

柏崎刈羽原子力発電所6号及び7号炉審査資料	
資料番号	KK67-0107
提出年月日	平成28年7月8日

柏崎刈羽原子力発電所 6号及び7号炉

側面回転ばねの妥当性検討の方針について

平成28年7月

東京電力ホールディングス株式会社

1. はじめに

本資料は、柏崎刈羽原子力発電所 6, 7 号炉の原子炉建屋の地震応答解析に用いる埋込み SR モデルに適用した側面回転ばねについて、その適用に関する妥当性検討の方針について記すものである。本資料では、6 号炉の妥当性検討の方針を説明するが、7 号炉についても同様の方針により、側面回転ばねを考慮することの妥当性を確認する予定である。

2. 論点の整理と検討方針

ここでは、回転ばねを考慮することの目的・効果を説明した上で、側面回転ばねを考慮するにあたっての論点を抽出し、各論点に対する検討方針を設定する。

2. 1 回転ばねを採用する目的・効果について

今回工認の原子炉建屋の水平方向の地震応答解析モデルでは、既工認モデル時より考慮している NOVAK の側面水平ばねに加え、図-1 に示すように NOVAK の側面回転ばねを採用する予定である。

これは、2007 年新潟県中越沖地震の観測記録を用いたシミュレーション解析において、他の項目（コンクリート実剛性等）と併せて、側面回転ばねを採用したモデルによる解析結果が、観測記録を精度良く再現できたことを踏まえ、より実状に近い建屋応答を再現するという観点から、側面回転ばねによる効果を考慮することとしたものである。また、側面回転ばねを考慮することにより、埋込み SR モデル適用の判定基準として用いる建屋の接地率の改善効果も期待できる。

側面回転ばねを考慮することが建屋応答に与える影響を定量的に把握するために、6/7 号炉原子炉建屋のうち 7 号炉を代表として検討を実施した。検討にあたっては、①既工認ベースのモデル（回転ばね非考慮）、②既工認ベースのモデルに側面回転ばねを追加したモデルのそれぞれの解析モデルについて、基準地震動 S_s による動的解析を実施し、結果を比較することとした。表-1 に建屋接地率、図-2 に床応答スペクトル、図-3 に建屋の最大応答せん断ひずみについての比較結果を示す。

まず、表-1 から側面回転ばねを考慮することによって接地率が大きく改善することが確認出来る。接地率は前述の通り、埋込み SR モデル適用の判定基準として用いる指標である。「原子力発電所耐震設計技術規定 JEAC4601-2008」（（社）日本電気協会、2009 年）では、接地率が 50%を下回った場合は、埋込み SR モデルの適用範囲外となり、特別な検討が必要になるとされている。

図-2 の床応答スペクトルについては、回転ばねを考慮することにより、短周期側の応答スペクトルを多少低減する効果が認められる。側面回転ばねは、建屋の地下側面と地盤の間の摩擦力による建屋の回転方向の拘束効果をモデル化したものであるため、その効果で短周期側の振動が低減したものと考えられる。

図-3 の建屋のせん断ひずみは、建屋耐震壁の耐震安全性評価の評価基準値として参照す

る応答値であるが、既工認モデル及び回転ばねを追加で考慮したモデル共に評価基準値に対して十分な余裕がある。回転ばねを考慮することにより、最大せん断ひずみは大きくなる傾向が確認出来る。

以上で説明したとおり、回転ばねを考慮することの主要な目的としては、「側面の摩擦力による拘束効果をモデルに取り込むことによってより実状に近い応答を模擬すること」及び「埋込みSRモデル適用の判定基準として用いる建屋の接地率を改善すること」にあると考えている。

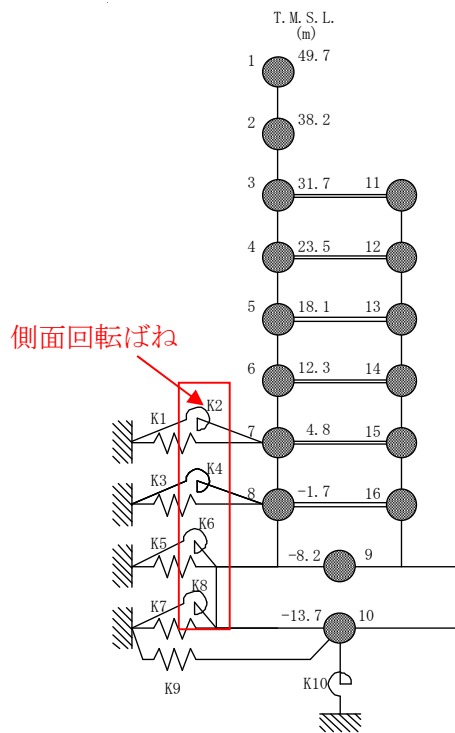


図-1 K6/7 R/B の地震応答解析モデル* (NS 方向)

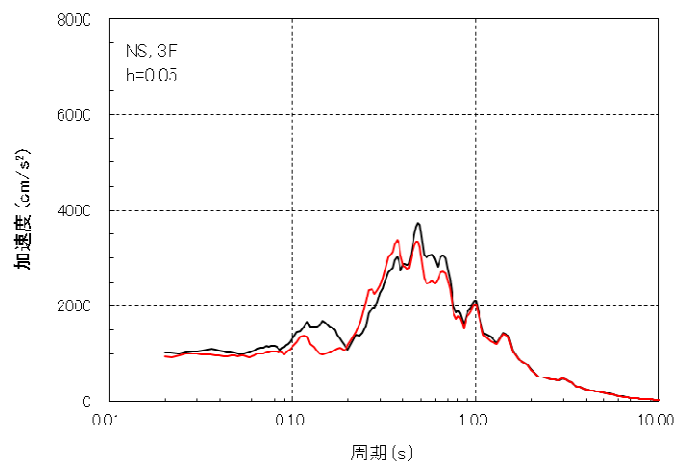
*原子炉建屋の解析モデル図としては、6、7号炉原子炉建屋で同じ表現となる。

表-1 側面回転ばねが接地率に与える影響 (7号炉原子炉建屋での試算例)

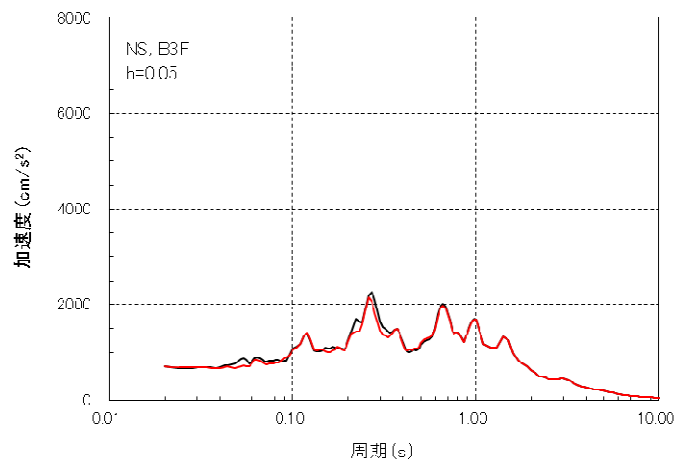
解析ケース	接地率	
	NS 方向	EW 方向
既工認モデル	51.5%(Ss-1)	49.9%(Ss-2)
回転ばね考慮	70.1%(Ss-1)	67.0%(Ss-2)

凡例

— 既工認モデル
— 回転ばね考慮



(3階, Ss-1, NS方向)



(基礎版上, Ss-1, NS方向)

図-2 側面回転ばねが建屋床応答スペクトルに与える影響
(7号炉原子炉建屋での試算例)

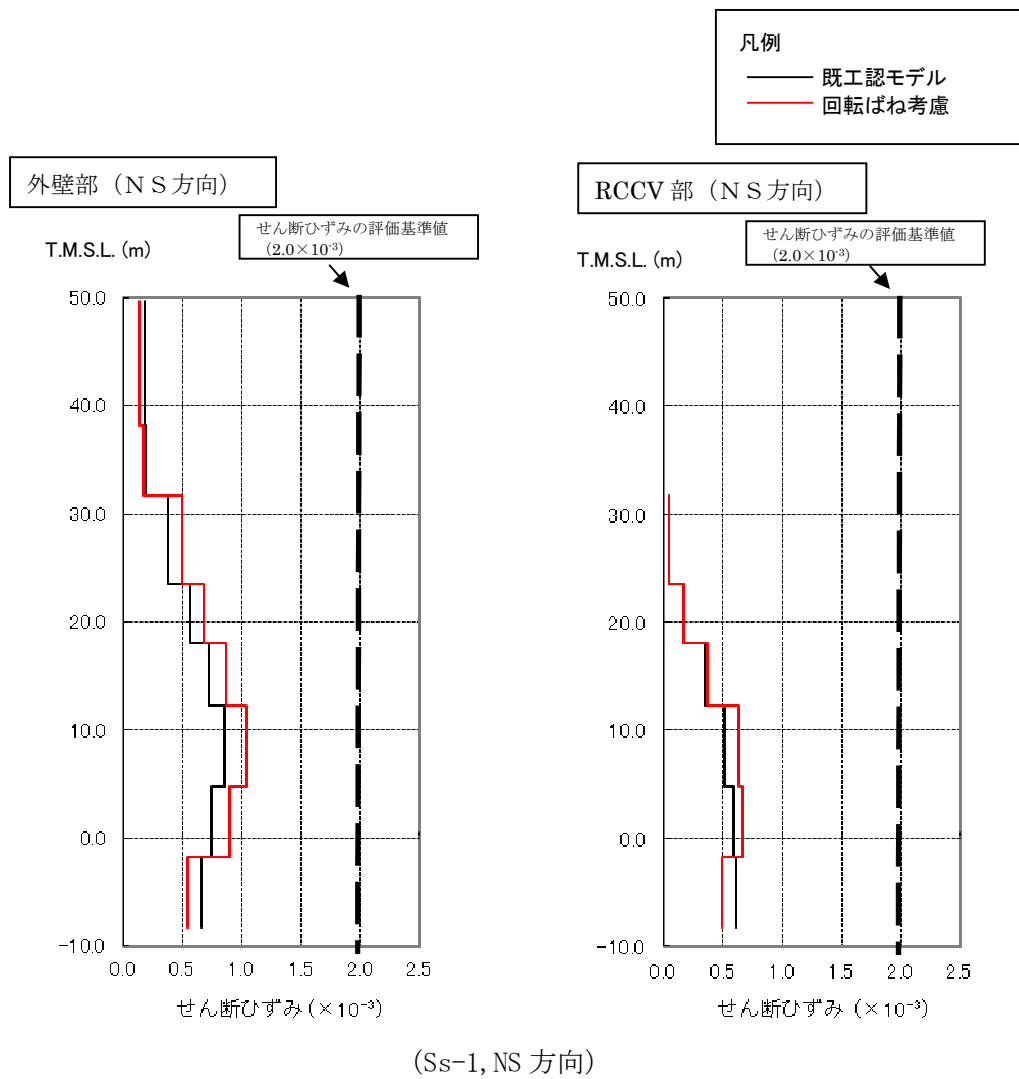


図-3 回転ばねを考慮することが建屋の応答せん断ひずみに与える影響
(7号炉原子炉建屋での試算例)

2. 2 建屋の設置状況を踏まえた論点の抽出

NOVAK の側面回転ばねは、図-4 に示す通り、埋込み建屋の回転方向の変形に対する建屋地下外壁部と側面地盤との間に作用する摩擦力による拘束効果を表現したものであり、側面回転ばねを採用することの妥当性・適用性の確認にあたっては、埋込みの状況や建屋周辺部の状況を適切に考慮した上で、側面の摩擦力により考慮した回転ばねの反力を負担出来ることを確認する必要があると考えられる。なお、「1. はじめに」で述べたとおり本資料では6号炉原子炉建屋（以下、K6R/B という）を代表として検討方針を説明するが、地震応答解析モデルで側面回転ばねを適用する建屋については、同様の検討方針に基づき個別にその妥当性を説明する予定である。

K6R/B の地盤及び周辺建屋の設置状況の詳細について、図-5 に平面図、図-6 に断面図を示す。これより、建屋地下外壁の大部分が地盤と接していることが確認出来ることから、側面地盤ばねを考慮すること自体に支障は無いと考えられる。一方、K6R/B の地下外壁部については図-7 に詳細を示すとおり、防水層が設けられており、建屋地下外壁が防水層を介して概ねマンメイドロック（西山モルタル）と接する特殊な状況にある。したがって、側面回転ばねの妥当性の検討にあたっては、防水層が介在することを踏まえた上で建屋と地盤間で摩擦力が伝達可能かを確認する必要があると考え、これを論点として位置づけることとした。

→ **【論点① 建屋側面に防水層が存在する場合に防水層と地盤間で摩擦力が伝達可能か】**

また、工認で採用する地震応答解析モデルへの適用性の検討にあたっては、原子炉建屋の検討に用いる基準地震動 S_s 及び弾性設計用地震動 S_d を想定した場合でも回転ばねが機能することを確認することが必要と考えられる。地震時には建屋地下外壁面と側面地盤の境界部で、地盤の接触剥離の発生や土圧変動が発生することにより、外壁側面の摩擦抵抗力が影響を受けることが想定されることから、それらの影響を考慮した上での適用性を示すことが必要であると考えられるため、これを2つめの論点として位置づけることとした。

→ **【論点② 地震時の側面地盤の剥離や土圧変動を考慮しても側面回転ばねとしての摩擦伝達効果が得られるか】**

一方、図-5、図-6 に示した通り、K6R/B の東側側面には6号炉タービン建屋が接している。更に、建屋周辺においてマンメイドロックが複雑に打設されていることや埋め戻し土が存在することについても確認出来る。以上のような状況を踏まえると、隣接建屋や建屋周辺の詳細な地盤状況を踏まえた場合の側面回転ばねの適用性についても確認する必要があると考えられるため、これを3つめの論点として位置づけることとした。

→ **【論点③ 隣接建屋や建屋周辺の詳細な地盤状況が側面回転ばねの適用性に影響しないか】**

今回工認で採用予定の地震応答解析モデル（埋込みSRモデル）は、簡易に側面ばねをモデル化した解析モデルであるため、主に【論点②】の検証で用いる詳細評価モデルによる検討結果を踏まえた上で、埋込みSRモデルへ回転ばねを適用することが妥当かどうかを確認する必要があると考えられる。そのためこれを4つめの論点として位置づけることとした。

→【論点④ 詳細評価モデルの検討結果を踏まえて埋込みSRモデルへ回転ばねを適用することが妥当か】

以降では、以上の4つの論点を踏まえた上で、妥当性の確認方針を設定する。

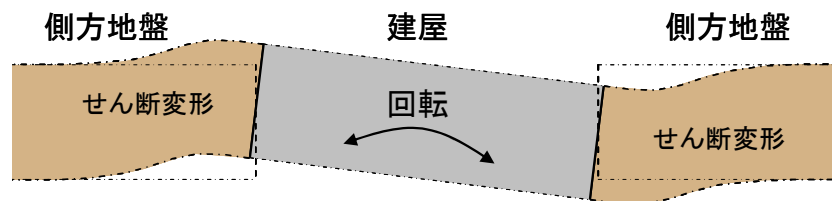


図-4 NOVAK ばねの作用機構概念

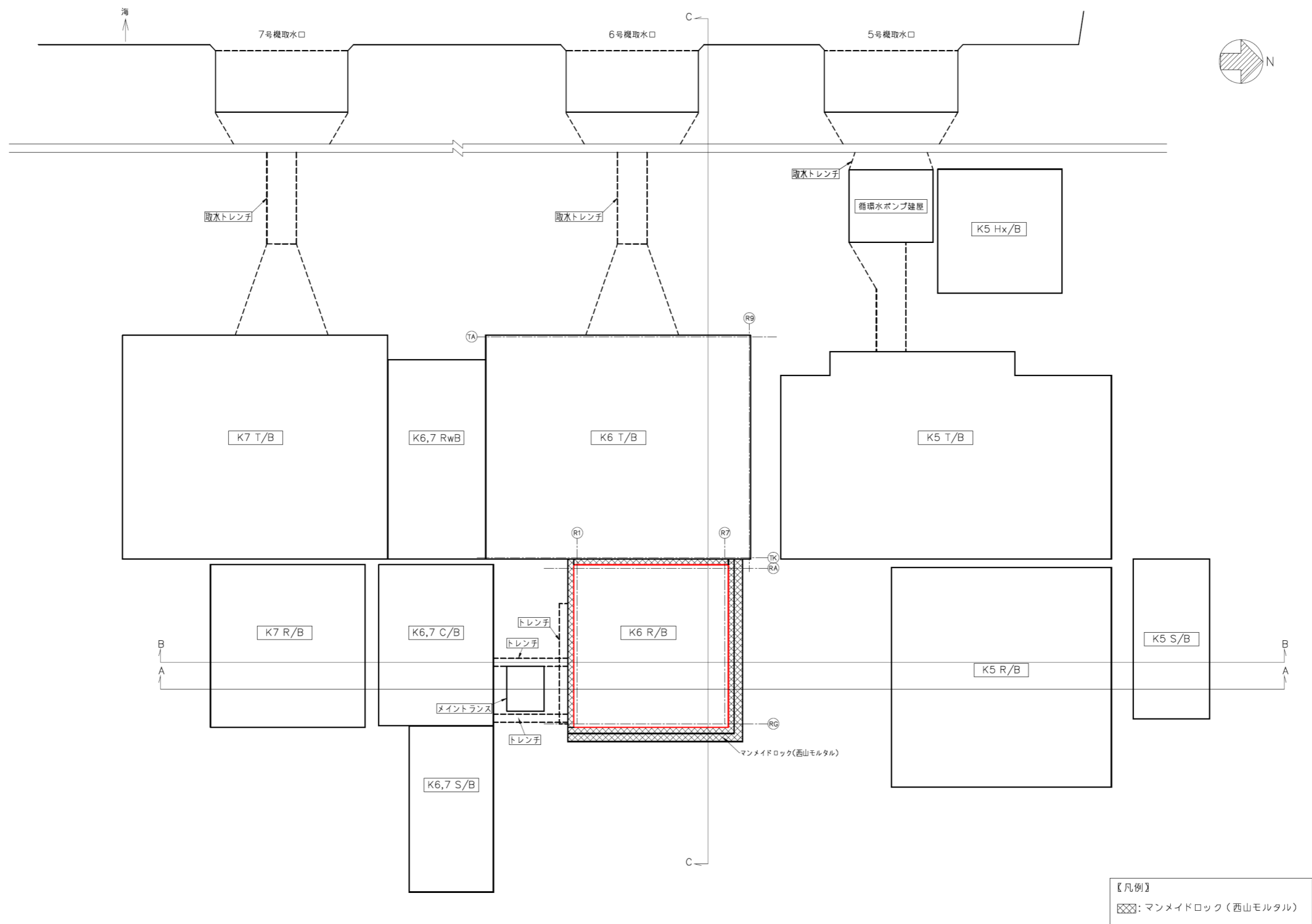
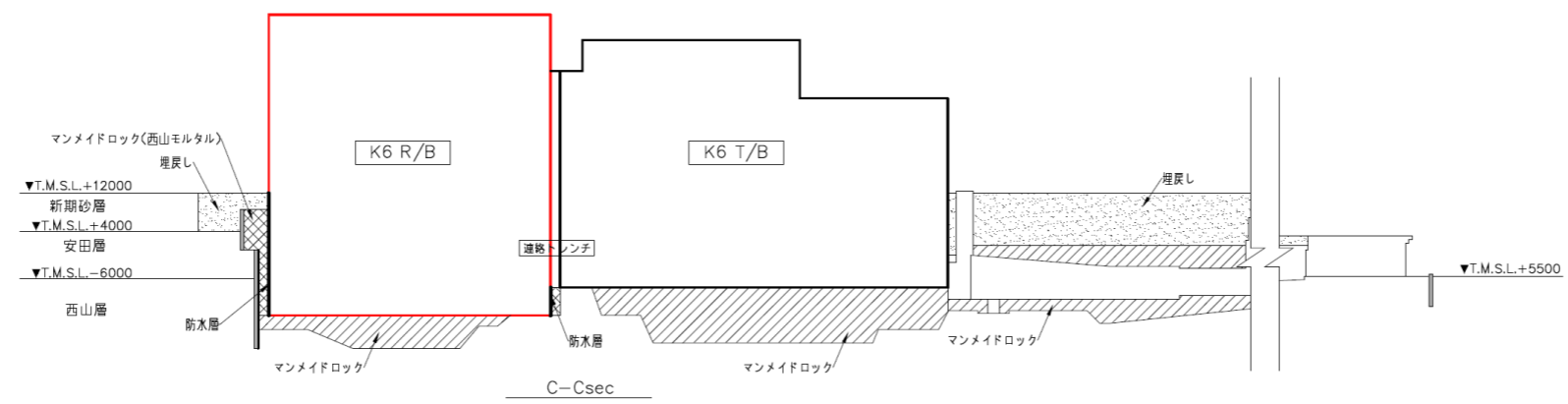
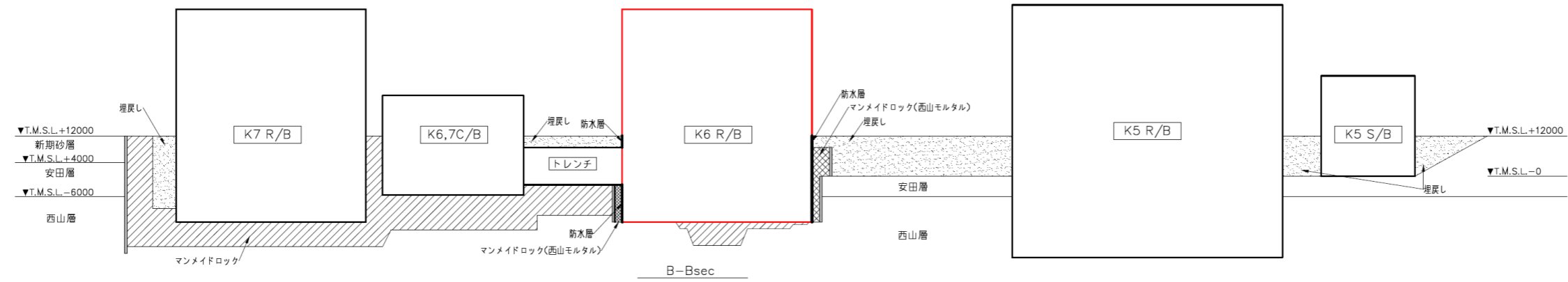
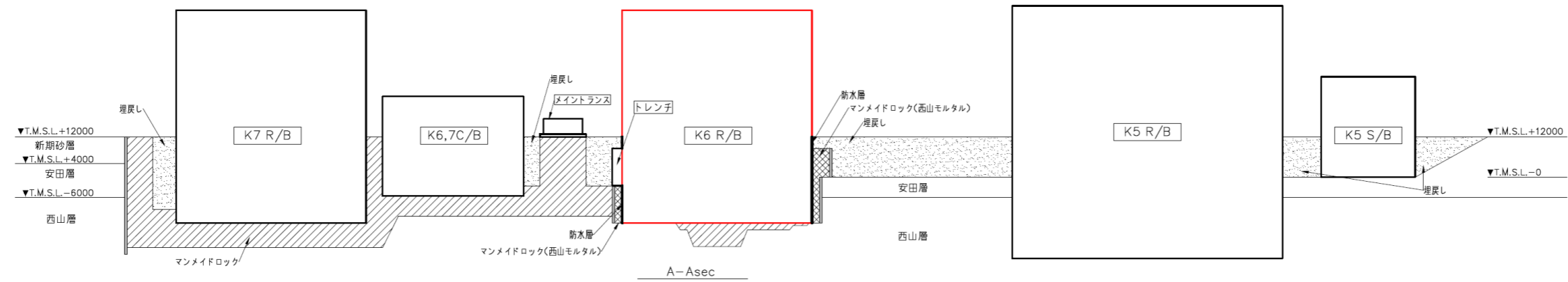


図-5 6号炉原子炉建屋の設置状況 (平面図)



- 【凡例】
- ☒: マンメイドロック (西山モルタル)
 - ▨: マンメイドロック
 - ▨: 埋戻し
 - : 連壁 (t=800mm)

図-6 6号炉原子炉建屋の設置状況 (断面図)

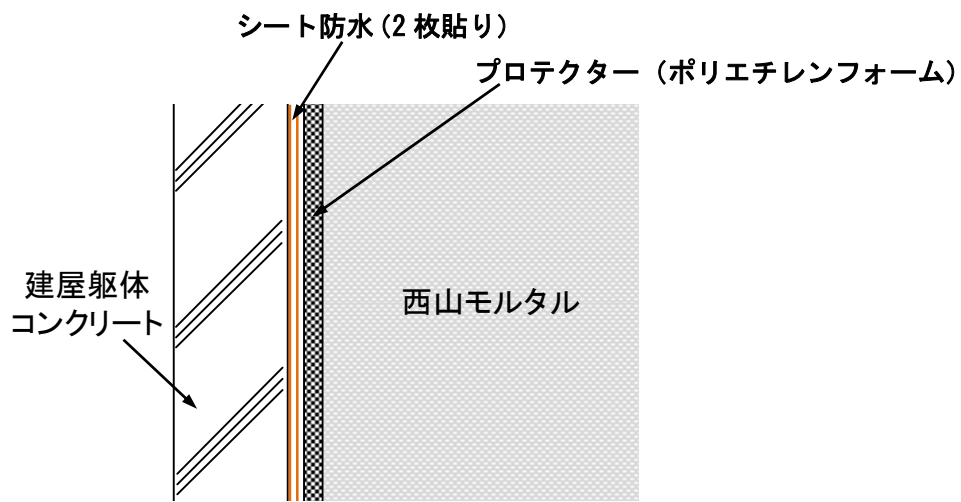


図-7 K6R/B 地下外壁の防水施工状況

2. 3 妥当性の検討方針

2. 2で抽出した論点を踏まえて、今後の検討方針を設定することとした。検討の全体フローを図-8に示す。

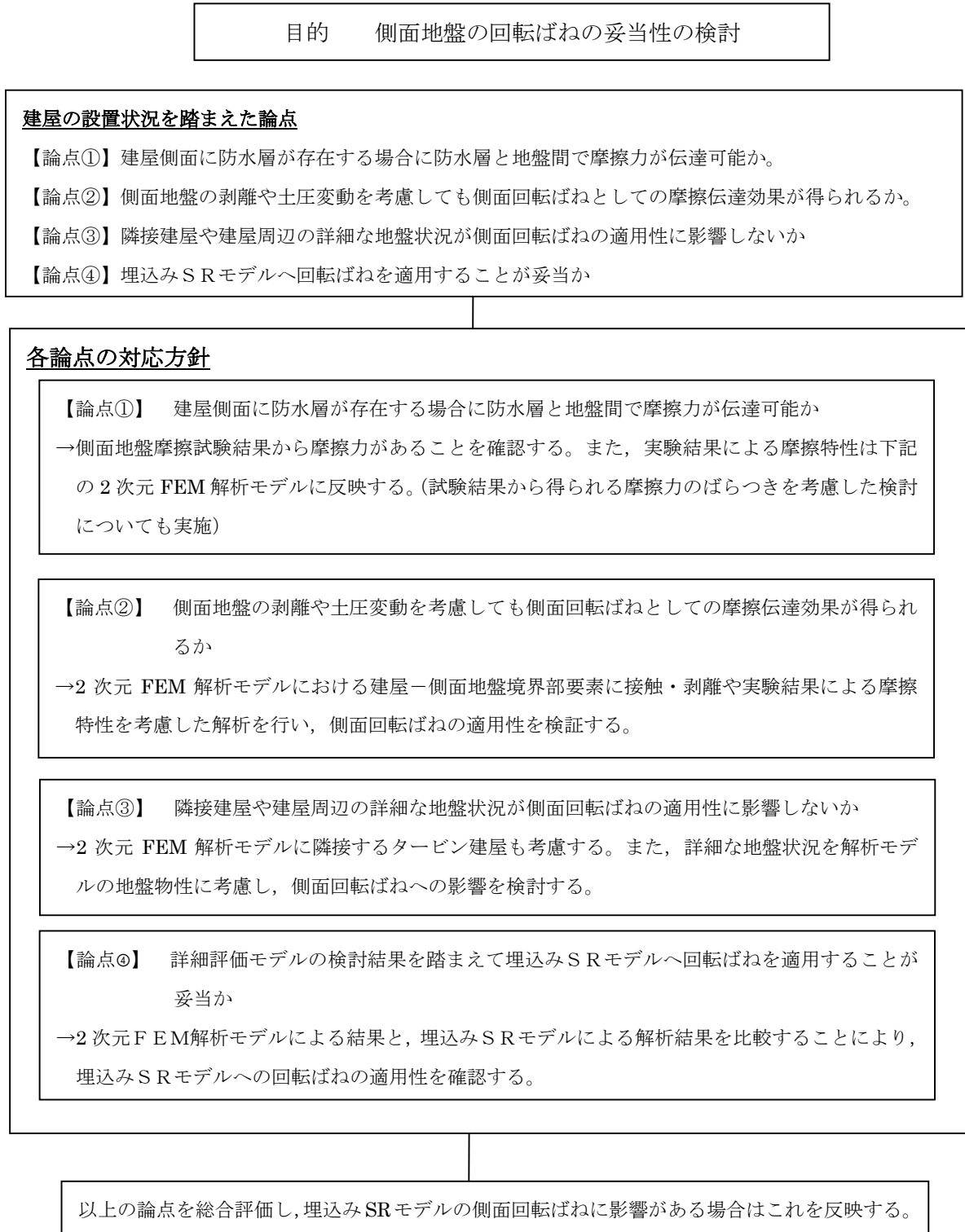


図-8 側面地盤回転ばねの妥当性に関する全体の検討フロー

2. 3. 1 【論点①】についての確認方針

【論点①】建屋側面には防水層があるが，防水層と地盤間で摩擦力が伝達可能か

K6R/B の地下外壁には図-7に示したとおり，防水層が設置されていることから，回転ばねの妥当性検討にあたっては，建屋側面に防水層がある場合の建屋-側面地盤の境界部で保持できる摩擦力（以下，摩擦耐力と呼ぶ）を適切に設定した上で，確認を行うことが必要であると考えられる。

防水層が存在する場合の建屋-側面地盤の境界部の摩擦耐力については，地盤摩擦試験により確認する方針とした。地盤摩擦試験の実施にあたっては，図-9に示すように実機防水仕様様の状況や側面に作用する土圧による影響も踏まえたモデル化を行うこととし，試験に用いる材料（保護板，防水層（シート）等）については，試験結果の実機への適用性を考慮し，実機と同製品もしくは同等品を使用することとした。試験により得られた摩擦耐力については，側面回転ばねの妥当性確認に用いる2次元FEMモデル（後述）に反映する。

なお，2次元FEMモデルの基礎側面と地盤間のジョイント要素の摩擦力（せん断応力-垂直圧関係）は，地盤摩擦試験結果（図-10）の平均値を採用することを基本とするが，試験結果のばらつきを考慮して下限値を採用した場合の影響についても検討を実施する。

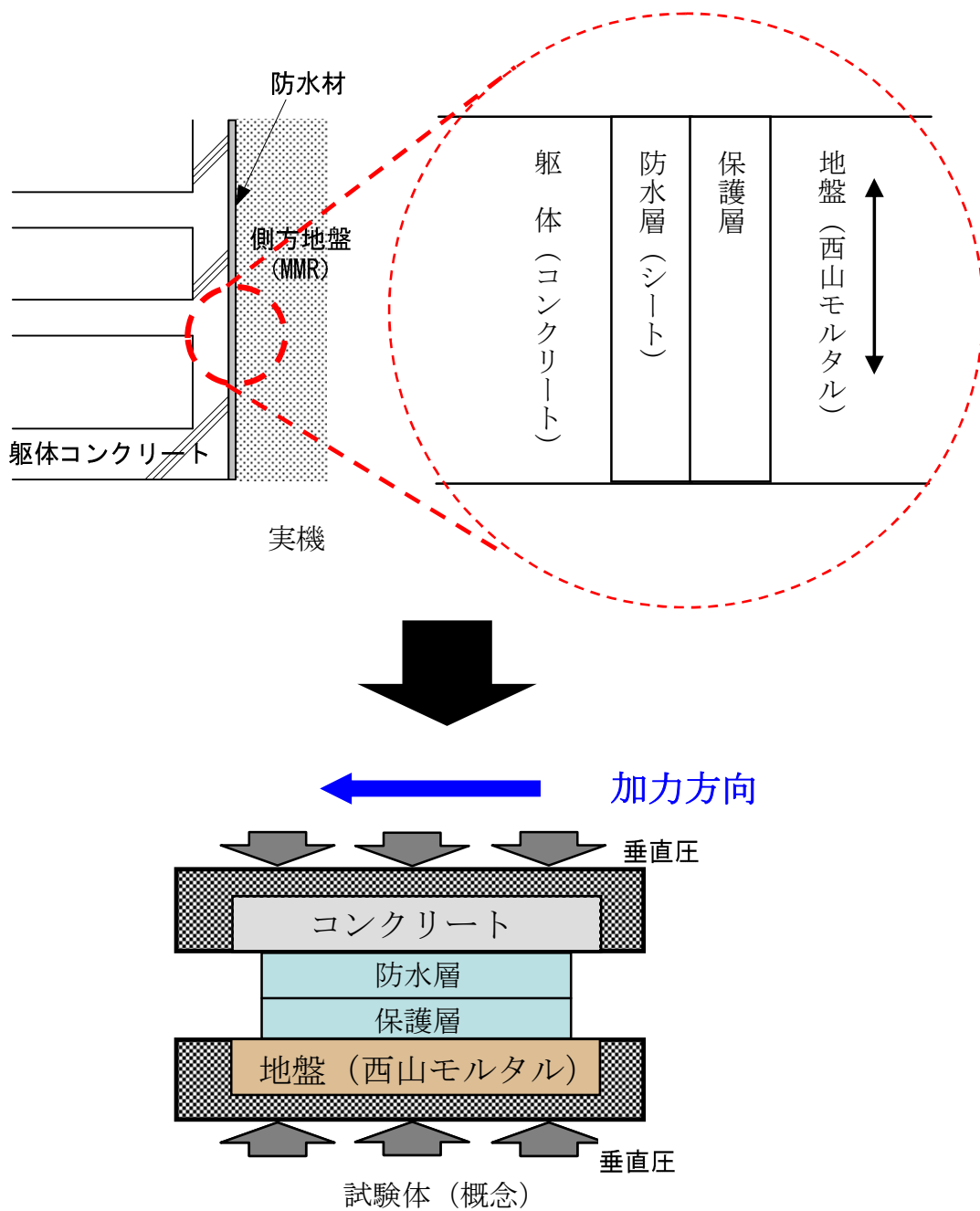


図-9 地中外壁の摩擦試験のモデル化の考え方

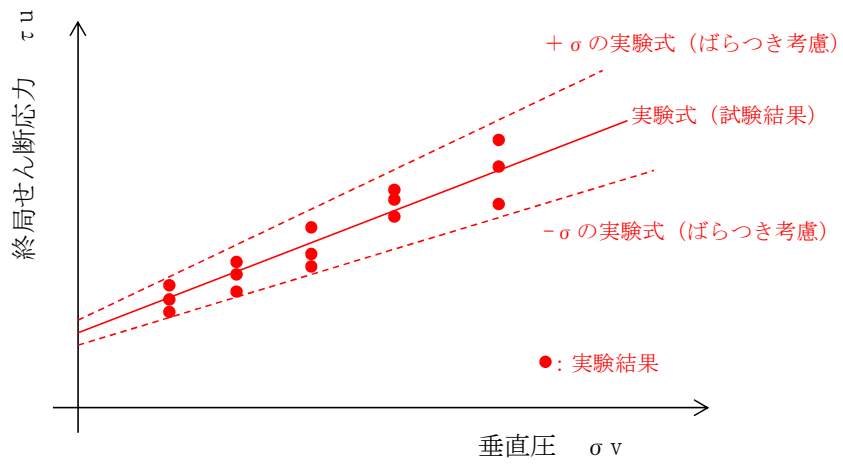


図-10 最大せん断応力-垂直圧関係（地盤摩擦試験結果）（概念図）

2. 3. 2 【論点②】 についての確認方針

【論点②】 側面地盤の剥離や土圧変動を考慮しても側面回転ばねとしての摩擦伝達効果が得られるか

地震時には建屋地下外壁面と側面地盤の境界部で、地盤の接触剥離の発生や土圧変動が発生することにより、外壁側面の摩擦抵抗力が影響を受ける。そこで、2次元 FEM モデルを用いた地震応答解析を行い、基準地震動 S_s 時における建屋-側面地盤の境界部の接触・剥離及び摩擦を検討する。2次元 FEM モデルには図-11 に破線で示す建屋-地盤境界部に接触剥離や摩擦を考慮したジョイント要素（水平ばねと摩擦ばね）を設ける。

検討に用いるモデルを図-12 に示す。図-12 に示す解析モデルは、建屋を質点系モデルとし、地盤を成層地盤としてモデル化するが、建屋周囲に存在する西山モルタルも考慮する。

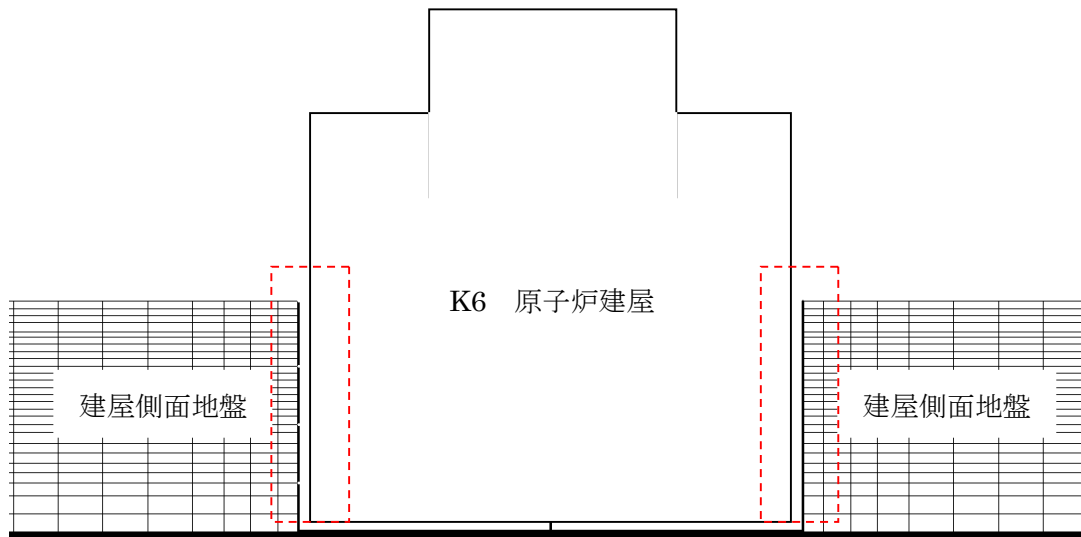
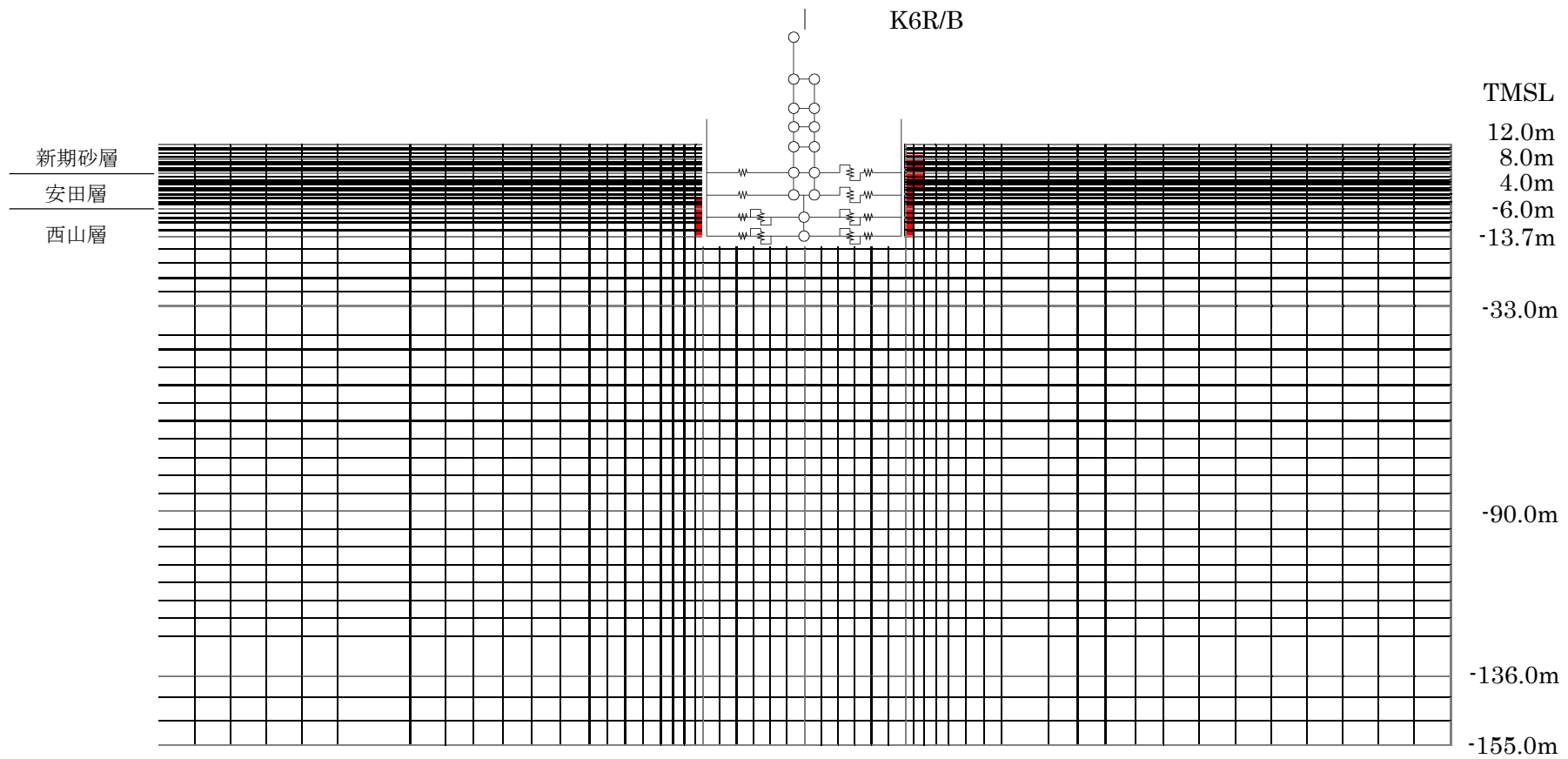


図-11 建屋と隣接地盤の剥離・接触の検討箇所



赤色着色部：西山モルタル

図-12 K6R/B モデル図 (NS 方向)

建屋と側面地盤の接続部は、剛ビームおよび接触剥離と摩擦抵抗を表現するジョイント要素でモデル化する(図-13)。ジョイント要素は軸方向ばねとせん断ばねで構成している。また、建屋の質点から側面地盤に向けて剛ビームを伸ばし、平面上で建屋基礎形状が保持されるようにモデル化する。

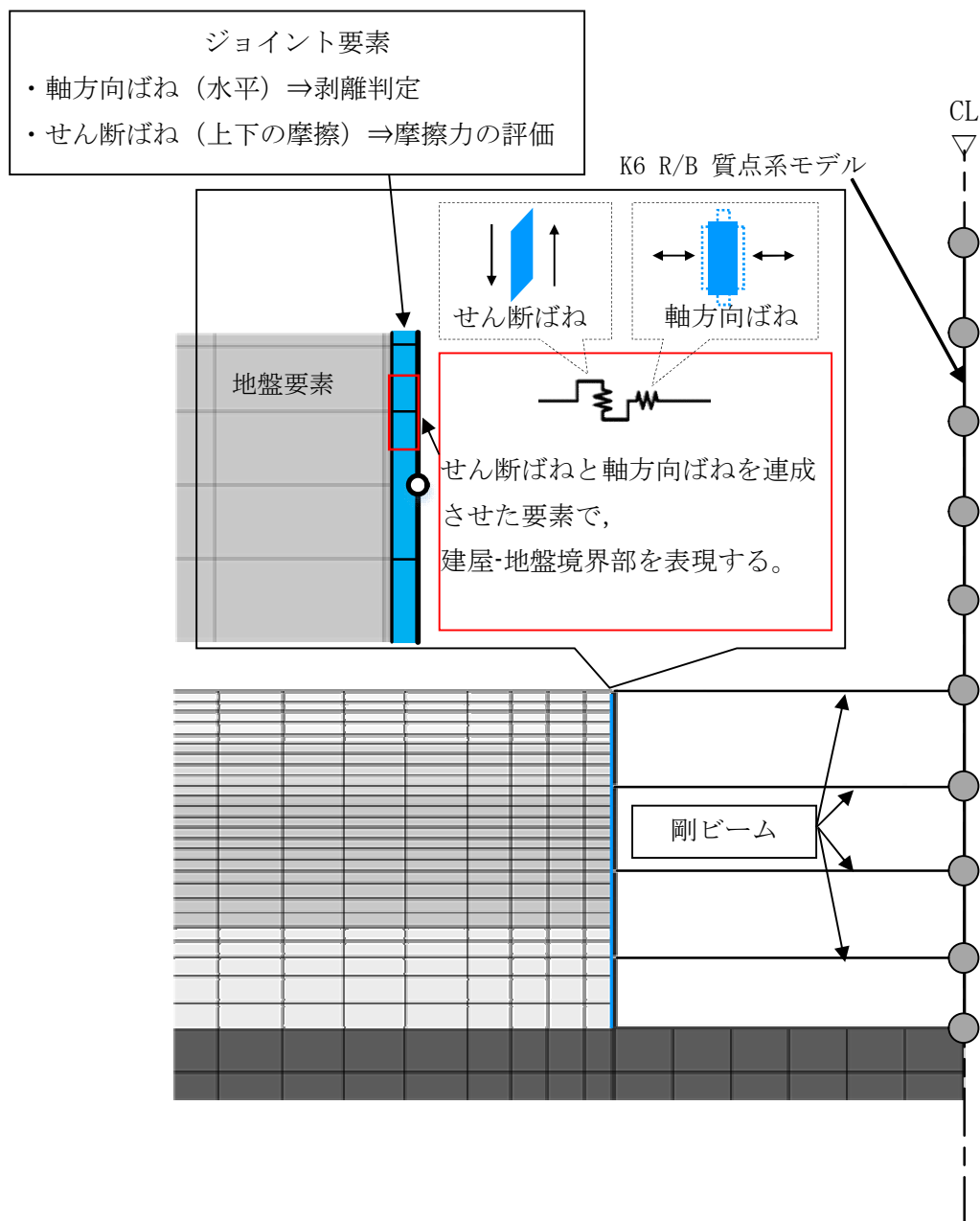


図-13 建屋と側面地盤要素の接続

ジョイント要素には、軸方向（水平方向）とせん断方向（鉛直方向）でそれぞれ接触・剥離と側面摩擦試験から得られる摩擦耐力をモデル化する。なお、比較的強固な西山モルタルで埋戻した部分の摩擦のみを考慮し、表層の摩擦は無視することとした。概念図を図-14に示す。

軸方向のモデル化は、地震動によって建屋と地盤が離れる場合には剥離が発生するものとした。またせん断方向のモデル化は、軸方向ばねと連成させて、軸方向ばねで剥離が発生する場合にはせん断ばねのせん断耐力（摩擦力）が0となるようにしている。また、軸方向ばねの変動軸力（土圧変動）に応じてせん断ばねのせん断耐力（最大静止摩擦力 τ_{max} ）を変動させ、動摩擦力については一定値とする。図-15に、ジョイント要素のせん断特性の概念図を示す。

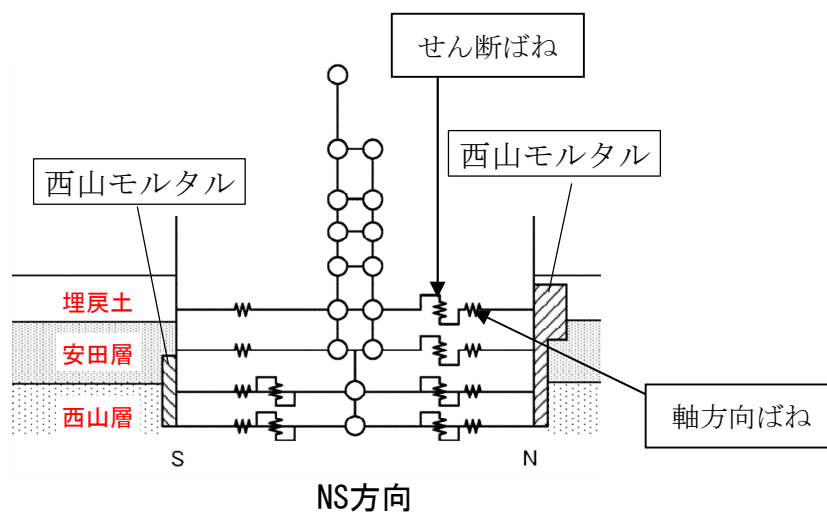


図-14 ジョイント要素の軸方向とせん断方向の特性（概念図）

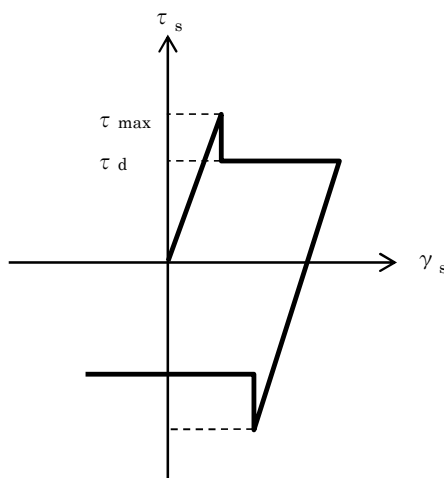
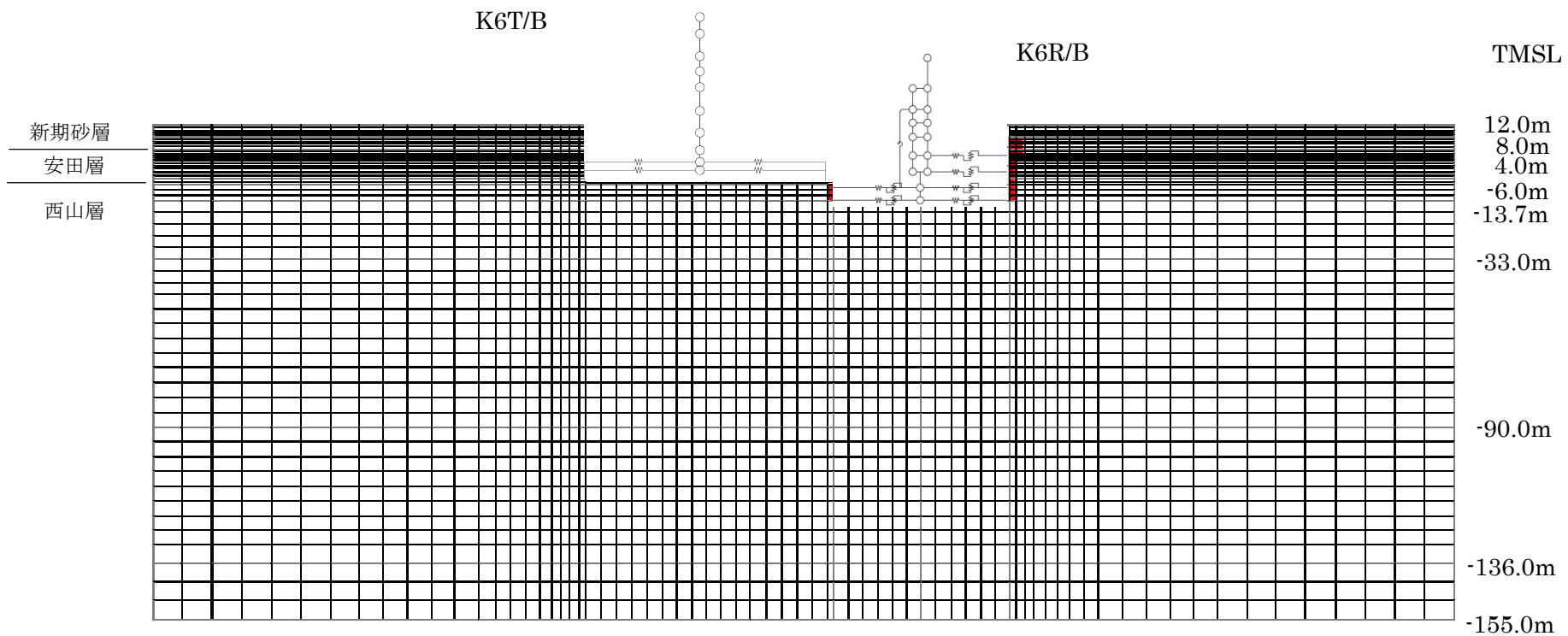


図-15 K6R/B 2次元FEMモデルジョイント要素（せん断ばね）の摩擦特性（概念図）

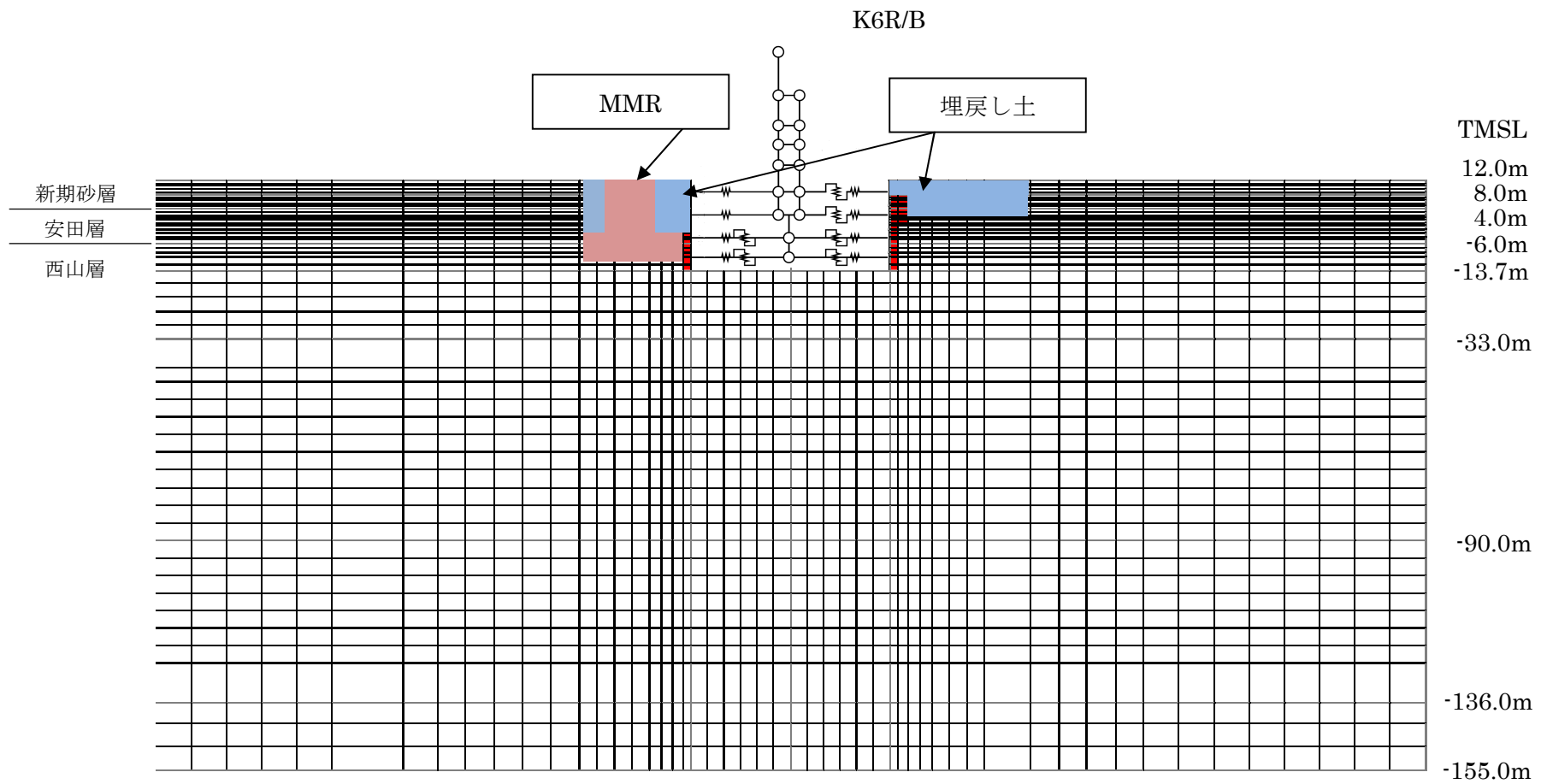
2. 3. 3 【論点③】についての確認方針

【論点③】隣接建屋や建屋周辺の詳細な地盤状況が側面回転ばねの適用性に影響しないか
2次元 FEM による検討は，【論点②】に対する検討で用いる地盤を成層としたモデルに加えて，隣接建屋（タービン建屋）や建屋周辺の詳細な地盤状況の影響を考慮したモデルによる解析についても実施し，その影響を確認する。図-5, 6 で示した周辺地盤状況のうち K6R/B 近傍の地盤を詳細にモデル化した場合のモデル図を図-16 及び図-17 に示す。



赤色着色部：西山モルタル

図-16 K6R/B モデル図 (EW 方向)



赤色着色部：西山モルタル

図-17 K6R/B モデル図 (NS 方向)

2. 3. 4 【論点④】についての確認方針

【論点④】詳細評価モデルの検討結果を踏まえて埋込み SR モデルへ回転ばねを適用することが妥当か

主に【論点②】を踏まえた検討で使用する 2 次元 FEM モデルによる詳細な地震応答解析結果と、簡易に側面ばねをモデル化した埋込み SR モデルの応答結果と比較検討することにより、今回工認における埋込み SR モデルへの回転ばねの適用性を確認する。

3. まとめ

側面回転ばねの妥当性検討のため、論点の整理を行い、論点に対する検討方針について説明した。今後は、抽出した論点に対する検討結果を総合的に評価し、今回工認で採用する予定の地震応答解析モデルへの側面回転ばねの適用性について確認する。また、各論点についての検討の結果、埋込み SR モデルの側面回転ばねに影響があると判断される場合はこれを反映するものとする。

以 上