

資料5 土に関する構造物の耐震設計法

1. 基礎構造物の耐震設計法

-杭基礎-

検討項目	現状の設計法	問題点	研究の現状と今後の設計法への反映
耐震設計の目標 基礎の機能： 構造物を安全に支持するとともに、有害な変位を生じない。	・ 損傷の調査，復旧が困難である基礎，地盤には過大な損傷を生じさせない。 - a)地盤の大きな残留変位（沈下，水平変位，傾斜） - b)基礎部材の損傷 ・ 構造物以上の耐力とする（キャパシティデザイン）。 ・ 塑性率の制限値以下とする（基礎の損傷の工学的指標として，変位塑性率を使用）。	・ レベル2地震において，基礎にはどの程度までの損傷が許容されるのか。 - a)基礎が支持する構造物の種類，重要度等により異なる。 - 復旧が不要，容易増し杭などの復旧 - b)構造物の倒壊は防ぐが，撤去，再構築が必要。	・ 構造物が有すべき，耐震性能の明確化。
		・ 基礎の損傷による構造物への影響が不明である。	・ 橋脚基礎については，動的解析事例有り。 - ただし，耐力低下後のモデル化が必要。
		・ 基礎の損傷の程度を評価する工学的指標が課題。	・ 基礎の損傷を表す工学的な指標の明確化し，基礎の耐震性能を表現。
		・ 構造物に対する基礎の耐力余裕度をどの程度に設定すべきか。 - 構造型式に応じた損傷程度の設定 - 損傷程度と損傷部位の設定	・ 橋脚基礎については，動的解析による検討事例有り。 ・ 構造物のどこで損傷させるべきか。
	・ 基礎の地震時の変位により構造物の安全性が損なわれない。 ・ 落橋，走行安全性，構造物の損傷最大応答変位が，構造物から決まる変位の制限値以下とする。	・ 構造物から決まる変位の制限値が必ずしも定量的に評価されていない。	

塑性領域での解析 -1 解析モデル	・実杭の静的載荷試験結果の分析等に基づき、杭周辺の鉛直，水平地盤抵抗をばねとしてモデル化 - a)地盤抵抗，杭体の非線形性を考慮（バイリニア，トリリニア） - b)静的解析：荷重増分法 - c)動的解析	・地盤の強度・変形特性の調査法 ・地震時の地盤定数の評価法（ひずみレベル，繰返し載荷，ひずみ速度等の影響） ・地盤抵抗モデルの土質力学的意味づけ ・各抵抗要素の強度低下領域のモデル化	・新しい原位置試験法の開発 ・室内試験により研究中 ・地盤の変形特性や土圧論など地盤力学的見地からの地盤抵抗の合理的な設定法．
-2 応答値の算定 地震の影響	・支持する構造物からの荷重（慣性力，構造物の耐力） ・地震時の地盤震動変位（構造物からの荷重と地盤震動変位の影響の組合せ法） ・液状化による地盤定数の低下	・杭体の非線形領域における，構造物からの荷重と地盤変位の影響との組合せ方法．	・大型振動台実験，動的解析などにより研究中 ・実構造物基礎の地震時挙動の計測が必要
地震時挙動の評価法（応答値の算定）	1)動的解析：時刻歴解析法（弾塑性解析法，等価線形化法），非線形スペクトル法 2)静的解析法による骨格曲線を基に，等価エネルギー法により推定 3)応答変位法	・動的解析に用いる諸定数の設定法（各抵抗要素の復元力特性，周波数依存性） ・設計に用いる静的解析手法の開発	
安定の照査 -1 限界状態の設定	1)基礎に著しい損傷を生じさせない（耐力，応答塑性率照査） ・基礎の変形により構造物の安全性が損なわれない		
-2 降伏点の設定 ・バイリニアにおける変曲点 ・設計における限界状態	1)基礎の荷重～変位骨格曲線において変位が急増する点（杭体の降伏，押し込み支持力，引き抜き支持力の上限値，水平地盤抵抗） 2)基礎の残留変位が急増する点（基礎本体部材の損傷，地盤抵抗の塑性化）		

-3 残留変位の算定	・基礎の残留変位は算定していない．残留変位が過大とならないよう，基礎の最大応答変位を降伏点以下とする，あるいは応答塑性率をその制限値以下とする．		・残留変位の推定法の開発（各種抵抗要素の復元力特性の精度向上） ・基礎の残留変位の制限値（残留変位が構造物の機能へ及ぼす影響把握）
-4 終局点の設定	・杭基礎全体系の耐力が低下する点 ・塑性率の制限値として設定（基礎本体に過大な損傷が生じないように定める．復旧の支障とならない程度）	・基礎の耐力低下を再現できる解析手法の開発 ・設計上許容できる範囲の明確化（基礎の損傷が構造物の機能，復旧へ及ぼす影響の把握）	
部材の照査 -1 部材靱性の評価法	・一般の地上部材に準じる ・靱性を確保できるよう構造細目を規定	・地盤による拘束効果の評価 ・靱性が必要な部位の明確化	

-ケーソン基礎-

検討項目	現状の設計法	問題点	研究の現状と今後の設計法への反映
耐震設計の目標	・杭基礎に同じ	・杭基礎に同じ	・杭基礎に同じ
塑性領域での解析 -1 解析モデル	・ケーソン基礎モデルの静的載荷試験結果の分析等に基づき，基礎周辺の地盤抵抗をばねとしてモデル化 ・地盤抵抗，基礎本体の非線形性，基礎の浮上りを考慮（バイリニア，トリリニア） ・静的解析：荷重増分法 ・動的解析	・杭基礎と同じ ・深い剛体基礎底面における支持力（鉛直地盤反力度の上限値）の評価法	・地盤抵抗の合理的な設定法
-2 応答値の算定 地震の影響	・支持する構造物からの荷重（慣性力，構造物の耐力） ・地震時の地盤震動変位	・杭基礎と同じ	・実構造物基礎の地震時挙動の計測が必要 ・動的解析結果との比較

地震時挙動の評価法（応答値の算定）	1)動的解析：時刻歴解析法（弾塑性解析法，等価線形化法），非線形スペクトル法 ・有効入力動の算定法	・杭基礎と同じ ・基礎周辺での減衰の影響の評価	
	2)静的解析法による骨格曲線を基に，等価エネルギー法により推定 3)応答変位法	・杭基礎と同じ	
安定の照査 -1 限界状態の設定	1)基礎に著しい損傷を生じさせない（耐力，応答塑性率照査） ・基礎の変形により構造物の安全性が損なわれない		
-2 降伏点の設定 ・バイリニアにおける変曲点 ・設計における限界状態	1)基礎の荷重～変位骨格曲線において変位が急増する点（ケーソン本体の降伏，基礎底面地盤の過度の塑性化，基礎の浮上り，基礎周面の水平地盤抵抗の過度の塑性化） 2)基礎の残留変位が急増する点（ケーソン本体の損傷，地盤抵抗の塑性化）		
-3 残留変位の算定	・基礎の残留変位は算定していない．残留変位が過大とならないよう，基礎の最大応答変位を降伏点以下とする，あるいは応答塑性率をその制限値以下とする．		・残留変位の推定法の開発（各種抵抗要素の復元力特性の精度向上） ・基礎の残留変位の制限値（残留変位が構造物の機能へ及ぼす影響把握）
-4 終局点の設定	・基礎全体系の耐力が低下する点 ・塑性率の制限値として設定（部材損傷を抑える） ・変位の制限値（構造物の安全性が損なわれない）	・杭基礎と同じ ・構造物から決まる変位の制限値が必ずしも定量的に評価されていない	
部材の照査 -1 部材靱性の評価法	・一般の地上部材に準じる ・靱性を確保できるよう構造細目を規定		

-直接基礎-

検討項目	現状の設計法	問題点	研究の現状と今後の設計法への反映
耐震設計の目標	・杭基礎に同じ	・杭基礎に同じ	・杭基礎に同じ
塑性領域での解析 -1 解析モデル	・基礎周辺の地盤抵抗をばねとしてモデル化 ・地盤抵抗の非線形性，基礎の浮上りを考慮（パイリニア） ・静的解析：荷重増分法 ・動的解析	・剛体基礎底面における支持力（鉛直地盤反力度の上限値）の評価法 ・基礎底面の滑動抵抗の評価法	・地盤の強度・変形特性を精密にモデル化した解析などにより研究中 ・地盤抵抗の合理的な設定法
-2 応答値の算定 地震の影響	・支持する構造物からの荷重（慣性力，構造物の耐力）		・大型振動台実験，動的解析などにより研究中
地震時挙動の評価法（応答値の算定）	1)動的解析：時刻歴解析法（弾塑性解析法，等価線形化法），非線形スペクトル法 2)静的解析法による骨格曲線を基に，等価エネルギー法により推定	・基礎周辺での減衰の影響の評価	・実構造物基礎の地震時挙動の計測が必要 ・動的解析結果との比較
安定の照査 -1 限界状態の設定	1)基礎の変形により構造物の安全性が損なわれない		
-2 降伏点の設定 ・パイリニアにおける変曲点 ・設計における限界状態	1) 基礎の荷重～変位骨格曲線において変位が急増する点（基礎の浮上り，底面地盤の過度の塑性化） 2) 基礎の残留変位が急増する点（地盤抵抗の塑性化，基礎の滑動）		
-3 残留変位の算定	・基礎の残留変位は算定していない．	・基礎の残留変位の推定法 ・基礎の滑動による残留変位の推定法 ・残留変位の制限値	・詳細な地盤調査結果を考慮した動的解析による検討事例有り ・動的解析による検討事例有り ・残留変位の推定法の開発

-4 終局点の設定	・塑性率の制限値として設定 ・変位の制限値（構造物の安全性が損なわれない）	・構造物から決まる変位の制限値が必ずしも定量的に評価されていない． ・基礎の残留変位が過大とならないための制限値	
部材の照査 -1 部材靱性の評価法	・直接基礎のフーチングは損傷させない	・厚い版部材の耐力評価法（従来と比較して，部材厚，鉄筋量が増加．特に，せん断力に対する設計法）	・フーチング 模型の載荷試験有り

道路：道路橋示方書・同解説 平成 8 年 12 月，（社）日本道路協会

道路土工・擁壁工指針（案） 平成 10 年 3 月，（社）日本道路協会道路土工委員会

鉄道：鉄道構造物等設計標準・同解説（抗土圧構造物）平成 9 年 3 月，（財）鉄道総合技術研究所

2．開削トンネルの耐震設計法

検討項目	現状の設計法	問題点	研究の現状と今後の設計法への反映
耐震設計の目標 -1 設計想定地震	・ 2 段階の設計用地震動を想定する a) レベル 1 地震動：構造物の耐用期間中に数回程度発生する大きさの地震動 b) レベル 2 地震動：構造物の耐用期間中に発生する確率が極めて小さい強い地震動	・ レベル 1 地震動は，従来から設計に用いられた地震動を準用する方向 ・ レベル 2 地震動は，その設定方法が確立されていない． ・ 原子力では 2 段階の基準地震動 - S 1：過去の地震および活動度の高い活断層による地震 - S 2：活動度の低い活断層，地震地体構造および直下地震	
-2 耐震性能	1) レベル 1 地震動に対しては，耐震性能 1 を満足させる 2) レベル 2 地震動に対しては，耐震性能 2 または 3 を満足させる 耐震性能 1：地震後にも機能は健全で，補修をしないで使用可能 耐震性能 2：地震後に機能が短期間で回復でき，補強を必要としない 耐震性能 3：地震によって構造物全体系が崩壊しない		

-3 耐震設計の流れ	・地中構造物の耐震設計は，レベル 1，レベル 2 の各地震動に対し，以下の耐震性の検討を行う． ・地盤の耐震安定性を検討し，確保されている場合は，地盤を連続体と見なして構造物の耐震計算を行い，構造物の安全性を検討する． ・地盤の耐震安定性が確保されていない場合は，対策工を施す．または，地盤変状を考慮して構造物の安全性を検討する．		
設計用地震動 -1 水平動 ・耐震基盤面での加速度時刻歴	・レベル 1 地震動，レベル 2 地震動とも，耐震基盤面で定義された加速度時刻歴	・耐震基盤面の定義方法には，V_s による設定，インピーダンス比による設定があるが確立されていない． ・レベル 1，レベル 2 地震動の定義，および設定方法に課題	
・耐震基盤面での速度応答スペクトル	・レベル 1 地震動，レベル 2 地震動とも，耐震基盤面で定義された速度応答スペクトル	・レベル 2 地震動の速度応答スペクトルが基準類で異なる．設定根拠となった観測地震波，減衰定数，非超過確率が課題	
-2 鉛直動 ・地盤鉛直震度	・レベル 1 地震動，レベル 2 地震動とも，鉛直震度を設定．主に横断方向の耐震計算に必要な応じ用いる．	・地下トンネル横断方向に対する鉛直地震動の影響については今後の課題	・阪神・淡路大震災における地下トンネルの横断面の被災に対しては，鉛直動の影響は小さいとの研究論文がいくつか報告されている
地盤鉛直変位	・レベル 1 地震動，レベル 2 地震動とも，地盤の鉛直変位を設定．主に縦断方向の耐震計算に必要な応じて用いる．		

耐震計算法 -1 横断方向 a)耐震計算法の分類	・地盤の耐震安定性が確保された場合について，地盤を連続体と見なしたモデルによる，構造物の安全性検討のための耐震計算法を示す． ・トンネルの横断方向の耐震計算は次の方法による - a)応答変位法 - b)静的 FEM 解析法 - c)動的 FEM 解析法 ・震度法は，構造物横断方向の耐震計算法として記述されている基準類があるが，設計例を含め応答変位法が用いられる方向にある．	・静的な耐震計算法が動的解析法をどの程度模擬できるか．特に，レベル 2 地震動対応で，地盤および躯体の材料非線形性の動的相互作用に及ぼす影響が重要 ・鉄道では地盤条件が複雑な場合，重要度の高い構造物の場合には動的 FEM を，そうでない場合は応答変位法を推奨 ・簡便な耐震計算法の開発	・各解析手法の比較検討が実施されている． - a)多層地盤などの地盤条件が複雑な場合は，地盤ばね算定法の問題から FEM が有力 - b)多層地盤において比較検討し，最大耐力までの損傷レベルについてはどれもほぼ同程度の結果を与える． ・鉄道ではトンネルと地盤の剛性比による簡易応答変位法を開発
b)地震荷重の算定	・静的な耐震計算法では，構造解析に用いる地震荷重を決定するため，あらかじめ設計用地震動による自由地盤の地震応答を求める．		
・応答スペクトル法	・地震動レベルに応じた速度応答スペクトルより，自由地盤の地震時の応答変位，せん断応力，応答加速度を求める． ・地盤のひずみレベルに応じた剛性を設定する．	・多層地盤では均一層へのモデル化は危険側 ・レベル 2 地震動対応の大ひずみレベルの剛性低下率の設定法	・多層地盤では固有値解析を実施して固有モードを算定することで対処可能
・動的解析法	・各地震動レベルの加速度時刻歴を用い，自由地盤（１次元地盤）の動的解析を実施する． ・地盤材料のひずみ依存性を取り入れる．動的解析法としては，等価線形解析法，逐次非線形解析法がある．	・等価線形解析法は，ひずみレベルが 1 %以上の適用に対して課題	・逐次非線形解析法を大ひずみレベル対応の動的解析法として，振動台実験により適用性の研究が進められ，新基準に取り入れられつつある．

c)構造解析 ・応答変位法	・応答変位法では，地震荷重として地盤変位，周面応力，地盤震度に基づく躯体慣性力および動水圧を作用させる． ・地盤ばねは，地盤のひずみレベルに応じた剛性に基づいて計算し，必要に応じて受働抵抗強度等の非線形性を取り入れる．	・地盤ばねの算定法に，既往の推定式による方法，静的 FEM 解析による方法があるが，大ひずみレベルへの適用性は検証されていない． ・受働抵抗強度の与え方に定まった方法がない．	・動的解析法との比較解析により，応答変位法の精度が地盤ばねを含めて検証されつつある．
・静的 FEM 解析	・解析方法に応じて地震荷重を作用させる．地盤のひずみレベルに応じた剛性を用いる．	・地盤の非線形性の与え方	・動的解析法との比較解析により，静的 FEM 解析の有効性が示されている．
・動的 FEM 解析	・設計用地震動の加速度時刻歴を作用させる．地盤材料のひずみ依存性を取り入れる．解析法としては，等価線形解析法，逐次非線形解析法がある． ・不整形地盤中にある場合，複雑な型式の場合，隣接構造物の影響を考慮する場合，他構造物が上載されている場合に適用	・等価線形解析法は，ひずみレベルが 1 %以上の適用に対して課題	・逐次非線形解析法を大ひずみレベル対応の動的解析法として研究が進められている． ・最大耐力までの損傷レベルについては妥当との検討結果が報告されている．

・ 共通事項	・ 躯体はフレームでモデル化し，材料および構造特性に基づいて，部材の非線形性を取り入れる． ・ $M \sim \phi$ 関係は，繰返し非線形モデル，等価線形モデルによる ・ 躯体と地盤の接触面で，必要に応じて剥離，滑動を考慮する． ・ 常時の荷重による断面力をあらかじめ計算し考慮する．躯体に非線形性を取り入れる場合は，常時荷重作用の段階から考慮することが必要な場合がある． ・ 現行設計法は，液状化しない地盤を対象に耐震計算法を設定	・ 耐震性能 3 に対応する崩壊機構のモデル化 ・ 剥離，滑動のモデル化 ・ 液状化地盤中のトンネル構造物の動的挙動は解明されたとはいえない．	・ ジョイント要素の有効性の検討 ・ 有効応力解析法による動的 FEM 解析を用いた研究が実施されている． ・ 鉄道では，液状化後の地震荷重として，水平土圧の増加と動泥圧の作用を規定
-2 縦断方向 a)耐震計算法の分類	・ 梁-地盤ばねモデルによる応答変位法 ・ 梁-地盤ばねモデルによる動的解析法	・ レベル 2 地震動に対する耐震計算法の研究が少ない．	
b)地震荷重の算定	・ あらかじめ設計用地震動によるトンネル縦断方向の地盤のみの応答を求める．		
・ 地盤条件の変化が大きい場合	・ トンネル縦断方向の地盤条件に従って 2 次元または 3 次元の動力学モデルを作成し，各地震動レベルの加速度時刻歴を用い，動的解析を行って地盤の応答時刻歴を求める． ・ 地盤の動力学モデルとしては，ばね・質点モデル，FEM モデルがある．材料のひずみ依存性を取り入れる．	・ ばね・質点モデルでは，通常地盤震動の 1 次モードのみをモデル化するため高次モードの影響を考慮できない． ・ FEM モデルでは，縦断方向に長大なモデルとなり，計算に労力，費用がかかる． ・ 大ひずみレベル対応の地盤の非線形の与え方 ・ 地震動の位相差入力	・ 縦断方向の波動の伝播速度を仮定して動的解析を実施し，影響を検討

・地盤条件の変化が小さい場合	・各地震動レベルに応じた速度応答スペクトルより，自由地盤の応答変位を求め，地盤条件の空間的ばらつきや地震動の基盤への位相差入力等に起因して，地盤の変位が縦断方向に正弦波状の分布をすると仮定する．	・正弦波状の変位分布の入力の設定法に十分な合理性がない． ・縦断方向の地盤変位の伝播速度，波長の計算方法が基準類により異なる． ・大ひずみレベル対応の伝播速度，波長の計算方法	
- c)構造解析法 ・応答変位法	・地盤ばね端より地盤変位を入力して弾性床上の梁として断面力を求める縦断方向に正弦波状変位分布を仮定する場合は，応答変位法による．		
・動的解析法	・地盤の応答時刻歴を入力して，部材の断面力時刻歴を求める． ・立坑等の地上構造物がある場合，地盤条件に急変部分がある場合には動的解析による．		
・共通事項	・地盤ばねは，地盤のひずみレベルに応じた剛性に基づいて計算し，必要に応じて受働抵抗強度等の非線形性を取り入れる． ・躯体と地盤の接触面で，必要に応じて剥離，滑動を考慮する． ・躯体および継ぎ手は，材料および構造特性に基づいて部材の非線形性を取り入れる． ・縦断方向においては，常時状態における不同沈下を除いて常時の断面力を考慮する必要はない． ・現行設計法は，液状化しない地盤を対象に耐震計算法を設定	・縦断方向の地盤ばねの算定方法としては地盤剛性の係数倍とする推定法が一般的であるが，大ひずみレベル対応としての適用性が問題 ・剥離，滑動のモデル化 ・液状化地盤中のトンネル構造物の動的挙動は解明されたとはいえない． ・液状化地盤に対する地盤ばねの設定方法，地盤変位の算定方法が課題	・杭基礎を対象として，液状化地盤に対する地盤ばねの設定方法，地盤変位の算定方法が研究されている．

照査方法 -1 安全性の照査	・対象とするトンネル構造物に要求される耐震性能に応じて、部材ごとに許容される損傷レベルを設定し、耐震計算の結果から安全性を照査する。 ・部材損傷レベルの区分 損傷レベル1：無損傷 損傷レベル2：場合によっては補修が必要な損傷 損傷レベル3：補修が必要な損傷 損傷レベル4：補修が必要で、場合によっては部材の取り替えが必要な損傷 ・部材の補修・補強の容易さから、耐震性能と損傷レベルの関係は以下のようなになる。 耐震性能1：補修・補強の容易さに関係なく損傷レベル1（レベル1地震動） 耐震性能2：補修・補強の容易な部材は損傷レベル2または3，補修・補強の困難な部材は損傷レベル2（レベル2地震動） 耐震性能3：補修・補強の容易さに関係なく損傷レベル3（レベル2地震動）	・部材損傷レベルの規定，および設計に即した適切な指標の設定が課題（RC部材，継ぎ手等） ・高軸力化部材の靱性の評価方法，面部材の面外せん断力の評価方法に課題	
------------------------------	--	---	--

-2 変形の照査	- 対象とするトンネル構造物に要求される耐震性能に応じて、部材ごとに許容される残留変形のレベルを設定し、耐震計算の結果から照査する。 - 部材変形レベルの区分 変形レベル1：残留変形なし 変形レベル2：残留変形中 変形レベル3：残留変形大 - 耐震性能と変形レベルの関係 耐震性能1：変形レベル1（レベル1地震動） 耐震性能2：変形レベル2（レベル2地震動） 耐震性能3：変形レベル3（レベル2地震動）	- 部材変形レベルの規定，および設計に即した適切な指標の設定が課題（止水性，走行安全性） - RC 部材のひび割れ，継ぎ手の目開き等を精度よく求める解析技術が課題	
地盤変状に対する検討 -1 液状化 ・浮上り，沈下	トンネル構造物の液状化による浮上り，および再圧密による沈下（不同沈下）は，各々対策を施すことで対処する．	- レベル2地震動対応の浮上り判定法 - レベル2地震動対応の液状化対策工 - 液状化後の再圧密に対する評価法が定まっていない．	- 地震力の大きさ，砂地盤の密度と浮上り量の関係に関して研究が進行中 - 浮上り対策工が，振動実験で研究されている
・側方流動	現行設計法では，側方流動に対する耐震計算法を規定していない	側方流動による荷重（流動変位，流動力）の評価法について定まった方法がない．	パイプライン，杭基礎に対しては，側方流動による荷重の作用方法について研究されている．
-2 地滑り・地盤沈下	傾斜した人工改変地盤に対し，地盤ひずみを与えて構造解析を実施し，安全性および変形を照査する．	変位吸収構造，地滑り抑止対策	地盤沈下に対し，その影響を荷重として考慮し，構造解析を行って安全性および変形を照査する．

-3 断層ずれ			・断層ずれに対し，トンネル位置での変位量を推定し，構造解析を行って安全性および変形を照査する． ・構造上対処できない場合は，変位吸収構造による対策，または復旧期間短縮のソフト的対策
耐震診断と耐震補強 -1 耐震診断	・鉄道では，簡便法により中柱を対象に耐震診断を実施．簡便法はトンネル上下面位置での地盤の地震時相対変位の大きな区間について，中柱がせん断破壊先行かどうかにより判定する． ・新設構造物と同程度の耐震計算法により耐震診断を実施することを規定している自治体，地下鉄事業者もある．	・簡便法の精度が課題 ・新設トンネルに対して提案されている耐震計算法に基づき，より精度の高い簡便法の構築が必要 ・耐震診断手法を確立する ・耐震補強区間の絞り込みが重要 1 次診断：原設計方法の調査，簡便法による診断，絞り込み 2 次診断：材料の経年劣化の調査，地盤条件の調査，詳細法による診断，耐震補強方法の決定	
-2 耐震補強	・鉄道では，開削トンネルの中柱を中心に耐震補強を実施している．せん断耐力増強を目的とした鋼板巻きが主．	・側壁のせん断補強方法が課題 ・曲げ破壊は補強しなくてもよい ・狭小な空間，限られた時間内での効率的な補強方法	・高架橋柱，地下鉄中柱については静的交番 ・載荷実験結果に基づき，補強方法が確立されつつある．

鉄道：新設構造物の当面の耐震設計に関する参考資料（平成 8 年 3 月）鉄道総合技術研究所

鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計（平成 1 1 年 2 月）

道路：共同溝設計指針（昭和 6 1 年 3 月）日本道路協会

駐車場設計・施工指針 同解説（平成 4 年 1 1 月）日本道路協会

水道施設：水道施設耐震工法指針・解説（1 9 9 7）日本水道協会

下水道施設の耐震対策指針と解説（1 9 9 7）日本下水道協会

原子力構造物：原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震設計に関する安全性照査マニュアル（1 9 9 2 年 9 月）土木学会原子力土木委員会

土木学会：沈埋トンネル耐震設計指針（案）（１９７５年３月）

コンクリート標準示方書・耐震設計編（平成８年）コンクリート工学委員会

トンネル耐震設計の方向と基本課題（平成１０年８月）地震工学委員会・トンネル耐震性研究小委員会

トンネルライブラリー・開削トンネルの耐震設計（平成１０年９月）トンネル工学委員会・技術小委員会

大震災の教訓を活かすために～実務技術者からの提案～（平成１０年４月）阪神・淡路大震災対応技術特別研究委員会

3. 抗土圧構造物の耐震設計法

-道路，鉄道構造物-

検討項目	現状の設計法	問題点	研究の現状と今後の設計法への反映
耐震設計の目標	1) 構造物に過大な損傷を生じさせない ・基礎部の損傷程度を基礎の塑性率の制限値以下とする ・く体の損傷程度は最大耐力以内とし，曲げ破壊先行型とする 2) 変位に対する構造物全体の安全性を確保する ・最大応答変位が変位の制限値以下とする 3) 周辺地盤の安全性を確保する ・所要の安全率を満足する	・レベル2地震動における損傷程度構造型式に応じた損傷程度の設定 損傷程度と損傷部位の設定 ・抗土圧は累積変位で制限する必要がある ・レベル2地震動を対象とした検討では，所要の安全率を満足するのは困難	・実被災構造物を対象とした検証解析が実施されている．被災状況と損傷程度を明確にし，耐震性能レベルを設定する必要がある． ・累積損傷度理論や Newmark 法によって累積変形を求める方法が検討されている．
塑性領域での解析 -1 解析モデル	震度法による解析 1) 構造物の安全性 基本は基礎部の塑性変形を考慮 a) 直接基礎型式 ・地盤抵抗の非線形特性，基礎の浮き上がりを考慮，部材は線形 b) 杭基礎形式 ・杭周辺の地盤ばねの非線形特性を考慮，部材は線形 ただし，構造高さの低い擁壁について道路では照査不要としている 2) 周辺地盤の安全性 ・レベル1地震動に対する円弧すべり安全率の照査	・レベル2地震時の地盤定数の評価（ひずみレベルによる非線形性の考慮） ・基礎部の降伏点の設定が不明瞭 ・部材の非線形特性の考慮 ・レベル2地震動に対する検討法の検討	・土質調査についての詳細な規定を示し，土質諸数値の設計用値の精度を向上する必要がある． ・動的解析による検討事例あり ・レベル2地震動において，地震動を静的震度に換算するための等価化係数の研究が行われている．

-2 応答値の算定 地震の影響	・慣性力 ・地震時土圧 ・地盤震動による地盤変位（杭） ・液状化の影響（杭） ・液状化による側方流動の影響	・レベル2地震動の設定方法の検討 ・レベル2地震に対する物部・岡部地震時土圧式の適用性に問題がある． ・盛土直下地盤の変形累積性が考慮されていない ・液状化（流動化）による残留変形量の推定方法が不十分	・基盤地震動の設定について検討がされており，表層地盤の動的解析により地表面加速度が算定される．地盤の動的解析には課題があるが，ある程度合理的に慣性力が設定できると考えられる． ・ひずみの局所化を考慮した地震時土圧の算定について検討が実施されており，合理的な地震時土圧を設定できる．
応答値の算定	1) 構造物の安全性 静的解析法（荷重増分法）により荷重～変位関係を算定し，エネルギー一定則を適用して塑性変形を考慮した最大応答値を推定	・地震動特性が考慮されていない ・変位の累積性が考慮されていない	・現状では設計レベルを考慮した場合，動的解析法は困難である．一方向に変形が卓越することを考慮し，最大変形量に対する推定精度を向上させる． ・Newmark 法など他の検討方法が提案されている．
	2) 周辺地盤の安全性 円弧すべり法によりすべり安全率を算定	・レベル2地震動で $F_s = 1$ を確保することは困難	
安定の照査 -1 照査項目	1) 構造物の安全性 支持，滑動，転倒，変位（塑性率） 2) 周辺地盤の安全性 基底破壊，側方移動，斜面の安定		・被災事例の詳細な分析等を実施し，限界状態を明確化する必要がある．
-2 照査方法	3) 構造物の安全性 エネルギー一定則より塑性変形を考慮した最大応答変形時の荷重に対して 滑動が許容水平支持力内 変位が塑性率の制限値内 を照査 4) 周辺地盤の安全性 ・慣性力に対する安全率を算定	・設計塑性率と基礎の損傷状態の関係が不明確 ・滑動に対しては水平支持力と作用力の対比で照査しているため，塑性率の概念がない． ・部材の非線形特性を考慮する必要がある． ・変形性能などで照査する必要がある．	・被災状況と塑性率の関係の整理が実施されており，実被害と関連付けられた塑性率の制限値を規定する必要がある． ・滑動に対しても Newmark 法で変形量を算定する方法が検討されている． ・許容変形量の設定については，被災構造物の解析などによって，構造物の使用条件等を勘案しながら適切に設定する必要がある．

部材の照査 -1 照査項目	構造物の安全性 ・前壁（片持ちスラブ） ・前フーチング（片持ちスラブ） ・後フーチング（片持ちスラブ）	・土圧作用条件での前壁の塑性率の設定に関する検討が不十分	
-2 照査方法	1)エネルギー一定則より塑性変形を考慮した最大応答変形時の荷重に対して最大耐力内であることを照査 2)橋脚に準じた構造細目にて対応 3)杭基礎で軟弱地盤の場合は，別途，応答変位法によって地盤変位の影響を考慮	・耐力照査では不経済な断面，配筋となる可能性がある ・靱性能による評価が必要であるが，一方向載荷により決定される配筋における部材靱性能評価法を検討する必要がある． ・地震後に土圧に抵抗する必要があることから，残留耐力を評価する必要がある． ・応答変位法を行う場合の盛土直下の地盤変位の算定方法が検討不十分	・橋脚のように変形が一方向に卓越しない条件での部材の交番載荷試験は，いろいろな組み合わせで行われているが，抗土圧のような条件での試験は少ない．

-港湾構造物-

検討項目	現状の設計法*	問題点	研究の現状と今後の設計法への反映
耐震設計の目標	1)大地震時にも港湾の機能がある程度保持する． 耐震強化岸壁の建設 （設計震度の最大値は0.25） 2)液状化対策の実施	・レベル2地震動に対する耐震設計，液状化対策 ・変形照査の手法	・レベル1，2地震を考慮した耐震設計に変更 ・変形照査のための有効応力解析手法の提案 ・許容変形量について検討中
塑性領域での解析 -1解析モデル	1)構造物の安全性 有効応力解析法による地震時変形計算	・レベル2地震時の地盤定数の評価（ひずみレベルによる非線形性の考慮） ・有効応力解析法が複雑すぎる．	・各種事例について有効応力計算の蓄積

-2応答値の算定	・慣性力 SHAKEより求めた地盤加速度より作用震度を算定 ・地震時土圧	・レベル2地震動の設定方法 ・地盤加速度の計算手法のレベル2地震時の信頼性 ・レベル2地震時の土圧算定手法の信頼性	・大都市直下の大地震のような極大地震動に対する耐震強化岸壁を新たに建設（設計震度は0.25以上） ・土圧軽減（軽量材，裏込め土の固化） ・土圧の現地観測，実物大の模型振動実験による土圧計測
安定の照査 -1照査項目	1)構造物の安全性 滑動，転倒，基礎の支持力 2)周辺地盤の安全性 液状化対策	・レベル2地震時の液状化対策が困難な場合がある．	・新しい構造形式の検討 ・液状化予測・判定手法の改訂
-2照査方法	1)構造物の安全性 静的震度法 変形照査	・許容変形量の設定方法が確立されていない．	・許容変形量の設定方法の検討 ・変形照査による設計法の提案

道路：道路橋示方書・同解説 平成8年12月，（社）日本道路協会

道路土工・擁壁工指針（案） 平成10年3月，（社）日本道路協会道路土工委員会

鉄道：鉄道構造物等設計標準・同解説（抗土圧構造物）平成9年3月，（財）鉄道総合技術研究所

重力式岸壁：港湾の施設の技術上の基準・同解説 平成元年6月 （社）日本港湾協会

4．盛土等土構造物の耐震設計法

検討項目	現状の設計法	問題点	研究の現状と今後の設計法への反映
設計の目標	盛土は、 a)のり面勾配などの構造規定 b)盛土材料，締め固めの規定など施工管理 で対応しており，耐震設計は一般には行われていなかった．	・これまで土構造物の耐震設計は積極的には行われてこなかった．しかし兵庫県南部地震以降，他構造物での耐震設計法の整備が進む中で，特に道路，鉄道，河川堤防などの線状構造物では，一カ所の破壊がシステム全体の破壊につながるため，盛土といえども一定の耐震性を確保する必要がある，L2に対応した設計法を整備する必要がある．	・今後の耐震設計を考える場合，盛土は特に全線に亘り耐震対策を行うことは現実的ではないため，どうしたら相対的に耐震性の弱い部分（例えば，締め固め不足箇所，基礎地盤の耐震性が低い箇所，構造的に不安定な箇所など）を選別し，無くすることができるかという視点での検討が必要となる．したがって耐震設計法の基本方針としては，地盤や盛土の不均質性などを勘案すると必ずしも変形量や破壊の予測を正確に行えるわけではないが，相対的にでも破壊降伏強度が低い箇所や，靱性の低い構造を見つけだせる解析を基本とすることが必要となる．
破壊安全度による設計 -1 計算方法	・耐震設計は希にしか行われませんが，行う場合でもフェレニウス法等の円弧すべり法に震度法を適用した安定解析がほとんどであった．	・円弧すべり法では，分割法によって解が求められているが，震度が大きくなった場合にはスライス間力の影響が無視できない．また砂質土地盤の基底破壊に円弧すべり法を適用すると地盤を過小評価する．	・常時ではさほど問題とならないが，各種提案されている円弧すべり法の仮定の違いによって，特に大地震時には結果が大きく異なることになるので，標準的な方法を提案する必要がある． ・スライスの方向を重力と地震力との合力方向に分割した場合には，スライス間力の影響が少なくなるとの研究がある．
-2 地震外力の考え方	・一般的にはL1相当時で0.15～0.2程度の水平震度を設定する．	・動的な加速度と静的な震度との対応が明確ではないので，設計震度の意味合いが不明確である．特にL2地震動を想定した場合の設計震度の設定方法は不明である．	・傾斜実験と振動実験の比較から，静的と動的の換算係数を求める研究が行われているが，いずれにしてもL2に対して0.15～0.2程度では低すぎる．また地震波形や盛土内での地震動の増幅の影響などについての研究は不十分である．

-3 安全度の照査方法	地震時においても安全率 $F_s > 1$ であることを確認するのが基本である。	特にレベル2地震時では所要の安全率を確保するのは困難である。	地震時において円弧すべり法が適用できる限界を明確にする必要がある。
塑性領域での設計法 -1 計算方法	動的解析などで詳細に変形を求める場合もあるが、現行設計では、円弧すべり法による破壊安全度の照査が一般的であり、盛土の変形量は算定していない。	レベル2地震動では円弧すべり法による破壊安全率を確保することは困難となる。このため、レベル2地震動対応の設計法においては、土が有する靱性能を評価することが重要となる。	変形量の算定手法としては、円弧すべり法を用いたニューマーク法を適用する方法が有効である。この計算では盛土のすべり面以外の部分を剛塑性体と仮定することになる。
-2 入力地震動の考え方		設計地震力を決定する方法としては、動的応答計算で盛土内での加速度応答を求める方法や非線形スペクトルを用いる方法などが考えられる。しかし盛土断面に対してこの方法を用いるのは、計算労力が大きく、設計実務的な方法ではない。特に盛土のような簡便な構造を複雑に計算する意味合いは薄い。	盛土は他の地上構造物に比べて動的応答倍率が小さいため、地表面における地震力をそのまま土構造物に加わる加速度としてもある程度の妥当性は得られる。簡便であり、地盤と土構造物の物性の精度とバランスする方法としては、地表面最大加速度(PGA)と基本波形を与える方法がある。この場合にはL1で200～300Gal、レベル2地震動で600～800Gal程度が目安となる。
-3 変形性の照査方法		変形を照査する場合は、算定される変形量と、許容される変形量の対比によって照査することになる。しかし設計において対象となる地震時変形量の種類と許容量が明確ではない。	盛土の地震時変形量は、Newmark法によって算出される滑動変形量の他に、必要に応じて、変形係数の劣化に起因した地盤や盛土の残留変形量、軟弱地盤の流動化による変形量なども加味して算出する。これらの地震時変形量に対して、所定の許容変形量以内であることを確認することによって変形性を照査する。
-4 許容変形量の考え方	地震時の許容変形量は、使用条件などから決められている場合もあるが、ほとんど設定されていない。	許容変形量の設定の際の考え方が明確ではない。	検討の対象となる盛土の使用目的や社会的な重要性、復旧程度などを勘案して許容変形量を定める必要があるが、対比する計算結果の精度や感度を十分に配慮する必要がある。

部材の照査法 -1 盛土の強度・変形 ・特性の設計値	・一般的には盛土の土質種別毎に定められている低めのせん断強度の設計値が用いられている。	・低めのせん断強度の設計値のため、レベル2地震動2に対応するため高い設計地震動を設定すると、所定の安定性や変形性を確保することが困難になる。 ・盛土の施工管理の程度に応じて、せん断強度の設計値を設定する必要がある。	・レベル2地震動の設計法を行う場合は、従来、安全代として隠されていたせん断強度の設計値を正当に評価する必要がある。特に良い材料を用いて十分に締め固めた材料は、せん断強度の設計値を高くする必要がある。しかし盛土材はバラツキが大きく、設計時には盛土材の種類を特定することが困難な場合が多いため、それらとの兼ね合いでどのような値を使うべきか工学的な判断が必要となる。
-2 抵抗部材の評価法	・地盤改良や補強材などの補強工の設計上の評価方法としては、円弧すべり法でせん断や引抜き抵抗力として加える方法で行われる方法がある。	・地震時において所定の安定性や変形性を確保出来ない場合の補強法に関する設計が明確ではない。同じ補強を行った場合でも計算法の違いで評価が大きく変化する。	・地盤改良や補強土工法、従来ののり面工などの補強効果に関する実験や解析は一部で行われているが、十分ではない。今後はこれらの設計法などについても検討する必要がある。

5．地下タンクの耐震設計法

検討項目	現状の設計法	問題点	研究の現状と今後の設計法への反映
耐震設計の基本方針	・「LNG 地下式貯槽（土木設備）設計指針」昭和53年 電事連、「LNG 地下式貯槽指針」昭和54年 日本瓦斯協会	・1978年時点までの技術を基礎として許容応力度の体系によっている。その後の豊富な建設実績や、解析手法などが反映されていない。	・「LMG 地下タンク躯体の構造性能照査指針（案）」土木学会（平成10年度中を目途）

	・震度法を基本とし，必要に応じて動的解析法により震度法で設計された貯槽の動的挙動について検討する．	・サイトの地震危険度に応じ，より進んだ解析法によって耐震性を確認しているが，官庁申請には「指針」ベース ・RC 示方書の「限界状態設計法」に現行の指針が対応していない． ・設計合理化への強い要望	・レベル 2 地震動対応，多段階設計，性能照査型設計への志向 耐震性能 1：地震後にも躯体は健全で，補修をしないで使用することができる． 耐震性能 2：地震後に短時間で躯体の性能が回復でき，補強を必要としない． 耐震性能 3：地震によって構造物全体が崩壊せず，補強により再利用が可能である． ・多段階の地震動を考慮 ・地震動と地下タンクの要求性能の対応は，地下タンク設置者が自由に選択できる．
地震荷重 -1 震度	・水平震度（基盤 0.15） ・鉛直震度（水平震度の 1/2）	・サイトで予測されるレベル 2 地震動と比べ，地震力が小さいのではないか． ・鉛直地震力の側壁の設計への影響は小さいものの，動的検討は十分とは言えない．	・レベル 1 地震動（供用期間中に 1 ～ 2 回発生する確率を有する地震） ・レベル 2 地震動（供用期間中に発生する確率は低いが大きな強度を持つ地震動）
-2 地震時土圧	・震度に基づく偏土圧（常時主働土圧 - 地震時主働土圧） ・周辺地盤の変形が地盤ばねを介して作用	・地盤変位によって生じる動土圧分布と，震度方法で仮定する地震時土圧文応との相違が指摘されている． ・地盤ばねの具体的な設定法の記載がない．研究で多くの提案あり．	・レベル 2 地震動は，必要に応じて，さらに複数の段階の地震動として設定（確立論的手法による応答スペクトルを基本とし，確率論的一様ハザード応答スペクトルにより，再現期間に応じた評価を加える．照査用地震動が異常に大きく評価されたり，逆に異常に小さく評価されたりすることを工学的見地から回避する）．

-3 地盤変位の設定	・地盤の応答計算による． ・平均応答スペクトルによる．	・液状化地盤の応答変位と地盤ばねの設定法が不明確 ・平均応答スペクトルとレベル2地震動との対応が不明確	・地盤の非線形解析（有効応力解析）で応答変位と地盤剛性低下を求める． ・サイト固有のスペクトルを優先．決めがたい場合は標準スペクトルを参照．
-4 動的解析における基盤への入力地震波	・基準水平加速度 150gal，周期特性の異なる波形3種以上	・現行の地震動は，その大きさに関して，サイトの地震危険度との関係が薄い．	・照査用地震動は目標とする応答スペクトルに適合した時刻歴地震波形を用いる．
耐震計算			・耐震性能に応じて，適切な解析手法（静的線形解析，準動的線形解析，準動的等価線形解析，動的非線形解析）を選択
-1 震度法	・タンクを円筒モデル（普通 FEM 円筒シェル）で表し，地震時土圧を側壁両側から偏土圧として載荷． ・地震力と直交方向には側壁の変形に応じた地盤のばね反力		・震度法は，静的線形解析に位置付け，耐震性能1の照査に限定
-2 応答変位法	・モデル化に関する具体的な記載はない．	・指針発効後，応答変位法の適用性検討について多くの研究が行われており，事実上の標準となっているが，官庁申請は震度法が普通	・応答変位法は，準動的解析に位置付け．
-3 動的解析法	・モデル化に関する具体的な記載はない．	・軸対称モデルによる等価線形解析は，広く普及． ・等価線形解析の範囲内であれば，応答変位法の方が実用的．	・地盤-構造物連成系の非線形動的解析の実用化が望まれている． ・躯体における側壁の位置により，断面破壊パターンが異なることが考慮できる方法の開発．（0度と180度方向は面外曲げ，90度と270度方向は面内せん断） ・地盤と構造物の接触面のモデル化が課題．
			・施工プロセスを考慮した初期応力（地盤，駆体）の設定と，これに連続した地震荷重の載荷．

照査方法	・許容応力度法による． ・原則として弾性理論に基づく． - a)許容応力度以内 - b)断面力計算時はコンクリート全断面（鉄筋は無視） - c)温度荷重による熱応力計算時は断面剛性の低減可	・曲げ耐力評価（地中構造物の応答塑性率評価，変形性能照査法が確立していない） ・せん断耐力評価（土圧作用下での面部材のせん断耐力は，気中の棒部材のせん断耐力と異なる）	・性能照査による．下記の照査項目について，解析手法のレベル（１～４）と耐震性能レベル（１～３）に応じて，照査内容をマトリクス表示． ・耐荷性能（応答塑性率と安全率） ・止水性能 ・機密性能 ・液密性能
地盤変状に対する検討	・液状化の可能性について判定し，躯体，周囲の盛土，周辺構造物に与える影響を検討． ・貯槽底部は一般に安定した支持層に設置されるので，底部付近での液状化の可能性はない． ・地表面付近で液状化した場合，躯体への影響は少ないが，貯槽周囲の盛土，周辺構造物に影響を与える恐れあり．	・盛土は地盤改良 ・支持層への過剰間隙水圧の浸透 ・中間に液状化層を挟む場合の扱い	・液状化に起因する荷重作用を適切に評価して所用の耐震性能を照査（具体的な解析手法は開発途上）． ・タンク躯体への影響は小さくとも，燃料配管支持架台（杭基礎）などの設計が困難．
・液状化対策	・地盤改良 ・地盤改良範囲	・レベル２地震動で対応 ・消防法では地上式タンクの基礎を想定．地中構造物に対する合理的な対策範囲．	