

既設開削トンネルにおける横断方向の 耐震性能評価に関する一検討

Study on the Seismic Performance Evaluation of Existing Cut and Cover Tunnel
in Transverse Section

山本泰幹¹・神木剛²・山本一敏³・木谷努⁴・橋本知尚⁵

Yasumiki Yamamoto, Takeshi Kamiki, Kazutoshi Yamamoto, Tsutomu Kitani and
Tomohisa Hashimoto

¹正会員 首都高速道路株式会社 神奈川管理局 (〒221-0044 神奈川県横浜市神奈川区東神奈川1-3-4)

²正会員 首都高速道路株式会社 神奈川建設局 (〒210-0006 神奈川県川崎市川崎区砂子110-2)

³正会員 パシフィックコンサルタンツ株式会社 交通技術本部 道路構造部 (〒163-0730 東京都新宿区西新宿2-7-1 新宿第一生命ビル)

⁴正会員 パシフィックコンサルタンツ株式会社 交通技術本部 トンネル部 (〒163-0730 東京都新宿区西新宿2-7-1 新宿第一生命ビル)

⁵非会員 パシフィックコンサルタンツ株式会社 交通技術本部 道路構造部 (〒163-0730 東京都新宿区西新宿2-7-1 新宿第一生命ビル)

We reviewed how we precisely evaluate the seismic performance of transverse section of existing cut and cover tunnel and determine systematically the needs of earthquake resistant reinforcement.

Regarding the ground motion Level 2 to be taken into account in seismic design, we evaluated by utilizing a dynamic analysis method by two dimensional finite element program named “WCOMD” which considers the nonlinear property of reinforced concrete.

At the same time, for the seismic force greater than anticipated, we evaluated the failure mode of the inner wall and inner column, and for the shear failure type inner wall and inner column, we also evaluated the needs of the earthquake resistant reinforcement paying attention to such as the margin of the shear strength.

Key Words : *existing cut and cover tunnel, reinforced concrete structure, shear failure, dynamic analysis by two dimensional finite element method*

1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震以後、耐震基準が見直され、それ以前に設計された首都高速道路の神奈川地区の既設開削トンネルにおいても、供用期間中に発生する確率は小さいが大きな強度を持つ地震動（以下、レベル2地震動と記す）に対する耐震性能の照査を行う必要が生じた。新設の開削トンネルの耐震設計を行う場合には、一般に設計の便宜を考慮して、トンネルを梁でモデル化して解析を行っている。しかし、既設の開削トンネルでこの方法を適用すると、

側壁や上下床版でせん断耐力が不足する 경우가少なくない。また、地下構造物の耐震補強は、地上構造物と比較して施工が難しく、長時間にわたる通行規制は社会的影響も大きくなる。このため、できる限り精度良く合理的な耐震性能照査を行い、耐震補強の対象となる開削トンネルを選定する必要があった。

既設の開削トンネルの耐震性能については、これまで免震工法に関する検討¹⁾や耐震補強方法に関する検討²⁾が行われてきているが、耐震補強の必要性の判定方法について体系的に整理されたものはない。

本報告は、耐震補強が必要となる条件を整理し、梁モデルよりも高い精度が期待できる材料非線形性を考慮した動的解析を用いて、横断方向の耐震補強の必要性を検討したものである。検討対象は、図-1に示す形状の異なる様々な開削トンネルで、9トンネル、26断面を対象とした。これらの開削トンネルは2BOX構造と掘割構造の延長が最も長いが、分岐合流部や換気所が一体となった断面も存在し、その形状は複雑に変化している。また、トンネルの床付面の地盤条件も有楽町層や上総層で様々である。

2. 目標とする耐震性能

首都高速道路の新設を対象とした「トンネル構造物設計要領（開削工法編）」³⁾（以下、「耐震設計要領」と記す）の基本方針では、供用期間中に発生する確率が高い地震動（以下、レベル1地震動）に対して、健全性を損なわず、地震直後においても通常の供用

が可能であることを目標とする耐震性能とするとされている。また、レベル2地震動に対して、地震直後にも緊急車両の通行が可能で、補修、補強により構造物の健全性を回復し、通常の供用が可能となることを目標とする耐震性能とするとされている。通常はレベル2地震動に対する照査が支配的であり、仮にレベル1地震動で損傷したとしても、レベル2地震動に対する耐震性能が確保されていれば、著しくレベル1地震動に対する耐震性能が損なわれるわけでないため、本検討における既設の開削トンネルの耐震性能の照査では、レベル2地震動のみを対象とした。表-1に既設開削トンネルの耐震性能と照査の判断方法を示す。なお、想定地震を超える地震動や様々な不測の事態に対してもトンネルが崩壊することを回避するため、中壁、中柱にせん断破壊が生じることがないようにするのが望ましく、耐震設計要領でも曲げ破壊型とするのが望ましいとされている。しかし、既設の開削トンネルでは、中壁、中柱が必ずしも曲げ破壊型になっているとは限らない。

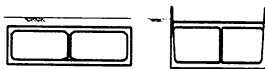
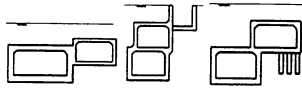
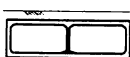
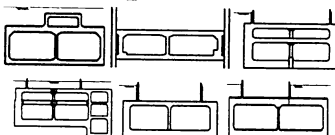
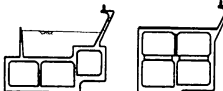
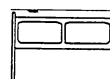
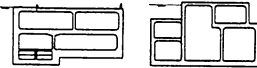
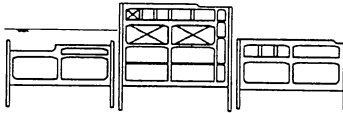
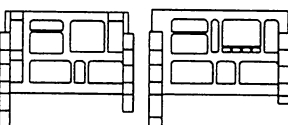
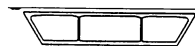
トンネル名	検討断面形状	床付け面の地盤条件	トンネル名	検討断面形状	床付け面の地盤条件
HY トンネル		洪積層	MZ トンネル		洪積層
		半断面 洪積層		MK トンネル	
S トンネル		沖積層	NT トンネル		洪積層
HZ トンネル		沖積層	NK トンネル		沖積層
HB トンネル		沖積層			洪積層
			T トンネル		洪積層

図-1 検討対象トンネル断面図

このような観点から、想定地震を超える地震動に対しても検討を行い、中壁、中柱がせん断破壊してトンネルが崩壊しないことと、地震後には補修、補強により建設当初の機能回復が可能であることを目標にして、耐震性能を照査することとした。

3. WCOMDの適用性の検証とモデル化

(1) 解析の概要

開削トンネルの横断方向の耐震検討方法には応答変位法、応答震度法、動的解析があるが、より高い精度が期待できる動的解析を用いることとした。また、開削トンネルのモデル化の方法として、梁モデルと材料非線形を考慮した FEM モデルがあるが、後述するように、周辺を地盤に拘束され分布荷重を受けるという開削トンネルの条件において、より高い精度のせん断耐力の評価を期待できる材料非線形を考慮した FEM モデルを用いることとした。

解析には、これらの条件を満足する解析コードの中で多方向非直交固定ひびわれモデルに基づく WCOMD⁴⁾を用いて、2次元動的 FEM 解析を行った。WCOMD の適用にあたっては、破壊形態と耐力が判明している鉄筋コンクリートのテストモデルを用いてキャリブレーションを行い、適用性を検証した。なお、地盤の構成則には大崎モデルを用いた。

(2) WCOMDの適用性の検証とモデル化の条件設定

WCOMD の既設開削トンネルの解析に対する適用性は、兵庫県南部地震において崩落した開削トンネルの中柱のせん断破壊を再現解析例^{5),6)}や、大型せん断土層を用いた振動台実験の再現解析例⁷⁾等で確認されている。

表-1 既設開削トンネルの耐震性能と照査の判断方法

耐震性能の観点	目標とする耐震性能	
	レベル2地震動	想定地震を超える地震動(中壁、中柱を対象)
耐震設計上の安全性	トンネルが崩壊しない。	トンネルが崩壊しない。
耐震設計上の供用性	地震直後にも緊急車両の通行が可能である。	—
耐震設計上の復旧性	補修、補強により建設当初の機能回復が可能である。	補修、補強により建設当初の機能回復が可能である。

本検討では、信頼性の高い鉄筋コンクリート部材のモデル化を行うために、破壊形態と耐力が判明しているテストモデルを用いてキャリブレーションを行った。モデル化における着目点は、部材の要素分割、無筋部および有筋部の要素設定である。テストモデルには、原子力マニュアル⁷⁾に示されている単純梁のテストモデルを用いることとした。せん断スパン比、せん断補強筋比、軸力の有無、荷重条件が異なる5ケースのテストモデルを用いた。ケース1から4のモデル図を図-2に、ケース5のモデル図を図-3に、それらの構造諸元を表-2に示す。検討の結果は表-3に示すとおりであり、次のことが言える。これにより、以下の条件でモデル化を行うこととした。

- a) ケース 1,2 の結果より、無筋コンクリート部分については引張軟化係数 c を標準値の 0.4 とした RC 要素とすると精度が悪くなる。したがって、無筋コンクリート部分には、無筋コンクリート要素を用いることを標準とした。
- b) ケース 4,5 の結果より、有筋部分について引張軟化係数 c を標準値の 0.4 とした方が、要素ごとに設定するよりも安定した精度を得られる。したがって、有筋部分については RC 要素を用い、引張軟化係数を標準値である 0.4 とすることを標準とした。
- c) ケース 2 の結果より、要素分割は 3 分割よりも 4 分割とした方がやや高い精度を期待できる。よって、部材高さ方向の要素分割は、4 分割を標準としてモデル化した。

表-2 テストモデルの構造諸元

	case1	case2	case3	case4	case5
スパン幅 (m)	0.50	1.00		0.50	1.00
部材幅 (m)		1.00			0.16
部材厚 (m)			0.30		
有効部材厚 (m)		0.25			0.26
コンクリート圧縮強度 (N/mm ²)		24.0			35.0
主鉄筋降伏強度 (N/mm ²)		350.0			511.0
せん断補強筋降伏強度 (N/mm ²)		—		350.0	332.0
引張鉄筋比		0.030			0.035
せん断補強筋比		—		0.005	0.038
軸力比	—		0.100	—	0.100

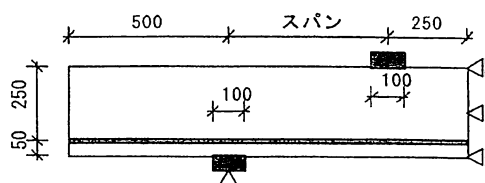


図-2 集中荷重を受ける単純梁モデル（ケース 1～4）

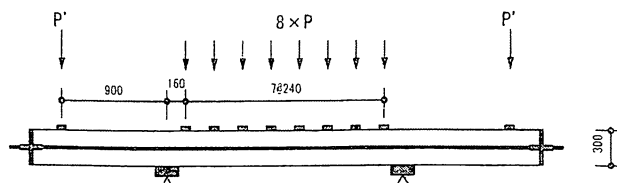


図-3 集中荷重を受ける単純梁モデル（ケース 5）

表-3 テストモデルを用いたキャリブレーション結果

case	要素 分割数	無筋部分の モデル化	主鉄筋だけの部分の モデル化	せん断補強鉄筋 だけの部分の モデル化	主鉄筋+せん断 補強鉄筋の部分の モデル化	解析で求まる せん断耐力 (kN)	標準となる せん断耐力 (kN)
case1-1	4	RC (C=0.4)	RC (C=0.4)	—	—	734.19	475.00
case1-2	4	無筋コンクリート	RC (C=0.4)	—	—	497.76	
case1-3	4	RC (要素ごと設定)	RC (要素ごと設定)	—	—	423.78	
case2-1	3	無筋コンクリート	RC (C=0.4)	—	—	361.38	324.00
case2-2	4	RC (C=0.4)	RC (C=0.4)	—	—	409.80	
case2-3	4	無筋コンクリート	RC (C=0.4)	—	—	346.64	
case2-4	4	RC (要素ごと設定)	RC (要素ごと設定)	—	—	333.51	
case3-1	4	無筋コンクリート	RC (C=0.4)	—	—	351.18	350.00
case3-2	4	RC (要素ごと設定)	RC (要素ごと設定)	—	—	335.59	
case4-1	4	—	—	RC (C=0.4)	RC (C=0.4)	833.34	855.00
case4-2	4	—	—	RC (要素ごと設定)	RC (要素ごと設定)	579.96	
case5-1	4	—	—	RC (C=0.4)	RC (C=0.4)	286.40	356.00
case5-2	4	—	—	RC (要素ごと設定)	RC (要素ごと設定)	194.40	

□ 本検討で標準とする条件を設定したケース

d) 分布荷重および軸力が作用するケース 5 のカルバートに近い条件では、標準となるせん断耐力に対して 2 割程度安全側のせん断耐力となっている。

(3) WCOMDと棒部材式のせん断耐力の比較

表-4は、表-2に示したケース2およびケース5のテストモデルを対象に、WCOMDの解析で求められたせん断耐力とコンクリート標準示方書の棒部材式で算出したせん断耐力との比較を行ったものである。なお、耐震設計要領における梁モデルのせん断耐力式は、コンクリート標準示方書の棒部材式と同じである。

表-4 より、以下のことが言える。

- WCOMD の解析で求められたせん断耐力は、棒部材式により求めたせん断耐力と比べると、ケース 2 において約 1.7 倍、ケース 5 において約 3.3 倍となっている。
- 棒部材式において安全係数を 1.0 とすることで、せん断耐力が 3～4 割増加する。
- 梁モデルの荷重条件が集中荷重のケース F と線形被害則を用いて分布荷重相当のせん断耐力を算出したケース G を比較すると、分布荷重相当のケース G で求められたせん断耐力のほうが 5 割弱大きい。

表-4 せん断耐力の比較結果

テストモデル のケース	検討 ケース	荷重	せん断 耐力式	部材係数		材料 係数	構造物 係数	せん断 耐力 (kN)	備考
				コンクリート	鉄筋				
ケース2 (集中荷重)	-	集中荷重	原子力マニュアルに記載されているせん断耐力					324.00	仮の真値
	ケースA	集中荷重	WCOMDの解析で求められたせん断耐力					346.64	
	ケースB	集中荷重	棒部材式	1.30	1.15	1.30	1.00	207.33	耐震設計 要領のせん 断耐力式
	ケースC	集中荷重	棒部材式	1.00	1.00	1.00	1.00	294.17	
ケース5 (分布荷重)	-	分布荷重	原子力マニュアルに記載されているせん断耐力					356.00	仮の真値
	ケースD	分布荷重	WCOMDの解析で求められたせん断耐力					286.40	
	ケースE	集中荷重	棒部材式	1.30	1.15	1.30	1.00	87.74	耐震設計 要領のせん 断耐力式
	ケースF	集中荷重	棒部材式	1.00	1.00	1.00	1.00	111.53	
	ケースG	分布荷重	棒部材式 ダイヤグラム式	1.00	1.00	1.00	1.00	162.17	線形被害則 の適用

以上より、梁モデルの照査で用いたせん断耐力は、WCOMD の解析で求められたせん断耐力と比べてかなり安全側の値であり、その要因は、安全係数の違

い、集中荷重と分布荷重の荷重条件の違い、解析方法の差であることがわかる。

(4) せん断耐力の余裕度について

WCOMDによる検討は精度の高い照査方法であるが、入力地震動、地盤条件、材料特性のばらつき、施工精度や劣化を含めた構造条件等の検討条件は不確定性を含んでおり、耐震設計要領で規定されている梁モデルと同等の一定の安全代（余裕度）を確保することが望ましい。せん断破壊に対する余裕度を確保する方法として、構造物に発生する変形が想定地震時の1.5倍程度となる入力地震動を用いて検討を行った。その理由は、表-4より、耐震設計要領に準拠して算出した梁モデルのせん断耐力は、部分安全係数の組み合わせにより、結果として1.3～1.4程度の安全係数が見込まれているからである。

4. 横断方向の耐震補強の必要性の判定方法

(1) 横断方向の耐震補強の必要性の判定手順

図-4に横断方向の耐震補強の必要性の判定手順を示す。この判定の方針は以下のとおりである。また、(2) および (3) に、図-4の各検討の概要を示す。

a) 照査1：WCOMD動的解析による耐震性能の照査

想定するレベル2地震動に対するWCOMD動的解析で、耐震性能が確保されていないと判定された断面は、耐震性能が不足する部材に対する耐震補強の実施を検討する。

b) 照査2：中壁、中柱の破壊形態の判定

照査1でOKと判定されたトンネルにおいても、中壁、中柱のせん断破壊はトンネル全体の崩壊につながる可能性があるため、想定地震を超える地震が発生するような不測の事態に備え、曲げ破壊型とすることが望ましい。したがって、曲げ破壊型である場合には、耐震補強の必要はないと判定する。

c) 照査3：WCOMD静的解析による中壁、中柱が軸力保持能力を喪失した場合の検討

照査2において中壁、中柱がせん断破壊型であると判定された場合でも、中壁、中柱が軸力保持能力を喪失したときに内空を保持できれば、耐震補強の必要はないと判定する。

d) 照査4：中壁、中柱のせん断耐力の余裕度の検討

照査3において内空を保持できないと判定された場合、中壁、中柱のせん断耐力に十分に余裕がある場合は、耐震補強の必要はないと判定する。せん断耐力に余裕がない場合は、耐震補強の実施を検討する。

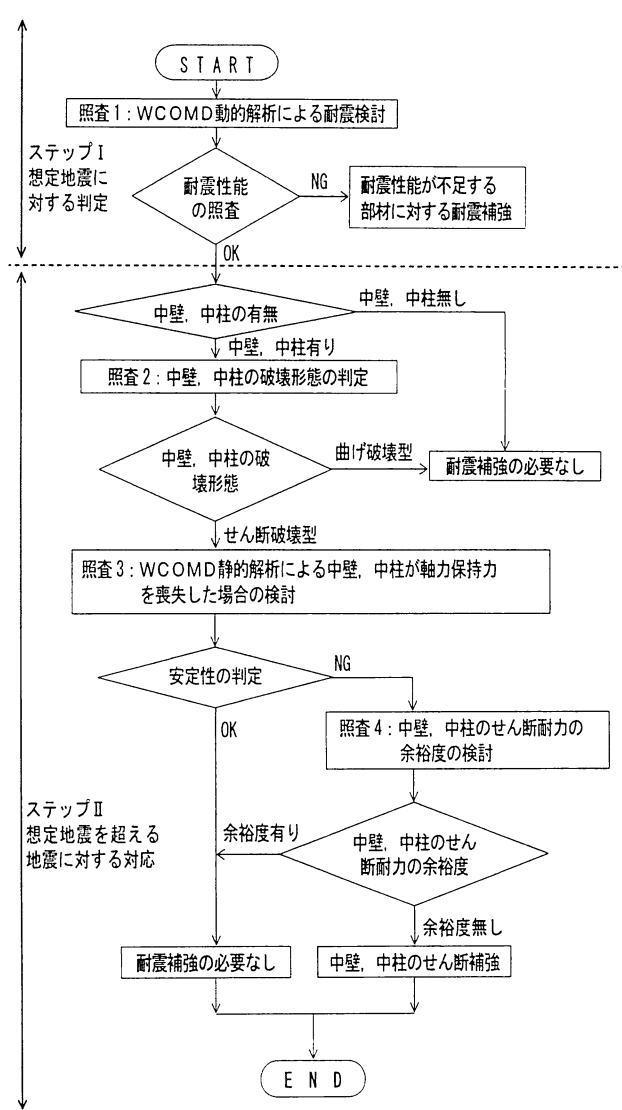


図-4 横断方向の耐震補強の必要性の判定手順

(2) 想定地震に対する判定

a) WCOMD動的解析による耐震性能の照査（照査1）

想定するレベル2地震動に対して、WCOMDを用いて動的解析を行い耐震性能を照査する。WCOMDでは、各要素の積分点ごとに表-5の判定指標で評価することが標準となっている。この判定指標で「破壊」と判定されなければ、後述するように平均圧縮ひずみが1%以下で、大規模なはく離やはく落は発生せず、せん断ひびわれは部材耐荷力の保持されるレベルであるため、損傷は限定的な範囲に留まる。つまり、表-1のレベル2地震動の「耐震設計上の供用性」、「耐震設計上の復旧性」を満足することになる。当然、表-1のレベル2地震

表-5 照査1:WCOMD動的解析による耐震検討の判定指標

損傷程度の分類	定義		損傷状態	レベル2 地震動の耐震 性能の観点 との対応
□ 軽微な損傷	引張ひずみ $>0.1\%$		ひびわれが発生し、少し開いた状態。樹脂注入等のひびわれ補修が必要な状態。	—
■ 重度の損傷	圧縮ひずみ $>1.5 \varepsilon_{Peak}$		圧縮方向の耐荷力がピークを超えて低下し始めている状態。圧縮ひずみは約0.3%。コンクリート打換えなどの補修が必要な状態。	—
■ 破壊	圧縮	圧縮ひずみ $>1.0\%$	コンクリートが圧壊した状態。	この状態に至らなければ、耐震設計上の供用性、復旧性を十分に確保できる。(安全性も確保できる)
	引張	引張ひずみ $>3.0\%$	コンクリートが引張られて鉄筋が伸び、大きく変形した状態。ただし、鉄筋破断を意味するものではない。	
	せん断	せん断ひずみ $>2.0\%$	せん断ひびわれが進展し、耐荷力が急激に低下する状態。	

動の「耐震設計上の安全性」も満足することになる。

なお、これらの判定では、すべての積分点のうち一つでも破壊の判定の基準を超えれば「破壊」と判定される。しかし、特定の積分点で「破壊」と判定されても、破壊領域が局部的で部材内で広がりを持たなければ、部材としての「破壊」にはならないため、表-5に示す判定指標は、表-1の十分条件となっている。

表-5に示す判定基準を満足できない場合には、部材としての損傷を評価するため、解析が途中で終了することなく最後まで実行できるように積分点ごとの破壊の判定の基準を引き上げ、せん断破壊および曲げ破壊の発生の有無、上下床版の鉛直方向の相対残留変位量を確認することとした。この場合の判定指標を表-6に示す。表-6において、解析が途中で終了する場合や斜めせん断ひびわれが発生する場合は、構造全体として不安定となる可能性があるため、これらを耐震設計上の安全性

表-6 照査1:WCOMD動的解析において部材としての損傷評価を行う場合の判定指標

照査項目	判定基準	レベル2地震動の 耐震性能の観点 との対応
構造全体系としての安定性	解析が途中で終了することなく最後まで実行できる。	耐震設計上の安全性の判定
せん断破壊の有無	連続する斜めせん断ひびわれの発生が見られない。(必要に応じてひずみの値によりクラックの連続性を確認する。)	耐震設計上の安全性の判定
曲げ破壊の有無	平均圧縮ひずみが、原子力マニュアルの限界状態の判定指標(圧縮縁コンクリートのひずみが1%)により、大規模なはく離、はく落がないことを確認する。	耐震設計上の供用性の判定
残留変位	上下床版の鉛直方向の相対変位が10cm以下程度である。	耐震設計上の復旧性の判定

の判定基準とした。また、原子力マニュアルによると、部材の平均圧縮ひずみが1%以下であれば大規模なはく離、はく落が発生しないことから、これを耐震設計上の供用性の判定基準とした。また、兵庫県南部地震により被災した上沢駅の事例では、上下床版の鉛直方向の相対変位が2~3cm程度であれば復旧を行っているため⁸⁾耐震設計上の復旧性の判定基準を10cm程度以下とした。

図-5は、HBトンネルNo.262+15断面に対するWCOMD動的解析の解析モデル図の例、図-6は同断面に対して表-5による評価を行った例である。右下隅角部のハンチにおいて「破壊」が発生しているが、表-6により部材としての損傷評価を行ったところ、平均圧縮ひずみは0.8%であり、曲げに対する照査はOKであった。また、図-7は、同断面のせん断耐力の余裕度を確認するために構造物の変形が想定地震の1.5倍程度となる入力地震動を用いた検討のうち、せん断破壊の有無の確認例である。部材を貫通する斜めせん断ひびわれの発生は見られず、せん断耐力の余裕度が確保されていることが確認できる。

なお、比較のためHBトンネルNo.258+15断面の上床版を対象とし、強制的にせん断破壊させた場合の斜めせん断ひびわれの例を図-8に示す。せん断破壊させるための措置として、対象部材がせん断破壊型となるようにせん断補強筋量を0.1倍、部材下端の主鉄筋量を6倍に変えて、トンネル上の建築

物基礎位置（矢印の位置）に集中荷重を与え、せん断破壊が生じて解析が終了するまで載荷を行った。図-8より、部材を貫通するように斜めせん断ひびわれが連続して発生しているのが確認できる。

対して、中壁、中柱の破壊形態を判定する。(1)式を満足する場合、曲げ破壊型と判定する。図-9に曲げモーメント分布模式図を示す。

$$V_d = M_d / l_a \leq V_{yd} \quad (1)$$

(3) 想定地震を超える地震に対する対応

a) 中壁、中柱の破壊形態の判定（照査2）

照査1においてOKと判定されたすべての断面に

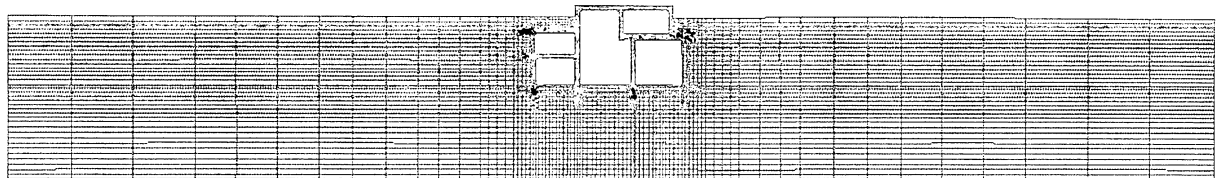


図-5 WCOMD 動的解析モデルの例（HB トンネルNo.252+15 断面）

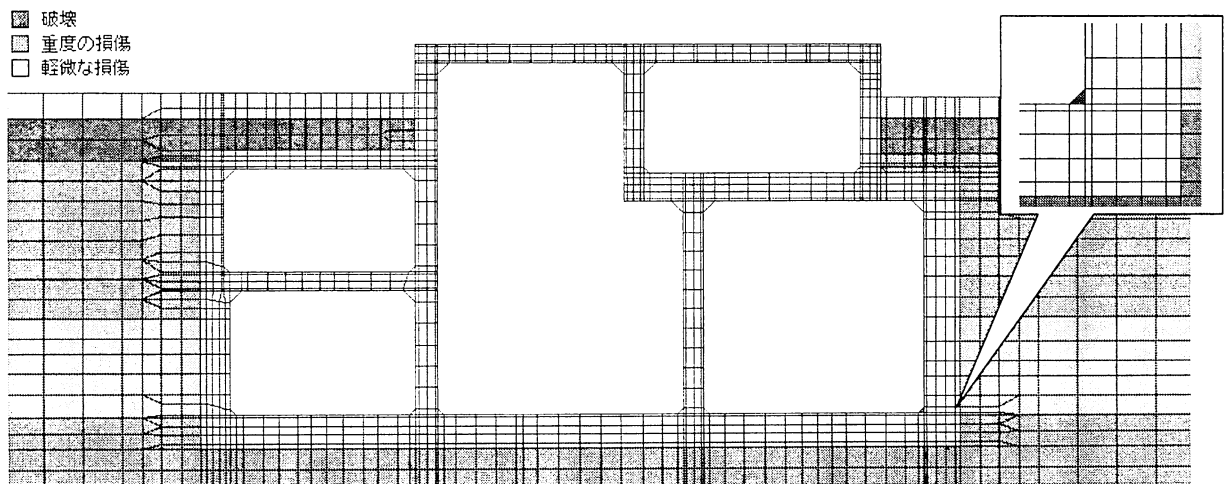


図-6 WCOMD 動的解析 表-5 による照査の例（HB トンネルNo.262+15 断面）

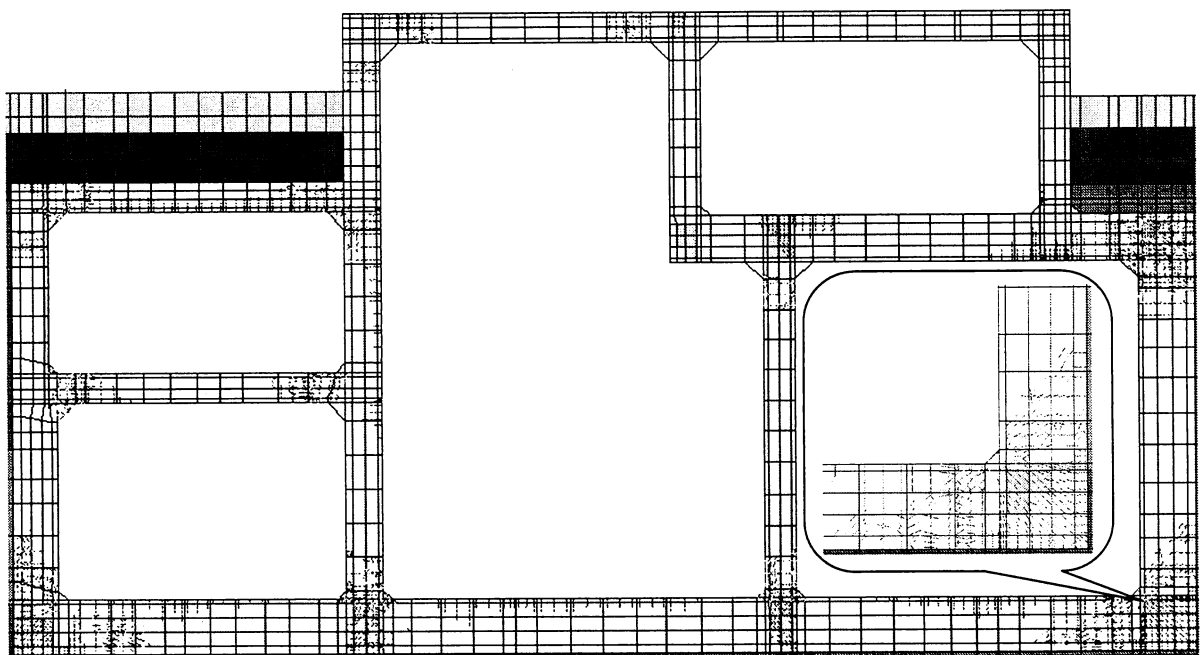


図-7 せん断耐力の余裕度の確認例 ひびわれ図（HB トンネルNo.262+15 断面）

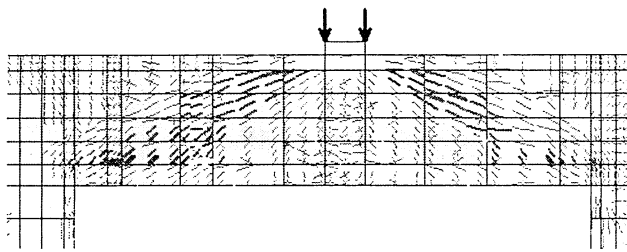
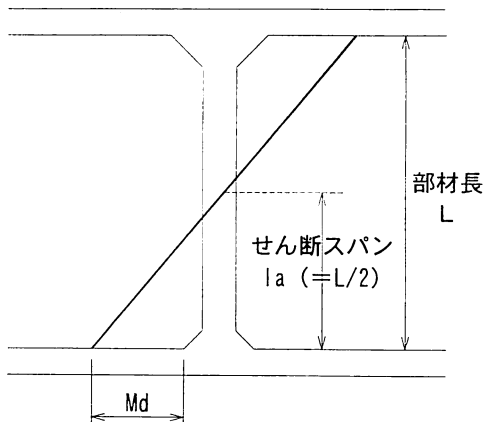


図-8 せん断破壊を発生させた場合の斜めせん断ひびわれの発生例 (HBトンネルNo.258+15断面の上床版)



V_{yd} : 中壁、中柱のせん断耐力
V_d : 中壁、中柱の終局曲げモーメント発生状態における発生せん断力
M_d : 中壁、中柱の曲げ耐力
l_a : せん断スパン

図-9 中壁、中柱の破壊形態の判定における曲げモーメント分布模式図

b) WCOMD静的解析による中壁、中柱が軸力保持能力を喪失した場合の検討 (照査3)

中壁、中柱の破壊形態判定において「せん断破壊型」と判定された部材を有する断面を対象に、想定地震を越える地震動に対し、中壁、中柱が軸力保持能力を喪失した場合の検討を行う。これは、「せん断破壊型」と判定された部材を取り除いた状態で、常時荷重を作用させたWCOMDによる静的解析を実施し、表-7に示す判定指標で判定する。

図-11は、照査1で用いた図-10に示すSトンネルNo.205+5断面の解析モデル図に対して、照査3を行ったときの变形図の例を示したものである。上下床版の鉛直方向の相対変位は、23.79cmとなっており、復旧性がNGとなっている。

表-7 照査3：中壁、中柱が軸力保持能力を喪失した場合の検討における判定指標

照査項目	判定基準	レベル2地震動の耐震性能の観点との対応
構造全体系としての安定性	解析が途中で終了することなく最後まで実行できる。	耐震設計上の安全性の判定
せん断破壊の有無	連続する斜めせん断ひびわれの発生が見られない。(必要に応じてひずみの値によりクラックの連続性を確認する。)	耐震設計上の安全性の判定
残留変位、損傷	「軽微な損傷」以下である。 上下床版の鉛直方向の相対変位が10cm程度以下である。	耐震設計上の復旧性の判定

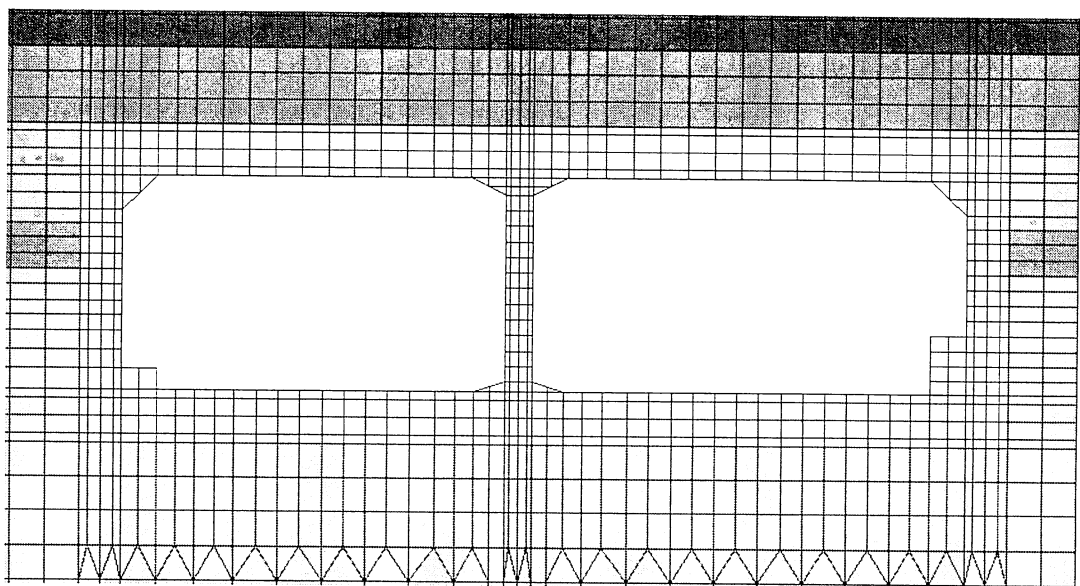


図-10 WCOMD 動的解析モデル図 (S トンネルNo.205+5 断面)

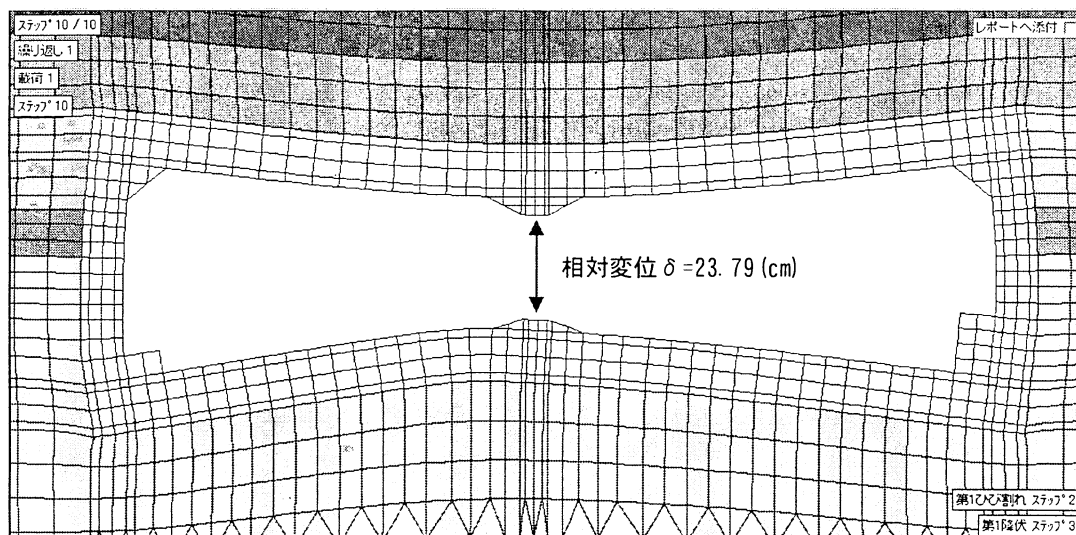


図-11 中壁、中柱が軸力保持能力を喪失した場合の照査例（SトンネルNo.205+5断面）

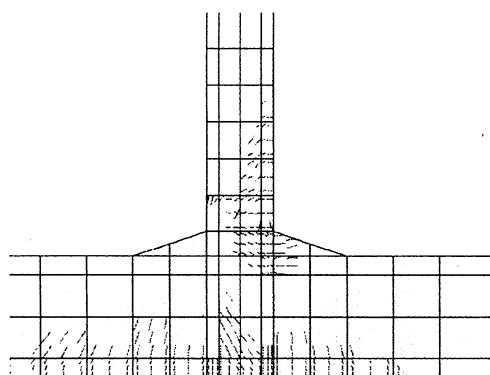


図-12 中壁、中柱のせん断耐力の余裕度の検討における中壁下部のひびわれ発生状況の例（SトンネルNo.205+5断面）

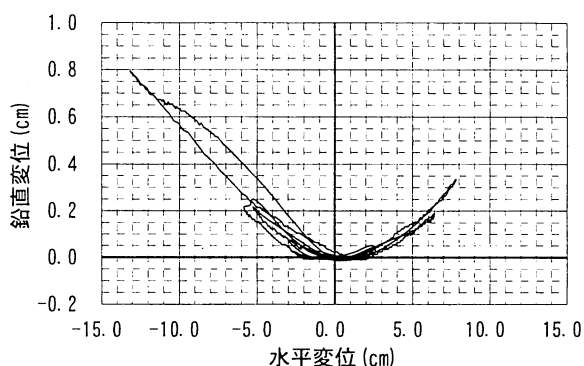


図-13 中壁、中柱のせん断耐力の余裕度の検討における中壁の沈下量の確認例（SトンネルNo.205+5断面）

c) 中壁、中柱のせん断耐力の余裕度の検討(照査4)

照査3では、想定を越える地震動に対して、意図的に中壁、中柱が軸力保持能力を喪失した場合でも中壁、中柱のせん断耐力の余裕度が十分あることが確認できれば、必ずしも曲げ破壊型とする必要はなく、耐震補強の必要性はないと判定する。

その方法として、構造物の変形が照査1の3倍以上となるように入力地震動を割り増した検討を実施し、表-8の判定指標でせん断耐力の余裕度を確認する。

構造物の変形を3倍以上とした理由は、せん断破壊に対して、耐震設計要領で規定されている梁モデルと同等の一定の安全代を確保するという意味で変形を1.5倍、想定を越える地震動による十分に大きな変形という意味でさらにそれを2倍したものである。

図-12は、SトンネルのNo.205+5断面におけ

表-8 照査4：中壁、中柱のせん断耐力の余裕度の判定指標

照査項目	判定基準	レベル2地震動の耐震性能の観点との対応
構造全体系としての安定性	解析が途中で終了することなく最後まで実行できる。	耐震設計上の安全性の判定
せん断破壊の有無	中壁、中柱に連続する斜めせん断ひびわれの発生が見られない。(必要に応じて、ひずみレベルや中壁、中柱の沈下量を確認する。)	耐震設計上の安全性の判定

る中壁、中柱のせん断耐力の余裕度の検討結果例として、中壁のひびわれ発生状況を示したものである。中壁に連続する斜めせん断ひびわれは発生

しておらず、せん断破壊は生じていないと判定される。

また、図-13は、SトンネルのNo.205+5断面における中壁上下端部の相対水平変位－相対鉛直変位関係を示したものであり、同断面の中壁、中柱がせん断破壊していないことを確認した例である。一般に、地震動による中壁の損傷程度が小さく、中壁の軸力保持能力が残存している場合は、相対水平変位＝0cmの位置における相対鉛直変位もほぼ0cmであるが、中壁のせん断破壊が進行し、軸力保持能力が失われてくると、相対水平変位＝0cmの位置における相対鉛直変位が圧縮方向に進行して沈下することが実験等⁹⁾により知られている。図-13より、相対水平変位＝0cmの位置における地震時の中壁の沈下は進行しておらず、中壁はせん断破壊していないことが確認できる。

5. まとめ

首都高速道路神奈川線の既設開削トンネル(9トンネル、26断面)対象とし、図-4に示す横断方向の耐震補強の必要性の判定手順を作成し、耐震補強が必要となる条件をまとめた。横断方向の耐震補強の必要性の判定を行った結果を以下に示す。

- a) 想定するレベル2地震動に対し、WCOMD動的解析による耐震性能の照査(照査1)を行ったところ、26断面すべてにおいて耐震性能が確保されている結果となった。
- b) 想定地震を越える地震に対する対応として、中壁、中柱の破壊形態の判定(照査2)を行ったところ、4断面は中壁、中柱がなく、また、7断面は曲げ破壊型と判定されたため、これらの11断面については、耐震補強の必要はないと判定した。
- c) 照査2において中壁、中柱がせん断破壊型であると判定された15断面に対し、中壁、中柱が軸力保持能力を喪失した場合の検討(照査3)を行ったところ、8断面については内空を保持できるため、耐震補強の必要はないと判定した。
- d) 照査3において内空を保持できないと判定された7断面について、中壁、中柱のせん断耐力の余裕度の検討(照査4)を行ったところ、7断面すべてにおいてせん断耐力に余裕があるため、耐震補強の必要はないと判定した。

参考文献

- 1) 室野剛隆, 桐生郷史, 館山勝, 小林正介: ポリマー材を用いた開削トンネルの免震工法と実設計事例(その1), 土木学会第60回年次学術講演会, 第1部, pp. 1245-1246, 2005.
- 2) 山村賢輔, 清宮理: 開削トンネル擁壁部の地震時挙動及びせん断補強方法, 土木学会第57回年次学術講演会, 第5部, pp. 607-608, 2002.
- 3) 首都高速道路株式会社, トンネル構造物設計要領(開削工法編), 平成20年7月
- 4) 岡村甫, 前川宏一: 鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則, 技報堂出版, 1991
- 5) An, X., and MAEKAWA, K. ; *Failure analysis of underground RC frame subjected to seismic action* , No.571/V-36, pp.251-268, 1997.8
- 6) An, X., and MAEKAWA, K. ; *Numerical Evaluation of Overall Seismic Performance of Underground RC Structures*, 第2回阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集, pp429-436, 1997.1
- 7) 土木学会原子力土木委員会, 原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針, マニュアル, 2005.6
- 8) 佐俣千載: 兵庫県南部地震での地下鉄構造物の被害と復旧, 土木学会論文集No.534, VI-30, pp. 1-17, 1996.3
- 9) 安松敏雄, 山下知之, 渡邊仁夫, 渡邊雄二, 山本一敏: 軸力保持に着目した高軸力下のRC中柱の変形性能に関する実験, 土木学会第57回年次学術講演会, 第5部, pp. 197-198, 2002.