

地中構造物の中柱滑り支承の効果

中村 敏晴¹・栗本 雅裕²・竹内 幹雄³・遠藤達巳⁴

¹正会員 (株)奥村組 技術研究所 (〒300-2612 茨城県つくば市大字大砂 387)

²正会員 (株)奥村組 技術研究所 (〒300-2612 茨城県つくば市大字大砂 387)

³フェロー会員 (株)奥村組 技術本部 技術開発部 (〒108-8381 東京都港区芝 5-6-1)

⁴正会員 (財)電力中央研究所 我孫子研究所 構造部 (〒270-1166 千葉県我孫子市我孫子 1646)

地中ボックスカルバートの中柱上端に滑り支承を設置した場合の効果について、1層2径間の実構造物を対象に、非線形動的地震応答解析で検討した。その結果、① 滑り支承は、中柱のせん断力・曲げモーメントを低減し、構造系の崩壊を防止する。② 中柱のせん断力・曲げモーメントが低減されることから中柱の断面寸法を縮小できる。③ 滑り支承の有無で隅角部の断面力・曲率の分布に大きな差異はないが、直土圧は滑り支承有りの方が大きい。すなわち、中柱が分担していた水平力を解放しても外力は隅角部の負担増として表れるのではなく地盤に分担されたものと解釈できる。これにより、L2対応の中柱の配筋量・断面寸法を減らすことが可能となり、より合理的な耐震設計になる。

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

1. はじめに

兵庫県南部地震では地震に強いと思われていた地下構造物にも被害が生じた。特に開削工法の地下鉄駅舎、駅間の鉄筋コンクリート柱のせん断破壊が顕著であった^{1),2)}。これに伴い設計基準類は中柱が曲げ破壊やせん断破壊しないよう改訂された。その結果、中柱は、鉄筋コンクリートの品質を確保するにも支承がある程多量の主鉄筋・帯鉄筋を投入するものとなった。

これに対し、筆者等はレベル2の地震に対してもトンネルの崩壊を防止し必要空間を確保するための新構造形式(中柱の一端に滑り支承を設置した構造)を考案し報告してきた^{3),4)}。

本報告は、1層2径間の実構造物を対象に、非線形動的地震応答解析で中柱上端に滑り支承を設置した場合の効果について検討したものである。

2. 滑り支承の構造

地下鉄構造物のようなボックスカルバートの横断方向耐震設計では、中柱のせん断破壊を防止し、中柱の上下端に塑性ヒンジが発生する事を前提として

その変形性能を確保することが重要になる。この一つの手段として上下端をヒンジに近い構造又は一端を滑り支承とする破壊モード制御型の構造形式が考えられる。この形式をとることによって、せん断力や曲げモーメントの発生を抑止し中柱への応力集中をコントロールできるものとなる。

滑り支承の基本構造図を図-1, 2に示す。

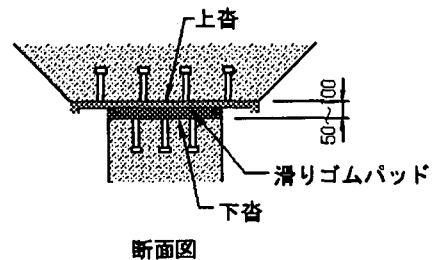


図-1 滑り支承構造図

滑り支承は柱と同等断面形状からなる上査、滑りゴムパッド、下査より構成される。上下査は鋼板製であり、滑りゴムパッドはPTFE材(テフロン)等の摩擦係数の小さい板を上面に設置した10mm~30mm程度の積層ゴムである。PTFE板で水平力の伝達を逃がし、ゴムで鉛直荷重を支持するとともに上下床版の回転変位を吸収するものである。

3. 滑り支承の効果

滑り支承の効果把握する目的で、兵庫県南部地震で崩壊した1層2径間構造（大開駅）を対象に滑り支承有り（滑り支承構造）滑り支承無し（従来構造）の2ケースで地震応答解析をおこなった。

(1) 構造物・滑り支承の諸元と地盤条件

解析対象とした大開駅は、図-3、4に示すように、幅17m高さ7.17m壁厚0.7~0.85mの1層2径間のボックスカルバート構造である。崩壊した中柱は断面幅1.0m、断面高さ0.4m、間隔3.5m、で配置されている。滑り支承は中柱上端に配置した。

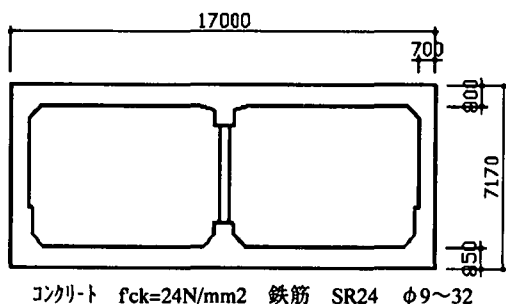


図-3 大開駅構造図

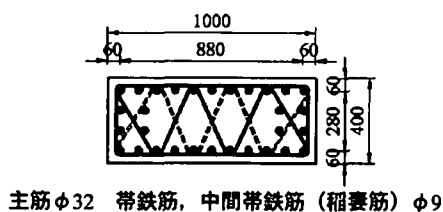


図-4 中柱断面図

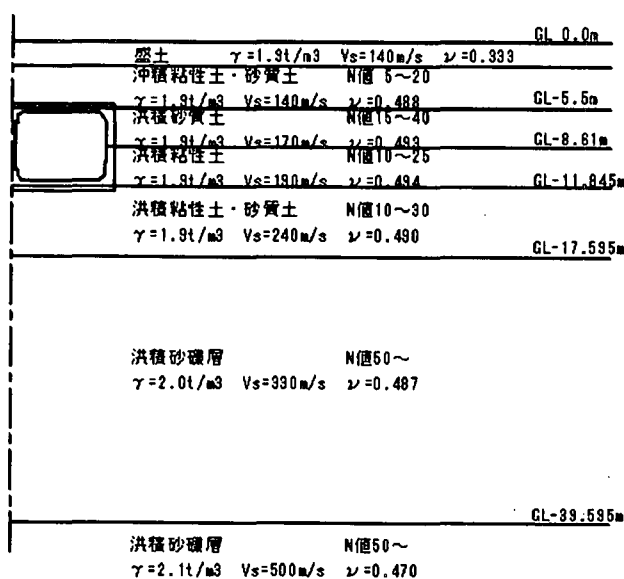


図-5 地盤構成図

地盤構成は既往の文献⁵⁾を参考に定めた。すなわち、図-5に示すように、表層より5.5mまでのN値が5~20程度の盛土および沖積層、5.5m~17.6mのN値が10~40程度の洪積砂層、粘土層、砂礫層の互層、さらに17.6m以深のN値50以上の洪積砂礫層よりなる。

(2) 解析方法・解析モデルおよび入力地震動

解析は2次元FEMで地盤および構造物の非線形性を考慮した時刻歴応答解析をおこなった。動的解析に用いたモデルを図-6に示す。側面および底面は粘性境界を用いた。

地盤はせん断応力とひずみ（ $\tau-\gamma$ ）の関係をRamberg-Osgood (RO) モデルで表現した平面ひずみ要素、構造物は曲げモーメントと曲率（ $M-\phi$ ）の関係を武田モデルで表現した梁要素でモデル化した。

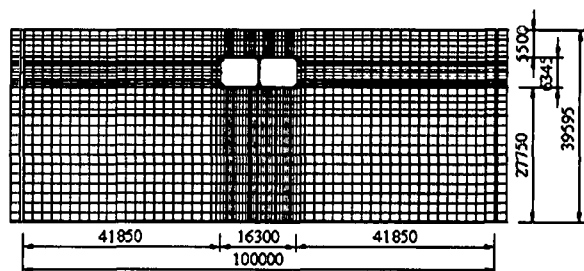


図-6 解析モデル図

滑り支承は、図-7に示すように、鉛直ばね、水平ばね、回転ばねでモデル化した。水平ばねは中柱軸力にP T F E板の摩擦係数を乗じた値で上限値を持つものとした。

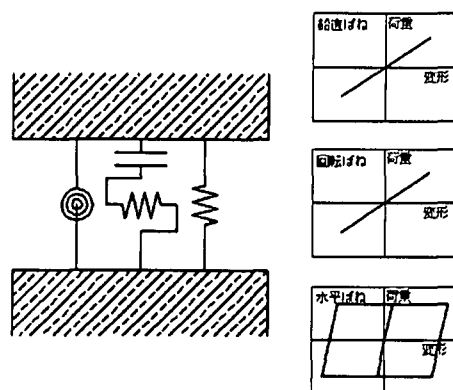


図-7 滑り支承モデル概念図

入力地震動は、ポートアイランドNS波（最大加速度 817cm/s^2 ）の最大加速度部を含む6秒間を使用した。

(3) 解析結果

a) 地盤・構造物の挙動

従来構造の動的解析結果について以下に述べる。

自由地盤の最大加速度は上下床版の位置で $700 \sim 740 \text{ cm/s}^2$ 、地表面で 897 cm/s^2 となり、構造物の最大加速度は、上下床版の位置で $580 \sim 800 \text{ cm/s}^2$ となった。上下床版の位置の相対変位は、図-8 に示すように、自由地盤で 39 mm 、構造物で 56 mm となった。中柱は、図-9 に示すように、せん断耐力を上回り、せん断破壊した中柱の被害状況と一致する。

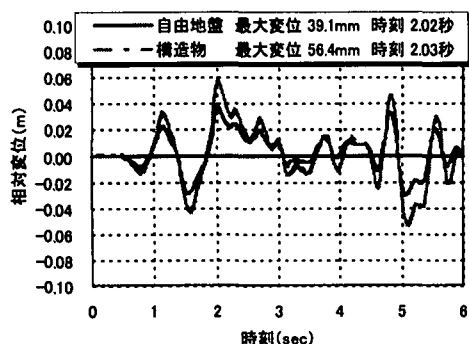


図-8 上下床版位置の相対変位

b) 滑り支承の効果

中柱の上下端が剛結されている従来構造では中柱はせん断破壊した。しかし、図-9 に示すように、中柱上端を滑り支承構造とした場合、中柱に作用するせん断力は、滑り支承無しに比べ大きく低減され、せん断耐力を越えないことがわかる。

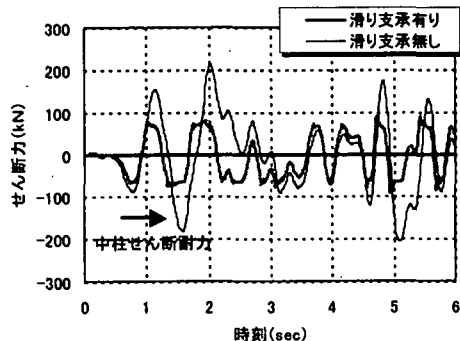


図-9 中柱下端せん断力時刻歴（単位幅当り）

滑り支承の有無が構造物の変形、部材の曲率、断面力、土圧等に及ぼす影響について図-10～15 に示す。この図は上下床版の相対変位が最大の時刻について示したものである。

滑り支承構造は等価せん断剛性が従来構造に比べ小さい。その結果、構造物の上下床版の相対変位は、図-10 に示すように、滑り支承の有無でそれぞれ 62 mm 、 56 mm と滑り支承有りの方が大きい。これを部材の曲率で見ると、図-11 に示すように、中柱を除いてそれほど差異はない。なお、滑り支承無しの中柱上下端の曲率は終局耐力時曲率の 1.5 倍程度となっている。

せん断力と曲げモーメントについても、図-12、13

に示すように、中柱は、滑り支承無しの場合に大きな値を示すが滑り支承有りの場合は小さな値となる。一方、隅角部は値に変化の無いことがわかる。

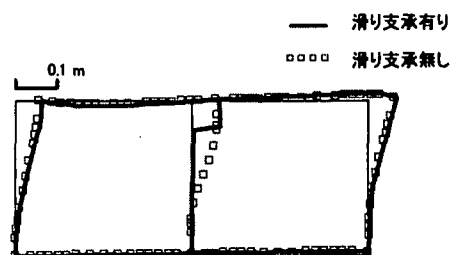


図-10 相対変位図

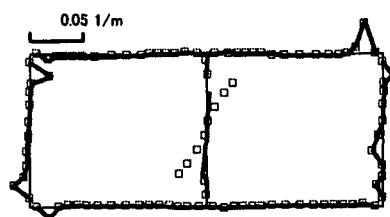


図-11 曲率分布図

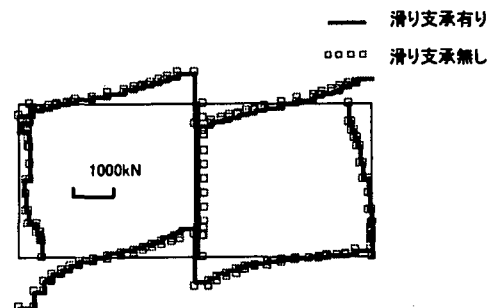


図-12 せん断力図

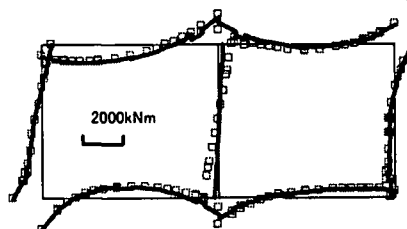


図-13 曲げモーメント図

土圧については、図-14、15 に示すように、滑り支承の有無で直土圧は側壁部および下床版で僅かに滑り支承有りの方が大きい値を示すが、せん断土圧には差異が認められない。

図-16 は筆者らがおこなったせん断土槽内の模型ボックスカルバート破壊実験のシミュレーション解析で得られた直土圧の分布⁴⁾である。この場合は滑り支承構造の直土圧が明らかに増加する結果となっている。

直土圧が大きくなる要因として以下のものが考えられる。滑り支承構造は従来構造に比べせん断剛性

が小さい。したがって、せん断土槽に同一の変形を与えた場合、滑り支承構造の水平相対変位は従来構造より大きくなる。また、滑り支承構造は上下床版の拘束を解放し、その結果、上下床版の曲げ変形は従来構造より大きくなる。直土圧はこの変形を防止する方向に作用し、滑り支承構造の直土圧は従来構造より大きくなる。

しかし、今回の実構造物の解析では滑り支承の有無で特に上床版直土圧に明確な差異が生じない。この一因として、すべり支承の有無に係らず、周辺地盤のひずみが大きく、剛性が低下することにより土圧が頭打ちになっていることも考えられるが、今後検討したい。

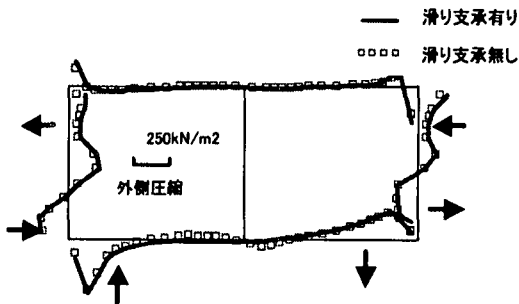


図-14 直土圧分布図（地震時増分）

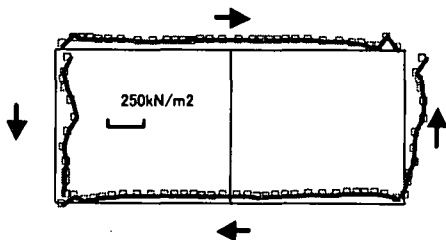


図-15 せん断土圧分布図（地震時増分）

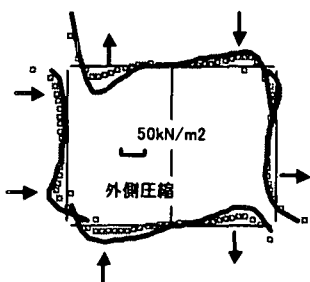


図-16 直土圧分布図（模型，地震時増分）

また、側壁直土圧の分布形状は模型実験のものと多少異なる。すなわち、模型実験では左側壁部分はほぼ全面に圧縮の土圧が作用し、右側壁部分はほぼ全面に引張りの土圧が作用していた。一方、今回の結果では両側壁とも中ほどで圧縮と引張りの土圧が反転するのが見られる。今回の結果は、構造物の剛性が地盤の剛性より小さい場合に、構造物の変形が地盤より大きいことに加えて地盤のせん断変形と構

造物梁部の曲げ変形の差により生じた結果である⁹⁾。一方、模型実験で土圧が反転しなかったのは、地盤と構造物の剛性がほぼ同等であり、構造物と地盤の相対変位が小さいために生じた結果と考えられる。

中柱の必要断面を従来構造と滑り支承構造で算定すると、図-17に示すように、0.5m×1.0mと0.3m×1.0mが得られる。この従来構造から滑り支承構造への中柱縮小幅は、駅部の必要空間を確保したまま掘削幅を縮小することが可能である。

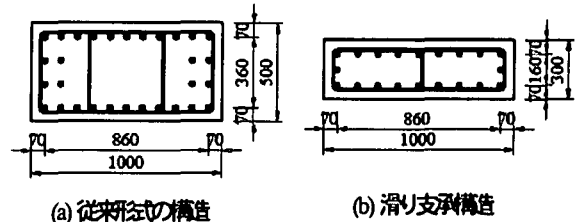


図-17 柱断面図

4. まとめ

地中ボックスカルバートの中柱上端に滑り支承を設置した場合の効果について、1層2径間の実構造物を対象に、非線形動的地震応答解析で検討した。その結果、① 滑り支承は、中柱のせん断力・曲げモーメントを低減し、構造系の崩壊を防止する。② 中柱のせん断力・曲げモーメントが低減されることから中柱の断面寸法を低減できる。③ 滑り支承の有無で隅角部の断面力・曲率の分布に大きな差異はないが、直土圧は滑り支承有りの方が大きい。すなわち、中柱が分担していた水平力を解放しても外力は隅角部の負担増として表れるのではなく地盤に分担されたものと解釈できる。

参考文献

- 1) 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，pp1-17，1996.3
- 2) 松田隆，大内一，佐俣千載：中柱を有する埋設函体構造物の地震時損傷メカニズムに関する解析的研究，土木学会論文集，No.563/I-39，pp125-136，1997.4
- 3) 遠藤達巳，坂上明，竹内幹雄，岩橋敏広：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，第24回地震工学研究発表会，pp805-808，1997.7
- 4) 中村敏晴，栗本雅裕，竹内幹雄，遠藤達巳：ボックスカルバートの中柱上端スライダ化の効果，第2回免震・制震コロキウム，pp325-330，2000.11
- 5) 矢的照夫他：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，土木学会論文報告集 No.537/I-35，pp303-320，1996.4
- 6) 色川邦彦他：地下構造物横断方向の応答特性に関する基礎的検討，土木学会第45回年次学術講演会 I-567，pp1164-1165