

開削トンネル部材のせん断破壊による 全体系耐力低下のシミュレーション

川西 智浩¹・室野 剛隆²・井澤 淳²・清野 純史³

¹正会員 工修（公財）鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部（〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38）

²正会員 工博（公財）鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部（〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38）

³正会員 工博 京都大学大学院工学研究科（〒615-8540 京都市西京区京都大学桂Cクラスター）

1. はじめに

開削トンネルにおいて中柱・中壁がせん断破壊を起こした場合には、トンネル全体系が崩壊する危険があることが大開駅の被害事例¹⁾や既往の研究²⁾³⁾により明らかになっており、中柱のせん断破壊防止を目的として鋼板巻きや添え柱を設置する等の耐震対策が順次実施されている。その一方で、側壁のせん断耐力が不足する場合には、中柱・中壁ではなく側壁がせん断破壊する可能性も十分考えられるため、その場合にトンネル全体系の破壊がどのように進展するのか、水平保有耐力がどの程度維持されるのかを把握しておく必要がある。

著者らはこれまでに、開削トンネルの破壊箇所の違いが全体系の破壊進展や水平保有耐力に及ぼす影響について検討するため、開削トンネルにおいて側壁がせん断破壊する場合と中壁がせん断破壊する場合の静的載荷試験を実施し、側壁がせん断破壊するケースについては、中壁が大きく損傷しなければ一定の耐力を維持できる可能性があることを確認している⁴⁾。ただし、実験は限られた条件下で実施していることから、側壁あるいは中壁がせん断破壊した場合のトンネル全体系の水平保有耐力がどのようなメカニズムでどの程度低下するのかについては、まだ未解明な部分が多い。

そこで本研究では、開削トンネルの側壁や中壁がせん断破壊した場合にトンネル全体系の水平保有耐力が低下するメカニズムについて検討するため、著者らが実施した静的載荷実験のシミュレーションを実施する。鉄筋コンクリート部材のせん断破壊のメカニズムは非常に複雑であるが、本研究では、トンネル全体系の水平保有耐力の低下量を簡易に把握す

ることを目的として、梁ばねモデルによる応答変位法を用いてシミュレーションを行うこととし、せん断破壊する部材を無視したりせん断破壊部材の非線形特性を変えることで、部材のせん断破壊の影響を考慮することとした。

2. 開削トンネル模型の静的載荷実験

まず、シミュレーションの対象となる開削トンネル模型の静的載荷実験の概要を述べる。実験の詳細い状況については、文献4)を参照されたい。

実験に用いた開削トンネル模型の概要を図-1に示す。ケース名は文献4)と統一した表記としている。Case0のトンネルは側壁にせん断補強筋を配置しない一方、中壁はせん断耐力を十分有する条件とすることで、トンネル全体として側壁がせん断破壊しやすい構造とした。また、Case1のトンネルはCase0とは逆に、中壁のせん断補強筋を配置しないことで、中壁がせん断破壊しやすくなる構造とした。

静的解析により得られた開削トンネルの荷重-変位関係ならびに損傷状況を図-2に示す。Case0では、荷重の増加に伴い左右側壁や中壁の曲げによる損傷が進行する形でトンネルが変形していき、変位が60mmを超えたあたりから左側壁に新たにせん断ひび割れが発生し、これにより全体系耐力が約7割程度にまで低下したが、中壁等その他の部材にはせん断ひび割れは発生せず、その後、その全体系耐力は維持される結果となった。一方Case1では、荷重の増加に伴い最初は隅角部や中壁に曲げひび割れが生じ始めるが、相対変位が10mmを超えたあたりから中壁にせん断ひび割れが現れ始め、この時点でトン

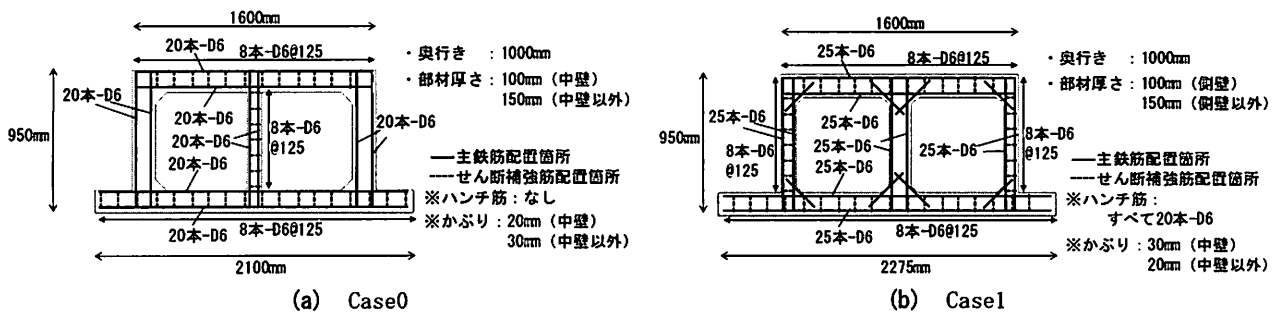


図-1 開削トンネル模型の概要

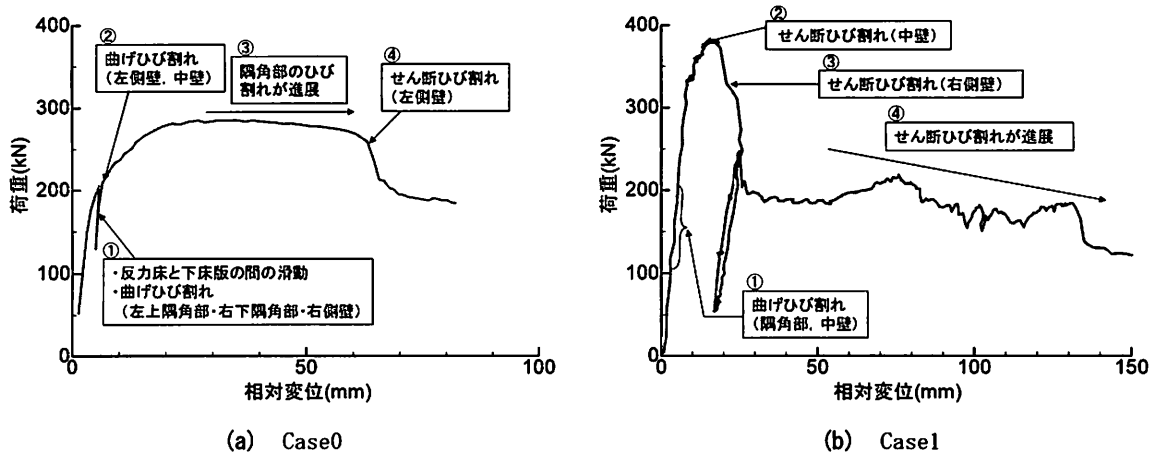


図-2 静的載荷試験の荷重－相対変位関係

ネル全体系耐力はピークとなり、その後一気にせん断破壊が進行する。その後間もなく、右側壁にもせん断破壊が現れ始め、この両部材のせん断破壊により全体系耐力が急激に低下した。したがって、部材の破壊位置によってトンネル全体系の破壊性状や耐力低下量が異なることがわかる。

しかし、これらの実験は限られた条件下で実施しており、2つの供試体の作成条件も異なることから、せん断破壊が起こる部材位置だけでトンネル全体としての安全性が確保できるかどうかを一概に判断することはできない。そこで、側壁あるいは中壁のせん断破壊に伴いどの程度トンネル全体系の耐力が低下するのかを把握するため、応答変位法を用いて本実験のシミュレーションを実施する。

3. 解析手法

(1) 解析モデル

本検討において用いる解析モデルを図-3に示す。2. で述べた静的載荷実験では、左右側壁および中壁における、ハンチ部と一般断面部の境界位置で曲げひび割れが発生していることから、この箇所

にRC部材のM- θ 関係を表す回転ばねを設け、それ以外の箇所については剛体として開削トンネルをモデル化し、底面固定として開削トンネル左上部を変位増分にて載荷することとした。また本検討では、開削トンネル構成部材をすべてモデル化した通常モデル(図-3(a)および(c))に加えて、Case0では左側壁、Case1では中壁がそれぞれ先行してせん断破壊していることを勘案し、これらの部材を無視したモデル(図-3(b)および(d))も検討に用いることとした。

次に、RC部材のM- θ 関係のモデル化を図-4に示す。鉄道の耐震標準⁵⁾では、RC部材のM- θ 関係を、C点、Y点、Yb点、M点、N点を結ぶテトラリニア型の骨格曲線でモデル化している。本検討では、耐震標準に基づきテトラリニア型の骨格曲線を軸力変動の影響も考慮したうえで設定し、図-4 (a)に示すようにその骨格曲線を以下の通り修正したものを、「基本型」のM- θ 関係とする。

- Yb点～M点の間にわずかな勾配を設けて計算の安定化を図るため、Yb点のモーメントは、最大曲げモーメントMmではなく、Mmと降伏時の曲げモーメントMyを用いて、 $My + 0.9 \cdot (Mm - My)$ で設定する。
- 静的載荷実験に用いたトンネル模型では、特にCase0において鉄筋の定着が十分とれていなかったため、曲げ損傷箇所において鉄筋が伸び出し、ひび割れが大きく開くような損傷となった。そこで、 θ_m および θ_n の値にその影響を加味するこ

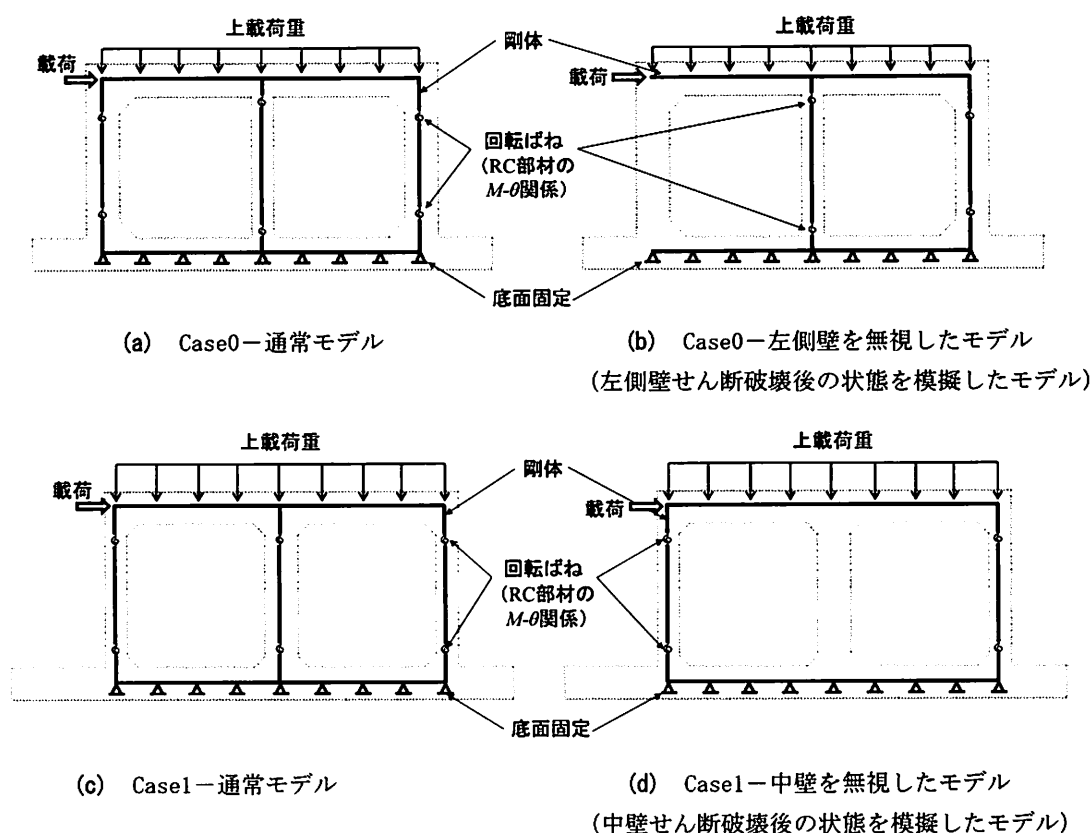


図-3 解析モデル

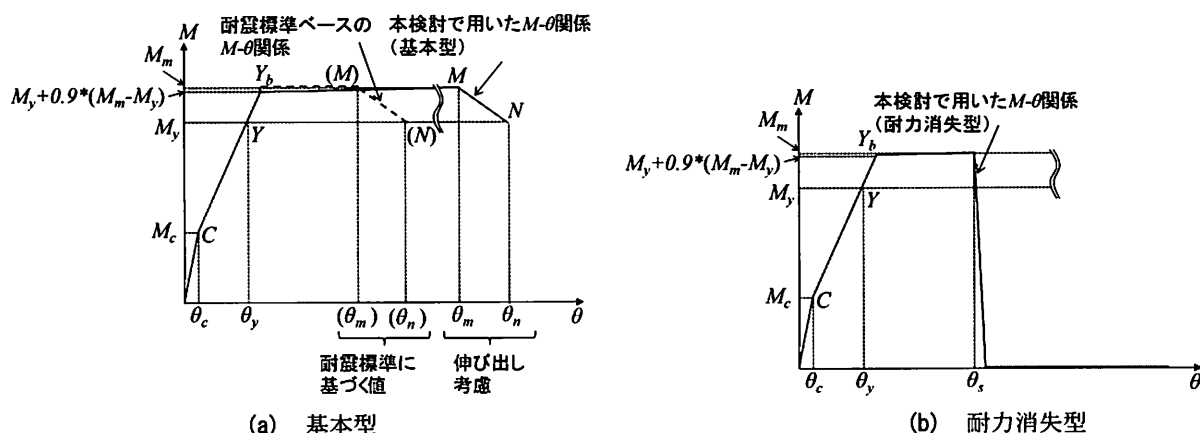


図-4 M-θ 関係のモデル化

とし、耐震標準に基づいて算定される θ_m 、 θ_n の値に対して $8 \times \theta_m$ の値を加え、大きく変形しても耐力低下が起こらないモデルとした。なお、Case1では曲げによる損傷があまり進行しないうちにせん断破壊しているが、Case1についてもこのモデルを用いる。

また本検討では「基本型」のM-θ関係に加え、静的載荷実験における各部材のせん断破壊を模擬するために、図-4(b)に示すように、変形角 θ_s で当該部材のモーメントが0に向かって低下するモデルを「耐力消失型」のM-θ関係として設定し、このモデルも検討に用いる。

以上の解析条件を踏まえて設定した、本検討にお

ける解析ケースを表-1に示す。Case0、Case1それぞれについて、通常モデル・基本型のM-θ関係を用いるケースに加えて、せん断破壊する部材を無視したモデルを用いた解析を実施する。さらに、静的載荷実験においてせん断破壊した部材に対し、耐力消失型のM-θ関係を用いるケースについても解析を実施する。この際の θ_s の値としては、当該部材のせん断力がせん断耐力に達する変形角とするのが望ましいが、本検討では静的載荷実験におけるせん断破壊の状況を踏まえて、適宜 θ_s の値を設定した。

なお、M-θ関係の算定に用いる材料定数として、コンクリートの圧縮強度は、材齢28日の段階における試験の実測値 (Case0 : 29.7N/mm², Case1 :

表-1 解析ケース

実験 ケース	解析 ケース	解析モデル	RC部材のM-θ関係
Case0	0-A	通常モデル	すべて基本型
	0-B	左側壁を無視したモデル	すべて基本型
	0-C	通常モデル	中壁・右側壁：基本型 左側壁：耐力消失型 ※ $\theta_s: 1.29 \times 10^{-1} \text{rad}$
Case1	1-A	通常モデル	すべて基本型
	1-B	中壁を無視したモデル	すべて基本型
	1-C	通常モデル	左側壁：基本型 中壁・右側壁：耐力消失型 ※ $\theta_s: <\text{中壁}> 1.90 \times 10^{-2} \text{rad}$ ※ $\theta_s: <\text{右側壁}> 3.00 \times 10^{-2} \text{rad}$

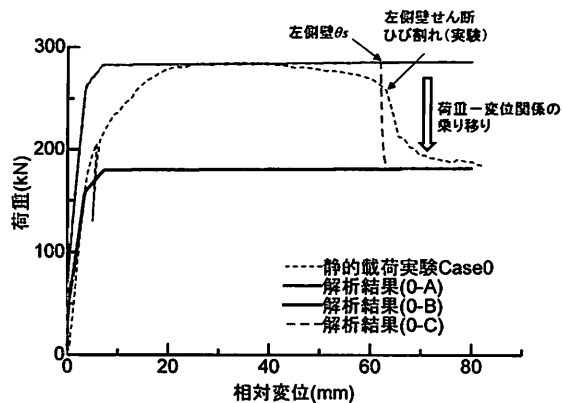
34.2N/mm²)を用いる。また鉄筋については、Case0でSD295、Case1でSD345を使用しているが、引張降伏強度の実測値がないため、静的載荷実験における最大荷重が概ね再現できるようにJIS G 3112⁶⁾に示される各鉄筋の降伏点強度の範囲内で引張降伏強度を調整し、Case0では330N/mm²、Case1では440N/mm²を用いることとした。

4. シミュレーション結果

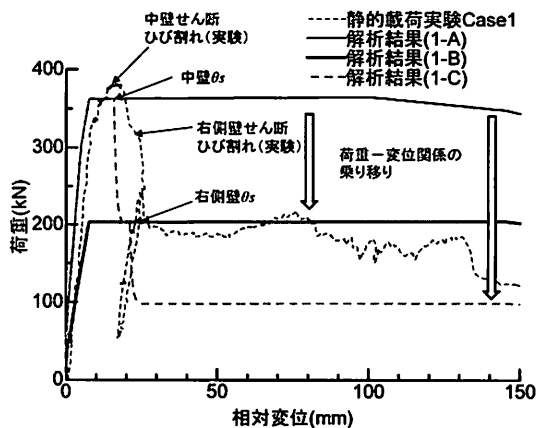
表-1に示した各解析ケースにおける開削トンネルモデルの荷重－変位関係を、静的載荷実験における荷重－変位関係とともに、図-5に示す。

まずCase0の結果（図-5(a)）に着目すると、静的載荷実験において左側壁がせん断破壊したことに伴い全体系耐力が低下するが、その低下量は、解析ケース0-Aと解析ケース0-Bの最大荷重の差と概ね整合しており、左側壁のせん断破壊に伴って、通常モデルの荷重－変位関係から左側壁を無視したモデルの荷重－変位関係に徐々に乗り移るような形になっている。一方、解析ケース0-Cの荷重－変位関係を見ると、左側壁の変形角が θ_s に到達したことで、実験結果と同様に通常モデルから左側壁を無視したモデルへの荷重－変位関係の乗り移りが起こっている。したがって、開削トンネルにおいて側壁のせん断破壊が起こる場合の全体系耐力の低下量は、その側壁がそれまで負担していた水平力（部材のせん断力）の損失量に概ね等しく、せん断破壊する部材を無視したモデルへの荷重－変位関係の乗り移り、あるいは耐力消失型のM-θ関係を用いることで、せん断破壊時の荷重－変位関係が概ね表現できることがわかる。

解析ケース0-Bおよび0-Cの代表的なステップにおける、上床版、左右側壁および中壁のモーメント分布を図-6に示す。図-6(a)および(b)はそれぞれ解析ケース0-Cにおける左側壁耐力消失前後の各部材のモーメントを比較したものであり、この図より左側



(a) Case0

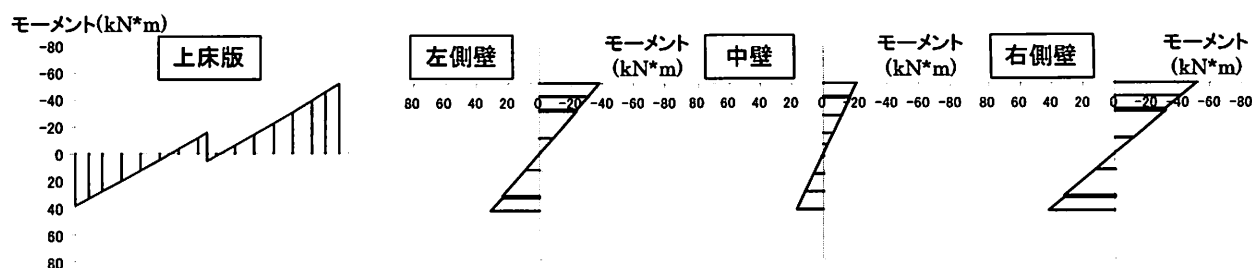


(b) Case1

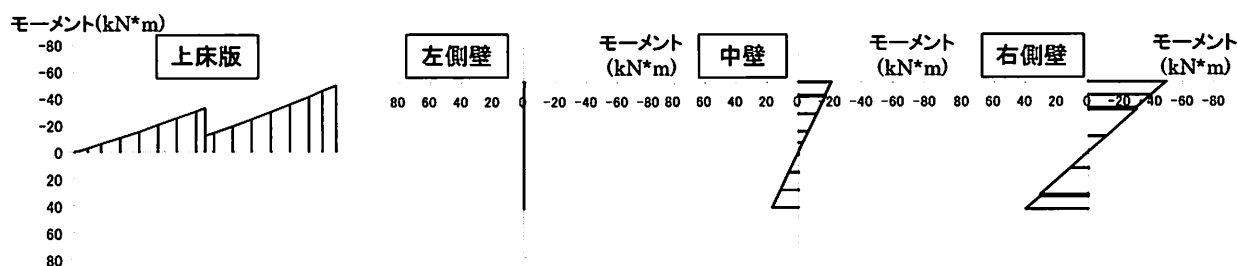
図-5 荷重－変位関係のシミュレーション結果

壁のせん断破壊により耐力を消失しても、中壁および右側壁のモーメントはほとんど変化しないことがわかる。また図-6(c)は、図-6(b)と同じ変位を作用させたステップにおける解析ケース0-Bの各部材のモーメントを表しており、左側壁を最初から無視したモデルを用いると、中壁および右側壁のモーメントは解析ケース0-Cにおける左側壁耐力消失後のモーメントとほぼ同じ値になることがわかる。ただし両ケースには、左側壁が軸力を負担できるかどうかの違いがあり、この影響で両ケースにおける上床版のモーメント分布は大きく異なっている。

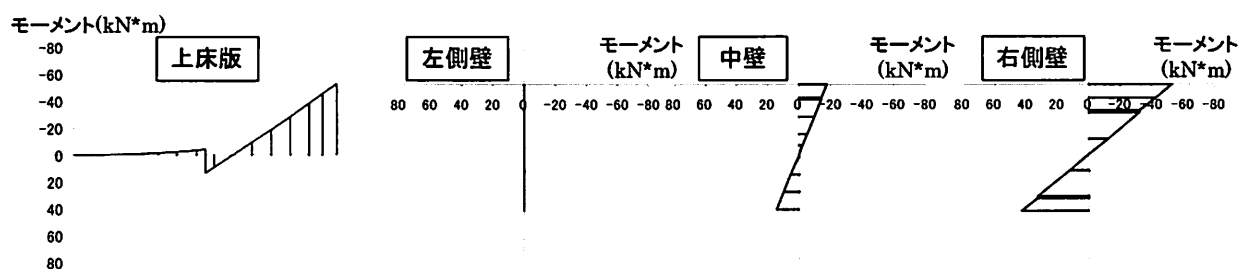
このように、側壁のせん断破壊の表現方法として、せん断破壊する部材を無視したモデルへの荷重－変位関係の乗り移りで表現する場合と、耐力消失型のM-θ関係を用いる場合の違いは、主にせん断破壊部材の軸力保持性能と上床版の断面力分布に表われる（下床版が固定条件でなければ、下床版の断面力分布にも影響が及ぶ）。まずせん断破壊部材の軸力保持性能の観点で考察すると、大開駅の崩壊事例のようにせん断破壊した部材には軸力保持性能が期待できないことを鑑みると、側壁を無視したモデルへの荷重－変位関係の乗り移りでせん断破壊を表現するほうが適切であると考えられる。ただし、地盤から



(a) Case0-C, 左側壁耐力消失前 (変位: 61.9mm)



(b) Case0-C, 左側壁耐力消失後 (変位: 66.0mm)



(c) Case0-B, 変位: 66.0mm

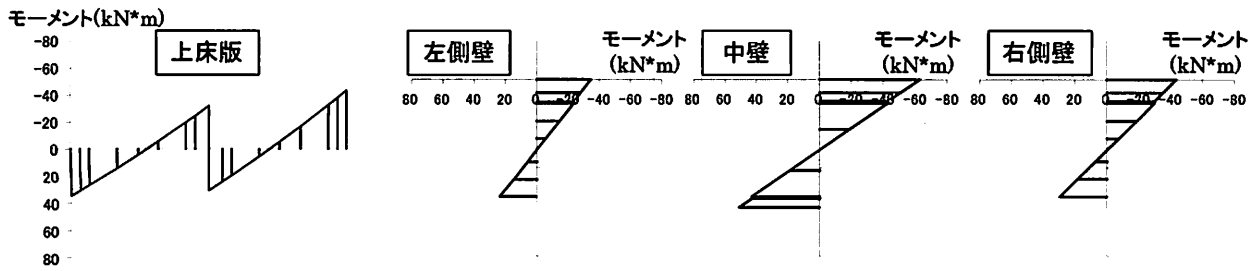
図-6 上床版, 左右側壁および中壁のモーメント分布 (Case0)

の土圧を受ける地盤中のトンネルであれば側壁を無視したモデルでの解析ができないため、軸力を保持できるかどうかを別途照査することを前提に、耐力消失型のM- θ 関係を用いる方法も有用である。また、上下床版の断面力分布への影響の観点で考察すると、各床版の照査が厳しくなるようにせん断破壊部材の軸力を考慮するのが設計の面では安全側であり、本ケースでは上床版における中央地点のモーメントが大きくなるケース（耐力消失型のM- θ 関係を用いる方法）を適用するのが良いと思われる。

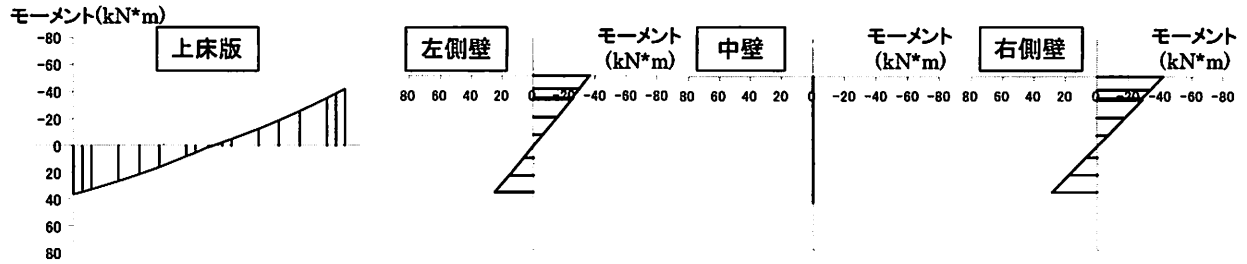
また、実験ではせん断破壊に伴う全体系耐力の低下が徐々に起こっていることから、ある程度の遷移区間を設けて荷重-変位関係を乗り移る、あるいは耐力消失型のM- θ 関係においてモーメントを徐々に低下させるのが適切であると思われるが、せん断破壊の進行と耐力低下の関係が不明であるため、せん断破壊発生時点で急激に耐力低下させるのが性能評価の観点では安全側である。

次にCase1の結果（図-5(b)）に注目すると、実験では中壁のせん断破壊後、間もなく右側壁もせん断破壊しており、両部材のせん断破壊による耐力低

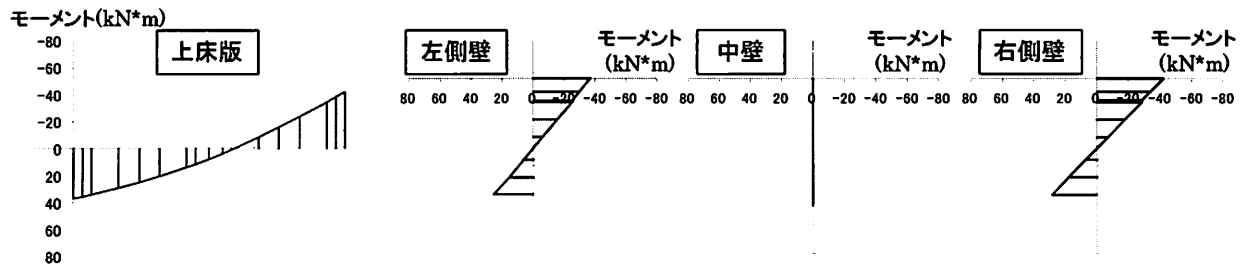
下が混合した状態になっているが、せん断破壊に伴う最終的な全体系耐力の低下量は、解析ケース1-Cにおける中壁・右側壁の θ s到達後の荷重低下量が概ね表現できている。また、実験ではいったん大きな耐力低下が起こった後、徐々にさらなる耐力低下が起こっているが、一度目の耐力低下量が解析ケース1-Aと解析ケース1-Bの最大荷重の差とも概ね対応していることから、中壁がせん断破壊する場合にも、せん断破壊部材を無視したモデルへの荷重-変位関係の乗り移りや耐力消失型のM- θ 関係を用いることで、せん断破壊時の全体系の耐力低下が表現可能と言える。最後に、解析ケース1-Bおよび1-Cの代表的なステップにおける、上床版、左右側壁および中壁のモーメント分布を図-7に示す。中壁がせん断破壊した前後においても、左右側壁の断面力はあまり変化しておらず、その一方で上床版のモーメント分布は中壁の軸力保持性能の有無の違いにより、解析ケース1-Bおよび1-Cで異なっていることから、側壁がせん断破壊する場合と同様に、各部材の照査の観点で安全側となるように、解析方法を選択するのが良いと考えられる。



(a) Case1-C, 中壁耐力消失前 (変位: 9.6mm)



(b) Case1-C, 中壁耐力消失後および右側壁耐力消失前 (変位: 20.8mm)



(c) Case1-B, 変位: 20.8mm

図-7 上床版, 左右側壁および中壁のモーメント分布 (Case1)

5. まとめ

本研究では、開削トンネルの部材がせん断破壊した場合の静的載荷実験結果のシミュレーションによりせん断破壊時の全体系の耐力低下量を把握する方法について検討した。その結果、開削トンネル部材がせん断破壊する場合の全体系の耐力低下量は、当該部材を無視したモデルへの荷重-変位関係への乗り移り、あるいはせん断破壊する部材に対して耐力消失型のM- θ 関係を用いることで概ね表現できることがわかった。

ただし、荷重-変位関係の乗り移りによりせん断破壊時の挙動を追跡できるのは、せん断破壊する部材を無視しても常時状態の荷重を支えることができる場合に限られる。また、本検討では上下床版を剛体としているが、地盤中の開削トンネルでは、地震時にこれらの部材も変形することから、当然ながら実際には上下床版の照査も必須となることに注意が必要である。

参考文献

- 1) 矢的照夫, 梅原俊夫, 青木一二三, 中村晋, 江崎順一, 末富岩雄: 兵庫県南部地震による神戸高速鉄道・大開駅の被害とその要因分析, 土木学会論文集, No.537/I-35, pp.303-320, 1996.
- 2) 石川博之, 末広俊夫, 金津努, 遠藤達巳, 松本敏克: 鉄筋コンクリート製地中構造物の変形性状と損傷状態に関わる実験的考察, 地震工学研究発表会講演論文集, Vol.26-2, pp.885-888, 2001.
- 3) 曽良岡宏, 足立正信, 本田国保, 田中浩一: 地中ボックスカルバートの変形性能に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, pp.1123-1128, 2001.
- 4) 川西智浩, 清野純史, 井澤淳: 開削トンネルの破壊状況と耐力の関係把握のための実験的研究, 第16回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.403-408, 2013.
- 5) 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, 丸善出版, 2012.
- 6) 日本工業規格: 鉄筋コンクリート用棒鋼 (JIS G 3112), 2010.