

開口部を有する地中構造物の 応答変位法による耐震設計に関する一考察

徳永法夫¹，今田康博²，内山茂利³，吉田 剛⁴

¹正会員 阪神高速道路管理技術センター 開発研究部 (〒541-0054 大阪府大阪市中央区南本町 4-5-7)

²非会員 阪神高速道路公団 保全施設部保全技術課 (〒541-0056 大阪府大阪市中央区久太郎町 4-1-3)

³正会員 日本工営株式会社大阪支店 技術第一部第二課 (〒553-0003 大阪府大阪市福島区福島 7-20-1)

⁴正会員 日本工営株式会社大阪支店 技術第一部第二課 (〒553-0003 大阪府大阪市福島区福島 7-20-1)

都市内開削トンネルの本線ランプ分岐合流部における函体構造を計画するに際して、トンネル換気計画に基づきランプ車道部から本線換気ダクトへ通じる接続部を確保するための大断面開口部を設ける必要があった。このため函体ブロックの一部に断面欠損を生じることとなるが、ブロック全体が載荷重に対して抵抗すると仮定し、開口部を仮想部材に置き換えた解析モデルにより応答変位法を実施した。

本文は大断面の開口部を有する地中構造物の耐震性能を解明するために、開口部に仮想部材を配置した骨組モデルによる非線形静的解析を行い耐震性能照査に関する考察をとりまとめたものである。

Key Words: underground structure, cut and cover tunnel, earthquake resistance design

1. はじめに

都市内開削トンネルの設計において、本線と2本のランプが分岐合流するインターチェンジの函体構造を計画するに際して、図-1の模式図に示すとおり、一体函体が分離3函体へ変化する構造急変部を設けるとともに、トンネル換気計画上ランプ車道部から本線換気ダクトへ通じる接続部を確保するため図-2に示す大断面開口部を計画する必要がある。

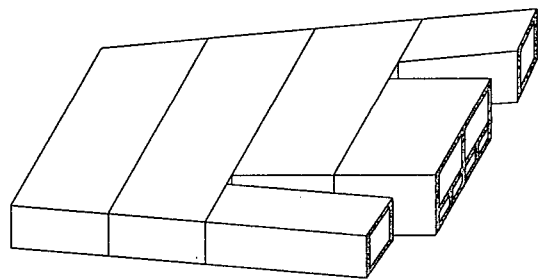


図-1 形状模式図

開削トンネルは通行車両が進行する縦断方向に箱形の断面が連続した線状(棒状)構造物であり、一般に良好で均一な地盤中に設置される場合には、トンネルに作用する諸荷重に対する躯体応力計算は、主として頂底板および側壁にて構成される横断方向について行うものである¹⁾。

躯体自重や地震時に作用する土圧などの諸荷重

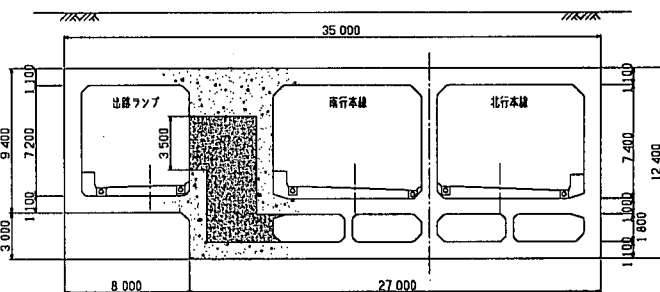


図-2 開口部を有する函体断面図

が開削トンネルに与える影響を評価するには、トンネル横断方向の適切なモデル化と、それによる構造解析に基づく必要があると考えられるが、ここで対象とする開削トンネルは、本線と出路ランプの境界壁に位置する開口部により、部分的に横断方向の骨組構造が矩形を構成できない。したがって、開口部に仮想部材を配置した骨組モデルを作成し応答変位法を用いた耐震設計を実施した。適用すべき設計地震力には「レベル1地震動」と「レベル2地震動」の2種類があるが、本モデルにおいてはレベル1地震時よりも、常時にて躯体断面が決定されることが事前検討にて明らかとなっているため、耐震検討においてはレベル2地震動のみを対象とする。なお、一般にレベル2地震時においては部材の降伏曲げモーメントを超えた塑性領域レベルも対象とするため、部材各部の曲げモーメントと曲げ剛性の関係を非線形とする必要がある²⁾。

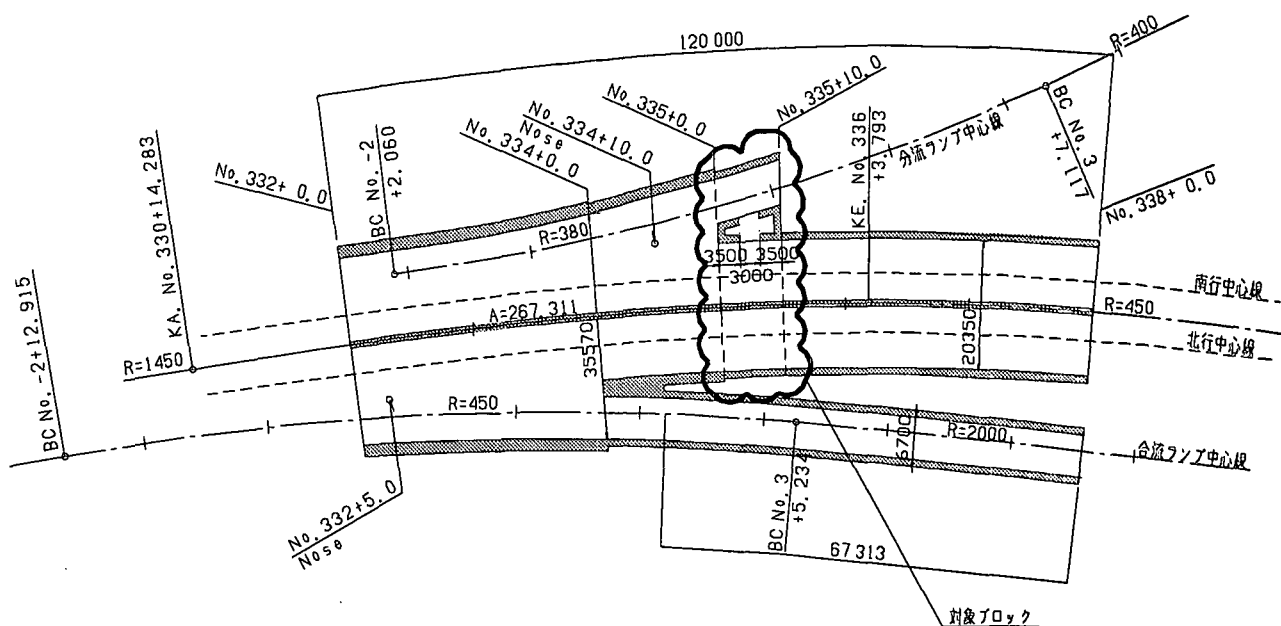


図-3 全体平面図

本文は、本線函体から入出路ランプが分岐合流するインターチェンジに位置する開削トンネルを対象として、境界壁に大断面開口部を有する函体構造物の耐震性能を評価するために、開口部に仮想部材を配置した骨組モデルによってレベル2地震動に対する応答変位法解析を実施し、その結果に基づき耐震性能照査に関する考察をとりまとめたものである。

2. 開削トンネル構造計画

検討対象となる開削トンネル 120m区間の構造規模は、本線単独区間が南北行き各2車線で内空幅員20m程度、分岐合流区間では最大36m程度となり、ランプは1車線で7m程度である。また車道部の内空高は建築限界、道路施設保全空間、付属施設空間ならびに排水側溝高を合わせ7m程度、ダクト部が一律1.8mである。対象路線の道路中心線に対して、幾何構造に基づく必要幅員を確保した全体平面図は図-3に示すとおりとなる。

開削トンネルを連続化した場合、地盤や地震の影響あるいはトンネルの載荷重によって縦断方向に無視できない応力を発生するおそれがある。とくに入出路ランプが分岐合流する箇所では、境界壁や側壁の配置が変化する構造急変部となるため、伸縮や回転などの変位を吸収する可とう性継手（構造目地）を設ける必要がある。分岐合流ランプによる構造急変部としては、測点Na334+0.0、334+10.0、335+0.0、335+10.0の4箇所が該当するため、ここに伸縮遊間をもつ構造目地を設けることとする。

このうち、開口部を含む函体ブロックは、図-4に示すとおり、Na335+0.0からNa335+10.0までの10m区間にあたり、ランプ車道部から本線ダクトへ通じる接続部は、測点Na335+5.0を中心として±1.5mの範囲に配置される。この境界壁は分流ランプの本線側側壁（ランプ境界壁）と本線の分流ランプ側側壁（本線境界壁）の2枚壁で構成されており、函体間の平面的な広がりに応じて、各々の離隔が漸次変化していく。ランプ境界壁の開口高は3.5m、本線境界壁の開口高は1.8mである。

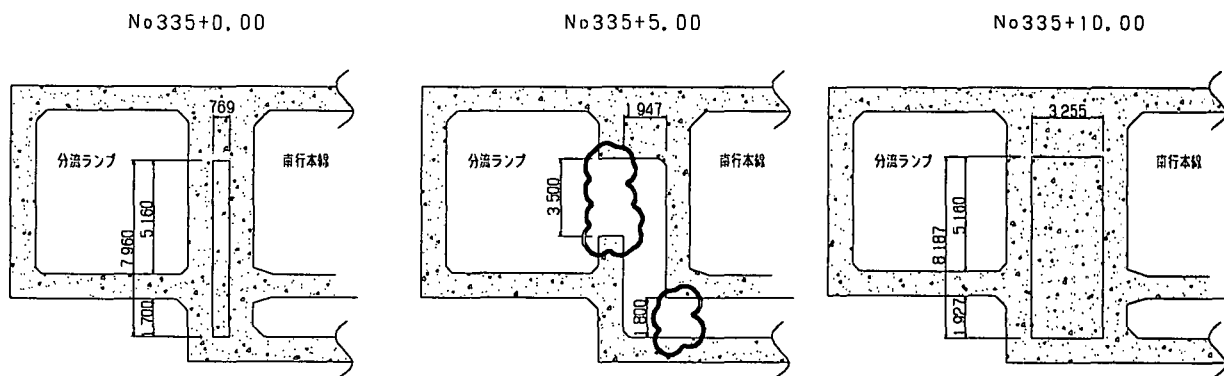


図-4 境界部断面図

3. 骨組モデルによる応答変位法解析

(1)実施目的

- 開削トンネルの耐震設計は地中道路構造物として必要な耐震性能の確保を原則とし、供用期間中に発生する確率は低いが大きな強度をもつレベル2地震動に対して、以下の耐震性能確保を目的とする。
- a)地震直後にも緊急車両の通行が可能である。
 - b)補修補強により建設当初の機能を回復できる。
 - c)被災後にも建築限界が確保できる。

つまり、ある程度の損傷が発生しても、その程度が避難路の確保や救助活動などに支障をきたさないことを想定していると考えられる。したがって部材の損傷レベルは、設計曲げモーメントが曲げ降伏点を超え、かぶりコンクリートが圧縮破壊に至るまでの状態を確保する必要がある。なお、せん断破壊先行型は脆性的で好ましくないため、設計せん断力がトンネル標準示方書〔開削工法編〕・同解説¹⁾に示されるせん断耐力以下であることを確認する。

(2)実施手順

実施手法は函体工を横断方向の弾塑性地盤に支持された、非線形部材で構成されるラーメン構造にモデル化し、二次元骨組解析により行うものとする。なお、支持地盤の抵抗要素は地盤バネとしてモデル化するが、計画位置の土質は深さ方向に著しく変化するため、地盤反力係数の推定式によらずFEM解析により初期剛性を求めている。基本的な実施手順は図-5に示すとおりである。

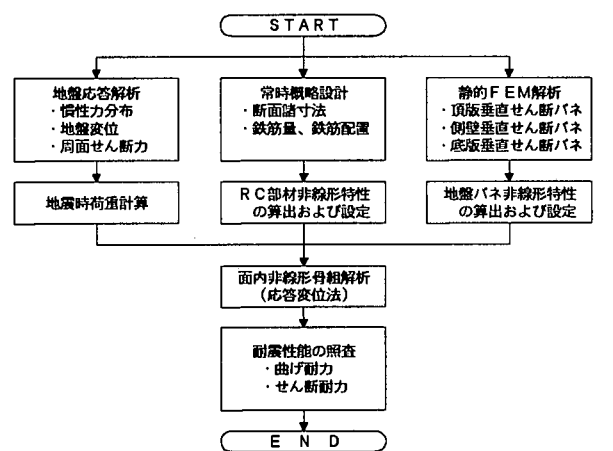


図-5 応答変位法の実施手順

(3)要素のモデル化(表-1)

レベル2地震時の照査においては、部材降伏点を超えた塑性領域での挙動が前提になると考えられるため、弾塑性部材として評価する必要がある。鉄筋コンクリート部材の応力度-ひずみ関係式は、道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編³⁾により、帯鉄筋による拘束効果を見込んだものが提示されている。

しかし、これは橋脚を対象として定式化されたものと考えられ、地中構造物の壁部材に対しては未だ不明確な点が多い。このため、従来から用いられているコンクリート標準示方書⁴⁾に示される応力度-ひずみ関係式に準じることとする。部材M-φ関係は常時設計断面に基づき、ひびわれ-降伏-終局のトリリニアでモデル化するが、水平部材の上下縁や垂直部材の左右縁において配筋状態が異なる場合には正負非対称となる。また、構造物をとりまく地盤抵抗要素についても塑性領域での挙動が問題となる可能性があるため、初期剛性と地盤反力度上限値によるバイリニアモデルとして設定する。

表-1 要素のモデル化

RC部材要素	地盤抵抗要素	
	垂直バネ	せん断バネ
材料非線形	幾何学的非線形	
M-φ関係： 非対称トリリニア	P-δ関係： 片側バイリニア (引張：抵抗なし)	τ-δ関係： 対称バイリニア

(4)解析モデル

函体工断面(図-2)の骨組解析モデルを図-6に示す。このうち、開口部にあたる骨組要素には仮想部材を設けることとする。仮想部材の剛性設定に際しては、対象函体のブロック延長が10m、開口幅が3mで計画されているため、ここでは奥行き方向長さを実長の7mとして算定する。

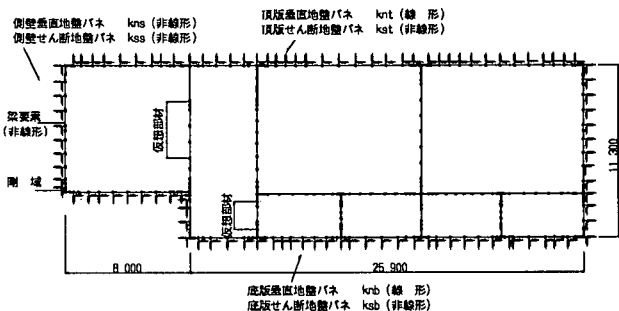


図-6 解析モデル

(5)地震時荷重

a)設計地震動の設定

レベル2設計地震動は、耐震設計上の基盤面とみなせる地層において得られた強震記録のうち、ポートアイランド NS、神戸海洋気象台 NS、東神戸大橋 N12W の3波により、計画位置の標準的な地盤において一次元重複反射解析を行った結果、上下床版の計画位置にて相対変位がもっとも大きな値を示すポートアイランドの振幅調整波を選定している。なお、地盤の地震応答解析は等価線形化法を用いている。

b)地震時荷重の算定

地震時には、応答加速度による躯体慣性力、応答変位による上下床版間相対変位および応答せん断力

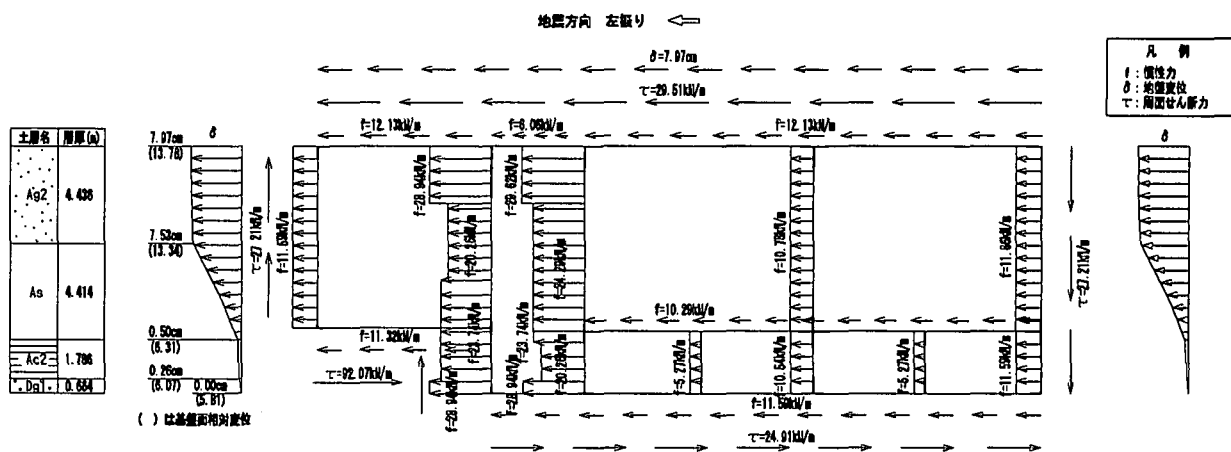


図-7 左方向地震時荷重

による躯体周面せん断力が作用する。地震応答解析結果に基づき、函体各部に作用する諸荷重を図-7に整理する。なお左側にランプが張出す左右非対称な構造のため、地震時荷重が左右それぞれに作用する二通りの载荷状態を解析する必要がある。

4. 解析結果まとめ

左方向への応答変位法解析結果は図-8に示すとおりである。上段が応答曲げモーメントに関する照査結果であり、ひびわれに達していない要素は白色、ひびわれから降伏までの要素は淡ハッチング、降伏以降の応答を呈す要素には濃ハッチングをしている。数値は応答曲げモーメント／降伏曲げモーメントの比率を示している。これによれば3つの要素で降伏曲げモーメントを超過しているため塑性率判定を実施したが、終局には至っていないことが確認できたため、曲げモーメントによる部材厚や主鉄筋などの変更は不要である。

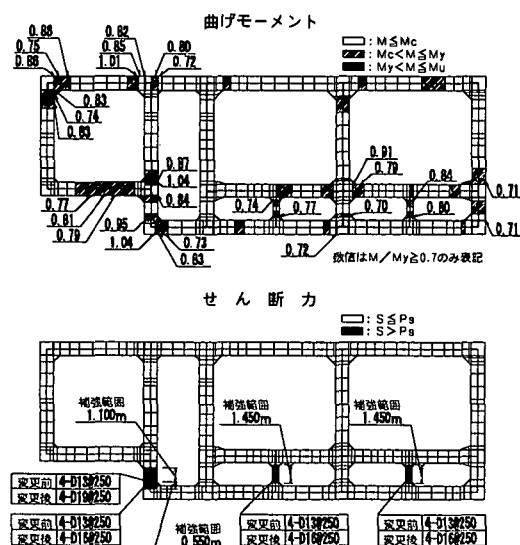


図-8 左方向解析結果

下段には応答せん断力に関する照査結果を示している。常時設計に基づく躯体断面では、レベル2地震時において一部でせん断耐力の不足が示されているため、スターラップ径を変更の上、せん断応力度照査により問題のないことを確認している。

5. おわりに

本解析結果より得られた耐震性能評価に関する考察は以下のようにまとめられる。

- (1) 一般部材にくらべ剛性の小さい開口部仮想部材には、作用断面力に対して損傷度合いが大きいものと考えられたが、解析結果によると両方向の荷重載荷時で、ともに弾性領域内の挙動におさまることが確認できた。なお、開口部縦断方向の検討としては、開口幅3mの支間長をもつ仮想梁に発生する断面力に対して必要な補強鉄筋を配置している。
- (2) 地中構造物は土圧により全隅角部が閉方向の応力状態にある上で、水平方向に卓越する地震時荷重により対角に位置する隅角部が各々開閉方向の応力を受けるため、隅角部には外側引張の応答が集中すると予想された。今回の左右両方向に対する応答変位法解析により、左方向荷重載荷時には左上および右下隅角部要素に、右方向荷重載荷時には右上と左下の隅角部要素に、それぞれ M_y には至らないものの大きな応答値を確認することができた。

参考文献

- (1) (社) 土木学会: トンネル標準示方書〔開削工法編〕・同解説, pp24-25, 1996.
- (2) (社) 土木学会: 開削トンネルの耐震設計, pp9-89, 1999.
- (3) (社) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V耐震設計編, pp130-131, 1997.
- (4) (社) 土木学会: コンクリート標準示方書 設計編, pp60-61, 1996.