

開削トンネルの縦断方向耐震設計に考慮する 地震波長と構造目地間隔に関する研究

足立 幸郎¹・中本 覚²・鈴木 直人³

¹正会員 工修 阪神高速道路公団 工務部設計課 (〒541-0056 大阪市中央区久太郎町4-1-3)

¹正会員 阪神高速道路公団 大阪管理部大阪第一維持事務所 (〒555-0011 大阪市西淀川区大和田1-1-4)

²正会員 工修 (株)建設技術研究所大阪支社技術第2部 (〒540-0008 大阪市中央区大手前1丁目2番15号)

応答変位法に基づく開削トンネルの縦断方向の耐震設計では、地震波の波長として基層と表層の調和平均波長、もしくは観測に基づくみかけの波長などが考慮される。しかし両者で算定される結果は著しく異なる場合がある。ここでは、阪神高速道路淀川左岸線の地盤構造を反映させた波長設定を行うことを考え、地動の変位振幅のほとんどが表面波の伝播に起因すると仮定して得られる地表面ひずみと、せん断波の伝播において地盤の不均一性から生じる地表面ひずみに基づき地震波長を算定した。検討の結果、計算された地震波長は、上述した既往の方法により算定される波長の中間的な波長が算定された。本検討結果に基づき開削トンネルの縦断方向の耐震性照査を行い、本路線においては構造目地間隔を80mに設定することが最も経済的であることが判明した。

Key Words: Cut and Cover Tunnel, Seismic Design, Response Displacement Method, Structural Joint

1. はじめに

開削トンネルをはじめとする地下構造物は従来耐震性が高い構造物とみなされてきた。しかしながら、兵庫県南部地震の教訓から、地下構造物の耐震性の向上が広く認識されるようになった。従来道路開削トンネルの縦断方向の耐震設計については、構造目地を10~20mに設置することにより、詳細な耐震設計は省略されてきた。しかしながら、構造目地は漏水等の原因となりやすいことから、耐久性確保の観点から構造目地間隔を広げることが望ましいと考えられる。その場合、縦断方向の耐震設計は不可欠となる。

縦断方向の耐震設計には一般に応答変位法が用いられる。水平方向に伝播する正弦状の地震波を想定し、設定した限界状態内に応答が収まるよう設計がなされる。地震波の振幅は、1次せん断波振動の最大振幅が考慮されるのが一般的である。波長については基層と表層の調和平均波長もしくは観測に基づくみかけの波長が考慮されるが、両者で算定される結果は著しく異なる場合がある。縦断方向の耐震設計においては地震

波長の設定が重要となることから、より建設地点の地盤構造を反映した地震波長設定が不可欠と考えられた。

そこで、本研究では阪神高速道路淀川左岸線の地盤構造を反映させた波長設定を行うことを考え、地動の変位振幅のほとんどが表面波の伝播に起因すると仮定して得られる地表面ひずみと、せん断波の伝播において地盤の不均一性から生じる地表面ひずみに基づき地震波長を算定した。また、算定された地震波長をもとに経済的となる構造目地間隔に関する検討結果を報告するものである。

2. 開削トンネルの要求耐震性能と照査項目

L2地震に対する開削トンネルの要求耐震性能については、まだ明確なコンセンサスが示されていないものと考えられる。ここでは、図1に示す要求性能と照査項目および限界状態を考慮した。L1地震において水密性など機能性の保持を目標とするが、L2地震に対しては人命の確保、早期復旧性の確保を目標とするものである。

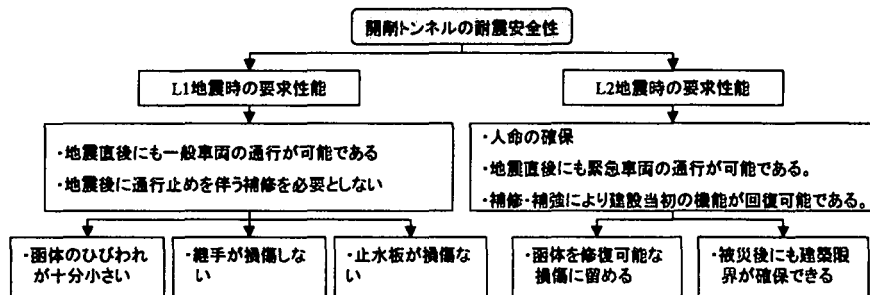


図1 開削トンネルの耐震要求性能及びその照査項目と限界状態

3. 地震波長の設定方法

(1) 検討方法

図2に検討対象の柱状図および函体との位置関係を示す。地震波の設定においては、地動の変位振幅の大部分はRayleigh波やLove波の伝播に起因するとみなして計算される地盤ひずみから波長を設定する¹⁾ことを考えた。しかしながら表面波は基盤までのやや深い地盤の影響に支配される性質を有していることから、表層地盤の不均一性による地盤ひずみまで評価できないと考え、さらに地盤の不均一性により生じる表層面の地盤ひずみも含めて地震波長を設定することとした。

(2) 地表面波動のシミュレーションと地震波長の設定

考慮する地表面における変位波形は、L2地震については阪神公団基盤波²⁾、L1地震には道示Ⅰ種地盤スペクトル適合波³⁾を基盤に入射し重複反射理論を用いて算出した変位波を用いた。

地表面変位波の伝播速度については表面波のみかけの伝播速度を用いた。ここでは大阪市淀川区此花地区での鉛直微動に関するアレー観測結果⁴⁾を利用して設定した。図3に観測結果を示す。図中にHaskelの方法⁵⁾を用いて表面波の位相速度を推定した結果も併せて示す。観測結果は、Haskelの方法を用いた推定位相速度とほぼ一致することがわかる。大規模地震時では、表層地盤の剛性劣化が本位相速度に影響を及ぼすことが

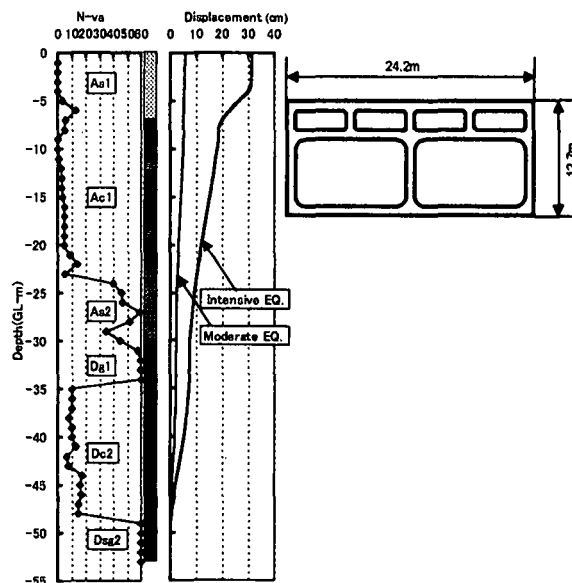


図1 開削トンネルの耐震要求性能及びその照査項目と限界

懸念される。このことから、表層の剛性低下を表現するために表層のせん断波速度 V_s を1/2に低下させた計算を行った。その結果も図3中に示している。表層地盤の剛性低下が位相速度に及ぼす影響は、Rayleigh波では見られないが、Love波では約0.5Hz以上でいそう速度が小さくなることが確認された。本結果に従い、表層地盤の剛性低下を考慮した位相速度および分散特性を考慮して地表面波動のシミュレーションを行った。

上述した地表面変位波形と表面波の位相速度を用いて、地表面変位波の伝播解析を行った。具体的には、

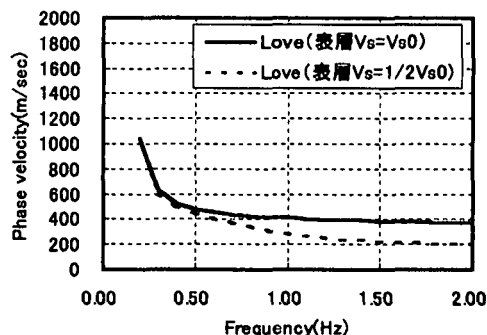
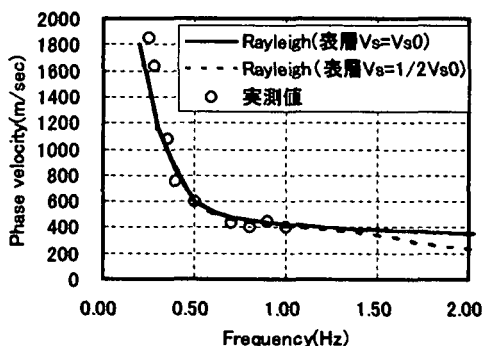


図3 表面波の位相速度の分散曲線 (実測値およびHaskel法による計算値、Rayleigh波：左、Love波：右)

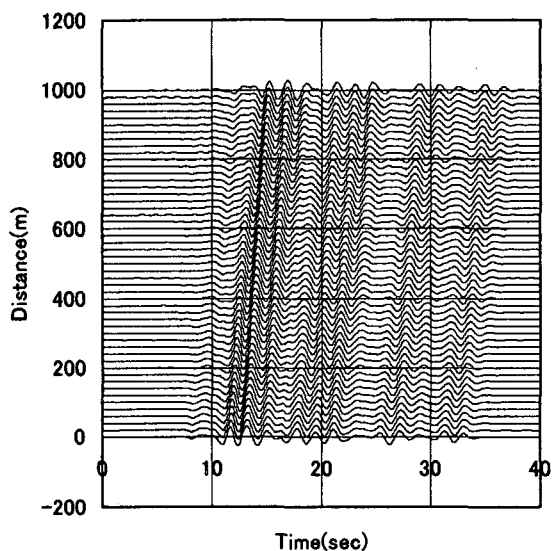


図4 地表面波形のシミュレーション解析
(L2,Rayleigh波型)

地表面に沿って x だけ離れた場所における位相を周波数成分ごとに遅らせる手法をとった。すなわち、地表面変位波をフーリエ分解し、位相スペクトルに対して設定した位相遅延量 ($\Delta\phi$) だけ遅らせたのち、フーリエ逆変換を行い地表面にそって x だけ離れた地点の地表面変位波を推定した。位相遅延量は $\Delta\phi = -2\pi \cdot f_i / cs_i \cdot x$ と与えた。なお、 f_i : 周波数、 cs_i : f_i に対応する位相速度である。こうして得られた地表面変位波形のシミュレーション結果を図4に示す。ここでは、位相速度の分散曲線にRayleigh波の特性を用いた結果を示す。さらに、この結果を用いて、任意の2点間の距離 (以下「相関距離」) とその2点間の最大相対変位を相関距離で除した地盤ひずみの関係を図5に示す。また同じ図中に、正弦波形を仮定した場合の最大相対変位および地盤ひずみも示している。アレー観測結果から本地点の地盤の固有周期から直接

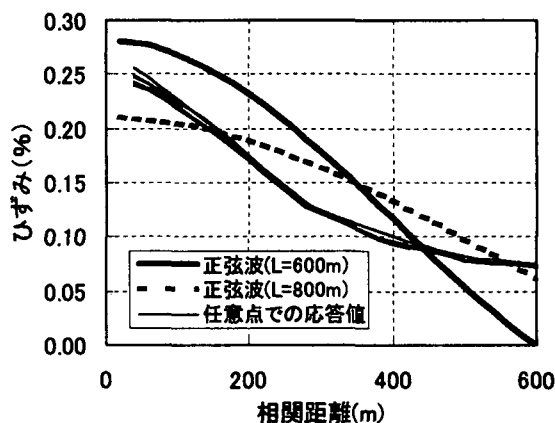


図5 波形シミュレーションおよび制限波による地盤ひずみ

的に算出される波長は800mであるが、地表面波動としてRayleigh波の伝播特性を考慮したシミュレーション結果と正弦波 ($L=800m$) の結果を比較すると、正弦波 ($L=800m$) はシミュレーション解析結果より相関距離が150mまでにおいてひずみを小さく評価する場合があることがわかる。このことから、当該地盤ではRayleigh波型の波動伝播を考える場合は、L2地震に対して $L=600m$ 程度とすることが望ましいことがわかる。同様の計算をLove波型について行った場合は、L2地震に対して波長を400mとすることが望ましいことが判明した。なお、同様の計算をL1地震について行ったが、算定される地震波長に差が見られなから、L1地震およびL2地震に共通した波長を設定した。

(3) 地盤の不均質性から生じる地盤ひずみと地震波長

層厚などが不均質な地盤では、入力される地震波が同じであっても、位置によって異なる応答を示すため相対差が生じる。このような、ローカルな地盤の不均一性の影響を検討するため、淀川左岸線の地盤モデルを用いた図6に示す3次元FEM地震応答解析を実施した。淀川左岸線のほぼ直線区間を平面状に10m間隔でモ

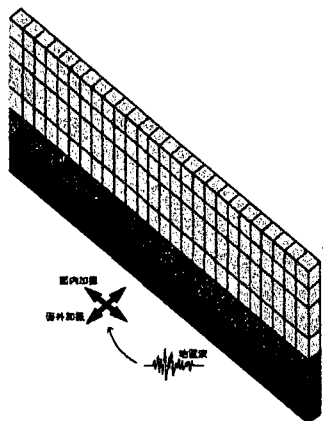


図6 3次元FEMモデル

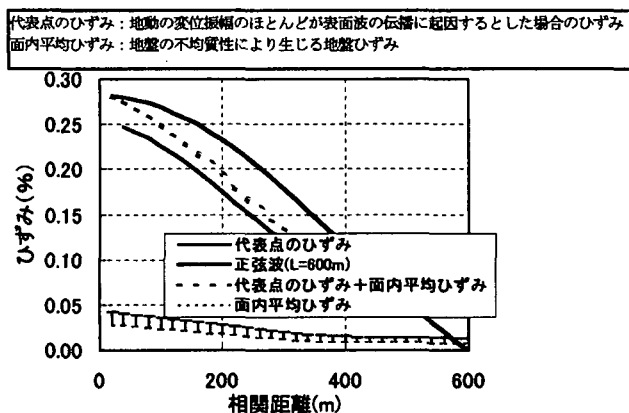


図7 地盤の不均一性から生じる地盤のひずみ (L2,Rayleigh波型)

表1 淀川左岸線の構造目地間隔と性能評価との関連表

	性能評価項目	20m	40m	60m	80m	100m	120m	200m
L1地震時	ひびわれ幅	○	○	○	○	○	×	×
	ジョイントバー	○	○	○	○	×	×	×
	止水板	○	○	○	○	×	×	×
L2地震時	軸方向鉄筋の破断	○	○	○	○	○	×	×
	継手部の目違い	○	○	○	○	○	○	○

デル化し、奥行き方向には1要素のみを有する3次元モデルとした。このモデルの基盤面に公団基盤波を水平面内2方向に入射し地盤ひずみの影響を確認した。図7に面内方向の検討結果を示す。ここでは、モデル端部からの距離（相関距離）、面内方向に生じる最大応答地盤ひずみ、前節のRayleigh波型の伝播特性を考慮した波動シミュレーションにおける代表値との関係を示す。面内方向のひずみは、平均値および平均値+1×標準偏差の形で図化している。それぞれの位置での地盤の構成の差異によって面内方向の地表面での応答が異なることがわかるが、その差は前節の波動シミュレーションで算出された相対変位と比較して小さいことがわかる。この傾向は、地震動のレベル、仮定する表面波の型に限らず共通した傾向であった。なお面外解析と面内解析とには有意な差は認められなかった。これは、淀川左岸線地区では面内方向の地盤の変化が少ないためと考えられる。本結果よりL2地震におけるRayleigh波型を仮定した場合、L=600mの波長を考慮することによって、地盤ひずみを安全側に評価することが判明した。同様の検討を、地震動レベル、波動種別毎の伝播速度を変化させた解析を行った。以上の検討結果を総合すれば、L2、L1地震でRayleigh波型の波動を仮定する場合はL=600m、Love波型の波動を仮定する場合はL=400mという地震波長が算出された。ちなみに、淀川左岸線の地盤条件では、共同溝設計指針の場合L=300m、ガス導管設計指針の場合L=1490mと算定される。

5. 構造目地間隔に関する検討

長区間化は軸方向鉄筋を増加させることによって可能である。また、長区間化による構造目地部の負担については許容変位量の大きい耐震目地を採用することによって克服できる。いずれにしても経済的な面からの検討が必要である。ここでは、配力筋は軸方向鉄筋の1/6という条件、さらに一般的に用いられる構造目地（伸縮量50mm程度）条件、一般的なジョイントバー設置条件下における経済的構造目地間隔について検討を行った。L1時は許容応力度もしくは許容伸縮量内にと

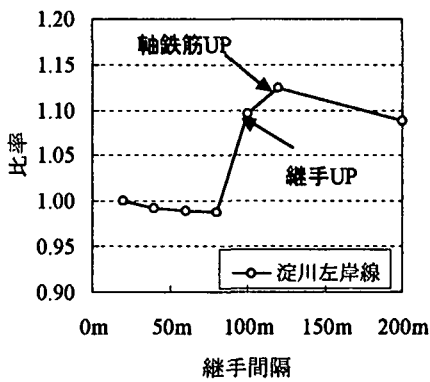


図8 構造目地間隔と建設コスト関係

(構造継手間隔を20mとした場合で基準化)

どめること、L2は配力筋の破断、躯体の目違い量から判定をした。その結果を表1に示す。L2地震時に重要となる構造体の耐震安全性の確保に関しては、構造目地間隔が100mであっても確保できるが、L1地震時に重要となる機能性の確保を行うためには、構造目地間隔を80mにする必要があることがわかる。構造目地間隔をパラメータとした経済比較を行った結果を図8に示す。構造目地間隔が80mの場合にコスト上最も有利になることがわかる。なお、本地盤条件では、L1地震時の機能性保持が構造目地間隔を決定する結果となったが、これは軟弱地盤での傾向と考えるのが妥当と思われる。

6. おわりに

本検討では当該地盤に建設する開削トンネルの縦断方向耐震設計に考慮すべき地震波を検討し、それに基づいて合理的な構造目地間隔について検討した。ここでは、配力筋については軸方向鉄筋の1/6としたが、ひび割れ対策からそれ以上の鉄筋量が必要とも考えられ始めている。これらを考慮した上で構造目地間隔を最終的に決定していく予定である。

【参考文献】

1) 高田ら：ライフライン系解析のため相対地震動、土論No.299、1980.7
2) 日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する参考資料、平成9年3月
3) 阪神高速道路公団：開削トンネル耐震設計指針(案)、平成11年12月
4) 土木学会関西支部：シールドトンネルの合理的耐震設計ガイドライン(案)、平成11年3月
5) Haskell et al: The dispersion of surface waves on multilayered medium, Bulletin of the seismological society of America, Vol43, 1953