以降の敷地内の追加地質調査結果（ボーリング、PS検層）に基づき設定
	地盤物性値 (補足2 (P11) 参照)	建設時の地質調査結果に基づき設定 ※表層地盤についてはひずみ依存性を考慮した等価物性値を設定	同左 ※表層地盤については、地震動レベルが異なることから等価物性値が異なる
	境界条件 (2次元FEM) (補足3 (P12) 参照)	<ul style="list-style-type: none"> 底面：粘性境界 側面：粘性境界 	<ul style="list-style-type: none"> 底面：粘性境界 側面：エネルギー伝達境界 <p>※側方地盤への波動の逸散をより詳細に評価する境界条件に変更</p>

論点Ⅱ-4 建物・構築物の地震応答解析における入力地震動の評価（4）

原子炉建物の地震応答解析に用いる入力地震動の評価手法及び解析モデルの比較（2次元FEM解析モデル）



- ※ 2次元FEM解析モデルの作成に用いた速度層区分については、地質調査結果に基づき作成し、審査会合（平成27年3月6日）にて、「概ね必要な検討がなされている」と評価されている。（参考1参照：速度層断面図（南北：P13，東西：P14），岩層区分との比較（南北：P15，東西：P17），岩級区分との比較（南北：P16，東西：P18））
- ※ 今回工認モデルでは建物基礎底面レベルの振動を同一とするため、建物基礎底面レベルの平面を保持する拘束条件を設けている。また、建物床レベルの水平変位を同一とするため、切欠き地盤側面には水平変位を保持する拘束条件を設けている。
- ※ 地盤物性値を補足2（P11）に示す。

論点Ⅱ-4 建物・構築物の地震応答解析における入力地震動の評価（補足1）

＜入力地震動の評価手法 1 / 5＞

建物・構築物の入力地震動は建物基礎底面位置で評価する。なお、建物・構築物の地震応答解析モデルは、既工認と同様に質点系モデルを採用する。

建物・構築物		入力地震動の算定方法			
		既工認		今回工認	
		水平	鉛直	水平	鉛直
S ク ラ ス 施 設 の 施 間 接 支 持 構 造 物	原子炉建物	(引下げ) 1次元波動論 (引上げ) 2次元FEM解析	—	(引下げ) 1次元波動論 (引上げ) 2次元FEM解析	(引下げ, 引上げ) 1次元波動論
	制御室建物	直接入力	—	(引下げ) 1次元波動論 (引上げ) 2次元FEM解析	(引下げ, 引上げ) 1次元波動論
	タービン建物	(引下げ, 引上げ) 1次元波動論	—	(引下げ, 引上げ) 1次元波動論	(引下げ, 引上げ) 1次元波動論
	廃棄物処理建物	(引下げ, 引上げ) 1次元波動論	—	(引下げ, 引上げ) 1次元波動論	(引下げ, 引上げ) 1次元波動論
	排気筒	(引下げ, 引上げ) 1次元波動論※1	(引下げ, 引上げ) 1次元波動論※1	(引下げ, 引上げ) 1次元波動論	(引下げ, 引上げ) 1次元波動論
重 要 S A 施 設	ガスタービン 発電機建物	—	—	(引下げ, 引上げ) 1次元波動論	(引下げ, 引上げ) 1次元波動論
	緊急時対策所建物	—	—	(引下げ, 引上げ) 1次元波動論	(引下げ, 引上げ) 1次元波動論

※1 排気筒の既工認は、改造工認（平成25年）を示す。

論点Ⅱ-4 建物・構築物の地震応答解析における入力地震動の評価（補足1）

<入力地震動の評価手法 2 / 5>

建物・構築物		入力地震動の算定方法			
		既工認		今回工認	
		水平	鉛直	水平	鉛直
波 及 的 影 響 を 及 ぼ す お そ れ の あ る 施 設	1号炉 原子炉建物	直接入力	—	(引下げ) 1次元波動論 (引上げ) 2次元FEM 解析	—
	1号炉 タービン建物	—	—	(引下げ, 引上げ) 1次元波動論	—
	1号炉 廃棄物処理建物	—	—	(引下げ, 引上げ) 1次元波動論	—
	サイトバンカ建物	直接入力	—	直接入力	—
	サイトバンカ建物 (増築部)	—	—	直接入力	—
	1号炉 排気筒	直接入力	—	(引下げ, 引上げ) 1次元波動論	(引下げ, 引上げ) 1次元波動論
	2号炉 排気筒モニタ室	—	—	排気筒の基礎上の地震応答 解析結果を用いる※1	—
	燃料移送ポンプエリア 竜巻防護対策設備	—	—	排気筒の基礎上の地震応答 解析結果を用いる※1	—

※1 排気筒の基礎上に設置されている建物・構築物であるため、排気筒の地震応答解析によって得られる基礎上の応答を入力地震動として用いる。

論点Ⅱ-4 建物・構築物の地震応答解析における入力地震動の評価（補足1）

＜入力地震動の評価手法 3 / 5＞

土木構造物の入力地震動は構造物の基礎底面又はF E Mモデルの下端位置で評価する。なお、取水槽及び屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）の地震応答解析モデルは、既工認から変更し、地盤－構造物連成系の2次元F E Mモデルを採用する。

土木構造物		入力地震動の算定方法			
		既工認		今回工認	
		水平	鉛直	水平	鉛直
（Sクラス施設の屋外重要土木構造物を含む）	取水槽	(引下げ, 引上げ) 1次元波動論	—	(引下げ, 引上げ) 1次元波動論	(引下げ, 引上げ) 1次元波動論
	屋外配管ダクト (タービン建物～排気筒)	(引下げ, 引上げ) 1次元波動論	—	(引下げ, 引上げ) 1次元波動論	(引下げ, 引上げ) 1次元波動論
	ディーゼル燃料貯蔵 タンク基礎	—	—	(引下げ, 引上げ) 1次元波動論	(引下げ, 引上げ) 1次元波動論
	燃料移送系配管ダクト	—	—	(引下げ, 引上げ) 1次元波動論	(引下げ, 引上げ) 1次元波動論
	屋外配管ダクト (復水貯蔵タンク～原子炉建物)	—	—	(引下げ, 引上げ) 1次元波動論	(引下げ, 引上げ) 1次元波動論
	取水管	—	—	(引下げ, 引上げ) 1次元波動論	(引下げ, 引上げ) 1次元波動論
	取水口	—	—	(引下げ, 引上げ) 1次元波動論	(引下げ, 引上げ) 1次元波動論

論点Ⅱ-4 建物・構築物の地震応答解析における入力地震動の評価（補足1）

<入力地震動の評価手法 4 / 5>

土木構造物		入力地震動の算定方法			
		既工認		今回工認	
		水平	鉛直	水平	鉛直
津波防護施設	防波壁 (多重鋼管杭式擁壁)	—	—	(引下げ, 引上げ) 1次元波動論	(引下げ, 引上げ) 1次元波動論
	防波壁 (鋼管杭式逆T擁壁)	—	—	(引下げ, 引上げ) 1次元波動論	(引下げ, 引上げ) 1次元波動論
	防波壁 (波返重力擁壁)	—	—	(引下げ, 引上げ) 1次元波動論	(引下げ, 引上げ) 1次元波動論
	除じん機エリア防水壁	—	—	取水槽の地震応答 解析結果を用いる※1	取水槽の地震応答 解析結果を用いる※1
重要SA施設	第1ベントフィルタ 格納槽	—	—	(引下げ, 引上げ) 1次元波動論	(引下げ, 引上げ) 1次元波動論
	低圧原子炉代替注水 ポンプ格納槽	—	—	(引下げ, 引上げ) 1次元波動論	(引下げ, 引上げ) 1次元波動論
	緊急時対策所用 燃料地下タンク	—	—	(引下げ, 引上げ) 1次元波動論	(引下げ, 引上げ) 1次元波動論
	ガスタービン発電機用 軽油タンク基礎	—	—	(引下げ, 引上げ) 1次元波動論	(引下げ, 引上げ) 1次元波動論

※1 取水槽に設置されている土木構造物であるため、取水槽の地震応答解析によって得られる応答を入力地震動として用いる。

論点Ⅱ-4 建物・構築物の地震応答解析における入力地震動の評価（補足1）

<入力地震動の評価手法 5 / 5>

土木構造物		入力地震動の算定方法			
		既工認		今回工認	
		水平	鉛直	水平	鉛直
波 及 的 影 響 を 及 ぼ す お そ れ の あ る 施 設	輪谷貯水槽（西側）	—	—	(引下げ, 引上げ) 1次元波動論	(引下げ, 引上げ) 1次元波動論
	免震重要棟遮蔽壁	—	—	(引下げ, 引上げ) 1次元波動論	(引下げ, 引上げ) 1次元波動論
	循環水ポンプエリア 竜巻防護対策設備	—	—	取水槽の地震応答 解析結果を用いる※1	取水槽の地震応答 解析結果を用いる※1
	海水ポンプエリア 竜巻防護対策設備	—	—	取水槽の地震応答 解析結果を用いる※1	取水槽の地震応答 解析結果を用いる※1
	ストレナーエリア 竜巻防護対策設備	—	—	取水槽の地震応答 解析結果を用いる※1	取水槽の地震応答 解析結果を用いる※1
	給気エリア防水壁	—	—	取水槽の地震応答 解析結果を用いる※1	取水槽の地震応答 解析結果を用いる※1

※1 取水槽に設置されている土木構造物であるため、取水槽の地震応答解析によって得られる応答を入力地震動として用いる。

論点Ⅱ-4 建物・構築物の地震応答解析における入力地震動の評価（補足2）

＜入力地震動評価用解析モデルの地盤物性値＞

- ・今回工認の入力地震動評価用解析モデルの地盤物性値を以下に示す。
- ・表層地盤を除く岩盤の地盤物性値は、既工認で設定した値を用いる。
- ・今回工認モデルにおいては、埋戻し土を反映した表層地盤（層番号①-1）について、基準地震動 S_s 及び弾性設計用地震動 S_d それぞれに対して、2次元 FEMモデルによる等価線形解析に基づき等価物性値（剛性、減衰定数）を詳細設計段階で設定することとする。なお、既工認モデルにおける表層地盤（層番号①）については、基準地震動 S_1 及び S_2 に対する1次元モデルによる等価線形解析に基づき、等価物性値（剛性）を設定している。

入力地震動評価用解析モデルの地盤物性値

層番号※1		S波速度 V_s (m/s)	P波速度 V_p (m/s)	単位体積重量※3 γ (kN/m^3)	ポアソン比 ν (-)	ヤング係数※3 E ($\times 10^5 \text{kN/m}^2$)	せん断弾性係数※3 G ($\times 10^5 \text{kN/m}^2$)	減衰定数 h (%)
既工認	今回工認							
①	①-1	等価線形解析及び試験結果に基づき設定						
	①-2	250	800	20.6	0.446	3.80	1.31	3※2
②	②	900	2100	23.0	0.388	52.9	19.0	3※2
③	③	1600	3600	24.5	0.377	176.5	64.0	3
④	④	1950	4000	24.5	0.344	256.0	95.1	3
⑤	⑤	2000	4050	26.0	0.339	283.4	105.9	3
⑥	⑥	2350	4950	27.9	0.355	427.6	157.9	3

※1 層番号は解析モデル図(P5)を参照。

※2 既工認では、慣用値として5%と設定。

※3 単位体積重量、ヤング係数及びせん断弾性係数については、今回工認では既工認の値（MKS単位系）を単位換算（SI単位系）した値を示す。

論点Ⅱ-4 建物・構築物の地震応答解析における入力地震動の評価（補足3）

＜2次元 F E M解析モデル側面の境界条件＞

■ 2次元 F E M解析モデルの側面の境界条件は F E M部分から側方地盤への波動の逸散を考慮したものであり、粘性境界は隣接する側方地盤との変位の関係から、エネルギー伝達境界は F E M部分と側方地盤全体の変位分布の関係からこの逸散を考慮している。詳細を以下に示す。

・粘性境界

ダッシュポットを用いた速度比例型の減衰力により、側方地盤への波動の逸散を考慮する。解の精度が良く、計算も容易である。

・エネルギー伝達境界

F E M部分の境界節点と側方地盤との変位分布の差から、側方地盤への波動の逸散を考慮する。解の精度がとても良く、より現実に即した解析結果を得ることができる。なお、先行プラントの工認において適用実績がある。

境界処理法	概念図	説明	定式化の難易度	計算上の特徴	解の精度	その他
粘性境界		・速度比例型の減衰力により波動逸散波を吸収	容易	・計算は容易 ・[K*]は対角またはバンドマトリクス	○	・手間と精度のバランスが良い ・周波数応答/時刻歴解析の双方に適用可能 ・1～3次元で適用可能
エネルギー伝達境界		・一般化表面波の固有モードを合成し、側方の水平成層地盤と結合	難解	・計算は煩雑、かつ固有値解析に計算時間を要する ・側方の[K*]はフルマトリクス	◎	・2次元および軸対称の周波数応答のみ適用可能

（入門・建物と地盤との動的相互作用，日本建築学会，1996より引用）

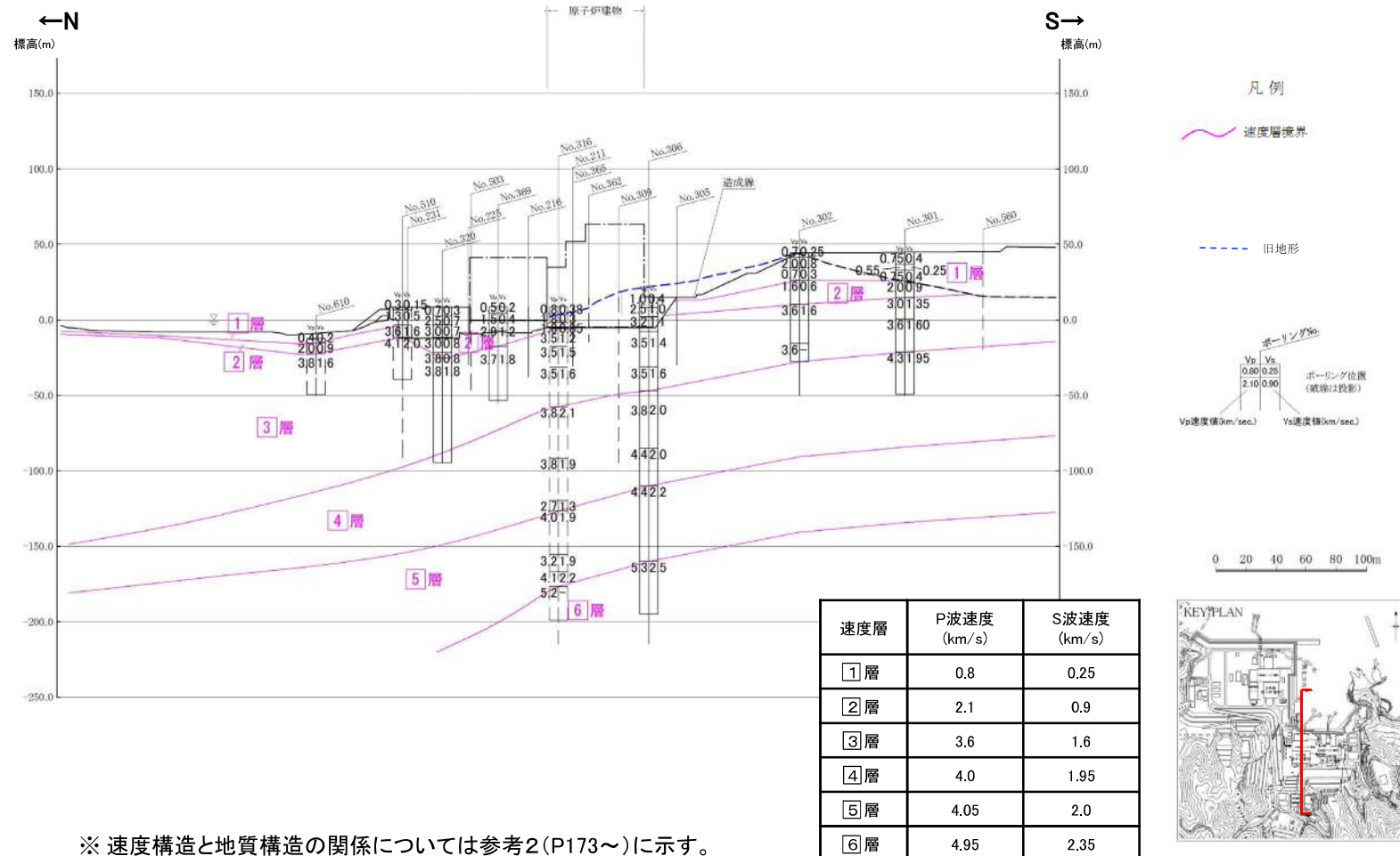
論点Ⅱ-4 建物・構築物の地震応答解析における入力地震動の評価（参考1）

2. 敷地及び敷地周辺の地質・地質構造の調査

敷地地盤の地質・地質構造(2号地盤の速度層断面図:南北断面)

第204回審査会合
資料1 P17再掲

- 2号地盤の南北断面における速度層区分より, 2号地盤の南北方向の地下構造は北に緩やかに傾斜していると考えられる。



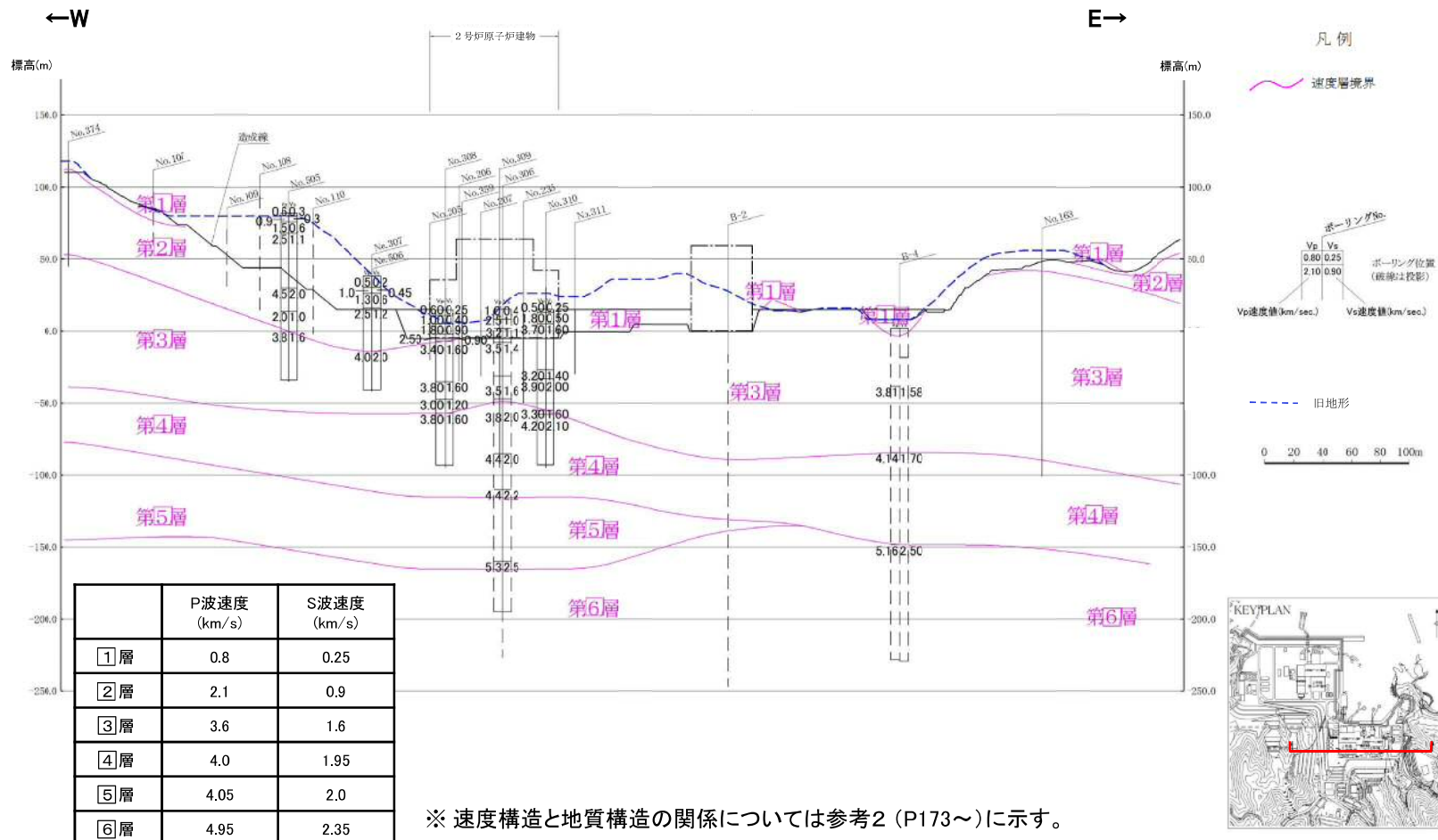
論点Ⅱ-4 建物・構築物の地震応答解析における入力地震動の評価（参考1）

2. 敷地及び敷地周辺の地質・地質構造の調査

敷地地盤の地質・地質構造(2号地盤の速度層断面図:東西断面)

第204回審査会合
資料1 P18再掲

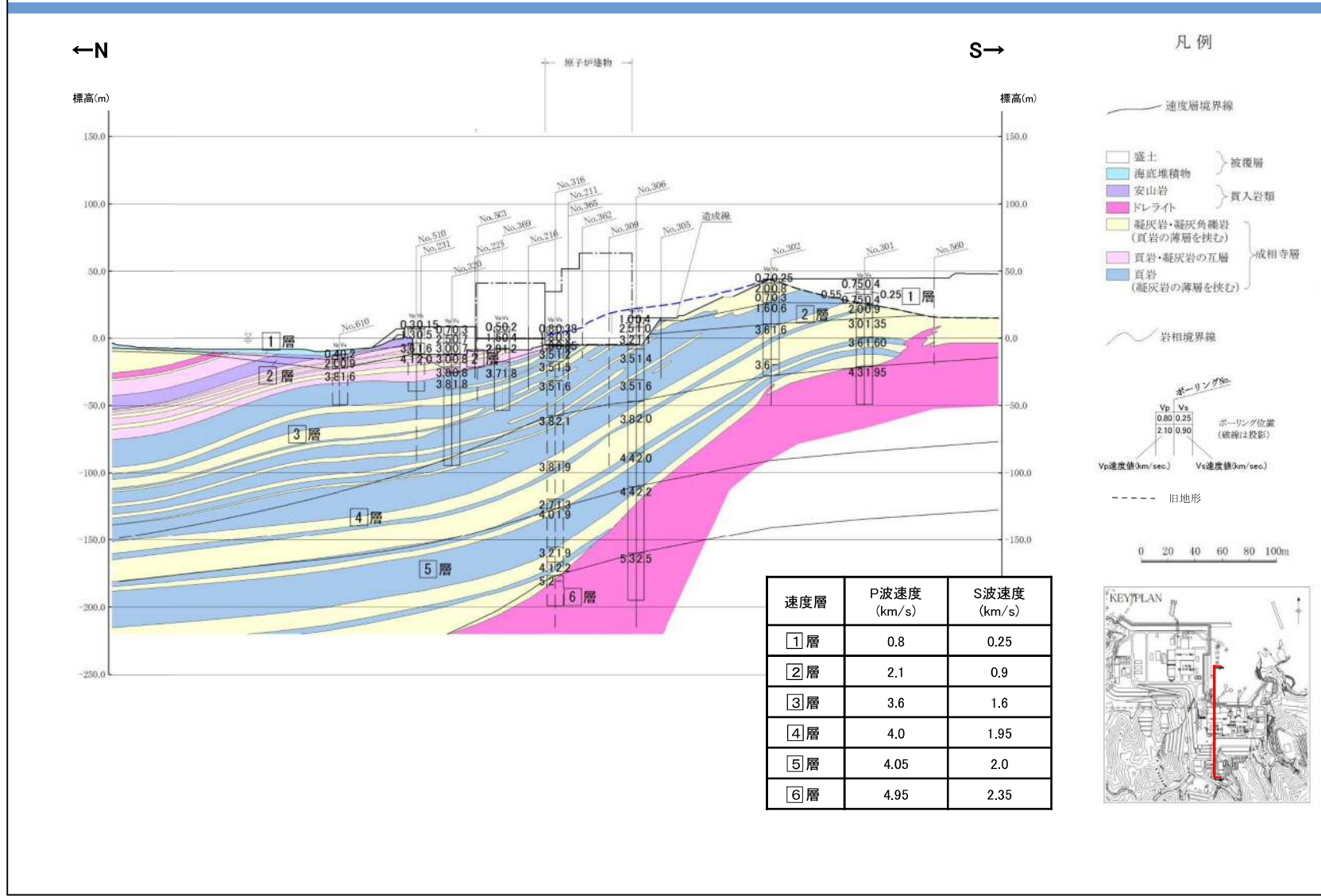
- 2号地盤の東西断面における速度層区分より, 2号地盤の東西方向の地下構造はほぼ水平成層であると考えられる。



論点Ⅱ-4 建物・構築物の地震応答解析における入力地震動の評価 (参考1)

【参考2】2号地盤の岩相区分との比較(南北断面)

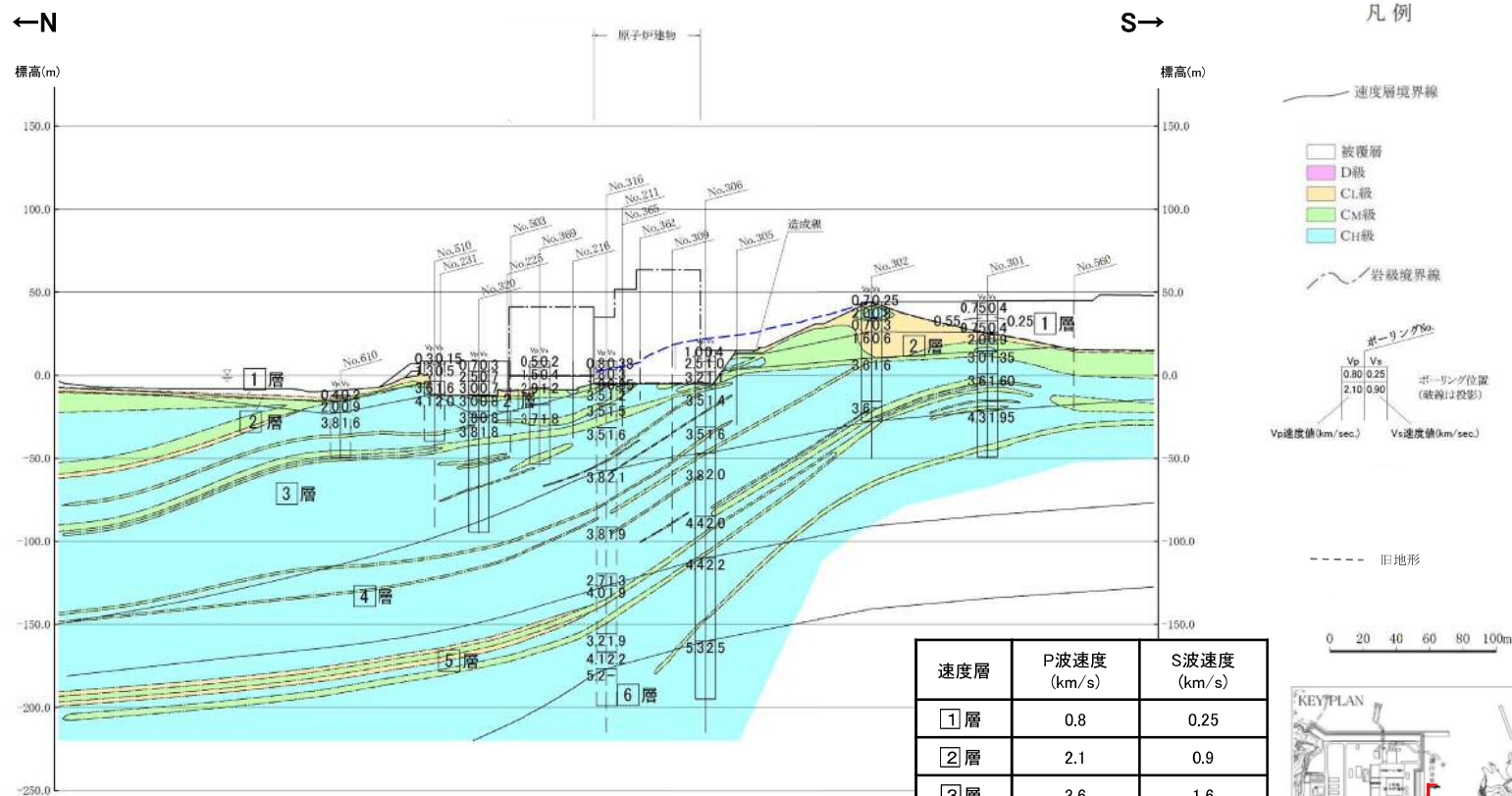
第204回審査会合
資料1 P175再掲



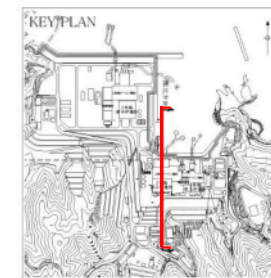
論点Ⅱ-4 建物・構築物の地震応答解析における入力地震動の評価 (参考1)

第204回審査会合
資料1 P176再掲

【参考2】2号地盤の岩級区分との比較(南北断面)



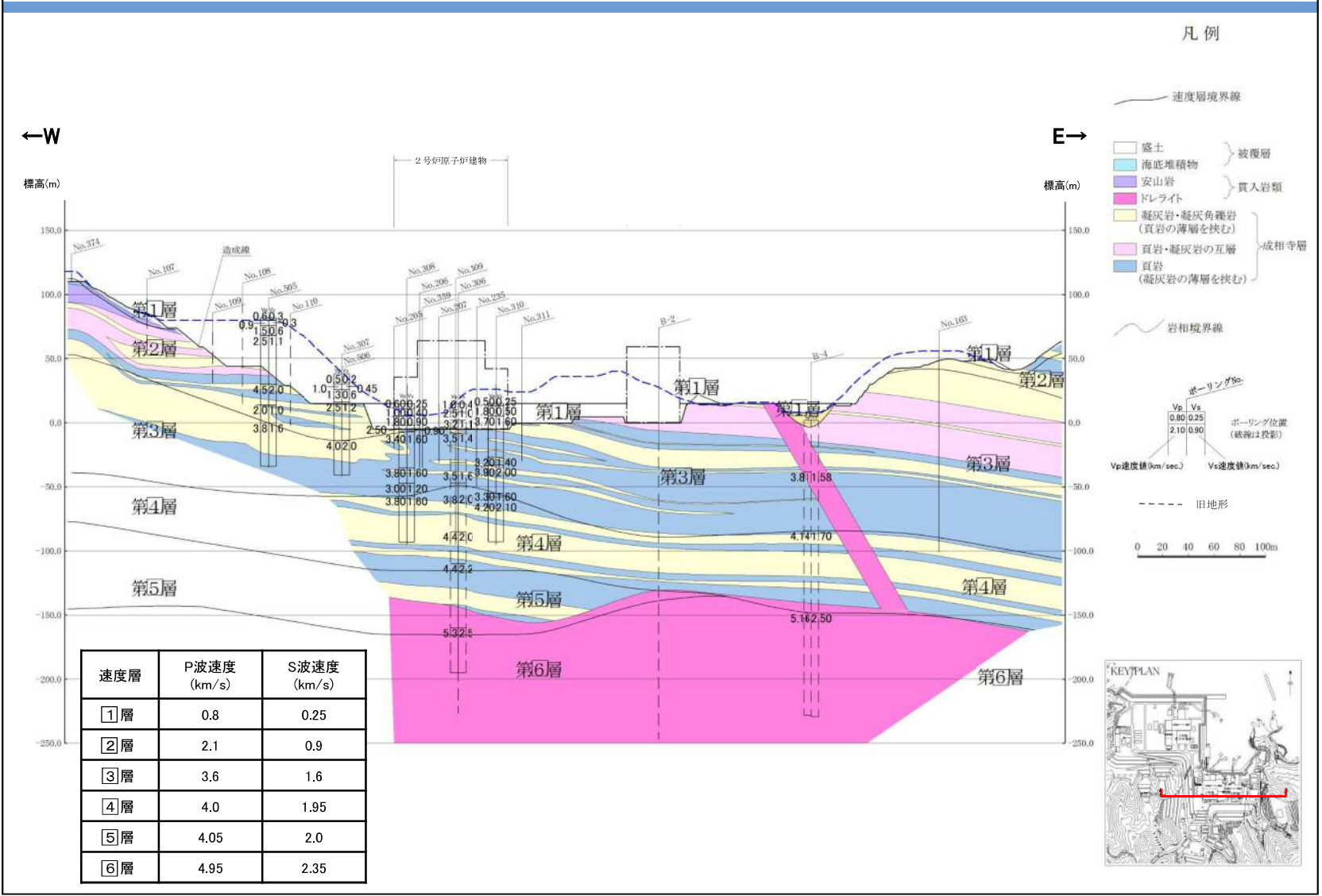
・浅部では、土被りが小さく、風化、亀裂の影響を受けているため、速度層境界は地質構造を反映していない。



論点Ⅱ-4 建物・構築物の地震応答解析における入力地震動の評価 (参考1)

【参考2】2号地盤の岩相区分との比較(東西断面)

第204回審査会合
資料1 P177再掲



論点Ⅱ-4 建物・構築物の地震応答解析における入力地震動の評価 (参考1)

【参考2】 2号地盤の岩級区分との比較 (東西断面)

第204回審査会合
資料1 P178再掲

