

## 地中構造物の中柱滑り支承の効果

中村敏晴\* 栗本雅裕\* 竹内幹雄\*\*

### 1. まえがき

1995年1月に発生した兵庫県南部地震では地震に強いと言われていた地下構造物にも被害が生じた。特に震度7の震災の帯と言われた地区に位置した開削工法による地下鉄駅舎、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。<sup>1),2)</sup>これは、地下構造物も適切な耐震設計が必要であることを示すものである。

トンネルなどの地下構造物は地盤の変形に伴って構造物本体に変形が生じる。この時、構造物の剛性を高めると構造物に作用する土圧は増大し、地震時に生じる断面力は大きくなる。このため、部材断面を大きくすることは必ずしも合理的とは言えず、地下構造物に伝達される地盤変形の影響を低減させる方が合理的である。

地下構造物に伝達される地盤変形の影響を低減させる方法としては、以下の2つが考えられる。

- ① 構造物の空間を確保しつつ地盤変形に追随する構造形式・形状とする方法
- ② 地震時の地盤変形を地下構造物に伝達しにくくする方法

中柱に滑り支承を設置する構法は、上記①の方法として中柱に応力解放装置(滑り支承)を取り付け、中柱のせん断破壊を防止するとともに全体の見かけ剛性を低下させることにより、地中構造物全体の靱性を高めるものである。

本報告はこの滑り支承の効果について、せん断土槽内で中柱に滑り支承を設置したボックスカルバートを破壊させた模型実験<sup>3)</sup>およびそのシミュレーションで確認した結果を示すものである。

### 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、**図-1**に示すように、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-2**に示す。

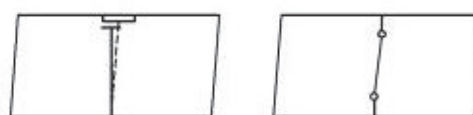


図-1 中柱による地中構造物の地震対策モデル

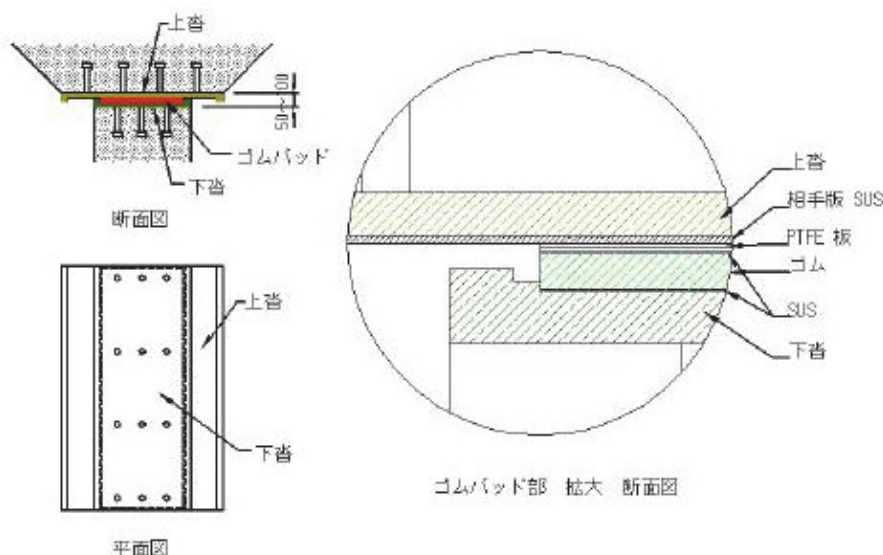


図-2 滑り支承装置構造図

\*構造研究室 \*\*技術開発部

この滑り支承は柱と同等断面形状からなる上沓、すべりゴムパッド、下沓より構成される。上下沓は鋼板製であり、すべりゴムパッドはPTFE材 (Poly Tetra Fluoro Ethylene 四フッ化エチレン樹脂:テフロン) 等の摩擦係数の小さい板を上面に設置した10~30mm程度の積層ゴムである。なお、PTFE材に接する沓には必要に応じてステンレス鋼板 (Steel Use Stainless: SUS) を設置する。PTFE板で水平力の伝達を逃がし、積層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。滑り支承のモデル概念図を図-3に示す。

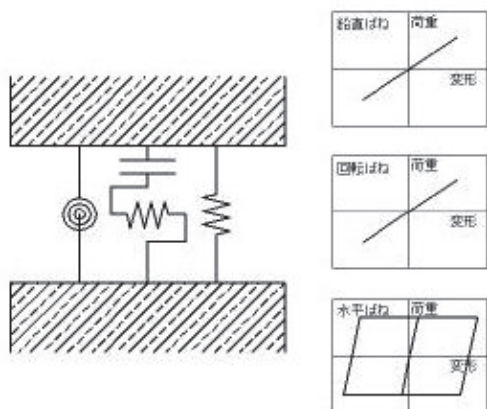


図-3 滑り支承モデル概念図

### 3. 滑り支承の効果

#### 3.1 模型実験のシミュレーション

##### a. 実験の概要

実験は、表-1に示すように、地盤のみをせん断土槽で載荷したもの (ケース I-1)、ボックスカルバートを直接アクチュエーターで載荷したもの (ケース II-0)、ボックスカルバートをせん断土槽で載荷したもの (ケース IV-1) の3ケースとした。

せん断土槽は、図-4に示すように、幅 4.0m、高さ 3.0m、奥行き 1.0m のものである。また、ボックスカルバートは、図-5に示すように、幅 2.3m、高さ 1.6m、奥行き 1.0m、壁厚 0.13~0.15m (複鉄筋 D10@100mm) のものである。中柱は、断面高さ 0.13m、幅 0.2m (鉄筋 D13、6本) で、せん断破壊先行型となるようせん断補強筋を配置していない。この形式の中柱を従来構造と称する。なお、ボックスカルバートをせん断土槽で載荷したケース IV-1 の中柱には鋼管 (φ114.3mm) の添え柱2本 (上部に積層ゴムを挿入-前章に示した滑り支承とは構造が異なるが機能的には同等) がある。このボックスカルバートは従来構造の中柱がせん断破壊した後に中柱が滑り支承形式に移行するものである。

地盤は乾燥砂をN値 10程度 (密度 1.78t/m<sup>3</sup>) に十分

締め固めて作成した。載荷はアクチュエーターの変位制御で静的に交番載荷した。なお、ボックスカルバートには約 5.0m 相当の土被り荷重 (中柱軸力 3~3.5N/mm<sup>2</sup>) が作用するようにインゴッドを用いて載荷した。

表-1 実験ケース

	ケース I-1	ケース II-0	ケース IV-1
載荷方法	せん断土槽 (地盤のみ)	気中	せん断土槽
中柱構造		従来構造	従来構造 + 鋼管添え柱

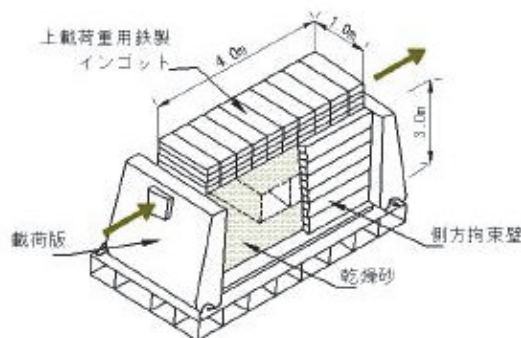


図-4 実験概念図

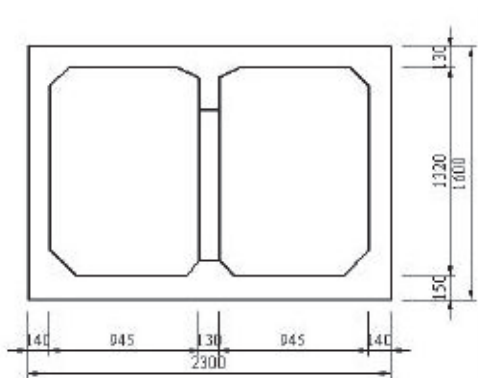


図-5 模型ボックスカルバート構造図

##### b. シミュレーション

実験のシミュレーションは、2次元の非線形静的FEMを用いておこなった。ボックスカルバートをせん断土槽で載荷したケース IV-1 の解析モデルを図-6に示す。

地盤は平面ひずみ要素、ボックスカルバートおよび載荷版は梁要素でモデル化した。モデルの底面は水平・鉛直の変位を固定した。なお、ボックスカルバートの周囲にはジョイント要素は使用しなかった。地盤の平面ひずみ要素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。構造物の梁要素は曲げモーメントと曲率 ( $M-\phi$ ) の関係をトリリニアのモデルで表現した。また、梁要素のせん断破壊に対する照査はFEM解析では実施していない。

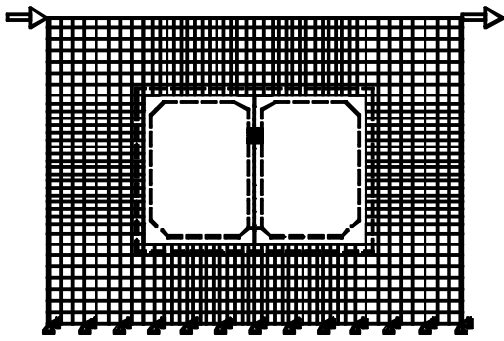


図-6 解析モデル図

ROモデルのパラメータは地盤のみをせん断土槽で載荷したケース I-1 で同定した。図-7に実験ケース I-1 とROモデルによるの  $G/G_{max}-\gamma$  曲線を示す。

M- $\phi$  曲線は、「鉄道構造物等設計標準・同解説（コンクリート構造物）平成4年」に示されるコンクリートおよび鉄筋の応力・ひずみ関係、コンクリートの引張強度を用いて  $M_c$ 、 $\phi_c$ 、 $M_y$ 、 $\phi_y$ 、 $M_u$ 、 $\phi_u$  を定めた。この時部材に作用している軸力は、FEM自重解析による軸力を用いた。M- $\phi$  曲線を図-8に示す。

滑り支承の鉛直ばね、水平ばね、回転ばねはゴムの剛性より算定した。

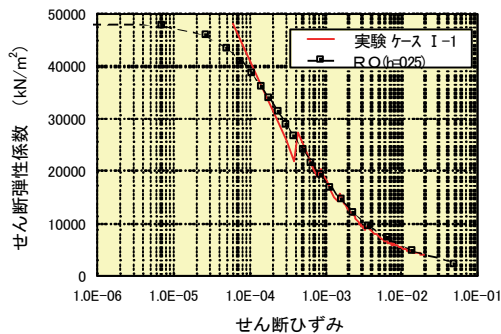


図-7 せん断弾性係数とひずみの関係

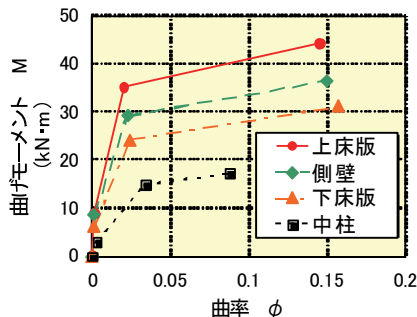


図-8 曲げモーメントと曲率の関係

c. 実験と解析結果の比較

表-1に示した各ケースについて土槽頂部の荷重-変位曲線を図-9~11に示す。ただし、ボックスカル

パートを直接アクチュエーターで載荷したケース II-0 については構造物頂部の荷重-変位曲線である。また、ボックスカルパートをせん断土槽で載荷したケース IV-1 の解析値は土槽頂部の変位が 37mm 以降、中柱がせん断破壊したもものとして中柱のないモデルで解析した結果を示した。

いずれの荷重-変位曲線も解析値と実験値はよく対応している。

実験での破壊状況は、ケース II-0 では上下床版の相対変位が 21.3mm (変形角 1.6/100) でせん断クラックが大きくなり、33.5mm (変形角 2.5/100) でせん断破壊したので載荷を中止した。一方、ケース IV-1 では上下床版の相対変位が 11.3mm (変形角 0.9/100、土槽頂部変位 23.2mm) でせん断破壊したが、土被り相当の荷重は、上端に滑り支承を挿入した鋼管の添え柱が分担し 37.6mm (変形角 2.6/100 土槽頂部変位約 78mm) でも載荷は可能な状態であったが装置の制約から載荷を終了した。

これに対し、解析では、コンクリートのせん断耐力を「鉄道構造物等設計標準・同解説（コンクリート構造物）平成4年」で評価すると両ケースとも中柱のせん断力はせん断耐力を超えない。実験で中柱がせん断破壊した相対変位で解析の中柱がせん断破壊するためには、上記設計標準によるせん断耐力を 1/1.3 倍程度することが必要である。この時、ケース II-0 では上下床版の相対変位が 11.7mm (変形角 0.8/100)、ケース IV-1 では 18.0mm (変形角 1.2/100、土槽頂部の変位 37mm) で中柱のせん断力はせん断耐力に達し、実験結果とほぼ符合す

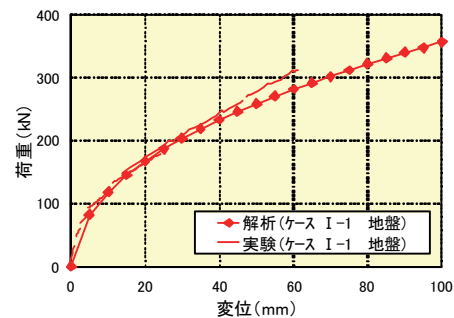


図-9 荷重-変位曲線の比較 (ケース I-1)

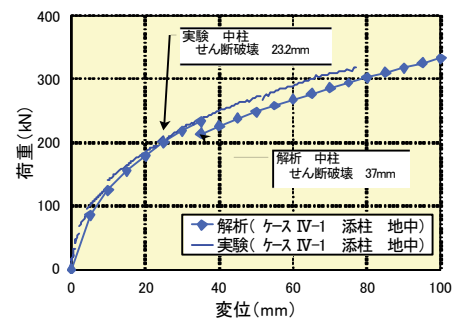


図-10 荷重-変位曲線の比較 (ケース IV-1)

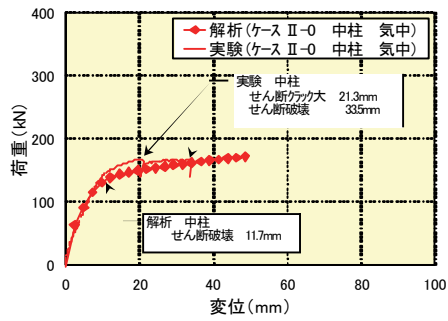


図-11 荷重-変位曲線の比較  
(ケース II-0)

る。せん断耐力が低い値を示すのは中柱の破壊が付着割裂破壊の様相を呈していたことが一因と考える。

図-12 は、ボックスカルバートをせん断土槽で載荷したケースIV-1 のインゴッドの鉛直荷重を除いた水平荷重分に対する、ボックスカルバート周囲のせん断土圧と地盤の平均せん断ひずみの関係を実験と解析と比較したものである。比較的良好に実験と解析は対応している。これは、地盤の非線形性を表現しておけば、ジョイント要素を用いなくとも、構造物周囲のせん断土圧の非線形性を表現することが可能であることを示している。

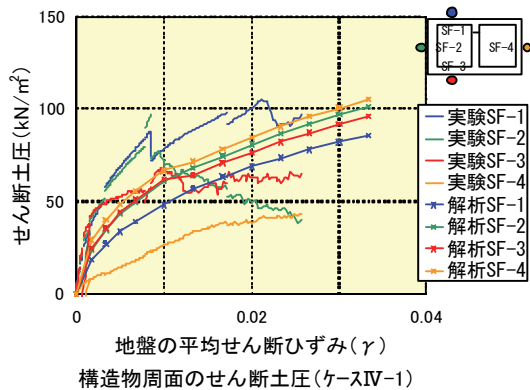


図-12 せん断ひずみとせん断土圧の比較

### 3.2 中柱滑り支承有無の影響

前節で示したように静的FEMは比較的良好的に実験をシミュレーションすることができた。そこで、この方法を用い、実験に用いた模型ボックスカルバートおよび地盤を対象に中柱上端に滑り支承を設置した時の影響について検討した。

#### a. 解析ケース

解析ケースを表-2に示す。解析ケースは地盤のみ、従来の鉄筋コンクリートの中柱構造のもの、中柱の上端に滑り支承を挿入したものの3ケースで、それぞれ気中の載荷とせん断土槽による載荷を実施した。地盤、ボックスカルバートの構造および滑り支承は前節同様のものとし、要素分割およびその定数も前節のものを用い、解

析は変位制御の片押しで実施した。ケース I-1、II-0 は前節に示したものである。

表-2 解析ケース

	ケース I-0	ケース II-0	ケース III-0
載荷方法	気中		
	ケース I-1	ケース II-1	ケース III-1
載荷方法	せん断土槽		
中柱構造	地盤のみ	従来構造	滑り支承 (積層ゴム)

ケース I-0 はボックスカルバートと同じ大きさの地盤

#### b. 解析結果

ボックスカルバートを直接アクチュエーターで載荷した気中載荷各ケースの土槽頂部の荷重-変位曲線、せん断剛性-変位曲線、せん断剛性比-変位曲線を図-13~15に示す。

図より、地盤のせん断剛性と両ボックスカルバートのせん断剛性に大きな差はないが、地盤および構造物の非線形性を反映して以下のような差異があることが分かる。  
① 従来構造のボックスカルバートのせん断剛性は滑り支承構造のボックスカルバートのせん断剛性より大きい。  
② 従来構造のボックスカルバートのせん断剛性は変形が小さい時点では地盤より大きく、変形が大きくなった時点で地盤と同程度となる。  
③ 滑り支承構造のボック

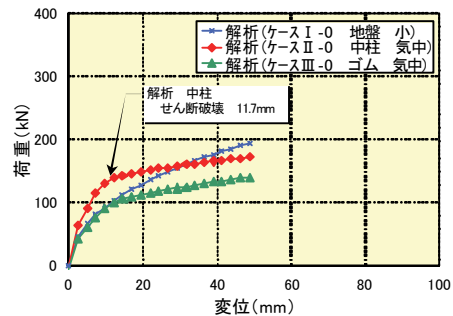


図-13 荷重-変位曲線 (上床版)

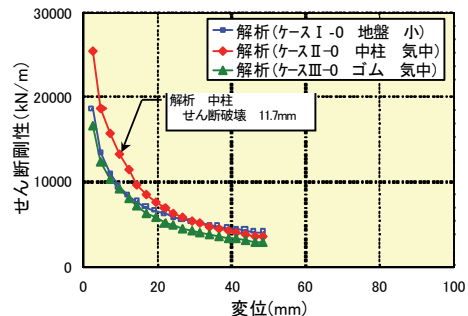


図-14 せん断剛性-変位曲線 (上床版)

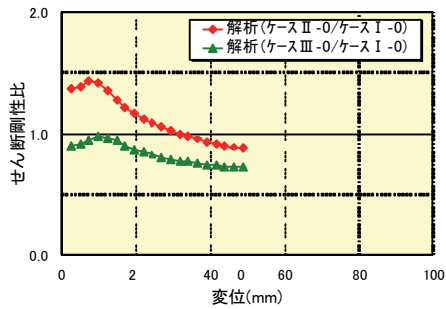


図-15 せん断剛性比-変位曲線 (上床版)

スカルパートのせん断剛性は変形が小さい時点ではほぼ地盤と同程度で、その後地盤より小さくなる事が分かる。

図-16 に示すせん断土槽で載荷したケースの荷重-変位曲線は、上記の空中載荷の傾向を反映した結果となっている。

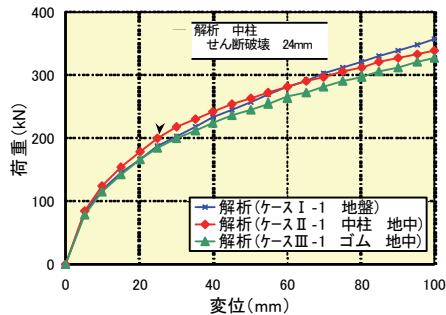


図-16 荷重-変位曲線 (土槽頂部)

図-17~20 はせん断土槽で載荷したケースの滑り支承の有無による変形、自重・上載荷重分も含む曲率、曲げモーメント・せん断力を比較したものである。土槽変位 20mm は鉄筋降伏前、60mm はすべての隅角部鉄筋降伏後となる。

図より、以下のことがわかる。

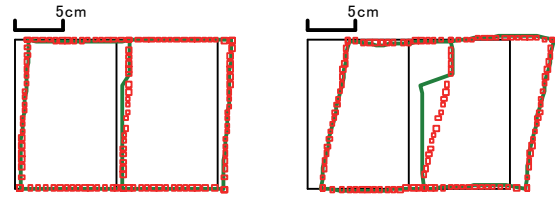
従来構造の中柱を有するボックスカルパートに地盤のせん断変形が作用すると、上載荷重による曲げモーメントに対して、隅角部では負の曲げモーメントが増加する部分 (図の右上隅角部・左下隅角部) と反転して正側のモーメントになる部分 (図の左上隅角部・右下隅角部) が生じる。中柱の上下床版では中柱の軸心を境にして曲げモーメントが増加する部分と減少する部分が生じる。中柱には曲げモーメントとせん断力が作用する。

これに対して、滑り支承を入れることにより、隅角部の曲げモーメント・せん断力に変化はないが、中柱・中柱上下の床版部の曲げモーメント・せん断力は減少する。ただし、隅角部の曲率は滑り支承を入れることにより、わずかではあるが大きくなる

以上のように、従来構造の中柱は、地盤のせん断変形による構造破壊に対してクリティカルな部材であるが、滑り支承を入れることによりクリティカルな部位は隅角

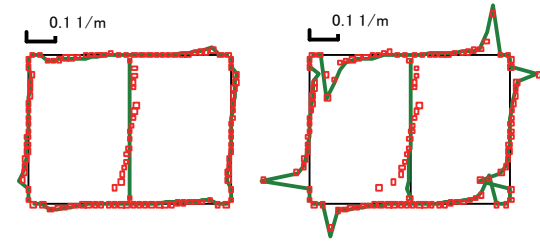
部に移行する。しかし、隅角部の断面力に増加はなく、変形が増大しても、十分な靱性を保持していれば破壊することもないと考えられる。

— 滑り支承有り  
□□□□ 滑り支承無し



変位(土槽変位) 20mm 変位(土槽変位) 60mm

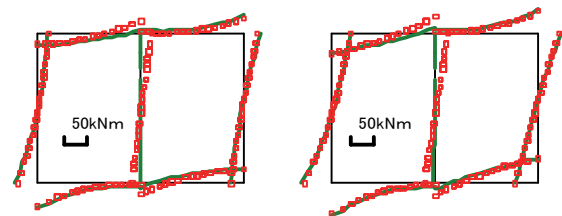
図-17 変形図



曲率(土槽変位) 20mm 曲率(土槽変位) 60mm

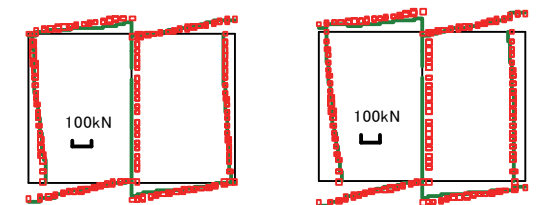
図-18 曲率分布図

— 滑り支承有り  
□□□□ 滑り支承無し



曲げモーメント(土槽変位) 20mm 曲げモーメント(土槽変位) 60mm

図-19 曲げモーメント図



せん断力(土槽変位) 20mm せん断力(土槽変位) 60mm

図-20 せん断力図

図-21 はせん断土槽で載荷したケースの滑り支承有無による地盤のせん断変形荷重分の土圧を比較したものである。

直土圧は、従来構造の中柱ボックスカルバートに比べ滑り支承構造のボックスカルバートの方が大きく、せん断土圧は両者ほぼ同程度の値となっている。

滑り支承構造は上下床版の拘束を解放する。したがって、滑り支承構造の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ものとする。

以上より、中柱に滑り支承構造を採用し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、地盤がこれを分担することを示している。

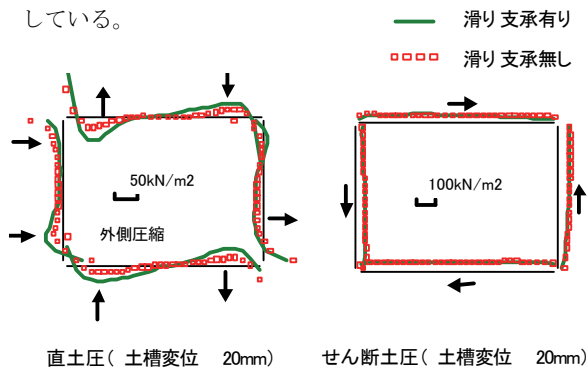


図-21 土圧分布図

#### 4. まとめ

中柱に滑り支承を設置することにより、中柱のせん断破壊を防止するとともに全体の見かけ剛性を低下させ、地中構造物全体の靱性を高める構法を提案し、その基本構造を提示した。

この構法の効果について、中柱に滑り支承を設置したボックスカルバートをせん断土槽内で破壊させた模型実験およびそのシミュレーションより以下のことが明らかになった。

地盤の非線形性をROモデル、鉄筋コンクリートをトリリニアモデルで表現した非線形FEMは、せん断土槽内に設置したボックスカルバートを静的に加力し破壊させた実験を、良好にシミュレーションすることが可能である。

中柱に滑り支承を入れることにより、同一の地盤変位のもとで、中柱および中柱直近の上下床版の曲げモーメント・せん断力が低減される。また、滑り支承構造は上下床版の拘束を解放し、上下床版の曲げ変形を増加させる。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。したがって、低減された曲げモーメント・せん断力はボックスカルバート構造物内に再配分されるのではなく、地盤に分担されたものと見ることができる。

以上より、中柱に滑り支承を設置することにより、無

理なく中柱の断面力を低減することが可能であり、構造系の破壊を防止できるとともにレベル2地震対策として中柱に配置する多量の主鉄筋・帯鉄筋を減少させることが可能となるとともに、経済的にも有利な構造とすることができる。

#### 5. あとがき

地中構造物の中柱滑り支承の効果を模型実験の解析で明らかにした。今後、実構造物、例えば地下鉄駅部の3層2径間構造を対象とした適用検討を実施するとともに、基本構造を示した滑り支承を詳細に検討することによりその設計手法を明確にして、滑り支承を実用に供せられるものにしていきたい。

#### 【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、岩楯敏広「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講演論文集、pp805-808、1997. 7