

第6章 立坑に対する耐震計算および照査

第6章 立坑に対する耐震計算および照査

6.1 一般

立坑および立坑とシールドトンネル接合部においては、常時荷重状態を初期条件とし、レベル1地震動およびレベル2地震動作用時に対する耐震性の照査を行い、それぞれの要求性能を満足するように構造諸元を決定する。

耐震計算の方法は応答変位法を原則とする。ただし、複雑な地震時挙動が予想される場合は、適切な力学モデルを用いて動的解析を行うのが望ましい。

また、液状化および液状化に伴う流動化が問題となる立地条件・地盤条件においては、これらの影響を適切に取り入れた耐震設計を行うとともに、接合部については盛土等将来計画があればその影響も考慮するのがよい。

[解説]

立坑は、開削工法あるいはケーソン工法等により施工されるトンネル施工上必要な仮設構造物であるとともに、トンネル施設の機能上必要な永久構造物として計画される場合も多い¹⁾。したがって、永久構造物としての立坑では、「トンネル標準示方書（開削工法編）・同解説 土木学会²⁾」のほか、「水道施設耐震工法指針・同解説 日本水道協会³⁾」「道路橋示方書（下部構造編、耐震設計編） 日本道路協会⁴⁾⁵⁾」等の基準類を参考に耐震設計される場合が多いと思われる。

第2章、第3章にはそれぞれ耐震性能の考え方、および合理的な設計地震動が示されている。本章では、これらに基づいた立坑および立坑とシールドトンネル接合部の断面力や変形等を算定するための耐震計算手法および耐震性の照査方法について示している。

耐震計算は、地震時の地盤変位に基づく応答変位法によることを原則とした。ただし、複雑な地震時挙動が予想される場合、特にレベル2地震動に対しては、非線形動的解析により安全性を照査しておくことが望ましい。立坑および立坑とシールドトンネルとの接合部に対する概略の耐震設計フローを図6.1-1に示す。

通常、立坑に作用する荷重としては、常時の土圧・水圧に加えて強震時における構造物周辺地盤の地盤変位に起因する地震力が想定される。これらの荷重以外に地盤条件や立地条件によっては、液状化による浮き上がりや支持力の低下、あるいは埋立地護岸付近や傾斜地など液状化に伴う流動化の影響が問題となる場合がある。このような影響についても適切な荷重評価や耐震計算のためのモデル化を行い、2章の耐震性能に基づく適切な断面耐力（あるいは変形性能）や変形量の許容値を設定して、耐震安全性の照査を行うのがよい。

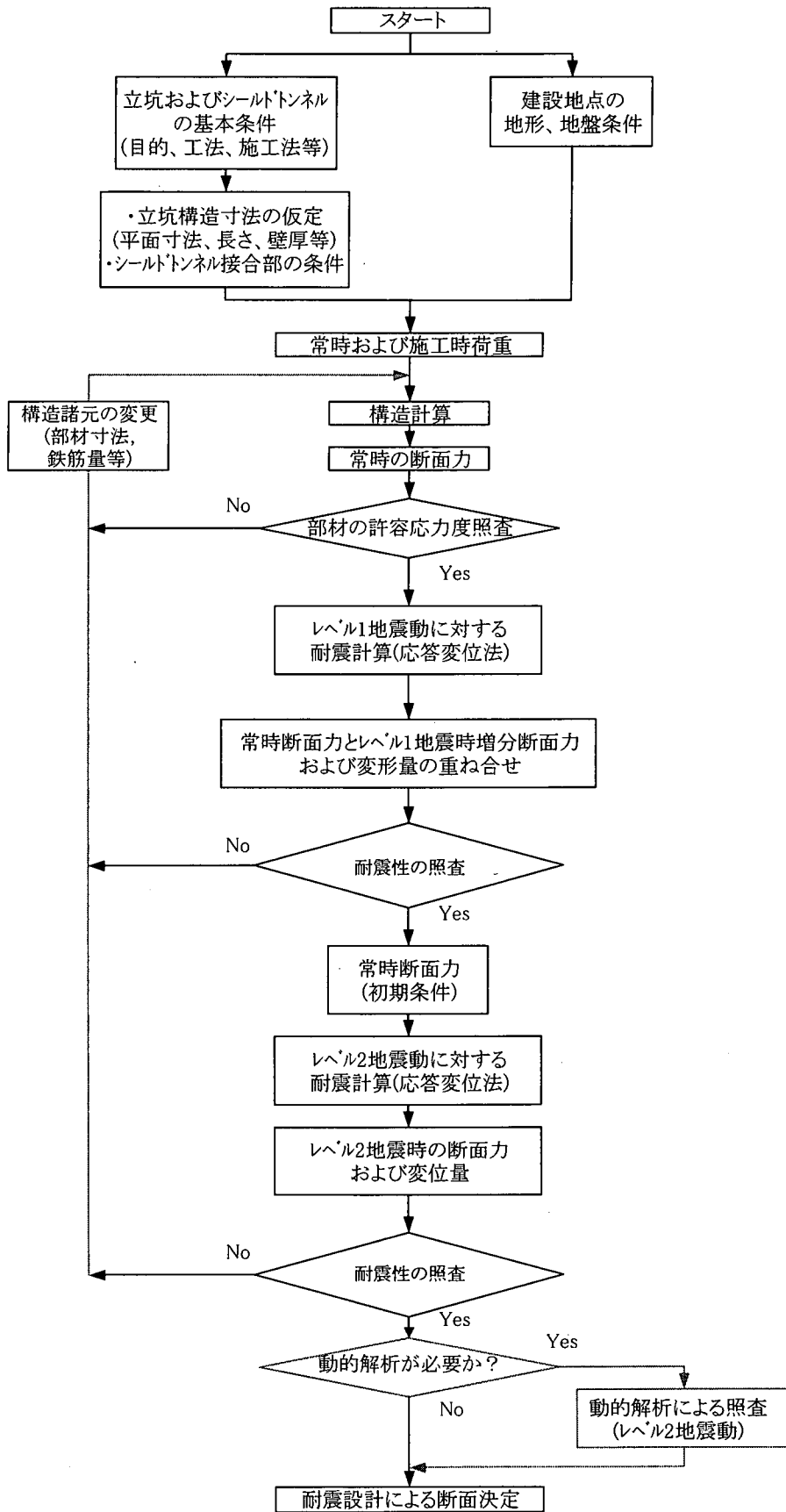


図 6.1-1 立坑およびシールドトンネル接合部に対する耐震設計フロー

6. 2 応答変位法による地震時断面力および変形の計算

6. 2. 1 立坑本体

立坑本体の耐震計算では、設計地震動、立坑の重要度や構造特性、地形や地盤条件等に応じた適切なモデル化を行うのがよい。

[解説]

立坑の工種（オープンケーソン、ニューマチックケーソン、地中連続壁、土留によるオープン工法など）、立坑の重要度、立坑の形状寸法、建設地点の地形・地盤条件、対象とする地震動レベル等により、適切なモデル化を行わなければならない。一般的な目安を以下に示す。

①設計地震動の大きさ

- ・レベル1地震動：立坑本体（弾性）、地盤ばね（非線形）
- ・レベル2地震動：立坑本体（非線形）、地盤ばね（非線形）

②立坑の形状寸法

- ・比較的規模が小さく縦長な形状：梁・ばねモデル、2次元FEM等
- ・平面寸法が大きい大規模構造：軸対称FEM、3次元FEM等

③地形・地盤条件

- ・地形や地層が不整形な場合、FEM等による地盤のモデル化が望ましい
- ・地震時のひずみ依存性を考慮した地盤ばねや地盤定数の評価が望ましい

以下、「関西における地下空間の活用と技術（土木学会関西支部）⁶⁾」を参考に、代表的な解析モデルとその特徴を示す。

1) 軸対称FEM（3次元シェル）解析⁶⁾

立坑側壁を軸対称シェル要素、底版や周辺地盤を軸対称連続体要素でモデル化したものであり、最も実状に近いと考えられる疑似3次元モデルである。このような軸対称FEMモデルによる応答変位法と動的解析の結果は、大深度立坑においても概ね一致することが確かめられており、合理的かつ実用的な解析モデルと考えられる。大深度、大規模立坑の場合など、このような軸対称FEMモデルによる検討が望ましい。

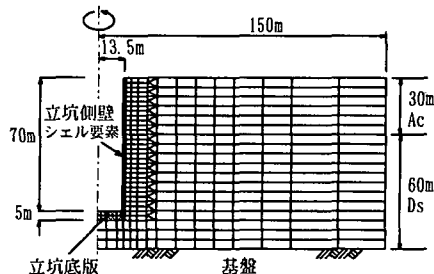


図 6. 2-1 軸対称 FEM モデル

2) 2次元 FEM 解析⁶⁾

立坑側壁を梁要素，底版や地盤および立坑内部（空洞部）を平面ひずみ連続体要素でモデル化したものである。3次元構造である立坑を，等価な2次元にモデル化（側壁梁要素の等価曲げ剛性，底版および立坑内部の連続体要素の変形係数）する必要がある。

矩形断面立坑の場合，地震作用方向に直交する側壁については壁の寸法に応じた剛性をもつ梁あるいは板要素，立坑内部については地震作用方向の壁を奥行き方向に集めた板要素等による2次元への等価なモデル化も考えられる。

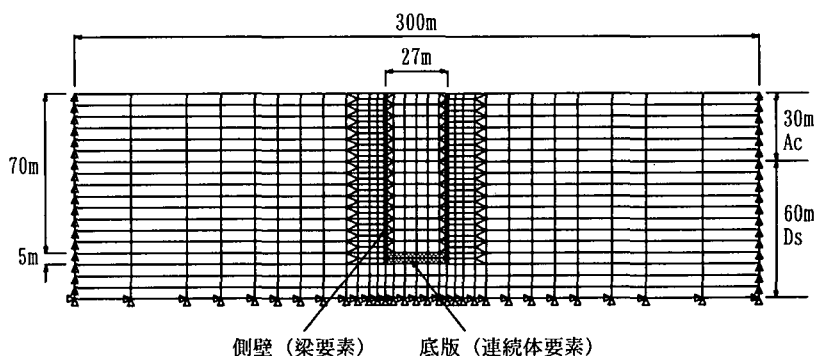


図 6. 2-2 2次元 FEM モデル

3) 梁・ばねモデル解析

立坑本体を1本の梁でモデル化し，これを底面地盤ばねおよび根入れ部の表層周面地盤ばねで支持した力学モデルである。地盤ばね値の設定や別途水平方向の設計を必要とする（2次元 FEM でも同じ）など，簡略ではあるが適用上の課題もある。特に底面地盤ばねが計算結果に与える影響が大きいことが認められており¹⁾，底面支持地盤の影響が大きいと考えられる立坑（例えば長さ比べて平面寸法が大きな大規模立坑など）に対しては適用上注意を要する。耐震設計計算モデルとして利便性は高いが，適用に当たっては地盤ばね定数に幅を持たせた検討を行うなど設計上の配慮が肝要である。なお，側壁における鉛直方向と水平方向の断面力など，各部材（底版，頂版，内部スラブなど）の2方向断面力を1つのモデルで解析するには立体 FEM モデル（板要素やばね要素で組み立てる）が考えられる。

一方，レベル2地震動においては，地盤ばねだけでなく立坑本体の塑性化を許す設計が主流となるため，立坑本体の非線形性も考慮した計算モデルが必要となる。梁モデルの場合，各深さ方向の断面諸量（RC構造の場合，断面寸法と配筋）と軸力により比較的簡便に非線形曲げ特性（ $M-\phi$ ）を設定できる利点がある。

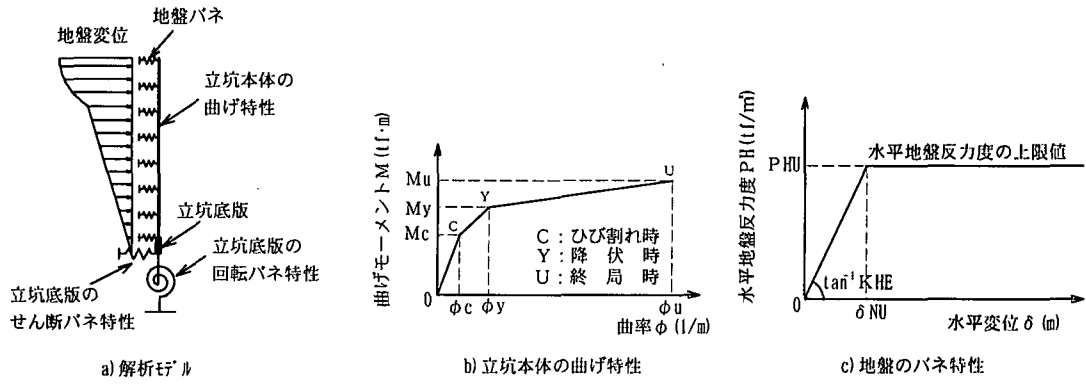


図 6.2-3 梁・ばねモデル

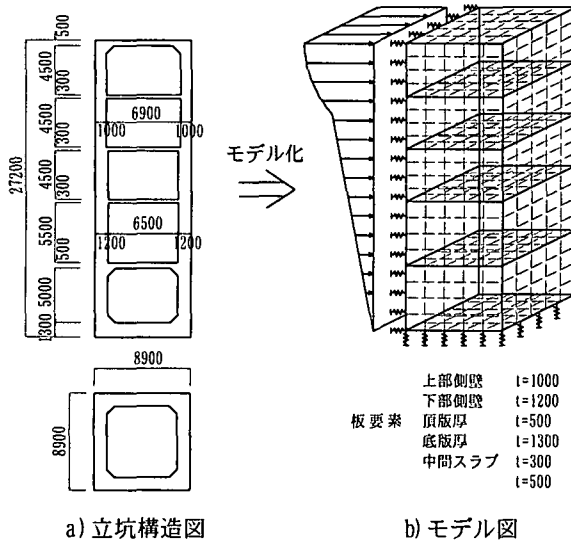


図 6.2-4 立体 FEM・ばねモデル

6. 2. 2 シールドトンネルとの接合部

立坑とシールドトンネルとの接合部に対する耐震計算も、設計地震動、立坑の重要度や構造特性、地形や地盤条件等に応じた適切なモデル化を行うのがよい。接合部の耐震計算は、立坑本体、シールドトンネルのそれぞれの耐震計算と整合するように行うものとする。

【解説】

立坑とシールドトンネルとの接合部に対する耐震計算も、立坑本体と同様、設計地震動、立坑の重要度や構造特性、地形や地盤条件等に応じた適切なモデル化を行うのがよい。

立坑とシールドトンネルとの接合部は異種構造物間の結合部であり、構造上の弱点部である。地震時の構造的な被害はこのような異種構造物間に生じやすいことは明らかである。このために、立坑とトンネルの接合部では力の伝達を緩和するかもしくは容易に修復可能な構造形式の採用が考えられる。力の伝達を緩和する手段としては、通常、可とう性継手が用いられる。

接合部の可とう性継手の部材応力度、相対変位量（伸縮量，せん断ずれ量，相対回転角）の耐震計算は、立坑とシールドトンネルを梁・ばねモデルで置換した応答変位法で求めてよい（図 6. 2-5 参照）。

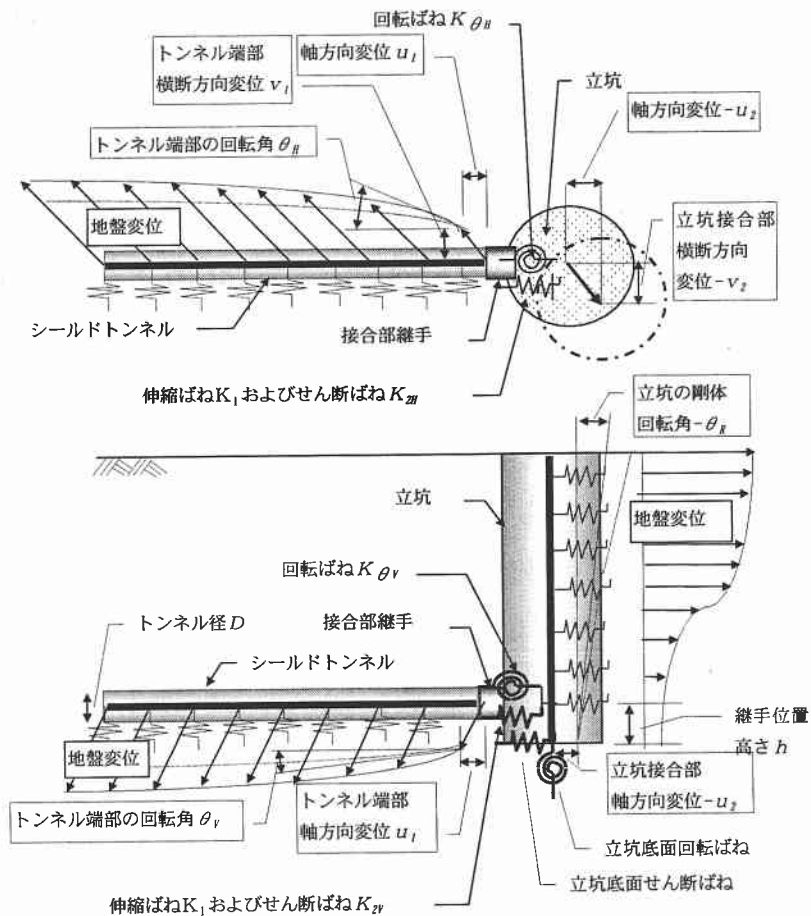


図 6. 2-5 立坑接合部の梁・ばねモデルと変位・回転角

接合部の可とう性継手の相対変位・回転角は次の項目で評価する。

- ①継手伸縮量 $\Delta u = (D/2) \cdot \Delta \theta + |u_2 - u_1|$
- ②継手水平面内の軸直角方向ずれ $\Delta v = |v_2 - v_1|$
- ③継手鉛直面内の軸直角方向ずれ $\Delta w = w_0 + |w_2 - w_1|$
- ④継手水平面内の相対回転角 $\Delta \theta_H = \theta_H$
- ⑤継手鉛直面内の相対回転角 $\Delta \theta_V = \theta_0 + \theta_R + \theta_V$

ただし、 $\Delta \theta = \max\{\Delta \theta_V, \Delta \theta_H\}$ であり、 D はトンネル外径である。

また、 w_0, θ_0 は、それぞれ、常時および将来における、接合部での立坑基礎とトンネル端部付近地層の相対沈下とそれによる可とう性継手の回転角である。

ここに、 θ_R, u_2, v_2, w_2 は、立坑の、それぞれ、地震動による剛体回転もしくは変形角、トンネル軸方向変位、水平・鉛直面内軸直角方向変位であり、 $\theta_H, \theta_V, u_1, v_1, w_1$ は、シールドトンネル端部の、それぞれ、地震動による水平・鉛直面内回転、軸方向変位、水平・鉛直面内軸直角方向変位である。

梁・ばねモデルを用いた応答変位法に基づいて、地震動による地盤変位から、直接、立坑接合部の相対変位および回転角を求める場合は、以下の式(6.2.2-1)～式(6.2.2-5)で算定してもよい(文献⁹⁾および付録技術資料8参照)。この式は、立坑が地盤変位と同じ振動数(位相は同位相または逆位相)で振動するものと仮定して、波動伝播によるトンネル軸方向の耐震計算法と同様の手法で、トンネル端部接合部の継手の突込み・拔出し量、相対回転角等を計算するものである。なお、接合部位置の立坑の変位および回転角は、別途、立坑本体の耐震計算で求められた変位を用いる。

1) トンネル軸方向

ばね定数 K_J を有する伸縮性継手の相対変位振幅 $|u_2 - u_1|$ および軸力振幅 $|T|$ は次のとおりである。

$$|u_2 - u_1| = \alpha_E \alpha_J Z_1 \quad (6.2.2-1)$$

$$|T| = \kappa \alpha_E \alpha_J (2\pi EA / L_1) Z_1 \quad (6.2.2-2)$$

ただし、

$$\alpha_E = \sqrt{\left(\frac{W_1}{Z_1}\right)^2 + \left(1 - \frac{2W_1}{Z_1}\right)\alpha_1}$$

$$\alpha_J = \frac{1}{1 + \kappa \sqrt{(1 - \alpha_1)/\alpha_1}}$$

$$\kappa = \frac{K_J}{2\pi EA / L_1}$$

$$\alpha_1 = \frac{1}{1 + \left(\frac{2\pi}{L_1}\right)^2 \frac{EA}{K_1}}$$

特に、伸縮自由な継手の場合 ($K_j = 0$)、相対変位振幅は次式で表される。

$$|u_2 - u_1| = \alpha_E Z_1 \quad (6.2.2-3)$$

2) トンネル軸直角方向

回転ばね定数 K_θ およびせん断ばね定数 K_s を有する可とう継手の相対変位振幅および断面力振幅については、付録技術資料 8 を参照されたい。

特に、回転・相対変位自由な可とう継手の回転角振幅および相対変位振幅は次式で表される。

$$\theta_H, \theta_V = \sqrt{\alpha_2} (2\pi Z_2 / L_2) \quad (6.2.2-4)$$

$$|v_2 - v_1|, |w_2 - w_1| = \alpha_2 Z_2 \sqrt{\alpha_{22}^2 (1 + 2\alpha_{22}) - 2\alpha_{22} \left(\frac{W_2}{\alpha_2 Z_2} - 1\right) + \left(\frac{W_2}{\alpha_2 Z_2} - 1\right)^2} \quad (6.2.2-5)$$

ただし、

$$\alpha_2 = \frac{1}{1 + \left(\frac{2\pi}{L_2}\right)^4 \frac{EI}{K_2}}$$

$$\alpha_{22} = \sqrt{\frac{1 - \alpha_2}{\alpha_2}}$$

ここに、

Z_1 : 接合部深さでの軸方向地盤変位振幅

Z_2 : 接合部深さでの軸直角方向水平または鉛直地盤変位振幅

W_1 : 接合部深さでの立坑のトンネル軸方向の変位振幅

W_2 : 接合部深さでの立坑のトンネル軸直角方向の水平または鉛直変位振幅

u_1 : シールドトンネル端部の地震動によるトンネル軸方向変位

v_1, w_1 : シールドトンネル端部の地震動による水平・鉛直面内の軸直角方向変位

u_2 : 立坑接合部の地震動によるトンネル軸方向変位

v_2, w_2 : 立坑接合部の地震動による水平・鉛直面内の軸直角方向変位

θ_H, θ_V : シールドトンネル端部の地震動による水平・鉛直面内回転

θ_R : 立坑接合部の地震動による剛体回転もしくは変形角

- EA : トンネルの軸方向剛性
- EI : トンネルの曲げ剛性
- K_1 : トンネル単位長さあたりの軸方向地盤ばね定数
- K_2 : トンネル単位長さあたりの軸直角方向地盤ばね定数
- L_1 : 軸方向地盤変位をもたらす波動のトンネル軸方向の見かけの波長
- L_2 : 軸直角方向変位をもたらす波動のトンネル軸方向の見かけの波長
- α_1 : 地盤からトンネルへの軸方向ひずみ伝達率
- α_2 : 地盤からトンネルへの曲げ・せん断ひずみ伝達率
- α_E : 地盤から伸縮自由継手への変位伝達率
- α_J : 伸縮性継手の剛性による変位伝達補正率
- κ : 伸縮性継手の継手／トンネル剛性比
- K_J : 伸縮性継手のばね定数
- T : 伸縮性継手の軸力

なお、地盤変位と立坑変位が逆位相となる場合は、上記 W_1, W_2 にマイナスをつけて代入すればよい。

6. 3 耐震性の照査

- (1) レベル1地震動に対する立坑およびシールドトンネルとの接合部の照査は、要求性能Iすなわち弾性限界（降伏応力度など）に対して所定の安全率を持った許容値を対象に行うことを基本とする。
- (2) レベル2地震動に対する立坑およびシールドトンネルとの接合部の照査は、事業者が定めた要求性能と、その要求性能に対して設定した許容値を対象に行うことを基本とする。具体的な許容値については、トンネルの用途および構造形式に応じ、損傷に伴う補修の難易性を考慮して定めるのがよい。

【解説】

耐震性の照査は、立坑本体の安定ならびに部材耐力（あるいは変形性能）に加えて、シールドトンネル接合部が対象となる。

- (1) レベル1地震動に対しては、本章「6.2 応答変位法による地震時断面力および変形の計算」により得られた断面力が、弾性限界に対して所定の安全率を持った許容値以内に収まることを照査するのがよい。通常行われている部材断面の降伏応力度や地盤の極限支持力度に対して所定の安全率を持たせた許容値を用い、地震後も補修せずに施設としての機能を保持できることを照査するものである（要求性能I）。
- (2) レベル2地震動に対しては、トンネルの用途および構造形式に応じ、損傷に伴う補修の難易性を考慮して定めた許容値を設定し、本章「6.2 応答変位法による地震時断面力および変形の計算」により得られた断面力（あるいは塑性率）や変形量が許容値以内に収まることを照査するものである。

接合部に可とう性継手を設け、力の伝達を緩和し相対変位を吸収する構造を採用する場合は、レベル2地震動に対しても可とう性継手は要求性能Iを目標に設計することが望ましい。一方、可とう性継手を設けない場合は、力が集中する接合部の設計は、修復性を考慮した変形の許容値を設定することが現実的である。

ただし、構造物が修復可能であっても脱線が許されない厳しい条件にある鉄道構造物においては、接合部においても使用限界を想定した要求性能Iに相当する許容値による耐震安全性の照査が必要と考えられる。

なお、修復性には、シールドトンネルの用途および構造形式に応じて、接合部の構造的損傷に伴う浸水、漏水、土砂流入等からの復旧および損傷部材の補修の難易度を考慮するのがよい（図6.3-1参照）。修復性を考慮した設計では、接合部の形状・構造を補修のしやすさの視点で工夫することも重要である。

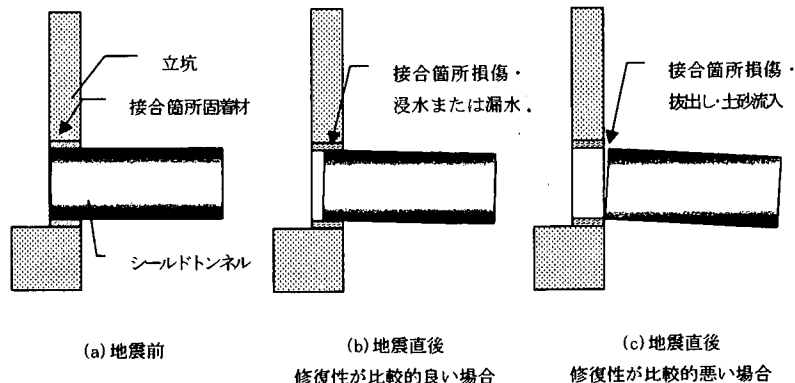


図 6.3-1 接合部の損傷と修復性

6. 4 動的解析による照査

立坑およびシールドトンネルとの接合部の耐震設計は、応答変位法に基づくことを原則とするが、複雑な地震時挙動が予想される場合は、特にレベル2地震動に対して動的解析により耐震安全性を照査することが望ましい。動的解析に当たっての留意点を以下に示す。

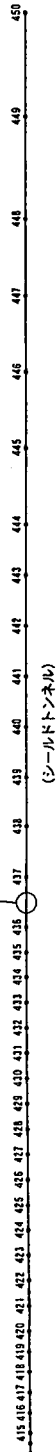
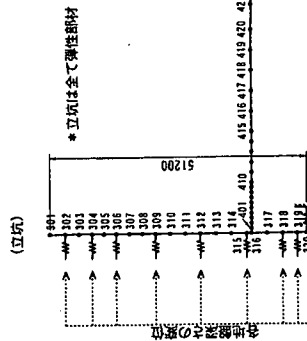
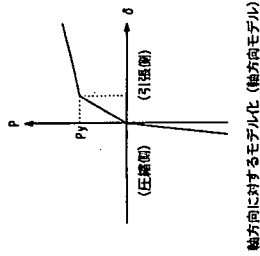
- (1) 解析の目的、解析精度に応じて適切な動的解析法を選定するのがよい。
- (2) 解析の目的に応じて、本章「6.2 応答変位法による地震時断面力および変形の計算」に準じたモデル化を行うのがよい。
- (3) 動的解析に用いる入力地震動は、第3章「3.2 設計地震動」に基づいて設定するものとする。

[解説]

- (1) 立坑およびシールドトンネルとの接合部の耐震設計は、動的な荷重を静的荷重に置き換え、本章「6.2 応答変位法による地震時断面力および変形の計算」によることを原則とするが、地震時挙動が複雑で応答変位法が不合理な場合や応答変位法の結果を詳細に検討する場合など動的解析によっても耐震安全性を照査することが望ましい。レベル2地震動に対する地震時挙動を検討する場合には、塑性化が予想される部材の非線形特性を取り入れた非線形時刻歴動的解析法が用いられる。
- (2) (3) 立坑の耐震設計において動的解析を必要とする例として、シールドトンネル接合部の応力変形状態の検討や地盤急変部における構造物の応力集中などが考えられる。周囲を地盤で囲まれた地中構造物であることから、工学的基盤面より上方の地盤をモデル化し、モデル下端より工学的基盤面相当の地震動を入力する場合が考えられる。このような場合には、地表面で規定された設計地震動を表層地盤の非線形特性を考慮して工学的基盤面における入力地震動を設定するのがよい。

複雑な地震時挙動が予想される具体的なケースとして、立坑とシールドトンネルとの接合部が考えられる。接合部付近は、剛性の異なる構造が直角に交わる箇所であり、両構造物の地震時挙動の違いにより損傷を受けやすい箇所でもある。このように複雑な地震時挙動を把握するためには、立坑とシールドトンネルおよび地盤を梁・ばね・マスモデル、あるいはFEMによりモデル化し、動的解析による検討を行うことが望ましいと考えられる。また接合部付近のシールドトンネル側に変位吸収のための可とう性継手が設けられる場合には、継手部の適切なモデル化を行い、ここに発生する最大応答値（回転量、ずれ量、ばね反力）が可とう性継手の変形や耐力に対する許容値以内に収まることを照査すればよい。

沈埋トンネルや開削トンネルで多用される動的解析手法^{7) 8)}である、立坑・シールドトンネル（接合部剛結条件）および地盤を梁・ばね・マスでモデル化し、接続部に着目した解析モデルのイメージを、図6.4-1に参考として示す。



① 構造物モデル (立坑・シールドトンネル)

K1: 構造物～地盤間ハネ
K2: 地盤間ハネ
K3: 地盤ハネ

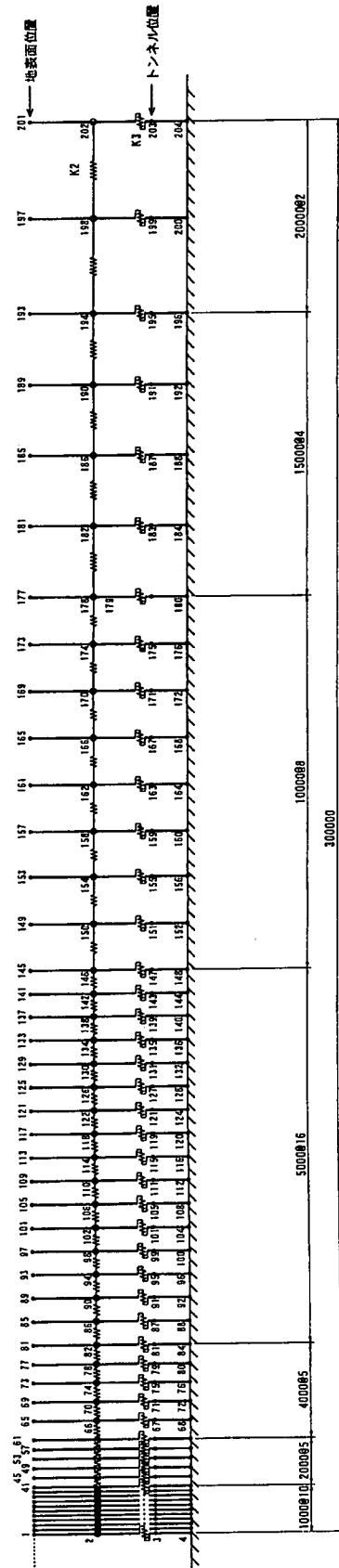


図 6.4-1 立坑・シールドトンネルの解析モデル

参考文献

- 1) 土木学会：トンネル標準示方書（シールド工法編），1996. 7
- 2) 土木学会：トンネル標準示方書（開削工法編），1996. 7
- 3) 日本水道協会：水道施設耐震工法指針・解説，1997
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅳ下部構造編，1996. 12
- 5) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編，1996. 12
- 6) 土木学会関西支部：関西における地下空間の活用と技術，1994. 8
- 7) 土木学会：トンネルライフライン-第9号，開削トンネルの耐震設計，1998. 10
- 8) 高田至郎：ライフライン地震工学，1991. 9
- 9) 竹澤請一郎・中田恒和・小池武・高田至郎：立坑・トンネル接合部の耐震設計モデルと簡易計算法，土木学会第55回年次学術講演会，2000. 9