

地盤-構造物系の応答解析検証事例に関する文献調査と評価に関するアンケート・集計結果

基礎構造物(1)

事例	直接基礎の地震時挙動①（単調載荷）	直接基礎の地震時挙動②（繰り返し載荷）	直接基礎の地震時挙動③（振動実験）
検討内容	再現解析	再現解析	再現解析
①数値解析手法	・2次元静的解析（梁-ばねモデル）	・2次元静的解析（梁-ばねモデル）	・2次元動的解析（梁-ばねモデル）
②対象物	<ul style="list-style-type: none"> <li>・上部構造-橋脚-直接基礎-地盤/大型水平載荷実験（単調偏心傾斜外力載荷実験）</li> <li>・地盤 気乾状態の豊浦標準砂、層厚 2.0m、相対密度 60%、80%</li> <li>・直接基礎 平面寸法 0.5m×0.5m（鋼製）</li> <li>・上部構造物 鋼製インゴッド</li> <li>・橋脚 H型鋼</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・上部構造-橋脚-直接基礎-地盤/大型水平載荷実験（繰り返し偏心傾斜外力載荷実験）</li> <li>・地盤 気乾状態の豊浦標準砂、層厚 2.0m、相対密度 60%、80%</li> <li>・直接基礎 平面寸法 0.5m×0.5m（鋼製）</li> <li>・上部構造物 鋼製インゴッド</li> <li>・橋脚 H型鋼</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・上部構造-橋脚-直接基礎-地盤/大型振動台実験</li> <li>・地盤 気乾状態の豊浦標準砂、層厚 2.0m、相対密度 80%（Vs=230m/s）</li> <li>・直接基礎 平面寸法 0.5m×0.5m（鋼製）</li> <li>・上部構造物 鋼製インゴッド</li> <li>・橋脚 H型鋼</li> </ul>
③評価する物理現象	・直接基礎と地盤間の非線形性（動的相互作用）	・直接基礎と地盤間の非線形性（動的相互作用）	・直接基礎と地盤間の非線形性（動的相互作用）
④③を評価するための数理モデル	<ul style="list-style-type: none"> <li>・直接基礎構造-地盤間 マクロエレメント（非線形ばね、浮き上がり考慮）</li> <li>・橋脚 梁要素</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・直接基礎構造-地盤間 マクロエレメント（非線形ばね、浮き上がり考慮）</li> <li>・橋脚 梁要素</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・直接基礎構造-地盤間 マクロエレメント（非線形ばね、浮き上がり考慮）</li> <li>・橋脚 梁要素</li> </ul>
⑤評価する応答値	<ul style="list-style-type: none"> <li>・上部構造（載荷点）位置 水平荷重-水平変位関係</li> <li>・直接基礎底面位置 曲げモーメント-中心位置回転角関係、曲げモーメント-中心位置鉛直変位関係、水平荷重-中心位置水平変位関係</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・上部構造（載荷点）位置 水平荷重-水平変位関係の履歴形状とその大きさおよび荷重と変位の最大値</li> <li>・直接基礎底面位置 曲げモーメント-中心位置回転角関係の履歴形状とその大きさおよび荷重と変位の最大値、曲げモーメント-中心位置鉛直変位関係の履歴形状とその大きさおよび荷重と変位の最大値、水平荷重-中心位置水平変位関係の履歴形状とその大きさおよび荷重と変位の最大値</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・上部構造（載荷点）位置 水平方向加速度・変位の応答波形</li> <li>・直接基礎底面位置 基礎底面位置鉛直荷重と水平荷重および転倒モーメントの応答波形、基礎底面の鉛直変位、水平変位、回転角の応答波形</li> </ul>
⑥設計的観点からの必要精度(*)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・上部構造位置 荷重-変位関係の軌跡（載荷経路）が近似していること。</li> <li>・直接基礎-地盤 浮上り現象を再現できること。荷重-変位関係の軌跡（載荷経路）が近似していること。荷重や変位および残留沈下量や残留水平変位が安全側の値が得られること。載荷高さや地盤の相対密度の違いに起因する最大モーメントの違いを再現できること。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・上部構造位置 履歴形状とその大きさおよび荷重と変位の最大値が近似していること。</li> <li>・直接基礎-地盤 浮上り現象を再現できること。荷重-変位関係の履歴形状とその大きさおよび荷重と変位の最大値が近似していること。載荷高さや地盤の相対密度の違いおよび繰り返し回数の違いに起因する履歴形状や残留変位量の違いを再現できること。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・上部構造位置 応答波形の形状（概周期と最大振幅）が近似していること。</li> <li>・直接基礎-地盤 応答波形の形状（概周期と最大振幅）が近似していること。残留変位量が同じオーダーで得られること。鉛直変位-回転角関係、曲げモーメント-回転角関係の履歴形状が近似していること。偏心量（M/V）の時刻歴波形の形状（概周期と最大振幅）が近似していること。</li> </ul>
⑦④に関するチェックポイント(**)	・マクロエレメントモデルの塑性ポテンシャル面の形状を規定するパラメータの値の違いによる応答値の変化	・マクロエレメントモデルの塑性ポテンシャル面の形状を規定するパラメータの値の違いによる応答値の変化	・マクロエレメントモデルの塑性ポテンシャル面の形状を規定するパラメータの値の違いによる応答値の変化（ここでは繰り返し偏心傾斜外力載荷実験での結果を考慮して設定） ・回転の減衰係数を変化させて、実験結果の再現性が良い減衰係数を採用
注記	(**) ⑦は検討者が必要と判断して追加した項目	(**) ⑦は検討者が必要と判断して追加した項目	(**) ⑦は検討者が必要と判断して追加した項目

基礎構造物(2)

事例	杭基礎の地震時応答評価①(遠心実験)	杭基礎の地震時応答評価②(大型振動台実験)	杭基礎の地震時応答評価③(遠心実験)
検討内容	再現解析	再現解析	再現解析、パラメータ・スタディー
①数値解析手法	・2次元動的解析(梁-ばねモデル)	・2次元動的解析(梁-ばねモデル)	・2次元動的解析(梁-ばねモデル)
②対象物	<ul style="list-style-type: none"> <li>・フーチング-杭-地盤/遠心力場 50G</li> <li>・地盤 粘土層+砂層(相対密度 90%、80%)、層厚 20m 相当</li> <li>・アルミニウム杭 実寸 600mm の鋼管杭、長さ 20.1m 相当</li> <li>3本×3本の群杭</li> <li>・フーチング アルニウム</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・上部構造物-鋼管杭-地盤/大型振動台実験</li> <li>・地盤 乾燥砂、層厚 3.0m、相対密度 60~70%、Vs=200m/s 相当</li> <li>・鋼管杭 矩形断面形状(杭外径 D=125mm、杭長 L=3,250mm)</li> <li>3×3本の9本群杭、杭頭はフーチングと剛結合</li> <li>・上部構造物 上載荷重と柱およびフーチングは鋼材で製作</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・フーチング-杭-地盤/遠心力場 70G</li> <li>・地盤 乾燥砂(相対密度 60%、85%、90%)、層厚 33.95m 相当</li> <li>・アルミニウム杭 実寸 1,200mm の RC 杭、長さ 27.3m 相当</li> <li>・3本×3本の群杭</li> <li>・フーチング アルニウム</li> <li>・橋脚 鋼材</li> <li>・上部構造 鋼材</li> </ul>
③評価する物理現象	・地盤とフーチングおよび杭の地震応答	・地盤とフーチングおよび杭の地震応答	・地盤とフーチングおよび杭の地震応答
④③を評価するための数理モデル	<ul style="list-style-type: none"> <li>・地盤 非線形せん断ばねモデル、双曲線モデル</li> <li>・杭 線形梁要素</li> <li>・杭-地盤間 非線形ばね(水平方向、鉛直方向)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・地盤 非線形せん断ばねモデル、双曲線モデル</li> <li>・杭 線形梁要素</li> <li>・杭-地盤間 非線形ばね(水平方向、鉛直方向)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・地盤 非線形せん断ばね(質点-ばね系モデル)、双曲線モデル</li> <li>・杭 線形梁要素</li> <li>・杭-地盤間 非線形ばね(水平方向、鉛直方向)</li> </ul>
⑤評価する応答値	<ul style="list-style-type: none"> <li>・地盤 加速度と変位の時刻歴波形、せん断応力度-せん断ひずみの履歴、加速度・せん断応力・せん断ひずみ・相対変位分布</li> <li>・フーチング 中心位置の加速度と変位の時刻歴波形</li> <li>・杭 軸力分布、曲げモーメント分布</li> <li>・杭-地盤間 地盤反力度分布</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・地盤 加速度と変位の時刻歴波形、せん断応力度-せん断ひずみの履歴、加速度・せん断応力・せん断ひずみ・相対変位分布</li> <li>・フーチング 中心位置の加速度と変位の時刻歴波形</li> <li>・杭 軸力分布、曲げモーメント分布</li> <li>・杭-地盤間 地盤反力度分布</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・地盤 加速度と変位の時刻歴波形、せん断応力度-せん断ひずみの履歴、加速度・せん断応力・せん断ひずみ・相対変位分布</li> <li>・フーチング 中心位置の加速度と変位の時刻歴波形</li> <li>・杭 軸力分布、曲げモーメント分布</li> <li>・杭-地盤間 地盤反力度分布</li> </ul>
⑥設計的観点からの必要精度(*)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・応答時刻歴波形：概周期と振幅の値が近似していること。</li> <li>・深度方向の分布：分布形状とその値が近似していること。</li> <li>・地盤反力度：分布と値が近似していること。</li> <li>・せん断応力度-せん断ひずみ関係：履歴形状が近似していること。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・応答時刻歴波形：概周期と振幅の値が近似していること。</li> <li>・深度方向の分布：分布形状とその値が近似していること。</li> <li>・地盤反力度：分布と値が近似していること。</li> <li>・せん断応力度-せん断ひずみ関係：履歴形状が近似していること。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・応答時刻歴波形：概周期と振幅の値が近似していること。</li> <li>・深度方向の分布：分布形状とその値が近似していること。</li> <li>・地盤反力度：分布と値が近似していること。</li> <li>・せん断応力度-せん断ひずみ関係：履歴形状が近似していること。</li> </ul>
⑦④に関するチェックポイント(**)	・周辺地盤の最大せん断応力度の設定を土質試験から設定した場合と計測加速度から設定した場合で実験結果への近似度合いを検討。	・周辺地盤の最大せん断応力度の設定を土質試験から設定した場合と計測加速度から設定した場合で実験結果への近似度合いを検討。	・周辺地盤の最大せん断応力度の設定を土質試験から設定した場合と計測加速度から設定した場合で実験結果への近似度合いを検討。
注記	(**) ⑦は検討者が必要と判断して追加した項目	(**) ⑦は検討者が必要と判断して追加した項目	(**) ⑦は検討者が必要と判断して追加した項目

基礎構造物(3)

事例	RC 造杭基礎構造物の振動実験	RC 造杭基礎構造物の遠心模型振動実験	群杭基礎の大型振動台実験
検討内容	再現解析	再現解析	再現解析
①数値解析手法	・2次元動的 FEM (非線形)	・2次元動的 FEM (非線形・有効応力解析)	・2次元動的解析 (梁-ばねモデル) ・実験の地盤応答変位を水平方向相互作用ばねに入力
②対象物	・上部構造物-RC 杭-地盤/大型振動台実験 ・地盤 乾燥砂、層厚 4.5m、相対密度 93% ・RC 杭 $\phi$ 0.15m、長さ 4.5m、杭頭はフーチングと剛結合 ・上部構造物 鋼製インゴッド+フーチング	・RC 杭基礎構造物 (上部工弾性) -地盤 (縮尺 1/25) ・地盤:モデル地盤、層厚 13.5m (液状化層 11.5m) 相当 ・構造物:鋼製、高さ 9m、桁質量 1,000ton 相当 ・基礎:RC 杭 $\phi$ 1.2m、3×3 (ctc 2.5 $\phi$ ) L=11.5m 相当	・上部構造物-鋼管杭-地盤/大型振動台実験 ・地盤 乾燥砂、層厚 3.0m、相対密度 60~70% Vs=200m/s ・鋼管杭 矩形断面形状杭外径 D=125mm、杭長 L=3,250mm) 3×3 本の 9 本群杭、杭頭はフーチングと剛結合 ・上部構造物 上載荷重と柱およびフーチングは鋼材で製作
③評価する物理現象	・地盤と杭・構造物の動的相互作用 ・地盤・上部構造物の応答、RC 杭の応答 (曲げ)	・地盤-構造物の動的相互作用 ・地盤の液状化 ・基礎の応答 (コンクリートのひび割れ・圧壊、鉄筋降伏)	・杭-地盤間の水平方向ばねの非線形挙動、群杭効果 ・上部構造と杭の応答
④③を評価するための数理モデル	・地盤 FEM 平面ひずみ要素、修正 Ramberg-Osgood モデル ・RC 杭 梁要素 (ファイバーモデル)、コンクリート非線形モデル、鉄筋 (バイリニアモデル) ・地盤と杭の接触面 ばね要素、すべりを表す bi-linear モデル	・地盤:FEM 平面ひずみ要素、弾塑性モデル、2 相系 (圧密方程式) ・RC 杭:梁要素 (ファイバーモデル)、コンクリート非線形モデル、鉄筋 (バイリニアモデル)	・杭-地盤間 非線形ばね (水平方向)、非線形弾性ばね (鉛直方向) ・杭 線形梁要素
⑤評価する応答値	・地盤・構造物:加速度、変位の時刻歴波形、加速度、変位の最大値分布、せん断応力-せん断ひずみ履歴曲線 ・RC 杭 曲率の時刻歴および深度分布 (同時刻値、最大値)	・地盤:加速度、過剰間隙水圧 ・構造物:加速度、変位 (動的、残留) ・RC 杭:部材変形 (曲率)、要素応答 (ひずみ・ひび割れ・圧壊)	・上部構造 加速度と地表面に対する相対変位の時刻歴波形 ・フーチング 回転加速度と回転角の時刻歴波形 ・杭 変位分布、曲げモーメントの時刻歴波形、曲げモーメント分布 ・地盤反力度 (水平方向の杭-地盤間ばね) 地盤反力度の深度方向分布、地盤反力度-水平変位の履歴
⑥設計的観点からの必要精度(*)	・レベル 2 地震動に対する変形性能評価として: 地盤および構造物・基礎の最大変位 実験値 $\pm 25\%$ 以内 ただし、地盤および構造物・基礎の時刻歴波形の位相特性、最大値発生状況などが実験を大略模擬していること。	・地盤:液状化範囲がほぼ一致すること 加速度応答から短周期振動が消失する傾向が見られること ・RC 杭:耐力評価の場合 20% 塑性率 ( $M-\phi$ 関係) 評価はばらつきが大きい (照査基準 $\mu < 4$ の場合 2~2.5 程度を閾値に設定)	・応答時刻歴波形:概周期と振幅の値が近似していること。 ・変位分布、曲げモーメント分布:分布形状とその値が近似していること。 ・地盤反力度:分布形状と値が近似していること。 ・地盤反力度:群杭効果を確認できること。
⑦④に関するチェックポイント(**)	・地盤 (1)2次元 FEM 解析の場合、要素の奥行き (杭径との比率) (2)2次元 FEM 解析の場合、杭のすりぬけの考慮の有無 (3)せん断剛性、動的変形特性の拘束圧依存性の考慮の有無 ・RC 杭 (1)杭周面の鉛直方向のすべりのモデル化 (2)曲げに対する構成モデルの軸力変動考慮の有無	・地盤-構造物の動的相互作用:群杭効果、荷重分担幅 ・地盤:液状化特性 (要素試験フィッティング) 液状化範囲と液状化に至るタイミング 加速度応答の特徴 (短周期振動の消失、サイクリックモビリティ) ・RC 杭: $M-\phi$ 関係のモデル化 (コンクリート強度、鉄筋強度、円形断面 $\rightarrow$ 矩形断面) 非線形化のタイミング (鉄筋降伏、コンクリートクラック)	杭-地盤間の非線形ばね (水平方向) の初期勾配を設定するためのパラメータを変化させて、実験結果の再現性が良いパラメータを採用
注記	(*) 必要精度は、全応力非線形地震応答解析結果に関する検討者の感覚による。実験値の $\pm 25\%$ 以内とは、安全係数として 1.25 を考えることを意味する。 (**) ⑦は検討者が必要と判断して追加した項目	(*) 検討者の感覚的な評価 (**) ⑦は検討者が必要と判断して追加した項目	(**) ⑦は検討者が必要と判断して追加した項目

基礎構造物(4)

事例	被災橋梁の被災メカニズムの推定①	被災橋梁の被災メカニズムの推定②	ケーソン基礎構造の正負交番載荷実験
検討内容	再現解析	再現解析	再現解析
①数値解析手法	・2次元動的解析(梁-ばねモデル)	・2次元動的FEM(非線形)	・2次元静的FEM(非線形)
②対象物	<ul style="list-style-type: none"> <li>上部構造-橋脚-ケーソン基礎-地盤系</li> <li>地震で橋脚が傾斜(橋脚基部の損傷は無し)した橋脚-ケーソン基礎と同じ橋の変状が生じていない橋脚-ケーソン基礎</li> <li>活荷重合成単純鋼鉄桁(7連)、張出し式橋脚(円柱)、オープンケーソン基礎φ6,000mm:橋脚が橋軸直角方向に1°4'傾斜、橋軸方向に26'傾斜</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>橋台-杭基礎-地盤系</li> <li>地震で被災した橋台杭基礎と被災しなかった橋台杭基礎</li> <li>3径間単純鋼合成I桁、既製コンクリート杭(RC)、斜杭、21本(7本×3列)、杭径400mm、杭長10m:杭頭部せん断破壊、躯体の河川側への水平移動</li> <li>5径間単純鋼合成I桁、鋼管杭、斜杭、27本(9本×3列)、杭径600mm、杭長18.5m:損傷なし</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>RC橋脚-ケーソン基礎-地盤/大型模型を用いた繰返し載荷実験</li> <li>地盤 砂層:層厚1.3m(相対密度60%、Vs=92~192m/s) セメント改良地盤:層厚1.3m(Vs=1,263~1,680m/s) 支持層:砕石、層厚0.4m</li> <li>RCケーソン基礎 高さ2.6m、幅1.0m×1.8mの小判型中空断面</li> <li>RC橋脚 高さ1.2m、幅0.43m×1.4mの小判型断面</li> </ul>
③評価する物理現象	・被災メカニズム	・被災メカニズム	・ケーソン基礎の耐力と変形能および損傷状態
④③を評価するための数理モデル	<ul style="list-style-type: none"> <li>地盤 非線形せん断ばねモデル、双曲線モデル</li> <li>橋脚とケーソン基礎 線形梁要素</li> <li>ケーソン基礎-地盤間 非線形ばね(水平方向、鉛直方向)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>地盤 FEM平面ひずみ要素、双曲線モデル、液状化層は多重せん断ばねモデル+間隙水要素</li> <li>橋台 剛平面ひずみ要素</li> <li>杭基礎 非線形梁要素(M-φモデル)</li> <li>橋台と地盤 衝突ばね(非線形弾性)</li> <li>杭と地盤間 ジョイント要素</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>地盤 FEM平面ひずみ要素、非線形モデル</li> <li>RCケーソン基礎 RC要素(非線形)と無筋コンクリート要素(非線形)</li> <li>RC橋脚 RC要素(非線形)</li> <li>地盤と基礎の接触面 接合要素(滑り・はく離を考慮)</li> </ul>
⑤評価する応答値	<ul style="list-style-type: none"> <li>ケーソン基礎 変位分布</li> <li>基礎構造-地盤間 前面水平抵抗、底面鉛直抵抗、底面水平抵抗、側面水平抵抗、前面鉛直抵抗、側面鉛直抵抗の地盤反力度</li> <li>残留変位(橋脚の残留傾斜)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>地盤 自由地盤の変位</li> <li>杭 曲げモーメント分布、せん断力分布</li> <li>残留変位</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ケーソン基礎 水平力-水平変位関係の履歴形状、耐力と変形能、履歴吸収エネルギー、損傷状況、軸方向鉄筋のひずみ分布</li> </ul>
⑥設計的観点からの必要精度(*)	・残留変位量の再現性	<ul style="list-style-type: none"> <li>鋼管杭:応答曲げモーメントと全塑性曲げモーメントの関係</li> <li>RC杭は応答せん断力とせん断耐力の関係</li> <li>残留変位量の再現性</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>水平力-水平変位の形状と最大耐力および最大変位が近似していること。</li> <li>塑性率に対する履歴吸収エネルギーの変化の仕方が近似していること。</li> <li>損傷箇所と損傷状況が近似していること。</li> <li>軸方向鉄筋のひずみ分布が近似していること。</li> </ul>
⑦④に関するチェックポイント(**)	橋脚と基礎構造-地盤間ばねと周辺地盤で変形する固有振動モードが異なるので、“橋脚-基礎構造-地盤系”と“自由地盤”でRayleigh型粘性減衰の係数を変えた(要素別Rayleigh型粘性減衰)。	杭頭部の結合条件をピン結合と剛結合とした場合を解析対象として再現性が高い方を実際に生じた被害状況との比較に用いている。	ケーソン基礎に生じた損傷状況(解析結果)が実験結果と大きく異なる場合は、境界条件等を変化させた解析を行い、再現性の向上を検討した。
注記	(**) ⑦は検討者が必要と判断して追加した項目	(**) ⑦は検討者が必要と判断して追加した項目	(**) ⑦は検討者が必要と判断して追加した項目

地中構造物(1)

事例	実地震による RC 造地中構造物被害の要因分析	シールドトンネル模型の振動実験とその応答解析	RC 地中構造物の断層変位に対する損傷評価
検討内容	再現解析	再現解析	パラメータ・スタディー
①数値解析手法	・ 2次元動的 FEM (地盤：非線形、構造：線形) + 2次元静的フレーム (構造：非線形) の併用	・ 地盤解析：1次元動的解析/3次元 FEM 動的解析 ・ 構造物：3次元はりばねモデルによる応答変位法	・ 3次元性的 FEM (非線形)
②対象物	・ 地中構造物—地盤/駅舎の地震被害の再現 ・ 地盤：実地盤、層厚 44m (Vs=140~500m/s) ・ 構造物：2連 RC 地中構造 (中柱構造)、全幅×高さ=約 6m ×約 16m	・ シールドトンネル (線形) —地盤 (線形) ・ 地盤：模型地盤、層厚 0.28m、0.8m、洪積層と沖積層の不整形地盤 ・ 構造物：単線シールドトンネル (二次覆工の有無) 地震動が軸直角方向に作用する場合の模型振動実験と応答解析	・ RC 地中構造物—地盤 ・ 地盤：モデル地盤 (モデル化範囲 122m×100m) 層厚 (最大) 13.9m (土被り 8m) ・ 地中構造物：RC 製、3室、幅 16m×高さ 5.9m×長さ 16m (1ブロック)
③評価する物理現象	・ 地中構造物の地震時動的応答、破壊の原因	・ トンネルの振動特性、トンネル-地盤の相互作用	・ 地盤・岩盤と地中構造物の相互作用 ・ 地中構造物の応答 (コンクリートのひび割れ・圧壊、鉄筋降伏)
④③を評価するための数理モデル	・ 地盤：FEM 平面ひずみ要素、等価線形化法 ・ 構造物：線形梁要素 (地盤+構造物モデル)、非線形梁要素 (構造物単体モデル) ・ 地盤 (非線形) + 構造物 (線形) モデルの二次元 FEM 動的解析と構造物のみをモデル化したはりモデル (非線形) の静的解析を併用した解析	・ 地盤：1次元動的解析、3次元 FEM 動的解析 ・ 構造物：覆工を梁要素、継手をばね要素、地盤をばね要素でモデル化したはり—ばねモデル	・ 地盤：FEM6 面体要素、完全弾塑性 (Drucker-Prager) モデル ・ RC 構造物：FEM6 面体要素、コンクリート非線形モデル、埋込鉄筋モデル ・ 地盤・岩盤と構造物の接触面：接合要素 (接触・剥離・せん断)
⑤評価する応答値	・ 地盤：加速度 ・ 構造物：曲げモーメント、せん断力、軸力	・ 地盤：加速度波形 ・ 構造物：曲げモーメント	・ 地盤：変形モード、せん断ひずみ分布 ・ RC 構造物：部材変形 (ひずみ・変形角) 要素応答 (ひずみ・ひび割れ・圧壊)
⑥設計的観点からの必要精度(*)	・ 地表面の加速度が気象庁震度階と整合しているか。 ・ 実地震動による被害の再現確認のため、事前に計測されていない。 破壊形状が合致しているか否か、理論の耐力に対して、これを超過しているか否か、破壊順序が適切か等の評価となる。	・ 最大加速度が模型実験とほぼ合致する。 ・ 曲げモーメントは最大応答値、位相が合致する。 3次元 FEM では沖積層では概ね 20%程度の誤差であり、よく合致している。洪積層では、位相は合うものの、最大値は大きく異なる。 1次元解析では曲げモーメントの定量的な評価は困難。 (地盤を考慮した動的縮小模型実験であれば、20%以下だとかなり精度は良い方)	・ 断層変位に対する限界状態：要求性能との関係からの整理が必要 部材限界 耐力⇒20%、変形角 (破壊の進展) ⇒挙動の急変 空間保持限界 頂版の落下 (垂直材の破壊状態より評価) *解析限界 (不安定化) ⇒破壊の集中により 限界値が評価できない場合がある。 ・ 鉄筋破断：要素長により評価 (ひずみ) が変わる
⑦④に関するチェックポイント(**)	・ 解析モデル：2次元 FEM とフレームモデルの併用方法 ・ 地盤：(1)周辺地盤の評価 (2)入力地震動の選定 (神戸大学) ・ 構造物：2次元 FEM における線形梁要素の剛性の評価 (弾性時の 5割)	・ 地盤：地盤物性の評価、不整形箇所への応答の評価 (文献では、模型実験において地盤を線形として弾性材料を用いている。実構造の場合には地盤の非線形特性の評価が必要となる。) ・ 構造物：継手のモデル化、地盤ばねのモデル化	・ 地盤：要素試験値からパラメータを設定 ・ RC 構造物：コンクリート部材のポストピーク挙動 (解析限界) ・ 接合要素：付着特性、剛性、摩擦強度⇒座布団効果、進行性破壊
注記	実地震被害のあった地中構造物の再現解析を行ったもの。 (*) 検討者の感覚的な評価 (**)⑦は検討者が必要と判断して追加した項目	シールドトンネルの模型振動実験 (直角方向加振を対象) をもとに、再現解析を行ったもの。 (*) 検討者の感覚的な評価 (**)⑦は検討者が必要と判断して追加した項目	(*) 限界状態や照査指標の設定により、要求精度は異なる (**) ⑦は検討者が必要と判断して追加した項目

護岸構造物(1)

事例	岸壁地震時挙動の模型実験および解析		
検討内容	再現解析		
①数値解析手法	・2次元動的FEM(非線形)		
②対象物	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ケーソン式岸壁—地盤/大型振動台実験</li> <li>・地盤 飽和砂、層厚1.4m、相対密度70%~90%</li> <li>・固化地盤 セメント混合砂、層厚0.1m</li> <li>・ケーソン アルミニウム製函+フーチング、内部に砂・錘で重量・重心調整</li> </ul>		
③評価する物理現象	<ul style="list-style-type: none"> <li>・地盤と構造物の動的相互作用(海水による動水圧を含む)</li> <li>・地盤・構造物の応答</li> </ul>		
④③を評価するための数理モデル	<ul style="list-style-type: none"> <li>・地盤 FEM平面要素、マルチスプリングモデル</li> <li>・ケーソン FEM平面要素、線形弾性</li> <li>・地盤と岸壁の接触面 ジョイント要素、すべり・剥離を表すクーロン摩擦モデル</li> <li>・海水 流体要素</li> </ul>		
⑤評価する応答値	<ul style="list-style-type: none"> <li>・地盤・構造物 加速度、変位、背面土圧の時刻歴波形、加速度、変位、背面土圧の最大値、残留変形、せん断ひずみの分布(解析終了時)</li> </ul>		
⑥設計的観点からの必要精度(*)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・レベル2地震動に対する変形性能評価として： 構造物の残留変位 実験値±25%以内(この程度であればよしとした)</li> <li>ただし、地盤・構造物の残留変形、構造物の時刻歴波形の位相特性、最大値の傾向などが実験を大略模擬していること。</li> </ul>		
⑦④に関するチェックポイント(**)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・地盤 (1)2次元FEM解析の場合、メッシュ分割 (2)初期地盤モデル(せん断波速度、固有周期) (3)せん断剛性、動的変形特性の拘束圧依存性の考慮の有無</li> <li>・構造物 (1)地盤との接触面の鉛直・水平方向のすべり・剥離のモデル化、レーリー減衰の設定 (2)海水による動水圧</li> </ul>		
注記	<ul style="list-style-type: none"> <li>(*) 検討者の感覚的な評価</li> <li>(**)⑦は検討者が必要と判断して追加した項目</li> </ul>		