

2016年制定 トンネル標準示方書 [シールド工法編] ・ 同解説

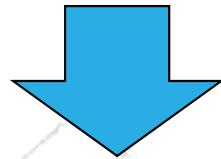
第5編 限界状態設計法

第5（限界状態設計法）分科会

第5編のおもな改訂箇所

- ・第2編との関連がわかる表を作成
- ・セグメントに関する実績調査などにより、材料の設計値、安全係数などを見直し
 - ⇒日本シールドセグメント技術協会 に協力いただき、セグメントの仕様、材料試験値、単体・継手曲げ試験などの結果から検討(2014～2015年度実施)
- ・安定性の照査の式を記載し、安定性照査時の安全係数などについて検討
- ・耐震設計について、想定地震動、設計断面(横断、縦断)、照査方法など、大幅な見直しを実施

- ・本改訂で、許容応力度法（第2編）と限界状態設計法（第5編）が併記となった。
- ・第5編のうち第2編と共通する事項は、第2編を参照し記載を省略



限界状態設計法により覆工の設計を一連で行うことを目的とし、第5編と第2編の条文の対応表を記載（p.280～ 解説表5.1.1）

第5編と第2編の対応表 (p.280 解説表5.1.1)

第5編の条文

参照する内容

第2編の条文

解説表 5.1.1 第5編の条文および第5編で省略した設計項目に対して参照する第2編の条文

第5編 限界状態設計法	参照内容	第5編に対応する第2編の条文
条文, [] は第2編を参照する項目	参照内容	
第1章 総 則	—	—
1.1 適用の範囲	—	1.1 適用の範囲
1.2 記号および用語の定義	一部第2編参照	1.2 名称
		1.3 記号
[覆工構造の選定]	第2編参照	1.4 覆工構造の選定
第2章 設計の基本	—	—
2.1 一般事項	—	1.5 設計の基本
2.2 設計耐用期間		
2.3 設計の前提		
2.4 限界値および応答値の算定		
2.5 安全係数		
2.6 修正係数		
[設計計算書]	第2編参照	1.6 設計計算書
[設計図]	第2編参照	1.7 設計図
第3章 材料の設計値	—	—
3.1 一般事項	—	3.1 材料
3.2 強度		3.2 材料の試験
3.3 応力-ひずみ曲線	—	3.3 材料のヤング係数およびポアソン比
3.4 ヤング係数		
3.5 その他の材料設計値		
第4章 作 用	—	—
4.1 一般事項	—	—

第5編の記載に加え第2編も参照

第5編では省略, 第2編参照

第2章 設計の基本

(大幅な改訂は無し)

2.1 一般事項

(1) 限界状態設計法による覆工の設計は、その使用目的に対して安全性、使用性、耐久性の確認をおこなうことを基本とし、設計耐用期間中に構造物が設定した限界状態に至らないことを確認しなければならない。

(2) シールドトンネルの限界状態は、終局限界状態、使用限界状態に区分することを原則とする。

(3) 各限界状態に対する安全性、使用性等の照査は、適切な材料の特性値、作用の特性値、安全係数、修正係数および本編で示す方法を用いて行うことを原則とする。

第2章 設計の基本

2.2 設計耐用期間

シールドトンネルの設計耐用期間は、トンネルの使用目的に応じて要求される供用期間中の覆工の経時変化、地下水や近接施工等の環境条件の変動、維持管理の方法等を考慮するために定める。

2.3 設計の前提

限界状態設計法による覆工の設計は、材料の基本的な性能および設計細目が満足され、標準的な施工方法と施工管理が行われることを前提とする。

第2章 設計の基本

2.4 限界値および応答値の算定

2.5 安全係数

2.6 修正係数

[限界値の算出]

材料強度の特性値 $f_k (= \rho_m f_n)$



材料強度の設計値 $f_d = f_k / \gamma_m$



限界値の特性値 $R(f_d)$



限界値の設計値 $R_d = R(f_d) / \gamma_b$



[応答値の算出]

作用の特性値 $F_k (= \rho_f F_n)$



作用の設計値 $F_d = \gamma_f F_k$



応答値の特性値 $S(F_d)$



応答値の設計値 $S_d = \sum \gamma_a S(F_d)$



[照 査]

$$\gamma_i \cdot S_d / R_d \leq 1.0$$

おもな改訂内容

- ・試験結果などから材料特性値を確認
コンクリートのヤング係数（変更無し）
鋼材のヤング係数（ $210\text{kN/mm}^2 \Rightarrow 200\text{kN/mm}^2$ ）
コンクリートのポアソン比（ $0.17 \Rightarrow 0.20$ ）
- ・鋼材の強度特性表などの改訂
（材料や厚さによる値を詳細に記載）
- ・ダクティルセグメントに関する記載を本文から削除
維持管理での利用に配慮し資料に記載（資料4）

- ・「荷重」から「作用」に改訂
(環境の影響等, 荷重以外の影響を含め作用とした)
- ・作用の設定は第2編と共通
地盤条件により側方土圧係数と作用係数の組み合わせに注意



セグメントの不具合(変状)などが報告されている軟弱地盤などでは特に注意

改訂の概要

- ・試験結果などから安全係数の数値を確認
- ・実務設計を考慮し、材料係数と部材係数には幅を持たせない。

一方、幅を持たせて設定した安全係数は以下の通り

- ・作用係数

地盤条件などを考慮すべきで一律の設定は困難

- ・構造解析係数

構造計算手法による差異などを考慮するため

- ・構造物係数

事業者が重要度などにより設定

第5章 安全係数

安全係数の設定方法

材料係数の場合

実験値 > 設計値 となるように設計すべき

実験値 > 設計値 = 特性値 ÷ 材料係数



材料係数 > 特性値 ÷ 実験値

上記となるように材料係数を設定した。

ここで

実験値：実際の材料が保有する強度

設計値：特性値 ÷ 材料係数

特性値：材料規格などで示される強度

部材係数等の他の係数も同様の考え方

○材料係数

解説表5.5.1 標準的な材料係数の値

限界状態	材料係数 γ_m						
	コンクリート		鉄筋	鋼材		球状黒鉛鑄鉄	ボルト
	セグメント	現場打ち		主桁縦リブ	スキンプレート		
終局限界状態	1.2	1.3	1.00	1.05	1.00	1.10	1.05
使用限界状態	1.0	1.0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

コンクリートの材料係数を材料試験結果の実績から検証

○部材係数（鉄筋コンクリート製セグメント）

解説表5.5.2

標準的な部材係数の値（鉄筋コンクリート製セグメント）

限界状態	部材係数 γ_b								
	本体部			セグメント継手			リング継手		吊手
	曲げ	軸力 (圧縮)	せん断	曲げ	軸力 (圧縮)	せん断	軸力 (引張)	せん断	
終局限界状態	1.10	1.30	1.30* ¹ 1.10* ²	1.10	1.30	1.20	1.10	1.20	1.30
使用限界状態	1.00	1.0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

鉄筋コンクリート製セグメントについて照査する部材，断面力ごとに部材係数を示した。

- ・主断面の曲げに対する部材係数：単体曲げ試験の実績から確認
- ・セグメント継手の曲げに対する部材係数：継手曲げ試験の実績から確認

○部材係数(鋼製セグメント)

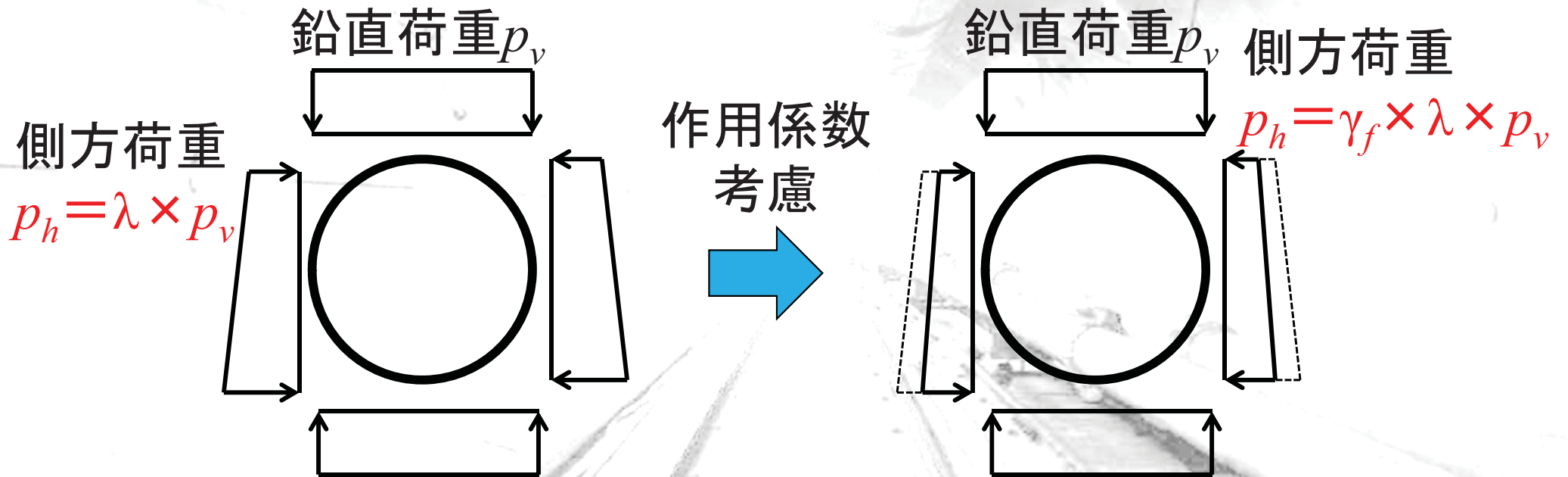
解説表5.5.3
標準的な部材係数の値(鋼製セグメント)

限界状態	部材係数 γ_b							
	本体部			セグメント継手		リング継手		吊手
	曲げ	軸力(圧縮)	せん断	曲げ	せん断	軸力(引張)	せん断	
終局限界状態	1.05	1.15	1.10	1.05	1.10	1.05	1.10	1.15
使用限界状態	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

鋼製セグメントについて照査する部材, 断面力ごとに部材係数を示した.

○作用係数の検討

側方土圧に対する作用係数について、軟弱粘性土地盤の
中小口径既設トンネルにおける荷重の推定実績から検討



λ : 側方土圧係数, γ_f : 作用係数 (0.8~1.0)

側方土圧の設計値と作用係数のイメージ

※「地中送電用シールドトンネルの維持管理に関する研究, 土木学会論文
文集F1, Vol.67」を参考に整理

改訂の概要

- 等価線形による計算方法を削除
(セグメントの適用事例はほとんどなし)
- 非線形計算を行う場合の留意事項に
関する記述を見直し

改訂の概要

- ・主断面のせん断耐力算定式を
コンクリート標準示方書と同じとした.
- ・安定の照査式を記載
セグメントの重量の実績を調査し、危険側の設計とならな
いように配慮.

改訂の概要

2012年版コンクリート標準示方書を参考に見直し.

・ひび割れ幅算定時の数値 (ε'_{csd})

旧: 150×10^{-6}

新: 150×10^{-6} (乾湿繰返し環境)

: 100×10^{-6} (常時湿潤環境) … 追加

・設計の選択幅を狭めないため, ひび割れ幅の限界値は現状のままとした.

0.005c (一般の環境)

0.004c (腐食性環境) … 削除しなかった

改訂の概要

- ・設計の流れに沿った章構成とし，内容を充実させた。
- ・『トンネル標準示方書(開削編)』と章構成，内容を調整

旧示方書との章構成の対比

2006年版 第5編 第9章 耐震設計		2016年版 第5編 第9章 耐震設計	
第236条	一般事項	9.1 一般事項	9.1.1 耐震設計の基本 9.1.2 耐震性に配慮したトンネル計画
第237条	安全係数		9.1.3 設計で想定する地震動 9.1.4 耐震性能 9.1.5 耐震設計の手順
第238条	構造解析		
第239条	安全性の照査		
		9.2 地震時作用	9.2.1 考慮すべき作用 9.2.2 設計地震動
		9.3 地震時の地盤挙動の算定	9.3.1 地盤応答解析 9.3.2 耐震設計上注意を要する地盤
		9.4 応答値の算定	9.4.1 応答値の算定の基本 9.4.2 横断方向の応答値の算定 9.4.3 縦断方向の応答値の算定 9.4.4 解析モデル
		9.5 耐震性能の照査	9.5.1 耐震性能の設計限界値と照査方法 9.5.2 安全係数 9.5.3 安定の照査
		9.6 耐震対策	

9.1.1 耐震設計の基本

9.1.2 耐震性に配慮したトンネル計画

9.1.3 設計で想定する地震動

9.1.4 耐震性能

9.1.5 耐震設計の手順

* 赤字で示す項について説明する.

9.1.1 耐震設計の基本

- ・レベル1地震動に対しては，許容応力度設計法によって行われる場合がある.
 - ・レベル2地震動に対しては，部材の塑性化を考慮できる限界状態設計法により行われている事例が増えている.
- ⇒常時の設計ならびに耐震設計に用いる地震動レベルによって，解説表 5.9.1に示す照査方法を基本とした.

解説表 5.9.1 耐震性能の照査方法

		常時およびレベル1地震動に対する設計を許容応力度設計法で行う場合	限界状態設計法で行う場合
常時の設計		許容応力度設計法*	限界状態設計法
耐震設計	レベル1地震動		
	レベル2地震動	限界状態設計法	

* 許容応力度設計法に関しては，第2編 覆工を参照.

トンネル計画にあたっては、計画地点における地震の影響に応じてトンネルの線形や覆工構造等を耐震性に配慮し定めるものとする。

耐震性に配慮すべき事項

- 1) トンネル横断方向について
- 2) トンネル縦断方向について
- 3) 液状化に対する配慮
- 4) 隣接する構造物との相互作用

9.1.4 耐震性能

P.325～

シールドトンネルの重要度等から要求される耐震性能を定める。

⇒シールドトンネルの耐震性能について、トンネルの損傷復旧の難度の観点から、耐震性能を3段階に分類し、その定義およびシールドトンネルの状態を明記した。

解説表 5.9.2 耐震性能の定義とトンネルの状態の関係

耐震性能	定義	シールドトンネルの状態
耐震性能 1	地震時に機能を保持し、地震後に補修をしないで、もしくは軽微な補修で、継続して使用可能な性能	地震後にシールドトンネルの本体および継手が弾性範囲内であり、継手部の止水性、および周辺地盤の安定性が確保されている状態。
耐震性能 2	地震後に構造物の使用に必要な耐力が保持され、構造物の機能が短時間で回復できる状態とする性能	地震後にシールドトンネルの本体および継手がせん断破壊しないとともに、トンネルが終局変形に至っておらず、耐荷能力を保持している状態であり、かつ、継手部の止水性、周辺地盤の安定が確保されている状態。ただし、補修や補強に困難が伴う部材に対しては、上記よりも厳しい限界値を設け、応答値がその範囲内にあることを確認する。
耐震性能 3	地震後に構造物が修復不可能となったとしても、構造物全体系が崩壊しない状態とする性能	地震後にシールドトンネルの本体および継手がトンネル全体の崩壊に至るような破壊を生じない状態。

9.1.4 耐震性能

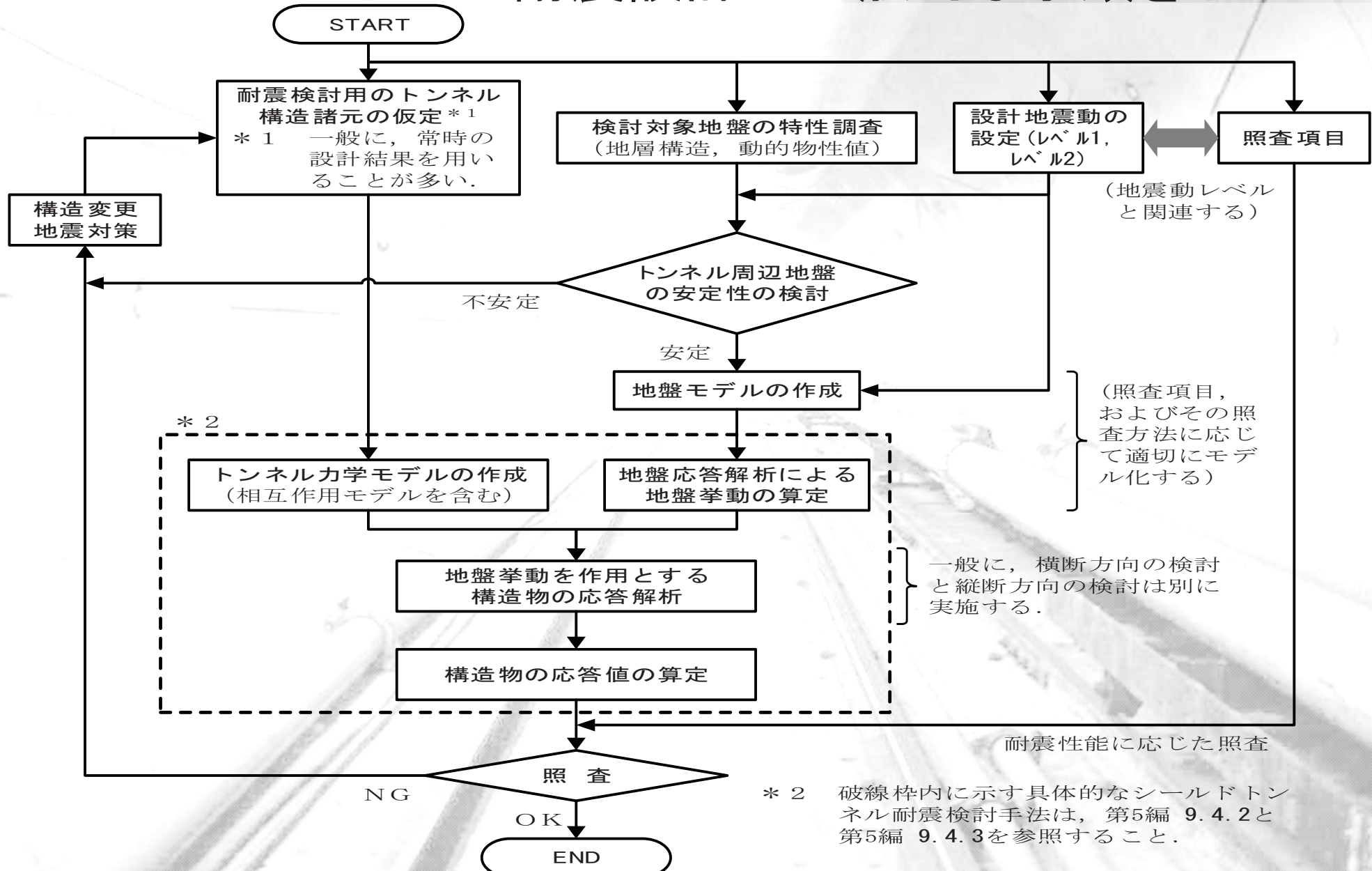
シールドトンネルの重要度等から要求される耐震性能を定める。
 ⇒シールドトンネルの使用区分を使用目的あるいは供用条件に応じて、レベル1地震動、レベル2地震動作用時の満足すべき耐震性能の例を示した。

解説 表 5.9.3 トンネルの使用目的あるいは供用条件と耐震性能の関係の例

トンネルの使用区分	使用目的あるいは供用条件	満足する耐震性能		適用例
		レベル1地震動	レベル2地震動	
Type I	①不特定多数の人間が常時使用する。 ②補修または補強の際にトンネル機能の停止や低下を伴う。 ③社会資本として当該トンネル機能がある期間にわたり停止すると社会的、経済的損失が大きい。	耐震性能1	耐震性能2	道路 鉄道
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
Type IV	①トンネル内に配管を施した後に中詰めする構造で、供用後の人間の入坑を伴わない。 ②トンネル断面内部からの補修または補強の必要性がない(充填トンネルのために一般的に入坑不可)。	耐震性能1 もしくは 耐震性能2	耐震性能3	ガス、電力、 上水道、 通信等の 中詰トンネル

9.1.5 耐震設計の手順

● シールドトンネルの耐震設計の一般的な手順を示した。



解説図 5.9.1 耐震設計の一般的な手順

9.2 地震時作用

P.328～

9.2.1 考慮すべき作用

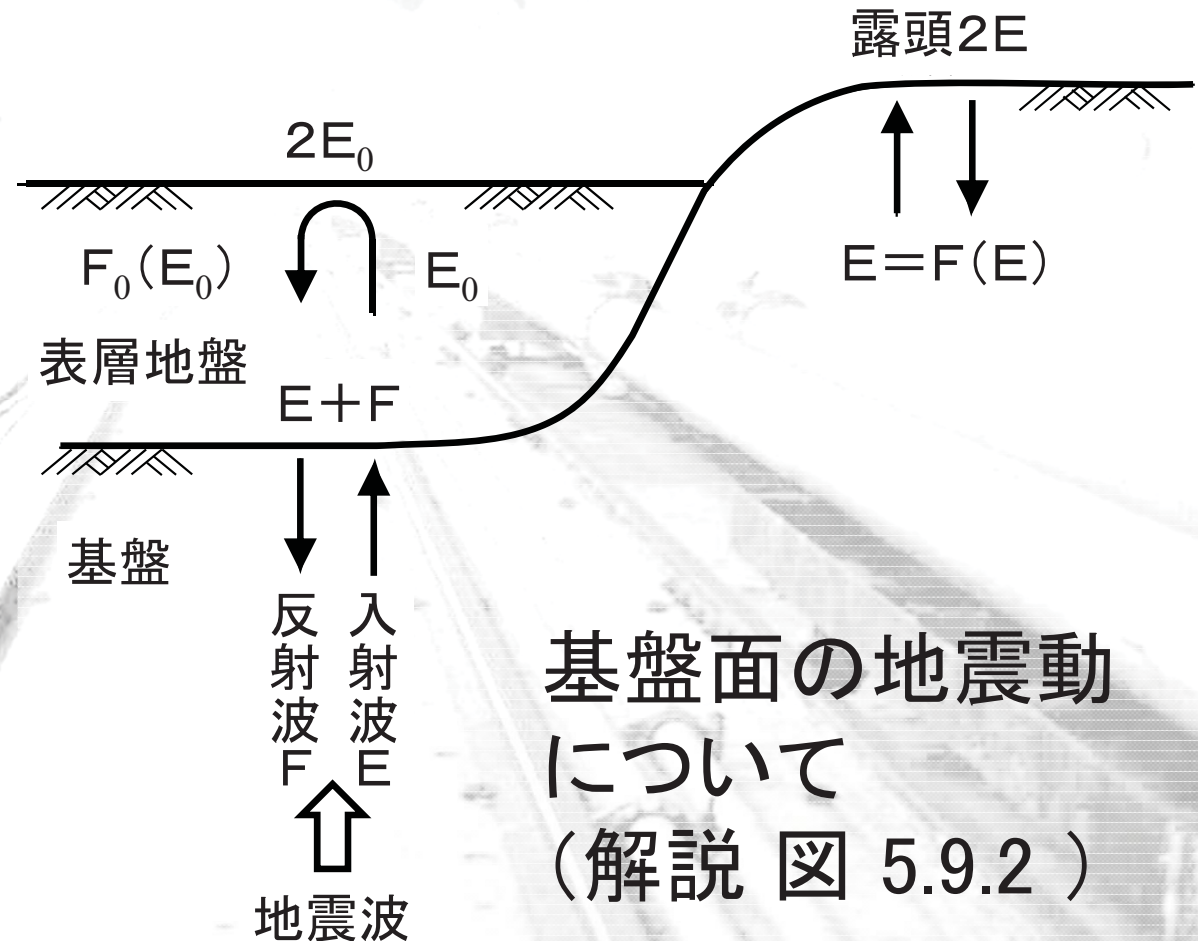
9.2.2 設計地震動

* 赤字で示す項について説明する.

9.2.2 設計地震動

耐震設計上の基盤面に対する設計地震動の設定について記述

- ・設計地震動は地盤などの特性，耐震設計法に応じて設定
⇒基盤面に入力する地震動の設定方法について記述
- ・基盤面は地盤条件や構造物の位置を考慮して設定
⇒耐震設計上の基盤面は，せん断弾性波速度「300m/s」以上



9.3.1 地盤応答解析

9.3.2 耐震設計上注意を要する地盤

- 地盤の地震応答解析手法の紹介し、代表的な動的解析手法と解析コードを記述
- 特殊地盤条件（液状化地盤，地盤急変部）における地盤挙動の扱い方法を記述

解説表 5.9.4 動的解析手法と解析コードの例

動的解析手法	解析コード
全応力1次元地震応答解析法	SHAKE, FDEL, MDM
全応力2次元地震応答解析法	FLUSH, T-DAP
有効応力1次元地震応答解析法	YUSAYUSA
有効応力2次元地震応答解析法	FLIP, LIQCA

9.4.1 応答値の算定の基本

9.4.2 横断方向の応答値の算定

9.4.3 縦断方向の応答値の算定

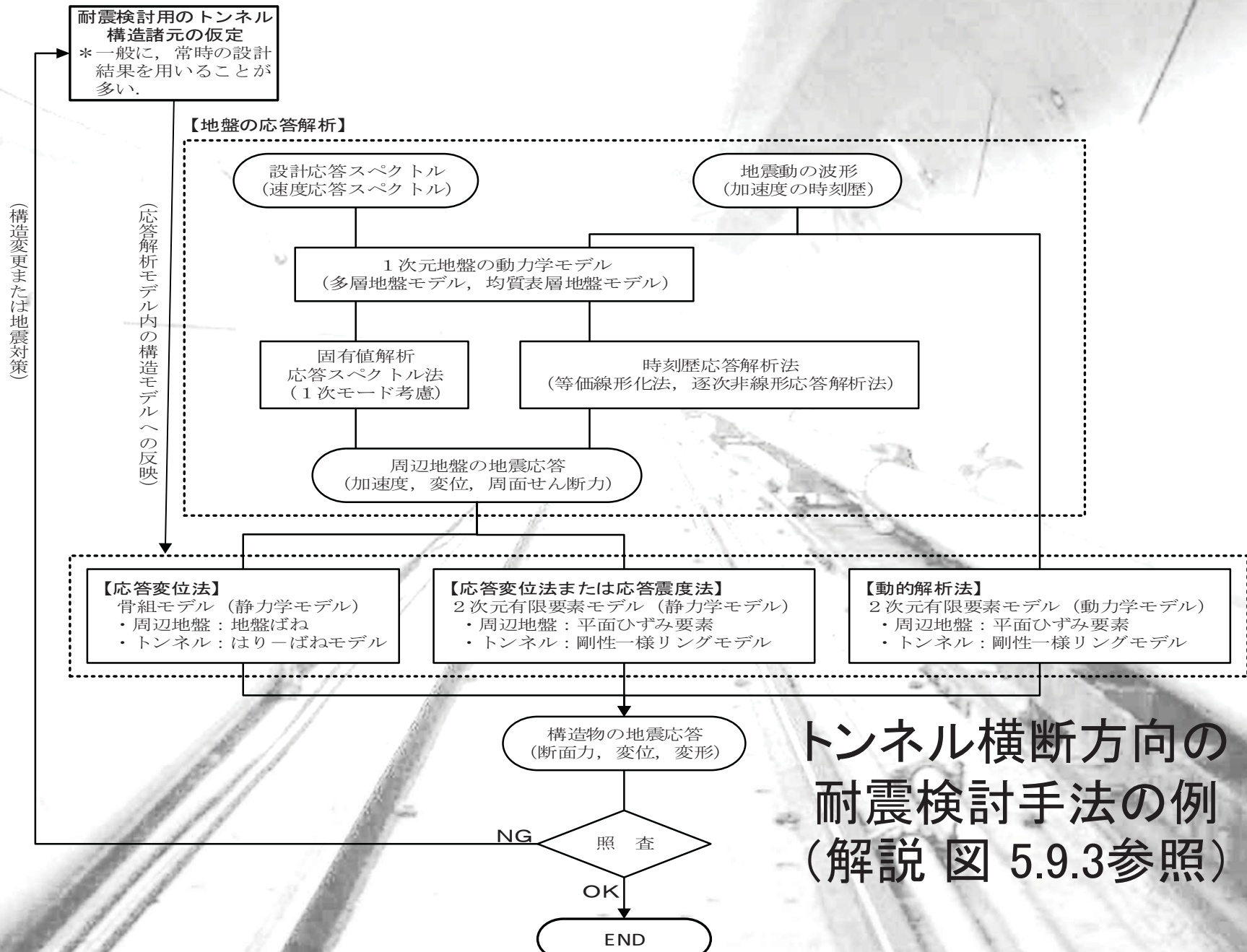
9.4.4 解析モデル

* 赤字で示す項について説明する。

応答値の算定手法について、横断方向、縦断方向に分けて定めた。

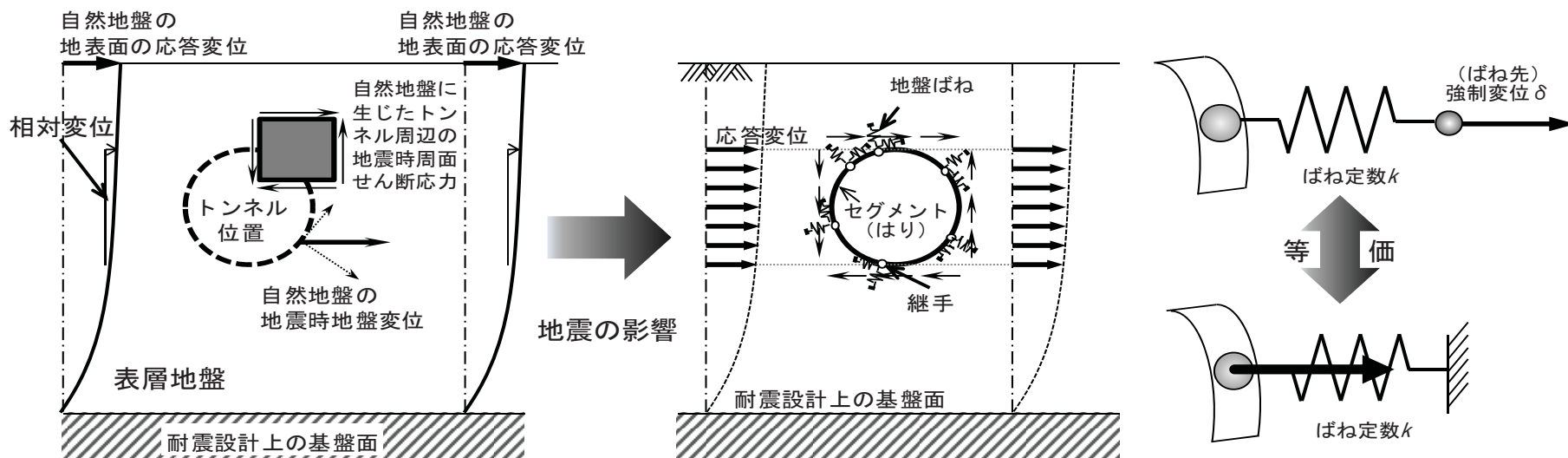
9.4.2 横断方向の応答値の算定(フロー)

- 横断方向の耐震検討手法について、体系化した図にて説明



トンネル横断方向の耐震検討手法の例 (解説図 5.9.3参照)

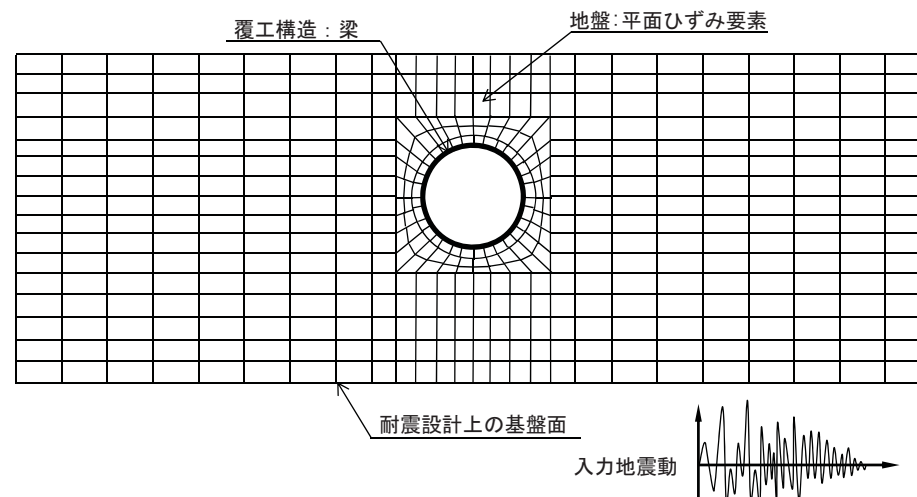
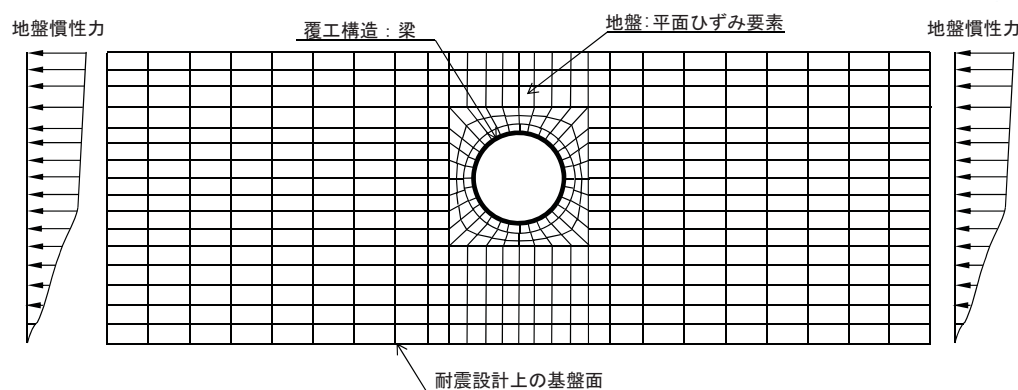
9.4.2 横断方向の応答値の算定



(a) 両側から応答変位および周面せん断力を与える方法

(b) 地盤ばねのばね先変位作用の説明図

① 応答変位法 (解説図 5.9.4)

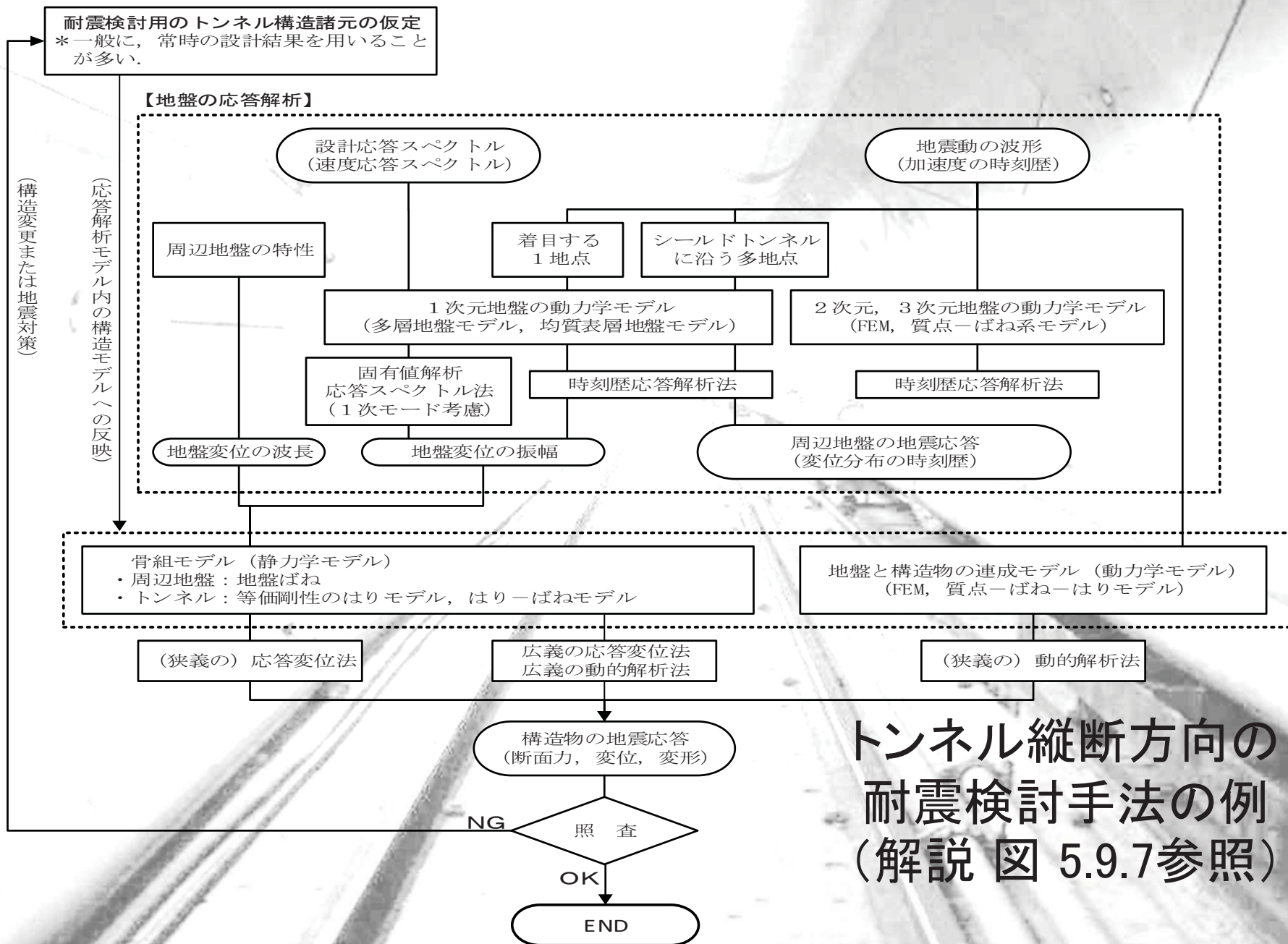


② 有限要素法による静的解析法 (解説図 5.9.5)

③ 有限要素法による動的解析法 (解説図 5.9.6)

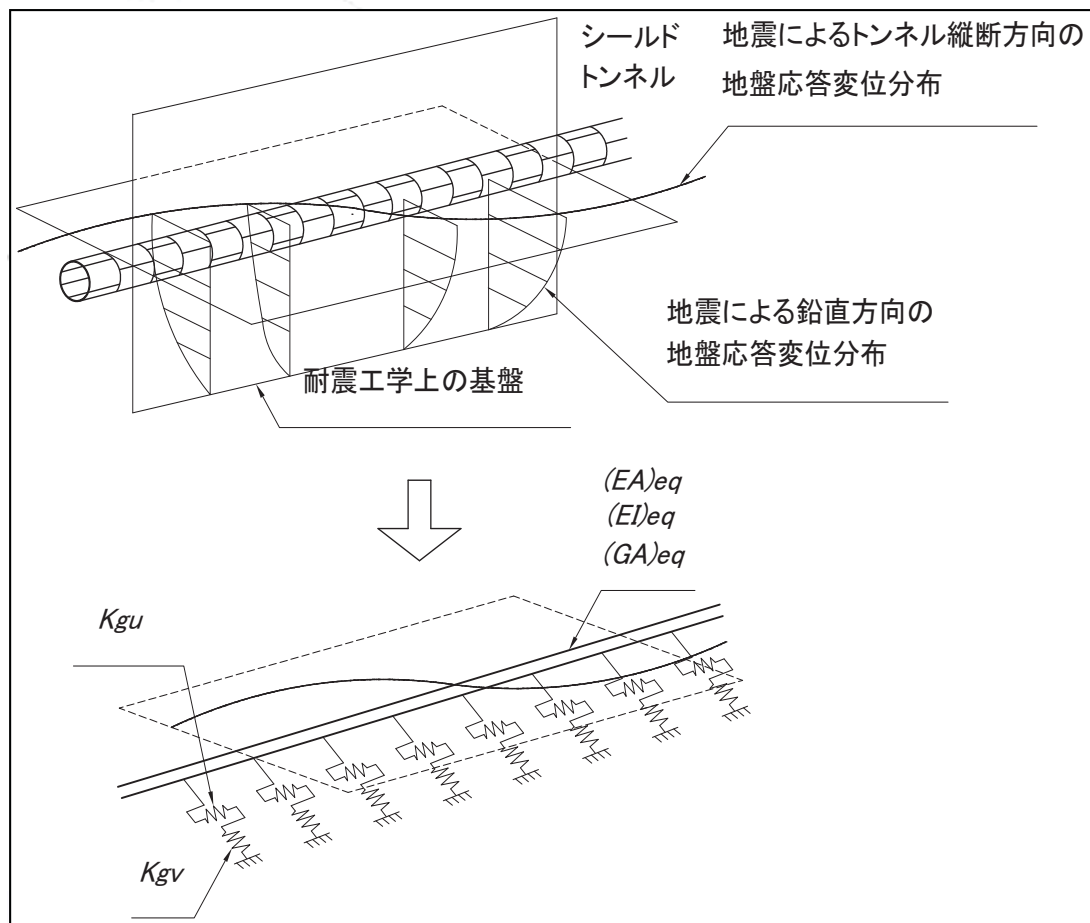
9.4.3 縦断方向の応答値の算定

- 縦断方向の耐震検討手法について、体系化した図にて説明



9.4.3 縦断方向の応答値の算定

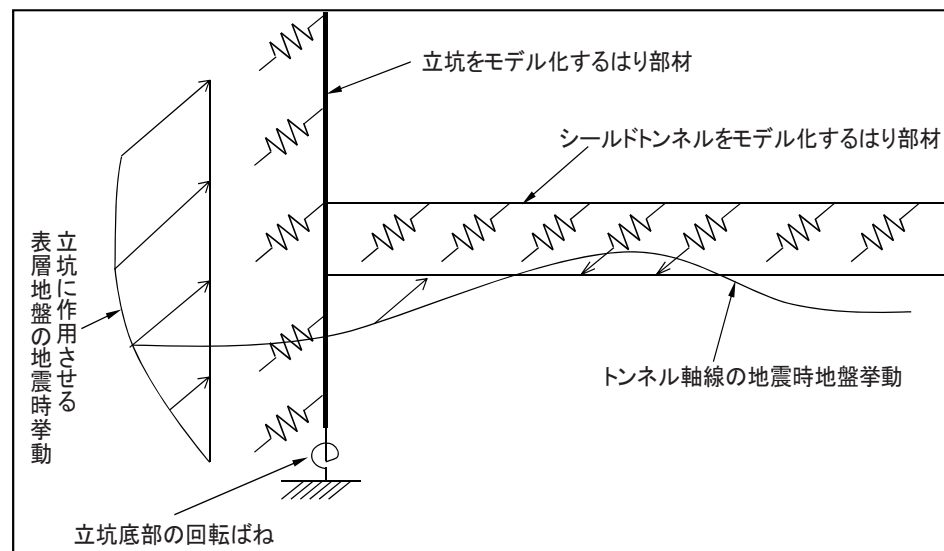
1) トンネル軸線に沿った地震時地盤変位を考慮



地震時の縦断方向の解析モデル
(解説図 5.9.8)

2) 構造変化部の特性を考慮

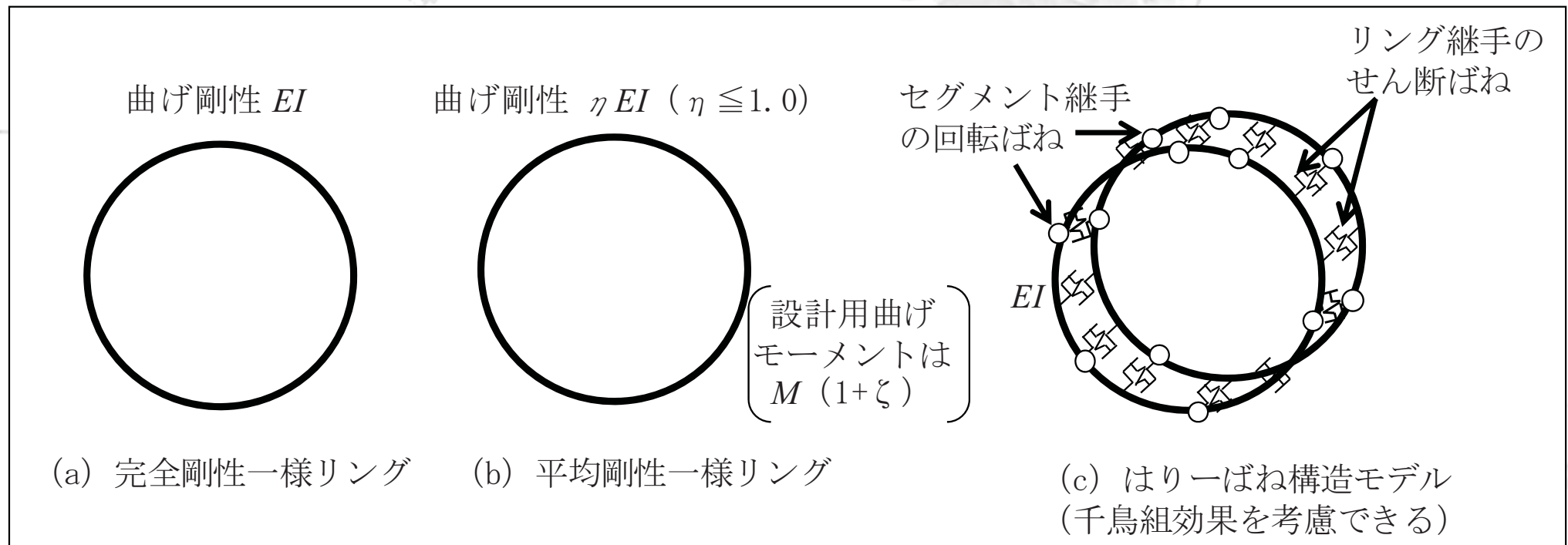
- ① 立坑接続部 (解説図 5.9.9)
- ② 分岐部 (解説図 5.9.10)
- ③ 断面変化部 (解説図 5.9.10)



立坑接続部の解析モデル
(解説図 5.9.9)

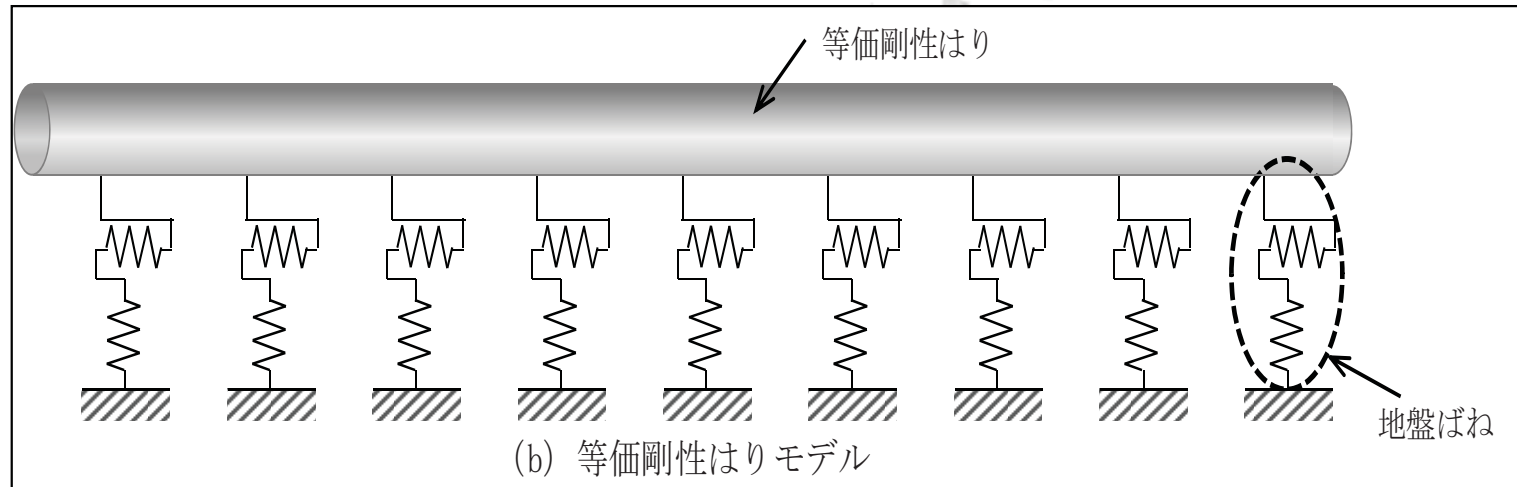
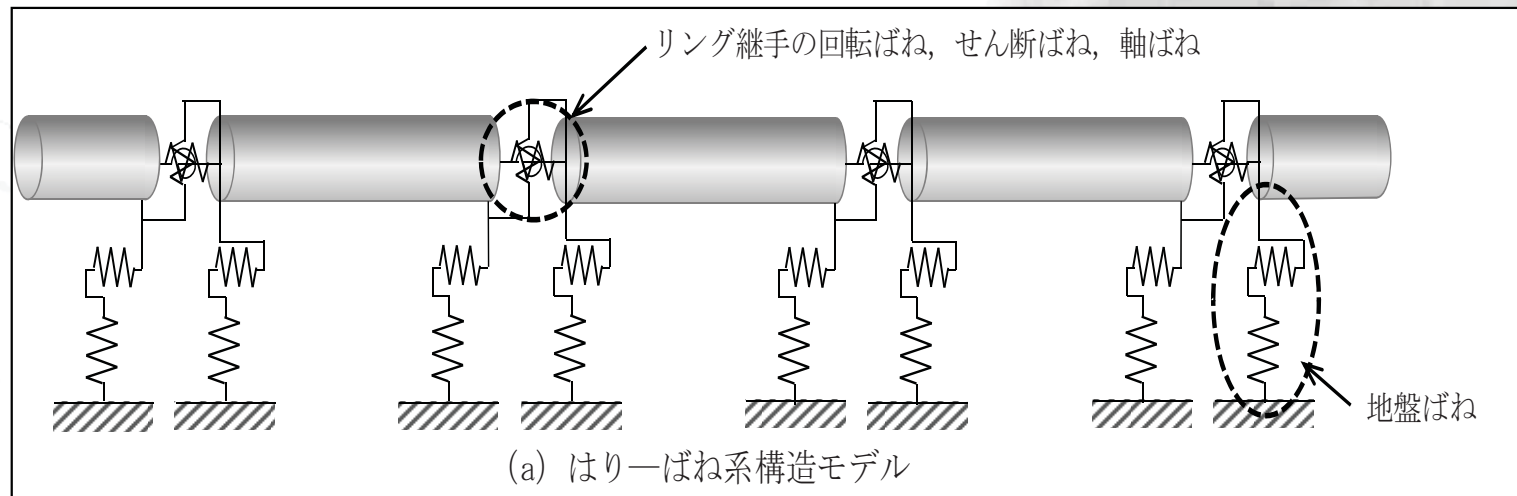
構造物や地盤の特性を考慮し解析モデルを作成

①横断方向の構造解析モデル



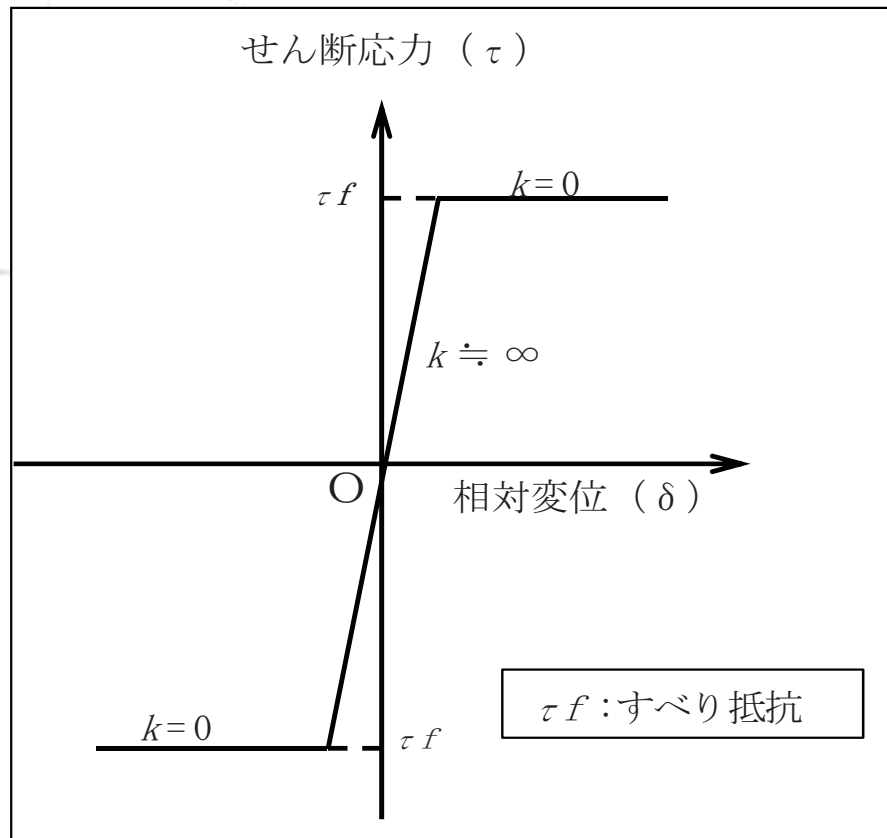
シールドトンネル一次覆工の横断方向構造解析モデル (解説図 5.9.12)

②縦断方向の構造解析モデル



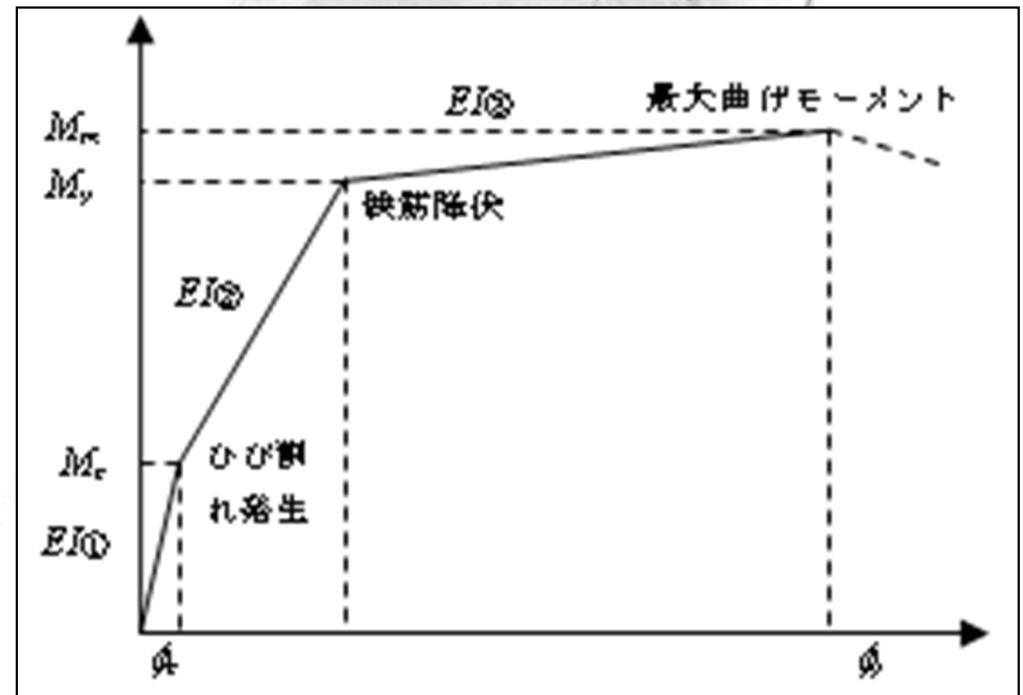
等価剛性はりモデルとはり-ばね系構造モデル
(解説 図 5.9.13)

③地盤の解析モデル



構造物と地盤のすべり
(解説図 5.9.15)

④部材のモデル化



鉄筋コンクリート部材の
部材非線形特性
(解説図 5.9.16)

9.5.1 耐震性能の設計限界値と照査方法

9.5.2 安全係数

9.5.3 安定性の照査

* 赤字で示す項について説明する。

照査項目に応じた適切な設計限界値を設定し，照査する。
 ⇒照査項目と限界値の例を横断方向，縦断方向ごとに記載

解説表 5.9.5 耐震性能1の照査項目と限界値の例(横断方向の検討)

照査内容	部材	照査項目	限界値
耐荷性能	セグメント本体	曲げモーメント，軸力	降伏応力度または降伏耐力
		せん断力	せん断耐力
	セグメント継手	曲げモーメント，軸力	降伏応力度または降伏耐力
		せん断力	せん断耐力
	リング継手	せん断力	せん断耐力
変形性能	セグメント継手	目開き量	限界目開き量 ¹

9.5.2 安全係数

地震動の特性，応答値を求める際の地盤や構造物のモデル化手法および解析の精度を考慮して定める。

⇒レベル1地震動，レベル2地震動および耐震性能に対応する標準的な安全係数を記載した。

解説表 5.9.11 標準的な安全係数の値

地震動 レベル	耐震性能		材料係数		部材係数				作用 係数	構造 解析 係数	構造物 係数	
			コンク リート	鉄筋， 鋼材， ボルト	軸力， 曲げ	せん断力		変形				
						本体部						継手部
						コンク リート	鉄筋， 鋼材					
レベル1 地震動	耐震 性能 1	応答値 および 限界値	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	
			1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	
レベル2 地震動	耐震 性能 2, 3	応答値 限界値	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	
			1.2~ 1.3	1.0~ 1.10	1.05 ~1.1	1.3	1.1	1.05 ~1.2	1.0	—	—	1.0~ 1.3

9.6 耐震対策

構造変化点や地盤の急変部は、トンネル縦断方向に大きな相対変位や断面力が発生しやすいため、必要に応じて対策を実施。

⇒具体的な耐震対策の事例を紹介。

解説 表 5.9.12 具体的な耐震対策の例

対策方法	具体的な対策
変形量の吸収	<ul style="list-style-type: none"> ・リング継手の剛性の低減(弾性ワッシャー, 可とうセグメント等) ・免震構造(セグメントの裏込めとして免震材料を注入するなど)の採用 等
部材の耐力の確保	<ul style="list-style-type: none"> ・継手の材質, 剛性, 本数の増加 ・鉄筋コンクリート製セグメントの場合, 本体の鉄筋の増加(横断方向: 主鉄筋, 縦断方向: 配力鉄筋) ・セグメント種別の変更 ・二次覆工の補強 ・セグメント幅の変更 等