

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

遠藤達巳¹・竹内幹雄²・坂上明³

- 1 正会員 工修 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 フェロ会員 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)
 3 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)

開削トンネルなどの地中構造物は、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変形性能を有すると同時に、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。実験に先立ち、2連のボックスカルバート構造の動的および静的な地盤・構造物連成FEM解析を実施した。その結果、この構造形式は、一種の免震構造となっており、大変形時の耐震性能を合理的に確保できる可能性が確認できた。

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いわ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圧縮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。

この地震を教訓として改訂された新しい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。

開削工法によるトンネルなどの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、兵庫県南部地震のような巨大な地震動(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。本論文では、この新構造形式の有効性を確認するため、実験に先立って実施した2連のボックスカルバート構造と地盤の連成系を対象とした動的応答解析と静的非線形解析結果について報告するものである。

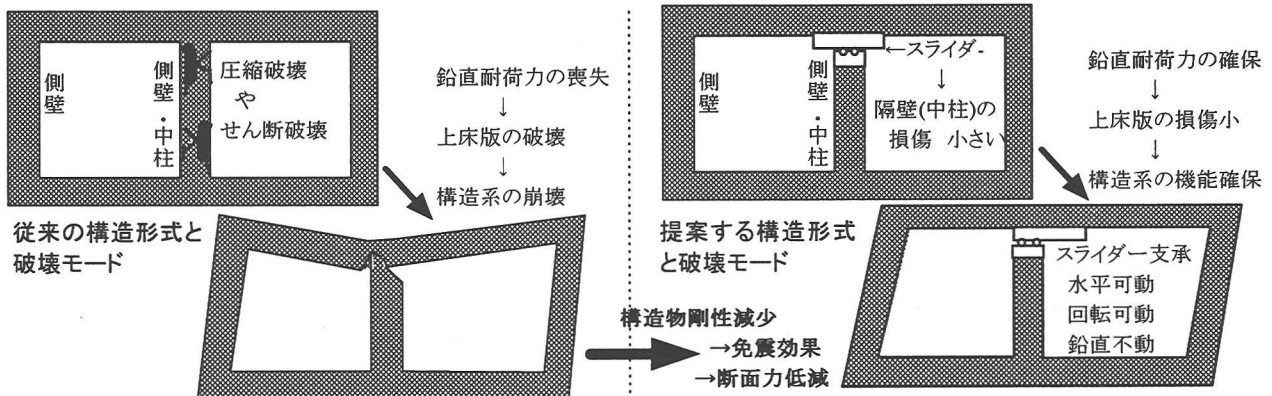


図-1 地中に埋設されるボックス形状の新構造形式の概念図

2. 新構造形式の概要

上記の耐震性能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。これまでの設計や耐震補強方策の多くは、補強鋼板の設置、コンクリート断面厚の増大およびせん断補強のための鉄筋の増加などによって、耐荷力を確保する方法を採っている。これらの方法では、補強効果にも限度があり、破壊モード(曲げ破壊とせん断破壊)が不安定になり、破壊形態を予測しにくいという欠点があるなど、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位変位が吸収可能な一種の免震装置(スライダ支持)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、レベル1地震動に対しては、主に側壁が水平荷重を分担するが、レベル2地震動に対しては、フェイルセーフ機能としてのスライダ支持があることで、中柱(隔壁)に脆性的な部材の破壊を発生させない。その結果、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. 動的応答解析による新構造形式の適用性検討 - 構造物の剛性変化に着目した検討 -

(1) 解析の概要

地中に埋設された2連ボックスラーメン構造を対象として、鉄筋コンクリート構造のひび割れ発生や鉄筋降伏などに起因する構造物の剛性の変化に着目した地盤・構造連成現象を考慮した動的応答解析を実施した。本検討は、新構造形式の成立性や合理性を確認するための予備的なものであり、定性的な動的連成挙動を把握することを目的としており、解析に用いた地盤および構造のモデルは簡略化したものを用いた。ただし、非線形領域での連成挙動については、後述する静的非線形解析の章で詳述する。

(2) 構造物のモデル化

図-2 で示す曲げ剛性が全部材一定で2連ボックスラーメン構造を対象とした①従来構造モデルと、隔壁または中柱上部にスライダ支持を配置を模擬して隔壁・中柱を省略した②スライダモデルの2種類を用いた。

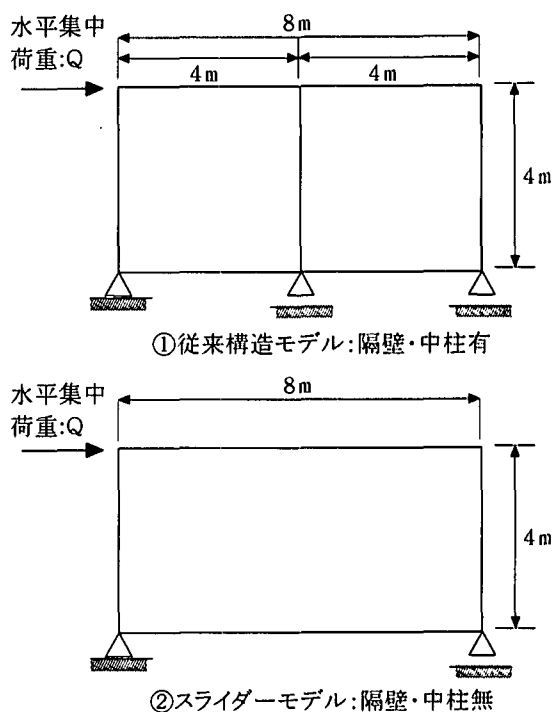


図-2 動的解析に用いたボックスカルバートの構造

解析で用いた構造物(ボックスカルバート)の諸元は以下の通りである。

断面厚:	36~48 cm
	(曲げ剛性換算で地盤の 0.41~2.45 倍)
ヤング係数:	$2.5 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$
減衰常数:	0.05
単位体積重量	1.8 tonf/m ³

(3) 地盤モデル

微小ひずみレベルの表層の固有振動数が 2.5Hz になるような層厚 20m の一様地盤を対象とした。本検討では、動的な連成効果のみを着眼点としており、地盤の非線形性は直接は考慮しなかった。ただし、地震時のひずみレベルを 2.5×10^{-3} と想定し、せん断弾性係数を 1/5 に低減したのを用いた。従って、表層の固有振動数が 1.1Hz となる地盤を対象としたことになる。以下に地盤の諸元を示す。

せん断速度:	$V_s = 4H \cdot f = 4 \cdot 20 \cdot 2.5 = 200 \text{ m/sec}$
単位体積重量:	$\gamma = 1.8 \text{ tonf/m}^3$
せん断弾性係数:	$G_0 = \rho V_s^2 = 1.8 / 9.8 \cdot 200^2 = 7347 \text{ tf/m}^2$
想定地震時ひずみ:	2.5×10^{-3}
地震時せん断剛性:	$G = G_0 / 5$
減衰定数:	$h = 0.15$

(4)解析ケース

構造物の剛性(3種類:断面厚さで考慮)と構造のモデル(2種類:従来構造モデル, スライダーモデル)をパラメータとした表-1 に示す 6 ケースの解析を実施した. 構造物の見かけのせん断剛性は, 図-2 中に示した水平集中荷重 Q を作用させた頂部変位から算出した. この見かけのせん断剛性は, 5 種類変化させたことになる.

表-1 動的解析における解析ケース一覧

CASE 名称	モデル	部材厚 (cm)	見かけのせん断剛性	剛性比 (構造物/地盤*)
D-P-1	従来	48	3657	2.45
D-P-2	従来	40	2045	1.37
D-P-3	従来	36	1490	1.0
D-N-1	スライダー	48	1490	1.0
D-N-2	スライダー	40	833	0.56
D-N-3	スライダー	36	608	0.41

*注)地盤剛性は全ケース一定で 1490tf/m²として算出.

(5)解析モデルと入力地震波

図-3 に解析で用いた要素分割図を示す. 対称モデルであるため右半分断面を抽出し, 地盤を平面ひずみ要素で, 構造物をはり要素でモデル化した. 境界条件は側面をエネルギー伝達境界, 底面を剛基礎とした.

入力地震波は兵庫県南部地震のポートアイランド GL.-8.3m の地点で観測された NS 成分を用いた.

図-4 に一例として CASE-D-P-2 のトンネル上下端の相対変位波形と, 隔壁・中柱および側壁上端の曲げモーメントを示す. 上下端の相対変位が最大となる時刻

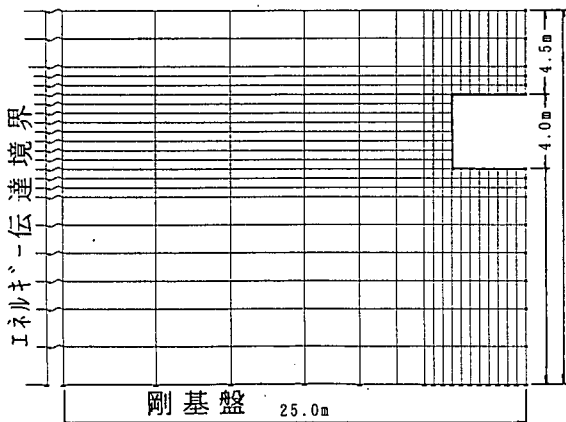


図-3 動的解析法に使用した要素分割図

(4.52sec)で隔壁・中柱ならびに側壁上端の曲げモーメントが最大応答を示すことが判る. 以後の検討では, この上下端の相対変位が最大となる時刻(4.52sec)断面に着目して検討を進める.

(6) 構造物と地盤の剛性比の違いが発生断面力に与える影響

提案する構造形式の議論とは離れるが, 構造物と地盤の剛性比の変化が発生断面力に与える影響の一般的な傾向について以下に述べる.

図-5 には, 構造物と地盤のせん断剛性比(構造物の剛性/地盤の剛性)と側壁に発生する断面力(曲げモーメントとせん断力)の関係を示した. ここで, 側壁の断面力の算出に当たっては, 2連ボックスラーメン形状の従来構造モデルの側壁に換算した. すなわち, スライダーモデルで算出された側壁の断面力については, 1/1.8

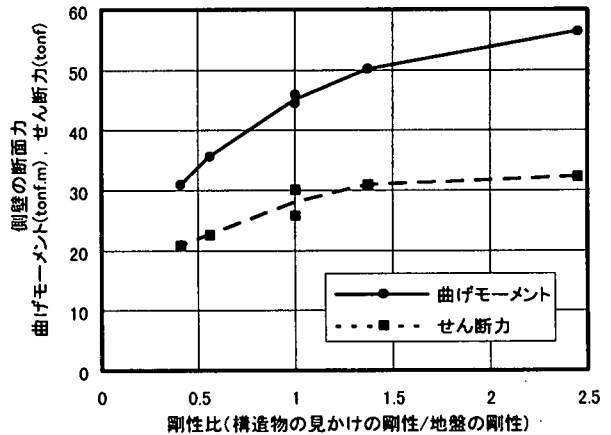


図-5 構造物と地盤の剛性比の相違が発生断面力に与える影響 -低刚性構造物の断面力低減効果-

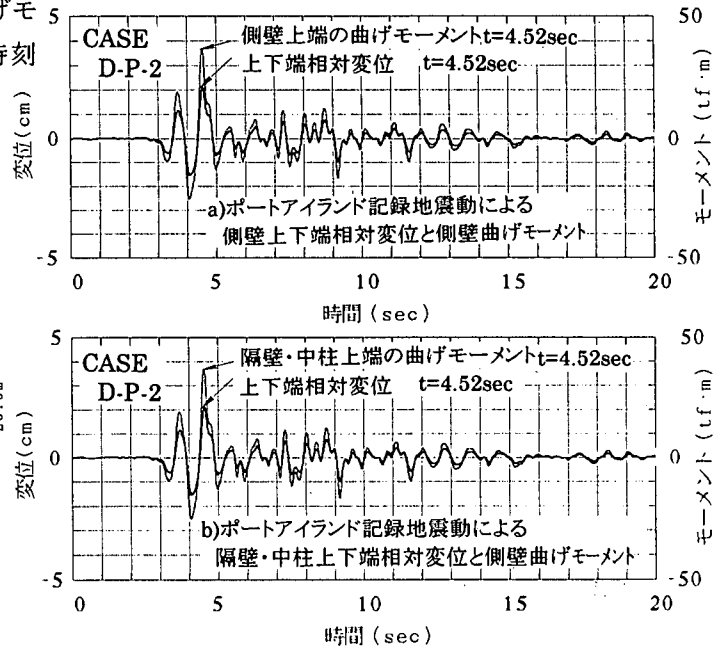


図-4 上下端の相対変位と曲げモーメントの時刻歴

倍したものを示した。これは、水平単位荷重:Qが作用した場合、スライダモデルの側壁に発生する曲げモーメントおよびせん断力は従来構造モデルの1.8倍になることに基づいている。

構造物の剛性が地盤の剛性に対して相対的に小さくなればなるほど、発生曲げモーメントおよびせん断力とも小さくなる傾向が判る。その傾向は、せん断力に比べ曲げモーメントで顕著である。また、地盤の剛性より構造物の剛性が小さい時にその傾向は顕著になる。

これは、剛性や固有振動数の相違により、構造物と地盤のひずみ差が小さくなり、作用する力が低減するためであると思われる。

すなわち、このような現象は断面厚さや鉄筋量を減少させることなどによって、発生する断面力を減少できるという地中構造物の一種の免震効果と考えることができる。今回提案しているスライダ構造も、見かけのせん断剛性を小さくすることで、発生する断面力を低減させる効果が期待できることになる。

別の見方をすれば、同じ断面諸元の構造物でも、レベル2地震動を考慮する場合はひび割れや鉄筋降伏による非線形性が顕著になり、このような鉄筋コンクリートの非線形性を積極的に設計・照査で考慮することにより、合理化が可能であることを示唆する結果である。今回の計算例によると、構造物の見かけのせん断剛性残存率が40%程度と仮定した状態を設計・照査で仮定することにより、断面力は非線形性を考慮しない場合の70%~80%程度に低減できることになる。レベル2地震動で鉄筋コンクリートの塑性化を許すような耐震性能について照査する場合には効果が大きいと考えられる。

7) 従来構造形式とスライダ構造形式の比較

従来構造形式をスライダ構造形式に変更した場合、

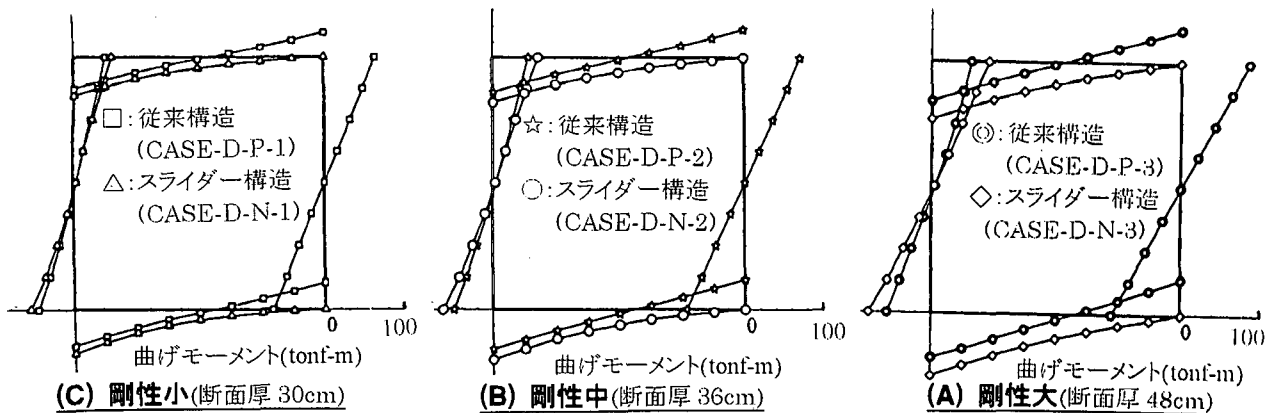
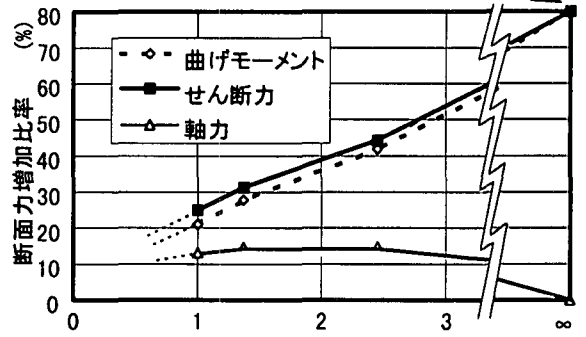


図-6 従来構造とスライダ構造の曲げモーメント比較

地上構造物として計算した場合



剛性比(構造物の見かけのせん断剛性/地盤のせん断剛性)

図-7 スライダ構造による断面力の増加率

隔壁や中柱が負担していた耐荷性能が期待できないため、側壁の負担が大きくなる。どの程度負担が増加するかを比較するため、図-6に曲げモーメントについて従来構造とスライダモデルの比較を示す。

従来構造の場合、隔壁・中柱に側壁より大きな曲げモーメントが発生しており、スライダ構造を模擬した隔壁のないモデルでは、この隔壁の分担分も側壁が負担することになるため、大きな曲げモーメントが発生することになる。前述したとおり、曲げモーメントの値は剛性が大きい場合ほど大きくなっている。それに加え、薄肉化して剛性が小さいほど両者の差が小さくなることが判明した。

他の断面力について、従来構造とスライダ構造モデルの比較を図-7に示した。図中には参考として、地上構造物の場合の増加比率も併記している。これは、構造物のフレームモデルのみに水平集中荷重を加えた場合の従来構造モデルとスライダモデルの比率である。

せん断力と曲げモーメントはほぼ同じ傾向となっている。軸力は増加比率はほぼ一定となっており、これは、スラ

ライダーモデルにおいて隔壁を省略したためと考えられる。

いずれの場合も、スライダーモデルの方が従来構造より大きな断面力になっているが、地上構造物として計算した場合の増加比率の80%に対して、地中構造物の場合は、地盤・構造物の連成効果によってその増加率が低下していることが判る。たとえば、地盤と構造物が見かけ上同等の剛性になった場合は、約30%程度の増加率となる。

構造物の剛性が小さくなるほど(断面を薄肉化すればするほど、あるいは、構造物の非線形化が進展するほど)、スライダー構造に変更することによる側壁の負担増加は軽減される。

4. 静的非線形解析による新構造形式の耐力・変形状態に関する検討

(1) 解析の目的・概要

前述した動的応答解析では、構造物および地盤の非線形性については、等価な線形剛性に置換することで評価した。しかし、両者の非線形性、特に構造物の非線形性が連成挙動に与える影響が大きいことが判っている。そのため、本検討では静的解析ではあるが、両者の非線形性をできる限り忠実にモデル化できる解析手法を用いて、2連ボックスカルバート構造を対象とした解

析を実施した。これにより、新構造形式の巨大地震時の大変形となった場合の新構造形式の成立性や合理性について考察を加える。

(2) 解析対象

解析に用いた対象は、図-8に示す著者らが以前に実施したせん断土槽内に鉄筋コンクリート製試験体を埋設した実験である¹⁾。前述した動的応答解析の解析対象の1/4スケールと考えてもよい。

この実験は地盤に土槽全体に均等なせん断ひずみを与える方式で、両者の逐次変化する非線形性を考慮した実験が可能である。また、後述する解析手法により実験を高精度にミュレートできることを確認しており、信頼性がある。

(3) 解析ケース

従来構造モデルとスライダー構造を採用した新構造形式モデルの比較と併せて、隔壁構造と中柱構造の比較も併せて実施した(図-9参照のこと)。

(4) 解析手法の概要¹⁾

解析は非線形FEM解析であり、以下に示す要素で各々の非線形特性を考慮した。解析に用いた要素分割を図-10に示した。

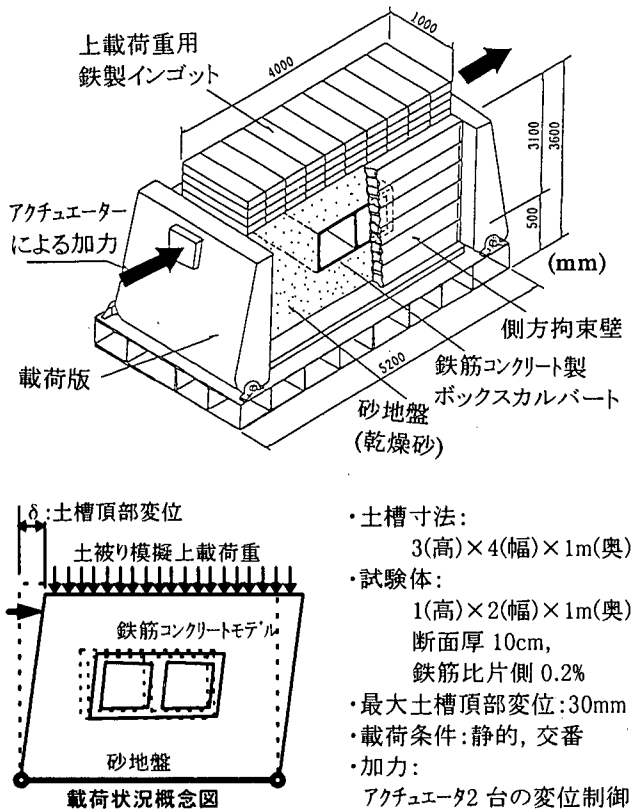


図-8 解析対象の実験概要

	正面図	側面図
CASE-S-1 従来-隔壁モデル 隔壁タイプ スライダーなし <実験結果あり>		
CASE-S-2 新形式-隔壁モデル 隔壁タイプ スライダー有		
CASE-S-3 従来-中柱モデル 中柱タイプ スライダーなし		
CASE-S-4 新形式-中柱モデル 中柱タイプ スライダー有		

図-9 静的解析で用いた構造条件

i) コンクリート要素

規準物性値

- ・弾性係数 $E=243,000 \text{ kgf/cm}^2$ ・ポアソン比 $\nu=0.167$
- ・引張強度 26 kgf/cm^2
- ・圧縮強度 345 kgf/cm^2

コンクリートの2軸破壊規準ならびに非線形特性は Kufer 則¹⁾を用いた。また、ひび割れ後にはテンションステイフニング効果を考慮した。e 関数によりひずみ依存で引張剛性残存率を算定し、 2000×10^{-6} でひび割れ発生前の剛性の40%まで残留させた。

ii) 鉄筋要素:

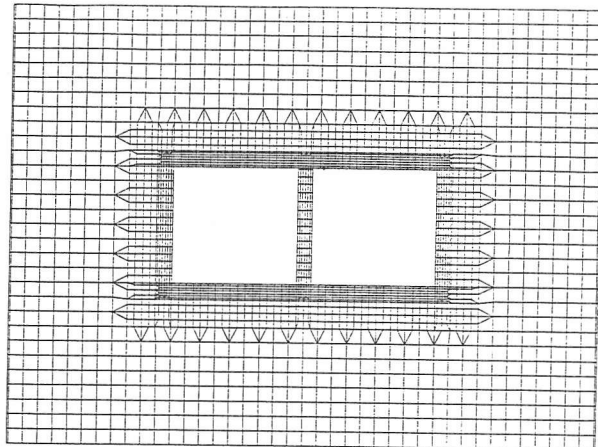
鉄筋はミーゼスの降伏関数を用いた弾塑性バイニリア曲線を用いてモデル化した。

iii) 砂地盤要素

規準とする初期物性は $G_0=400\text{kgf/cm}^2$, $\nu=0.4$ $\phi=35^\circ$ として、弾塑性理論に基づく硬化関数および降伏条件を用いてモデル化した²⁾。

iv) コンクリートと砂地盤の境界

モールクーロン則によるすべり破壊を考慮し、地盤と同等のせん断剛性を有するジョイント要素とした。



a) 全体図

b) 鉄筋コンクリート部拡大図

図-10 静的解析に用いた要素分割

(4) 解析結果の概要

解析では、土槽頂部の変位を 30mm まで増加させた。この変位は土槽の平均せん断ひずみでは、 1.0×10^{-2} に相当する。

CASE-S-1 と CASE-S-2 の土槽頂部変位 20mm 時のひび割れ性状を図-11 に示した。この時点では、従来構造では、すべての隅角部に断面深くひび割れが発生しており、隔壁上部にはコンクリートの圧縮破壊が見られる。スライダ構造では、隔壁には曲げが作用しないため、4 隅角部のみしかひび割れが発生しておらず、ひび割れの深さは従来構造よりやや深い。

図-12 には、土槽頂部変位が 20mm 時の地盤の降伏状況を示している。土槽の左下と右上隅部と、構造物の隅角部周辺でも降伏していることが判る。この地盤の降伏により、構造物が受ける土圧分布やその大きさが逐次変化していくと思われる。

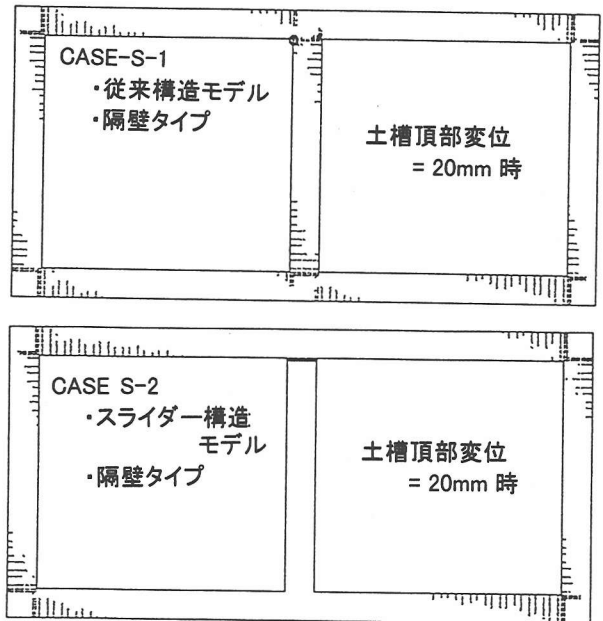


図-11 ひび割れ状況の解析結果

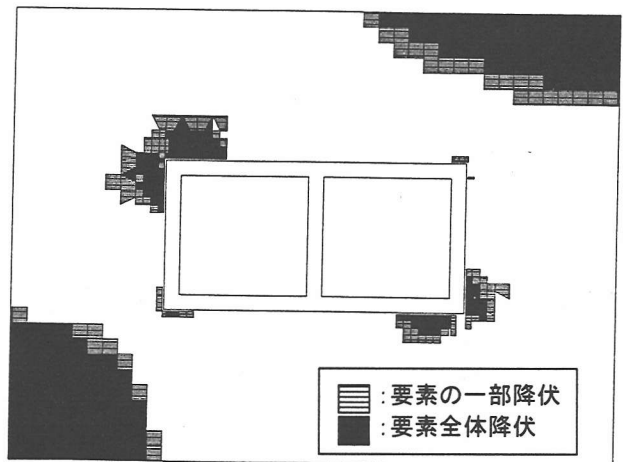


図-12 地盤の降伏状況の計算例

-CASE-S-1, 土槽頂部変位 20mm 時-

(5) 側壁と隔壁の荷重負担

図-13 には、従来構造モデル(CASE-S-1)の側壁と隔壁の曲げモーメントの推移を示している。ひび割れ発生前(ひずみレベル 1×10^{-3})から鉄筋降伏ひずみレベル(5×10^{-3})までは、隔壁に大きな曲げモーメントが発生しているが、その後は、隔壁の塑性化が進み、曲げモーメントの再配分によって、減少した後、ほぼ一定値を保つことになる。この傾向は中柱タイプの CASE-S-3 でも同様である。このように、隔壁の塑性化と再配分は側壁に比べ、早い時期に生じることが確認された。

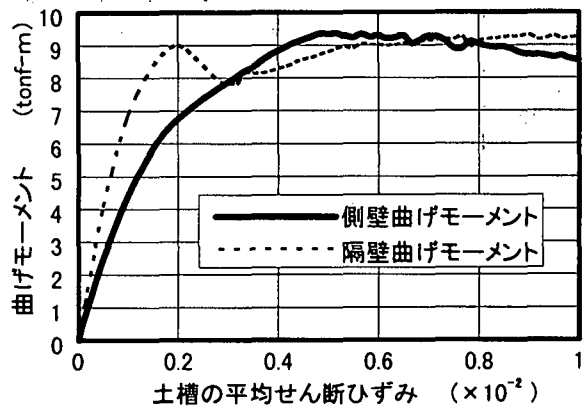


図-13 側壁と隔壁の荷重負担の推移(CASE-S-1)
-側壁と隔壁の下端曲げモーメント比較-

(6) 側壁に発生する断面力の比較

図-14,図-15 に側壁下端の曲げモーメントおよびせん断力と土槽の平均ひずみの関係を示した。ここで、断面力は任意の断面の応力分布を線形近似させ、その勾配から算出した。そのため、塑性化が進む段階(塑性ヒンジに相当、たとえば、 4×10^{-3} 以上)では、若干不安定になっている。

また、いずれのケースでも、 4×10^{-3} 程度を超えると、曲げモーメントは低下する傾向となっている。

スライダー構造としたケースと剛結した従来構造のものでは、曲げモーメントおよびせん断力とも大きな相違は認められない。土槽平均ひずみが 4×10^{-3} までは、スライダー構造に数%大きな断面力が発生している。最大曲げモーメント発生後は、不安定で一概には言えないものの、保持している曲げモーメントの値は従来構造の方が大きく、スライダー構造の側壁の損傷が大きいことと推測される。ただし、連成および地盤と構造物の非線形性を考慮しない場合はスライダー構造は従来構造に比べて1.8倍になることを考えれば、この差は非常に小さい。

塑性化する変位レベルの目安として、各隅角部の鉄筋降伏変位の一覧を表-2 に示した。隔壁・中柱の鉄筋降伏がもっとも早く、塑性化の進行が早いことが判る。側壁の鉄筋降伏はスライダー構造の場合の方が従来構造より、最大で15%程度小さい土槽頂部変位で降伏している。ただし、いずれのケースでも、すべての隅角部の鉄筋が降伏する土槽頂部変位は11.5~12.5mm(平均せん断ひずみとしては約 4.0×10^{-3})であり、それ以降の挙動に差異がないことの一つの根拠と考えることができる。

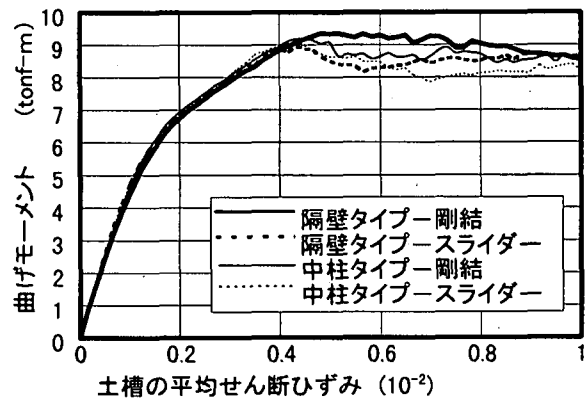


図-14 従来構造とスライダー構造の比較(CASE-S-1~4)
-側壁下端の曲げモーメント-

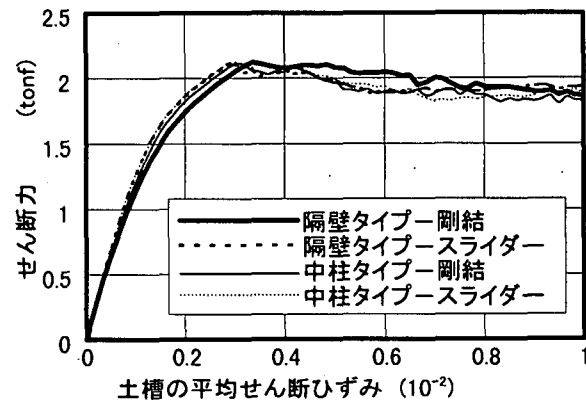


図-15 従来構造とスライダー構造の比較(CASE-S-1~4)
-側壁 下端のせん断力-

表-2 鉄筋が降伏する土槽頂部変位の一覧

CASE	降伏する部位(左から右への加力)					
	側壁 左上	側壁 右上	側壁 左下	側壁 右下	隔壁 上	隔壁 下
S-1	12.5	10.0	10.0	12.5	18.0	9.0
S-2	10.5	8.5	8.5	11.0	-	-
S-3	11.5	9.5	9.0	11.5	4.0	7.5
S-4	11.5	8.5	8.5	11.5	-	-

(7) 構造物に作用している外力

構造物に発生している断面力については言及したが、連成系における構造物が受けている外力(荷重)を確認するため、図-16 に構造物のせん断変形にもっとも大き

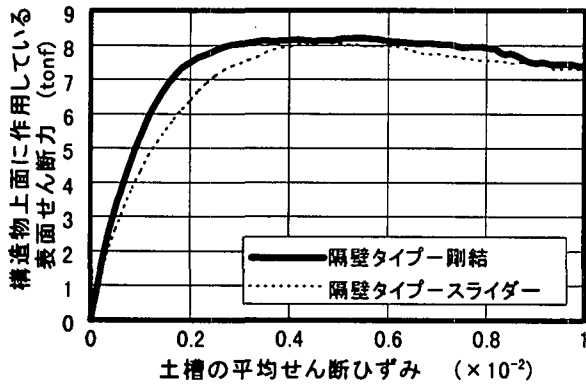


図-16 従来構造とスライダ'構造の比較(CASE-S-1&2)
- 構造物に作用している外力 -

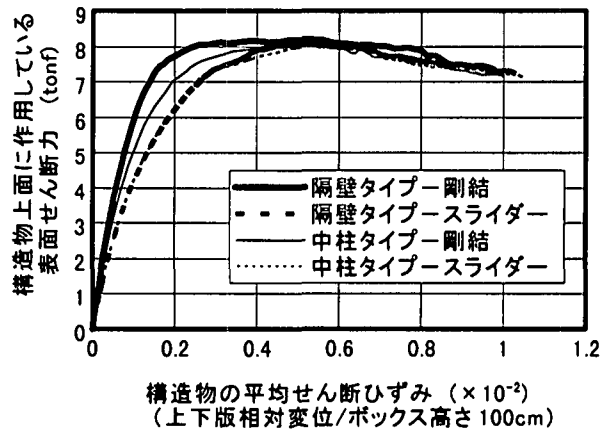


図-17 構造物単独の耐荷・変形状

く寄与すると考えられる構造物上面に作用する表面せん断力の算出結果を示した。

構造物の塑性化(たとえば鉄筋降伏)が進んでおらず、構造物の剛性が地盤に比べ相対的に大きい時点(土槽の平均せん断ひずみが 4×10^{-3} 程度)までは、隔壁を剛結した従来構造が大きな外力を受けている。しかし、それ以後変形が進むに従って、外力は減少するとともに、スライダ'構造と従来構造の差異が小さくなっている。すなわち、両者とも土槽全体の中では、同様の状態であると判断できる。

(8) 構造物の変形状

これまでは外荷重である土槽の平均せん断ひずみで整理していたが、構造物単独の荷重(外力)-変形状を明らかにするため、図-18 に構造物の見かけのせん断ひずみと上面での作用表面せん断力の関係を示した。

従来構造はスライダ'構造に比して初期剛性が高く、载荷初期の変形が小さい。スライダ'構造とした場合は、隔壁タイプと中柱タイプの差異はほとんどない。塑性化が進むと、いずれのケースもほとんど差がないことがよくわかる。大変形時には、地盤のひずみが主要な外力要因となる地中構造物では、スライダ'支承を配置することによる、側壁の負担増加の影響はほとんどないことが明らかとなった。

5. 結論

巨大地震時の耐震性能を確保することを目的として提案している「ボックスカルバートの隔壁・中柱に水平変位と回転が吸収可能なスライダ'を設置する新構造形式」の成立性・合理性を評価するため、単純なモデルを用いた解析を実施した結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) 構造物の剛性が地盤に比べ相対的に小さいと、構造物に発生する断面力は小さくなり、構造物の剛性を低減させる新構造形式は有利である。
- 2) 構造物と地盤の非線形性連成効果により、大変形時の耐荷および変形状は従来構造とほとんど差異がなく、隔壁・中柱の鉛直耐荷力の向上を考えあわせれば、耐震性能を大幅に改善できる。

以上のことより、限定された解析の結果からではあるが、提案した構造形式が十分な成立性・合理性を有していると考えられる。今後は、機器としてのスライダ'の性能確認および大型せん断土槽実験による検証などによる適用性検討を進めていく。

参考文献

- 1) 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設計に関する安全性照査マニュアル」
- 2) 西 好一「地盤材料の段-塑性挙動と構造物基礎の設計への応用に関する研究」昭和57年9月, 京都大学博士論文

(1996.9.14 受付)

A PROPOSAL OF THE EARTHQUAKE-RESISTANT STRUCTURAL SYSTEM FOR UNDERGROUND BOX-CULVERTS

Tatsumi ENDOH, Mikio TAKEUCHI, Akira SAKAGAMI

We will propose a new earthquake-resistant structural system for underground box-culvert like open-cut tunnel. In this system, a mechanical equipment which absorb horizontal and rotational displacement is placed on joints between upper slab and columns(separated wall), the secure performance against preservation of vertical forces will be improved without serious damages. To clarify the applicability and rationality of this system, 2 kinds of soil-structure-interaction analyses were conducted. It is concluded that this system becomes a kind of seismic isolation and seismic performance can be improved in case of large deformation.