

高架橋と一体となった大断面開削トンネルの設計

Design of Large Section Opencut Tunnel Combined with Elevated Bridge

徳永法夫*, 中本覚**, 吉村敏志***, 坂根勇一****

Norio TOKUNAGA, Satoru NAKAMOTO, Satoshi YOSIMURA and Yuuichi SAKANE

* 阪神高速道路公団神戸第二建設部 (〒650-0044 神戸市中央区東川崎町1丁目3-3)

** 阪神高速道路公団神戸第二建設部 (〒650-0044 神戸市中央区東川崎町1丁目3-3)

*** 阪神高速道路公団神戸第二建設部 (〒650-0044 神戸市中央区東川崎町1丁目3-3)

**** 日本技術開発株式会社大阪支社 (〒531-0072 大阪市北区豊崎5丁目6-10)

Highway is making gradual switch from elevated bridge to underground road in urban area.

Generally, underground road in urban area is built by opencut method. Tunnel specification about opencut method is published as design standards of large opencut tunnel. But method of earthquake-resistant design wasn't written clearly in its specification, because it was edited before Hyogo-ken Nanbu earthquake. Earthquake-resistant design (case of level 2) for combined structure (opencut tunnel and substructure of elevated bridge) isn't also established.

Therefore, we designed combined structure by simply method and inspected by dynamic analysis.

This paper shows a design of large opencut tunnel in chapter 2 and discusses a case study of design about combined structure in chapter 3.

Key Word : opencut tunnel, underground structure, earthquake-resistant design

1. はじめに

都市内高速道路では、高架橋主体の道路計画の時代から、周辺環境を考慮した地下道路が主体となる事業に移行しつつある。

都市内で地下道路を構築する場合、開削トンネルとなるのが一般的である。その設計に適用する大断面開削トンネル(地下道路)の統一的な基準として、「トンネル標準示方書開削工法編」¹⁾が挙げられるが、同基準は、兵庫県南部地震以前に整備されているため、耐震設計手法が明確に記されていないのが現状である。また、本稿で述べるような開削トンネルと高架橋下部工が一体化した複合一体構造の地震時(レベル2)に対する耐震設計手法についても確立されていない。このため、複合一体構造に対して、筆者らは簡易的な設計手法(以後、提案設計手法と呼ぶ。)を用いて設計を行ない、動的解析により検証した。

これらをまとめて、本稿では、2章において大断面開削トンネルの設計手法^{2), 3)}を示すとともに、3章において開削トンネルと高架橋下部工が一体化した複合一体構造の設計事例について述べるものである。

2. 設計手法

2.1 設計の流れ

開削トンネルの設計では、道路構造物として使用目的に適した線形、勾配、内空断面等の基本検討及び構造形式検討を行い、常時、地震時の各々の状況に応じた荷重を選定し、構造物の強度、変形、安定等について所要の安全性があることを確認しなければならない。

図-1に設計の流れをフローチャートで示す。

2.2 常時の設計

常時の設計は、横断方向に弾性地盤に支持されたラーメン構造として行い、安全性の照査は許容応力度法とする。

また、ラーメンの骨組みは、隅角部に剛域を考慮する。

開削トンネル荷重としては以下の種類の荷重を考慮する。

①死荷重として、躯体自重、上載土、中央分離帯、監視員通路、舗装等を考慮する。

②活荷重として、地上部に作用する活荷重とトンネル内に作用する活荷重を考慮する。

③水平土圧として、静止土圧を100%、70%の2ケースを

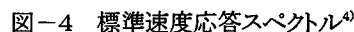
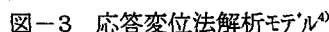
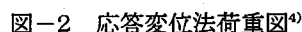
- ④揚圧力として、静水圧を最も不利となるように鉛直方向に考慮する。
- ⑤温度変化及び乾燥収縮は基本的に考慮しないが、土かぶり高が1m以下の場合は頂版の設計に考慮する。
- ⑥施工時荷重は、躯体の施工途中に切梁を撤去して土圧、水圧を躯体に作用させる場合や、逆巻き工法で施工する場合や、躯体を仮設構造物として利用する場合に考慮する。
- ⑦その他に近接工事、既設構造物、環境変化が本体に影響を及ぼすことが予測できる場合は、その都度考慮する。

地震時の設計は、図－1に示すように供用期間中に発生する確率が高い地震動(レベル1)と供用期間中に発生する確率は低い大きい強度をもつ地震動(レベル2)の2タイプが考えられるが、ここではレベル1地震時について示す(レベル2地震時については、3. 高架橋下部工載荷部の設計参照)。



図-2に応答変位法の一般的な荷重モデルを、図-3に解析モデルを示す。

- ① 構造物の重量に起因する慣性力 P_1 を考慮する。
- ② 地震時土圧 $p(Z)$ は、図-4に示す標準速度応答スペクトルを基に地震時の地盤変形量を算出し、これを考慮する。
- ③ 地盤に接する地下構造物の外周面に、地震時周面せん断力 τ を考慮する。
- ④ 地震時地盤バネ定数 K_s, K_H, K_v は、等価線形を考慮する。



3. 高架橋下部工を載荷した大断面開削トンネルの設計

3.1 設計概要

開削トンネルと高架橋基礎が一体化するようなケース(複合一体構造)の耐震設計手法が確立されていないため、実施設計に用いる設計手法(応答変位法を用いた静的解析)の提案を行い、その設計手法の妥当性を動的解析と応答変位法を使用した手法(以後、動的解析による応答変位法と呼ぶ。)により、検証した。

検討対象断面は、開削トンネル頂版上にランプ高架橋(3径間連続RC床版箱桁)橋脚が一体化として載荷される断面である。断面および側面を図-5に示し、提案設計手法と動的解析による応答変位法の解析モデルの概要を表-1に示す。

表-1 モデル設定手法比較表

	提案設計法	動的解析による応答変位法
図体部材特性	材料は非線形とし、モデルはトリリニアモデル(武田型)とする	提案設計法と同じ
地盤バネ	1次元動的応答解析(SHAKE)により収束した地盤剛性を用いて2次元FEM静的解析により算定バネ材料は線形とする	2次元動的FEM解析により収束した地盤剛性を用いて2次元FEM静的解析により算定バネ材料は非線形とする
地盤変位	1次元動的応答解析(SHAKE)による図体頂・底版間における相対変位	2次元動的FEM解析による図体頂・底版間における相対変位
周面せん断力	1次元動的応答解析(SHAKE)による各位置における最大せん断応力	2次元動的FEM解析による各位置における最大せん断応力
水平震度	1次元動的応答解析(SHAKE)による図体頂・底版間における応答加速度の平均値	2次元動的FEM解析による図体頂・底版間における応答加速度の平均値
橋脚荷重	保有水平耐力法による柱下端断面力	3次元骨組み動的解析による柱下端断面力

3.2 提案設計手法

開削トンネルと橋脚を分離し、以下のようにモデル化して、静的解析を行った。

(1) 開削トンネルモデル

① 応答変位法による静的解析モデルは、図-6に示す骨組みモデルとし、構造物は非線形性を考慮し、地盤については等価線形とした。構造物のモデル化にあたっては、常時死荷重により発生する軸力を用いたM-φ関係をトリリニアモデルで定義し、終局曲率は横拘束筋の拘束効果を見込まないことから、コンクリートの終局ひずみを0.0035として算出した(図-7)。また、地盤バネはFEM解析モデル⁴⁾により算出を行ったが、このときの地盤変形係数は、地盤重複反射理論による応答解析(SHAKE)により、収束した地盤剛性を用いた。

ここで、入力波形としては、ポートアイランド振幅調整波形⁵⁾を基盤面に任意で入力し、また、地盤特性は、建設省土木研究所が推奨する歪み依存曲線⁶⁾を用いて等価線形とした。

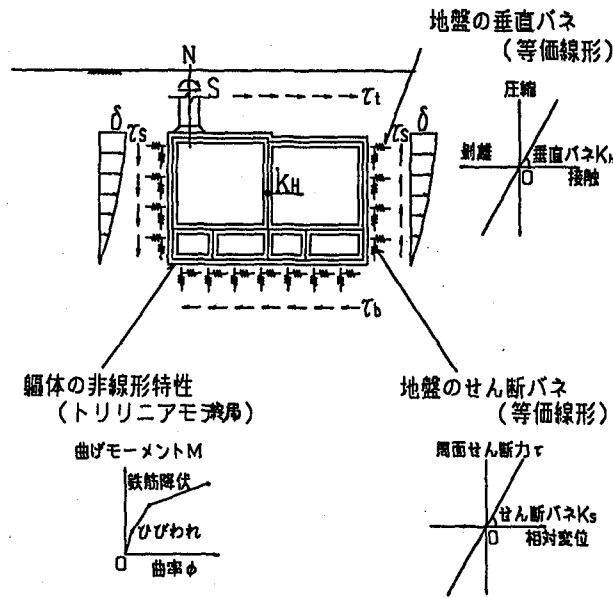


図-6 骨組み静的解析モデル

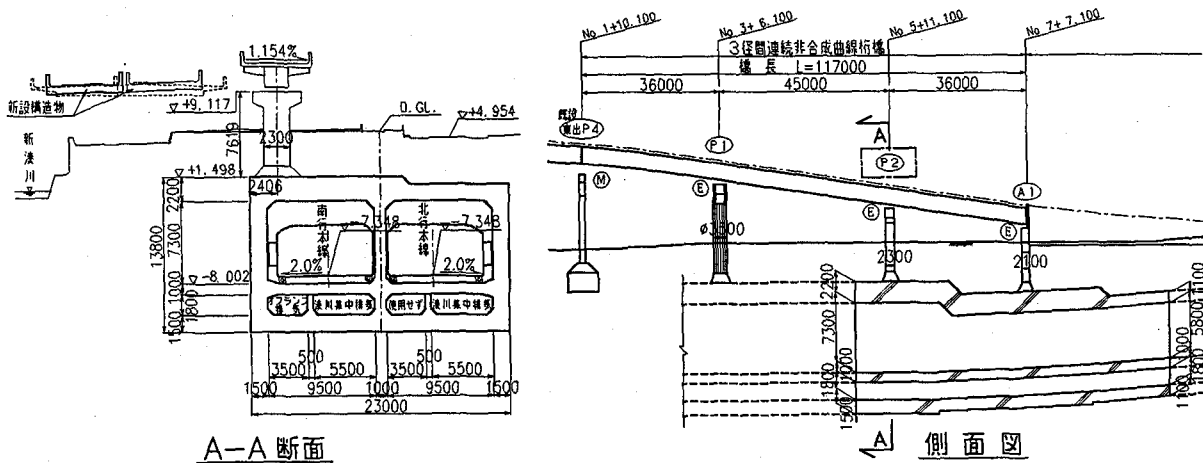


図-5 断面および側面形状図

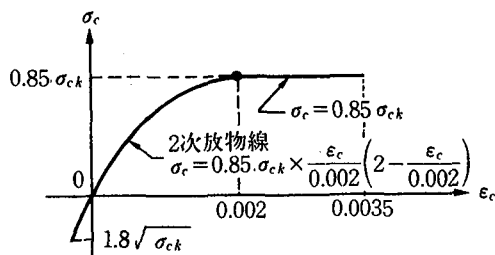


図-7 コンクリートの応力度－ひずみ曲線⁷⁾

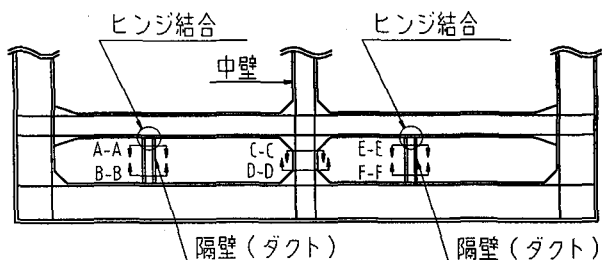


図-10 隔壁照査位置図

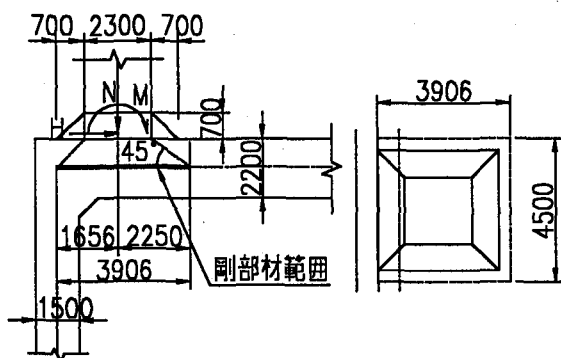


図-8 橋脚からの荷重及び剛域

○：ひび割れ曲げ耐力到達位置
△：降伏曲げ耐力到達位置

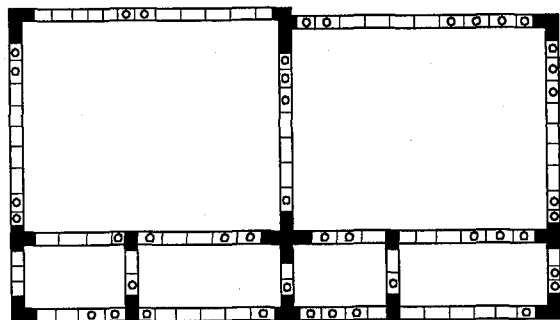


図-9 耐力到達箇所図

②荷重は、躯体底面に対する相対水平変位(地震時土圧)、周面せん断力、慣性力を考慮した。相対水平変位は、①と同条件を用いた地盤重複反射理論による応答解析(SHAKE)により算定した。

(2) 橋脚からの荷重

橋脚からの荷重は、「道路橋示方書・同解説⁸⁾」に基づき算出した橋脚の保有水平耐力Paを、図-8のように橋脚柱下端から頂版部材図心軸に対して45度の範囲を考慮し、柱下端断面力として開削トンネル頂版天端に作用させた。また、頂版部材の45度範囲に剛域を設定した。

(3) 提案設計手法による設計結果

各部材の発生断面力は常時<レベル1地震時<レベル2地震時の関係で、部材の多くはレベル2地震時で決定された。

表-2 照査結果表

隔壁の両端を固定した場合

部材	照査位置	解析結果 S	スターラップ	耐力 Ps	比率 S/Ps	判定
隔壁(左)	A-A	76.0	22-4	93	0.817	OK
	B-B	77.0	22-4	93	0.828	OK
中壁	C-C	166.0	22-4	211	0.787	OK
	D-D	166.0	22-4	211	0.787	OK
隔壁(右)	E-E	70.3	22-4	93	0.756	OK
	F-F	70.3	22-4	93	0.756	OK

隔壁の両端をヒンジにした場合

部材	照査位置	解析結果 S	スターラップ	耐力 Ps	比率 S/Ps	判定
隔壁(左)	A-A	0.4	16-4	57	0.007	OK
	B-B	0.5	16-4	57	0.009	OK
中壁	C-C	208.0	22-4	211	0.986	OK
	D-D	208.0	22-4	211	0.986	OK
隔壁(右)	E-E	0.3	16-4	57	0.005	OK
	F-F	0.5	16-4	57	0.009	OK

部材決定において、特徴的な点を以下に述べる。

- ①ひび割れ曲げ耐力に到達している部材は多少あるが、降伏耐力には至っていない(図-9)。
- ②地震時の挙動は、地盤の変形に追随すること、橋脚載荷断面力の影響が大きいことより、構造全体系としてせん断変形が卓越する。このため、中壁の付根、隔壁については、せん断耐力が支配的となり、その部材を助けるために、隔壁部でヒンジ構造を採用することにより、全体の部材厚を薄く設定することが可能となった。(図-10、表-2)
- ③地震時は隅角部付近で断面力が大きくなるが、ハチ勾配を1:1としたハチを全断面有効⁹⁾にしたことにより、部材厚を薄くすることが可能となった。
- ④底版隅角部の回転角は0.0023radとなり、阪神高速道路公団にて実施された実験確認値の許容回転角²⁾(0.04rad)を下回っている。

3.3 動的解析による応答変位法

実現象を表現するためには、地盤、函体、橋梁を一体モデルとした三次元立体動的解析が考えられるが、実用的ではない。そこで、複合一体構造の耐震設計は、高架橋と開削トンネルを分離解析¹⁰⁾することが適当であると考えられる。

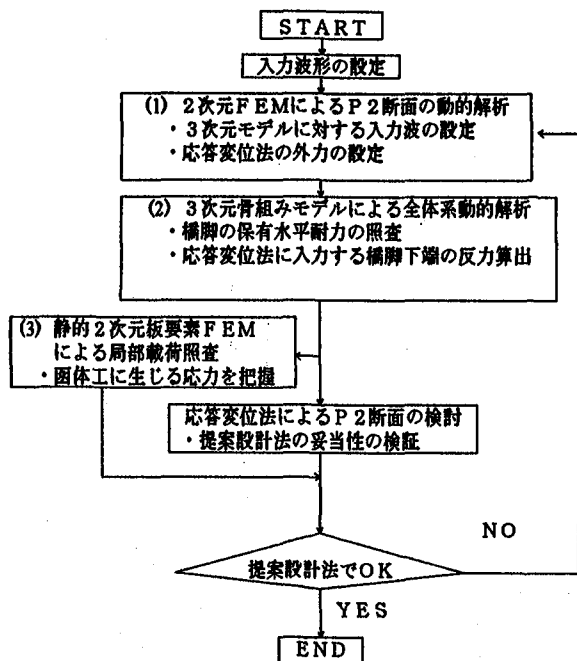


図-11 照査フローチャート

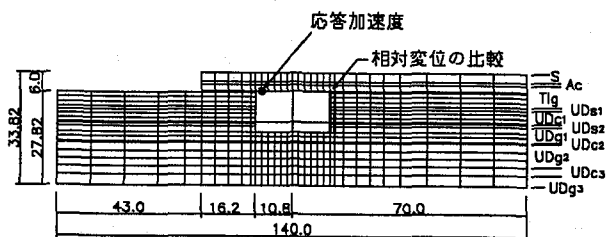


図-12 二次元動的FEM解析モデル

ことから、橋脚剛性及び上部工分担率の評価、橋脚+函体の地盤との連成挙動の把握に着手して、提案設計手法の妥当性を照査した。(図-11参照)

(1) 二次元動的FEM解析

二次元動的FEM解析は、開削トンネル(線形部材)+地盤(等価線形)モデルとすることにより、開削トンネル天端での応答加速度抽出、応答変位法に用いる地盤変位、周面せん断力、地震時慣性力及び地震時地盤バネ定数を算出することを目的として実施した。

図-12に解析モデルを示す。

(2) 高架橋の三次元骨組み動的解析

(1)で得られた開削トンネル天端の応答加速度を橋脚下端に入力することによって、橋脚の安全性を確認するとともに開削トンネル天端に入力する断面力を算出する。

a) 解析モデル

解析モデルは図-13および表-3のように上部工、下部工を一体とした骨組みモデルとし、曲線橋の影響を考慮するため、三次元モデルとした。上部工の骨組みは、線形はり部材とし、支承はゴム支承を線形バネ、可動支承をローラー支点とした。

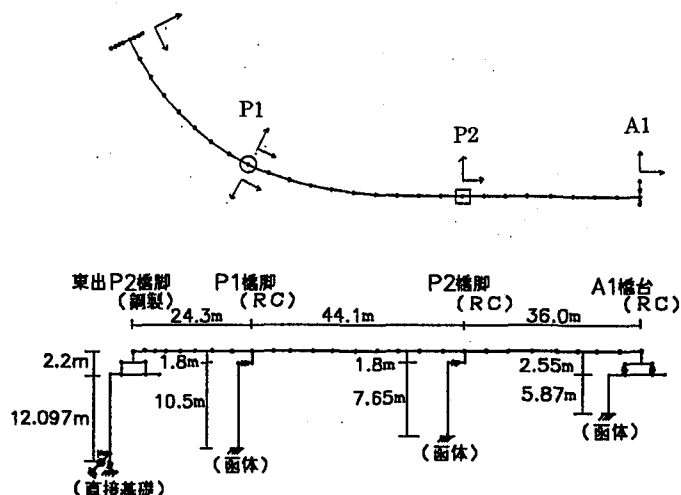


図-13 三次元骨組み動的解析モデル

表-3 橋梁のモデル化一覧表

	東出P2	A1、P2、P1
支	自由	線形バネ
承	固定	固定
鉛直方向	固定	固定
橋軸回り	固定	固定
直角回り	ピン	ピン
鉛直回り	ピン	ピン
橋脚	3次元線形梁モデル (鋼製橋脚)	3次元非線形梁モデル M-φ関係は武田型 トリニアモデル (RC橋脚)
基礎	線形地盤バネ (直接基礎)	固定 (函体)

また、橋脚柱部材はM-φを用いた非線形を考慮し、常時死荷重状態の軸力を考慮して設定した。減衰は、固有値解析より得られたエネルギー比例減衰モードの減衰を用いて、レーリー型減衰モデル化した。なお、採用したモードは、1次(上部工の橋軸方向支承の変形モード)、6次(P1橋脚直角方向)である。

b) 橋脚の安全性照査

保有水平耐力法で形状決定した橋脚を立体解析モデルで照査した結果を図-14および表-4に示す。この結果より、鉄筋の降伏を越えている部位があるものの、許容塑性率は十分に満足していることがわかる。

(3) 二次元静的板要素FEM解析

a) 解析モデル

橋脚荷重による開削トンネル部材応力度の応力集中に対する照査及び橋脚荷重の横断方向、縦断方向への影響範囲の確定を目的として、頂版部材を図-15の板要素にモデル化し、二次元静的板要素FEM解析を行った。

また、図-16に荷重状況図を示す。

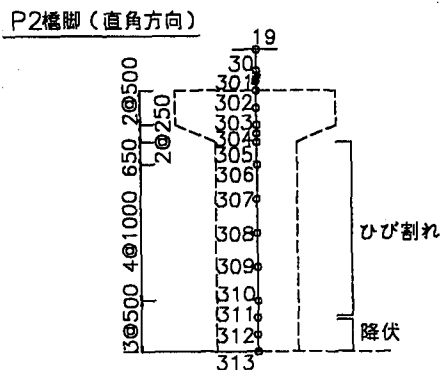


図-14 安全性照査モデル

表-4 安全性照査結果

節点番号	ひび割れモーメント Mc(tf・m)	降伏モーメント My(tf・m)	終局モーメント Mu(tf・m)	応答曲げモーメント (tf・m)	変形状態
305-306	723	2800	3597	1204	ひび割れ
306-307	729	2809	3607	1537	ひび割れ
307-308	735	2820	3618	1875	ひび割れ
308-309	740	2829	3628	2219	ひび割れ
309-310	745	2838	3638	2567	ひび割れ
310-311	748	2843	3643	2742	ひび割れ
311-312	751	2848	3648	2918	降伏
312-313	753	2852	3653	2956	降伏
節点番号	許容塑性率 安全率1.5	応答塑性率	許容塑性率 の判定		
305-306	19.7	0.2	OK		
306-307	19.6	0.4	OK		
307-308	19.4	0.5	OK		
308-309	19.3	0.7	OK		
309-310	19.1	0.8	OK		
310-311	19.1	0.9	OK		
311-312	19.0	1.0	OK		
312-313	18.9	1.5	OK		

b) 二次元静的板要素FEM解析と提案設計手法の比較

二次元静的板要素FEM解析結果の曲げモーメントと、提案設計手法の曲げモーメントの分布図を比較した結果(図-17)、10%程度提案設計手法の方が上まわっており、提案設計手法の橋脚荷重の頂版への広がり、頂版の剛域の設定等の図-8に示す仮定条件が適切であったと考えられた。

3.4 提案設計手法の妥当性照査結果

解析モデル(荷重、地盤バネ)は、提案設計手法(静的解析)と動的解析による応答変位法では若干異なるものの、解析結果の比較では図-18に示すように提案設計手法の断面力が動的解析による応答変位法結果の断面力より10%上まわる程度であった。

4. まとめと今後の課題

以上の検討結果を踏まえて、以下のことが指摘される。

①提案設計手法と動的解析による応答変位法の比較結果にあまり大差はなく、変形量、断面力ともに概ね同程度の値を示すことが把握できた(図-18参照)。したがって、設計レベルに用いる設計法として妥当と考えた。

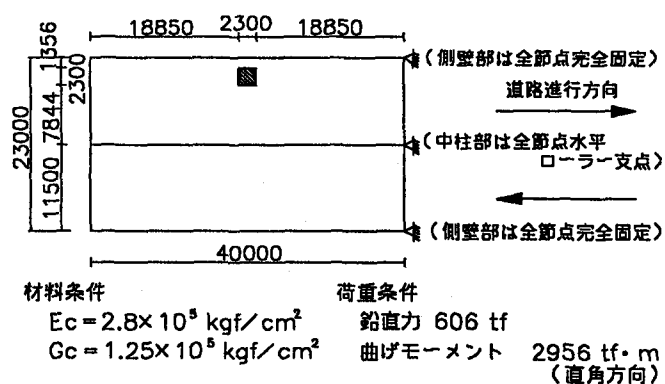


図-15 二次元静的板要素FEM解析モデル

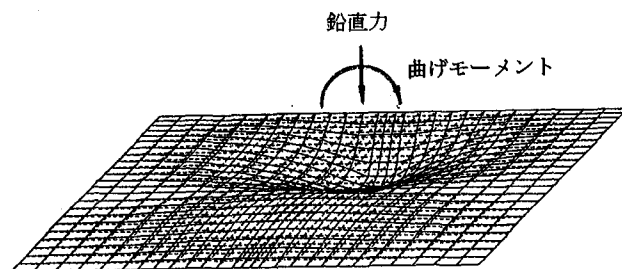


図-16 二次元静的板要素FEM解析荷重状況図

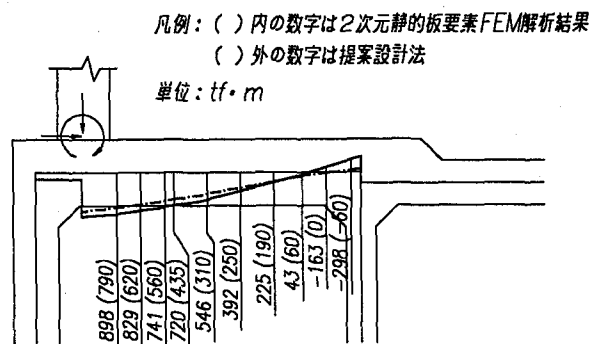


図-17 提案設計法と二次元板要素FEM解析比較図

②頂版の曲げモーメントは提案設計手法より、二次元静的板要素FEM解析結果の方が、若干上まわっている箇所はあるが、概ね同程度の値を示すことがわかった(図-17参照)。したがって、本事例で行った橋脚からの荷重を躯体に作用させる考え方および橋脚と頂版接合部の剛域設定方法の妥当性であることが検証された。

③このような事例に対する今後の検討課題としては、橋軸方向に作用する高架橋からの外力に伴う、躯体のねじれ、橋軸方向の挙動把握、目地位置との関係等

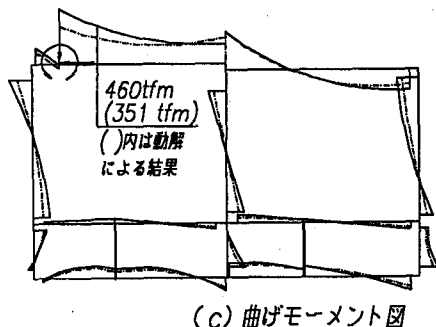
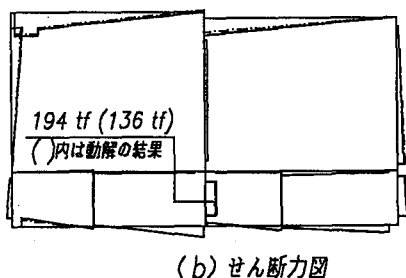
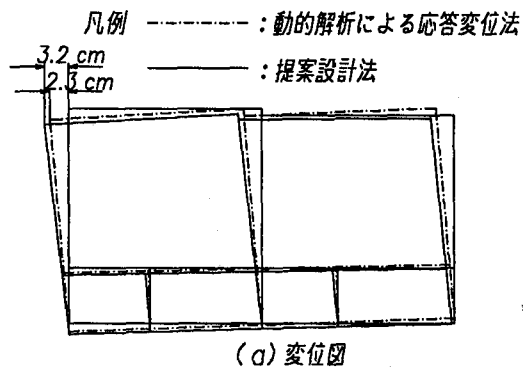


図-18 変位量および断面力比較図

が挙げられる。

④本事例で高架橋下部工を載荷した大断面開削トンネルの設計手法の妥当性検討を行ったが、今後は、現場条件に応じて適切な耐震設計手法を用いることが必要である。

参考文献

- 1) 土木学会：トンネル標準示方書 開削工法編・同解説 1997.7
- 2) 阪神高速道路公団：開削トンネル設計指針(案) 1997.10
- 3) 阪神高速道路公団：トンネル計画基準(案)/1996.3
- 4) (社)日本道路協会：駐車場設計・施工指針 同解説 1992.11
- 5) 阪神高速道路公団：開削トンネル耐震設計指針(素案) 1998.6
- 6) 建設省土木研究所：土研資料第1778号，地盤の地震時応答特性の数値解析法，SHAKE，DESRA/1982.2
- 7) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 IV下部構造編/1996.12
- 8) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編/1996.12
- 9) 幸左，藤井，大野，鈴木：開削トンネルの耐震性に関する実験的検討，土木学会第53回年次学術講演会 1998.10
- 10) 山口，太田，大西，家村，斉藤：高架橋と地下鉄の一体構造物の耐震解析法に関する考察，土木学会第51回年次学術講演会，1997.9

(1998年9月18日 受付)