

耐震性向上構造形式を取り入れた ボックスカルバートの載荷実験

遠藤達巳¹・坂上 明²・竹内幹雄³・岩楯徹広⁴

- 1 正会員 工修 (財)電力中央研究所 我孫子研究所 構造部 (〒270-11 千葉県我孫子市我孫子 1646)
2 正会員 (株)奥村組 技術本部 技術開発部 (〒117 東京都港区元赤坂 1-3-10)
3 フェロー会員 工修 (株)奥村組 技術本部 技術開発部 (〒117 東京都港区元赤坂 1-3-10)
4 正会員 工博 東京都立大学 工学部 土木工学科教授(〒192-03 東京都八王子市南大沢 1-1)

開削トンネルなどの地中構造物は、巨大な地震動(レベル2地震動)に対してもトンネル崩壊が回避できる構造であることが要求されている。この要求に対応するために、巨大地震時に中柱あるいは隔壁が鉛直方向力を伝達・保持し、致命的なトンネル崩壊を防止するため、上床スラブと中柱(隔壁)の結合部にあらかじめ回転および水位変位が吸収可能な装置を挿入しておく開削トンネル構造型式を提案した。この構造形式の耐荷および変形性能を確認するとともに実構造物への適用性を確認するため、縮尺モデルによる気中載荷実験および地中載荷実験を実施した。その結果、この構造形式は、ボックスカルバート構造の耐震性能を大幅に向上させることが可能であり、既設構造物の補強および新設構造物に対して有効であることが確認できた。

Key Words : *underground structure, soil-structure-interaction, earthquake response, non-linear analysis, reinforced concrete, open-cut tunnel*

1. はじめに

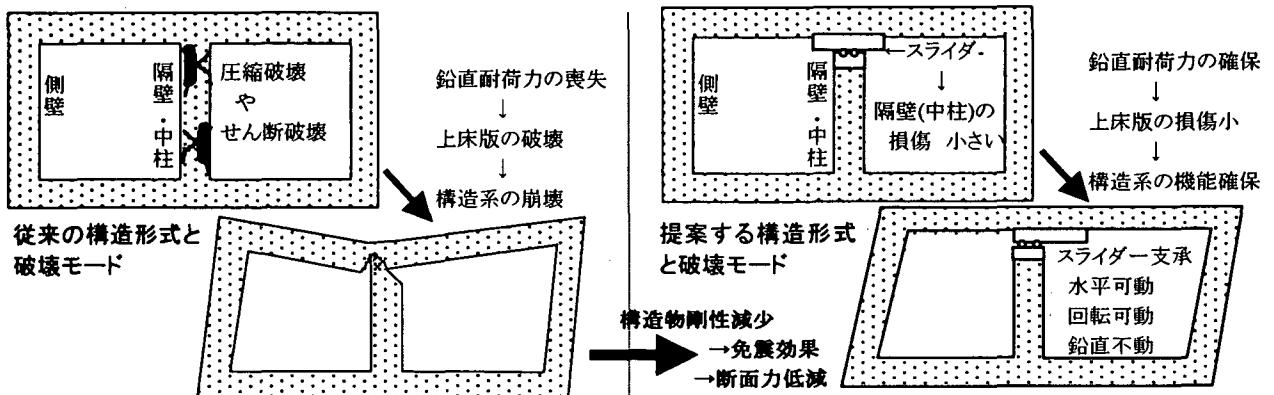
兵庫県南部地震においては、従来安全性が高いと考えられていた地中構造物も多くの損傷を受けたことが報告されている。その中には、大開駅をはじめとするボックスカルバート構造の中間柱や隔壁に曲げ破壊やせん断破壊が生じて、土被りなどの鉛直方向荷重により、上床版が陥没する致命的な被害が見られた。

この地震後に改訂されたコンクリート標準示方書・耐震設計編では、兵庫県南部地震のようなレベル2地震動において確保すべき耐震性能は、部材の破壊ではなく、系全体の挙動で照査することが規定されている。

開削工法による地中ボックス構造は、地震時に周辺の地盤変位に追従して構造物が強制的に変形させられる

ことが特徴的である。このため、供用期間中に数回起こりうる地震動(レベル1地震動)に対しては全体構造系として十分な耐力を有すると同時に、兵庫県南部地震クラスの地震動(レベル2地震動)に対しては、トンネル崩壊防止可能な構造であることが要求されており、「必要空間を確保すること」が保持すべき耐震性能と考えられる。

この耐震性能を確実に確保できる新構造形式を提案し、その適用性・合理性について検討を始めている。すでに、動的ならびに静的非線形解析により、本構造形式の有効性は確認している。本論文では、構造形式の耐荷および変形性能を確認するとともに実構造物への適用性を確認するために実施した縮尺モデルによる気中載荷および地中載荷実験について報告するものである。



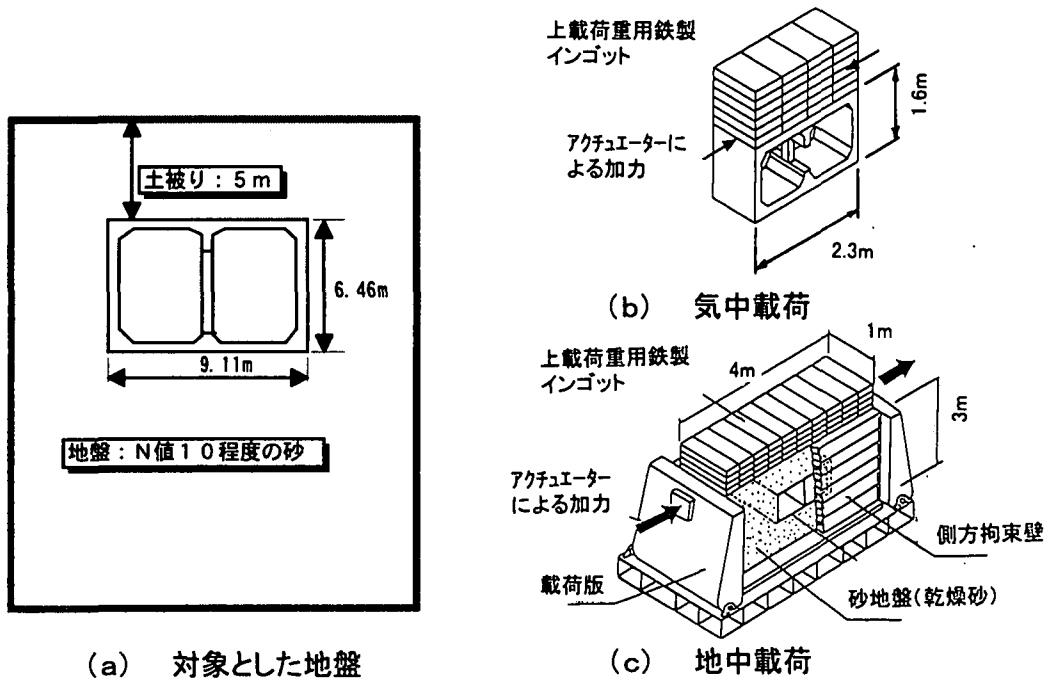


図-1 載荷実験状況図

表-1 実験ケース一覧

	CASE-1	CASE-2	CASE-3	CASE-4	CASE-5
構造形式	地盤のみ	従来構造を対象	既設構造の補強を対象 鋼管(コンクリート充填)+スライダー	新設構造物を対象 スライダー	新設構造物を対象 スライダー
概要図	地盤	気中		地中	
着目点	地盤物性値の把握	破壊モードの把握	スライダー支承の効果把握	地盤と構造物の相 互作用把握	新形式構造の耐震 性向上効果の把握

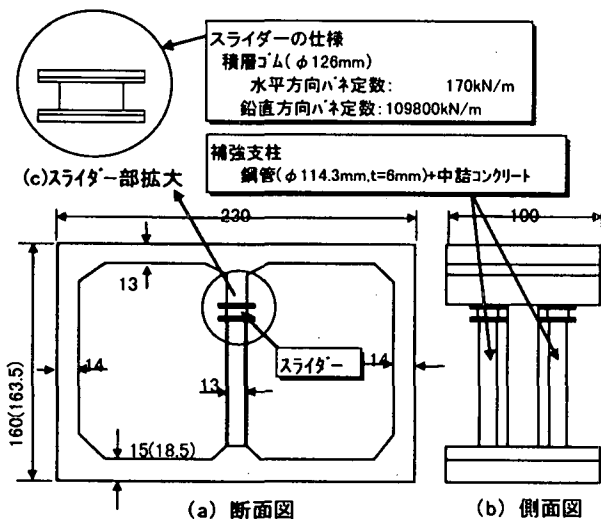


図-3 試験体の形状

2. 新構造形式の概要

上記の耐震性を確保するためには、中間柱の鉛直および水平方向耐荷力を増大させるのが一般的であるが、確実に「必要空間を確保する」という耐震性能を保証することができない。

そのため、この要求に確実に対応するために、巨大地震時に中柱あるいは中壁が鉛直方向力を確実に伝達でき耐荷力を確保するため、上床スラブと中柱(中壁)の結合部にあらかじめ回転および水平変位が吸収可能な一種の免震装置(スライダー支承)を挿入しておく開削トンネル構造型式を提案する。すなわち、フェイルセーフ機能としてのスライダー支承があることで、上載荷重を下部地盤に伝達させるという鉛直部材の機能が確保されるため、致命的なトンネル崩壊を防止することができる。

3. 実験概要

(1) 載荷方法

載荷は図-2 に示す気中載荷と地中載荷の2種類とした。いずれの場合も、対象構造物は土被り約 5m、高さ 6m × 幅 9m のボックスカルバート構造であり、実験は約 1/4 縮尺としている。土被り荷重に相当する鉛直荷重は鉄製のインゴットにより載荷した。気中載荷では、ボックス構造の上床版に直接アクチュエータで交番繰返し荷重を加えた。地中載荷の場合は、高さ 3m × 幅 4m × 奥行 1m のせん断土槽中に十分に締め固めた(N 値=約 10)乾燥砂中に試験体を埋設し、せん断土槽をせん断変形させることにより、砂を介して構造物に載荷した。

(2) 実験ケース

実験は表-1 に示す計 5 ケースを実施した。CASE-2 および 3 が気中載荷実験、CASE-4 および 5 が地中載荷実験である。また、CASE-1 は、砂地盤の特性を把握するための砂地盤のみのせん断実験である。CASE-2 は従来構造を模擬したもので、CASE-3,4 は既設構造物の補強を想定したものである。さらに、CASE-5 は新設構造物を対象とした試験体である。CASE-3,4 では、既設の中柱に並立する鋼管柱にスライダー支承を取り付けているのに対して、CASE-5 では、中柱の上部にスライダー支承が取り付けられている。

4. 変形性能の向上効果

図-4 には CASE-2 および 3 の最終状態のひび割れパターンを示した。両者とも、中柱にせん断破壊を生じており、かぶりコンクリート剥離と主鉄筋の座屈が生じており、ほぼ同等のひび割れ性状および破壊形態と思われる。

図-5 には、スライダー支承の有無の影響を比較するため、荷重と上床版の水平変位の関係を示した。載荷初期の性状はほぼ同等で、補強鋼管とスライダー支承の影響はほとんどない。図で示した時点で中柱せん断破壊が生じており、両者ともそれと前後してほぼ同一荷重・同一変位で側壁が鉄筋降伏する結果となった。従来構造の場合は、中柱がせん断破壊した時点で耐荷能力を喪失し、上床版が陥没する変形モードに移行すると予想され、危険防止のため載荷を中止している。それに対して、スライダー支承で補強した CASE-3 は、中柱がせん断破壊した後も、耐荷能力は保持できている結果となった。上床版の水平変位と側壁の鉄筋降伏時変位から算出した靱性率は、CASE2で 3.2、CASE3で 8 以上であった。

図-6 は、せん断破壊後の上床版中央部の鉛直変位と鉄筋ひずみを示した。従来構造の CASE2 では、せん断

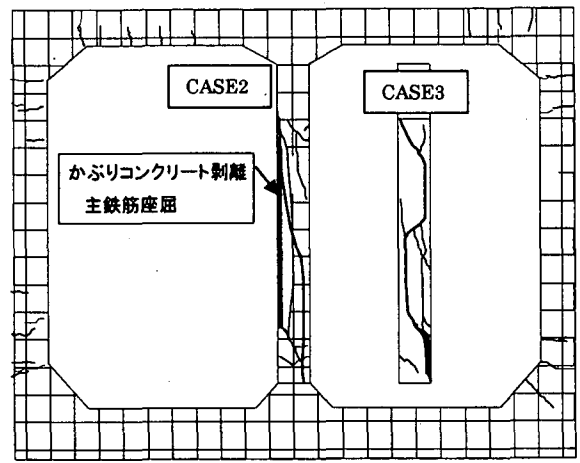


図-4 最終状態のひび割れパターン(CASE2,3)

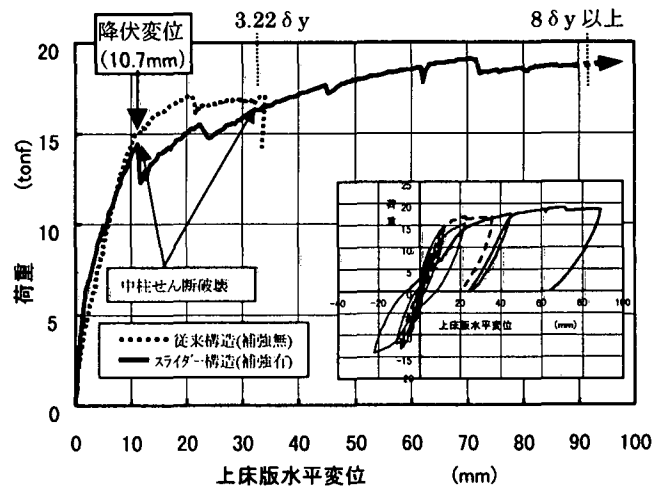


図-5 スライダー支承による補強効果

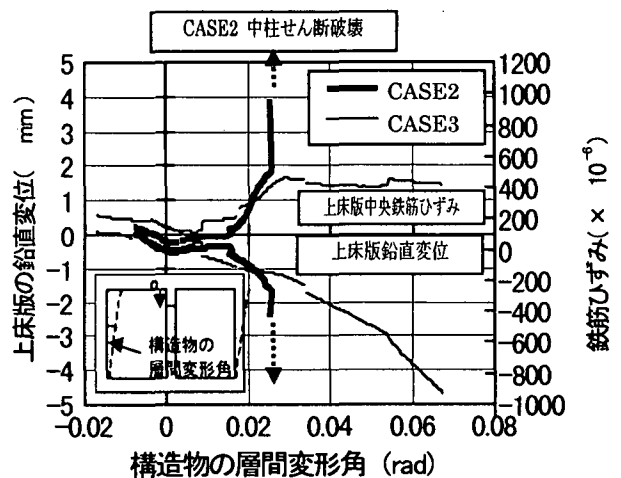


図-6 中柱せん断破壊後の挙動

破壊後急激に鉛直変位と鉄筋ひずみが増加しており、上床版が陥没する変形モードに移行しつつあると推測でき、この時点が構造系全体の終局状態であると考えられる。

5. 地盤との連成効果

図-7 に CASE-3(気中載荷,補強有)と CASE-4(地中載荷,補強有)の側壁隅角部の発生曲げモーメントを示す。荷重レベルが小さい範囲では,地盤の荷重分担効果で地中載荷の方が気中載荷より小さい。図-8 に $3\delta y$ 時 (δy :降伏変位)の変形モードを示したが,両者の変形モード,変形量とも大差なく,大変形時の挙動は同等であると判断できる。

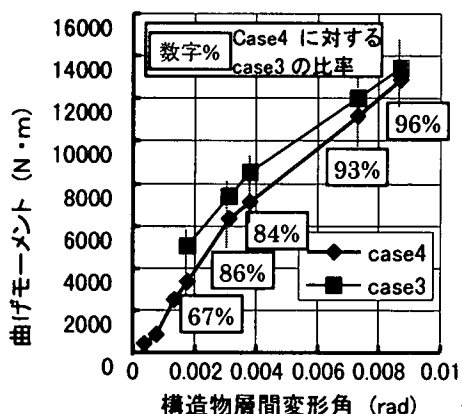


図-7 発生曲げモーメントの比較(側壁隅角部)

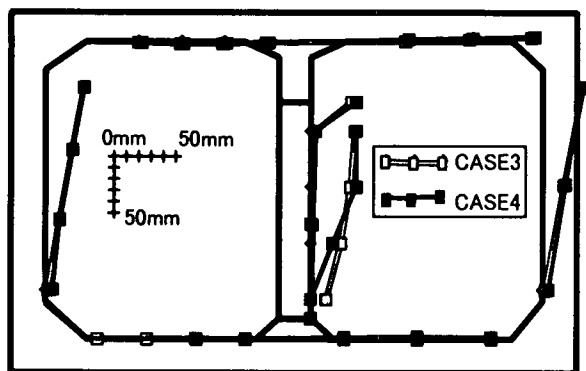


図-8 変形モードの比較($3\delta y$ 時:層間変位約30mm)

図-9 に構造物が受ける荷重(せん断方向土圧)を示した。地中載荷の場合では,系全体の外力である地盤の平均ひずみが増加しても,構造物が受ける外力は地盤の平均ひずみ 0.01 以降頭打ちになり,構造物と地盤の連成による荷重低減効果が認められた。これは,地盤と構造物の剛性の比に起因すると考えられる。地盤と構造物の剛性を算定した結果,初期荷重時には構造物の剛性が地盤より大きい,平均ひずみが約 0.01 以降では地盤の剛性が構造物の剛性を上回ることがが判明した。

6. 新設構造物への適用

CASE-5 試験体の中柱の上部にはスライダー支承が配置されており,水平方向の荷重分担はほとんど期待できない。そのため,CASE4 で中柱に曲げひび割れが発生し,

せん断破壊が生じる段階までは,側壁の負担が比較的大きくなる。しかし,大変形時では,図-10 に示した土槽平均ひずみと上床版水平変位の関係からわかるように,両者の変形特性はほとんど差がないことが判明した。

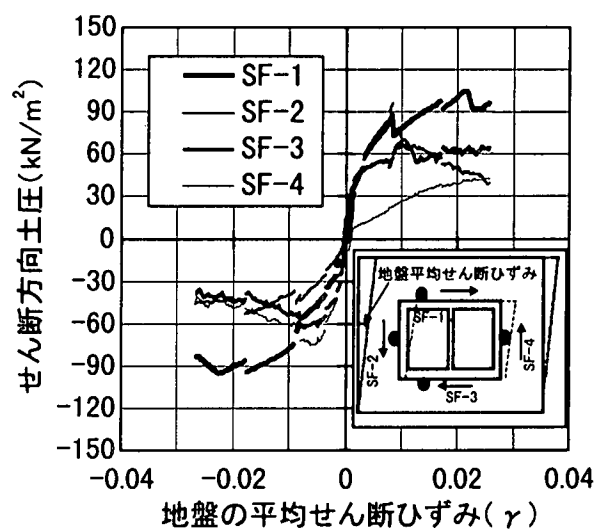


図-9 構造物が受けるせん断方向土圧(CASE4)

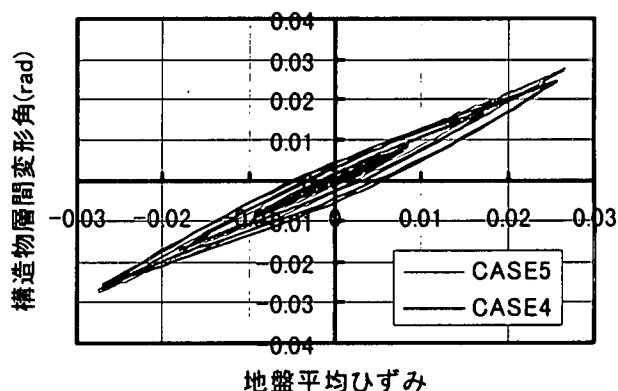


図-10 補強工法(CASE4)と新設工法(CASE5)の比較

7. まとめ

耐震性向上を目的とした新構造形式に関する実験の結果,以下のことが明らかとなった。

- ・新構造形式は中柱のせん断破壊後も構造系全体の耐荷性能を確保でき,靱性を大幅に増加させることが可能である。
- ・補強工法だけでなく,新設の構造物に対しても有効であり,大変形時の地盤と構造物の非線形連成作用を考慮することにより,合理的な設計が可能になる。

【参考文献】

遠藤達巳,竹内幹雄,坂上明:「地中に埋設されるボックスカルバートの耐震性向上構造形式の提案」,第1回免震・制震コロキウム論文集,pp149-156,1996.11