

開削トンネルにおける 地震時の漏水発生に関する検討

AN ANALYTICAL STUDY ON WATER LEAKAGE OF CUT AND COVER TUNNEL DUE TO EARTHQUAKE

長田 光正^{1*}・久木留 貴裕²・梅林 福太郎²・福間 雅俊²

Mitsumasa OSADA^{1*}, Takahiro KUKIDOME², Fukutaro UMEBAYASHI²,
Masatoshi FUKUMA²

The cut and cover Tunnel of the Metropolitan Expressway, connected to the Higashi-Ogishima side of Kawasaki Fairway Tunnel, was damaged by The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake and leaked water from the flexible joint at the base-slab. Because emergency repairs have priority, there was no enough time for an inspection to determine the mechanism of the damage. For this reason, we conducted seismic response analysis in a longitudinal direction using observed earthquake wave data and estimated the process of water leak. In addition, we used the current standard Level-2 earthquake wave data to check the safety of the structure.

Key Words : tunnel, flexible joint, water leak, earthquake behavior, finite element method

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震は，地震動と津波により，広い範囲に甚大な被害を及ぼした．とりわけ，地震動により，主に沿岸地域等において液状化が発生し，震源地から遠く離れた関東地方にまで被害が及んだ．同地震により，首都高速道路湾岸線の川崎航路トンネルに接続する東扇島側の陸上トンネル区間では，底版の構造目地部から漏水が発生した．

当該トンネルは，1994年に完成した開削トンネルである．同トンネルに接続する立坑及び沈埋トンネル区間では，トンネル縦断方向の耐震設計が動的解析を用いて詳細に実施されていた¹⁾．一方で，陸上トンネル区間では，漏水の原因となる構造目地を減らし，ブロック長を長くする代わりに，止水限界の大きい構造を設けることとし，詳細な解析は実施されていなかった．

漏水が発生した構造目地部は，地震直後に漏水が治まっていたことから，復旧を優先したため，漏水発生原因を詳細に把握する時間がなかったという経緯がある．こ

のため，漏水発生のメカニズムを把握することを目的に，地震応答解析による再現解析を実施した．

本論では，漏水発生のメカニズムを把握するため，縦断方向の動的解析を用いた再現解析を行い，発生原因を推定した．また，現行基準²⁾に対する安全性を確認するため，現行基準のレベル2地震動に対する検討を実施した．

2. 検討対象

検討対象は，川崎航路トンネルに接続する東扇島側の開削トンネルの構造目地部である．本開削トンネルは，全長427.15mで，トンネル中間位置のみに構造目地を有している．断面形状は幅35m，高さ11mの大断面であり，中壁を有する2連BOX構造である（図-1）．また，軟弱な地盤に位置するため，床版下側については，地盤改良が施されていた．図-2に検討対象と損傷箇所を示す．

キーワード：トンネル，構造目地，漏水，地震時挙動，有限要素法

¹ 正会員 首都高速道路株式会社 技術部 技術推進課 Engineering Department Design Engineering Group, METROPOLITAN EXPRESSWAY CO.,LTD. (E-mail: m.osada135@shutoko.jp)

² 正会員 株式会社オリエンタルコンサルタンツ 国土整備事業部門 Infrastructure Development Project SectorDivision, ORIENTAL CONSULTANTS CO.,LTD.

3. 損傷狀況

当該トンネルでは、地震直後に損傷調査が実施されており、数か所の損傷が発見された。この内、西行きで発見された路面の構造目地からの湧水が最も大きい被害であった。漏水の発生状況を写真-1に示す。

当該地点では、地震時に漏水が発生したものの、補修前に漏水は治まっていたことが確認されている。このことから、漏水の発生原因は、構造目地部において、地震動により一時的に隙間が生じた、あるいは、地震時に一時的に水圧が上昇し、構造目地部より漏水したと推測できる。

本検討では、当該トンネルの構造目地部からの漏水に着目し、地震発生時の挙動を縦断方向の動的解析により再現することで、地震時の漏水発生メカニズムを推定することとした。

4. 再現解析

(1) 解析条件

a) 解析手法

再現解析は、地盤の動的解析で算定したトンネル軸心位置における地盤の応答変位波形を、トンネルを弾性支承上のはりとしたモデルに入力する時刻歴の応答変位法により実施した。地盤解析は材料非線形性を考慮した動的解析により行った。また、トンネルの応答解析は、トンネル躯体を梁要素、地盤・構造目地部をばね要素でモデル化し、地盤解析により得られた地盤の応答変位を入力値とする応答変位法を行った。解析は、軸方向と直角方向の2方向について別々に実施した。

b) 地盤のモデル化

対象区間の沈埋トンネル側には立坑があり、地震時の地盤の挙動に影響することが想定された。従来からの実務等で用いられる一般的なトンネルの縦断方向の耐震設計では、地震の応答は地盤のみのモデルで算定し、トンネルと立坑のモデルには地盤ばねを介して地盤の応答変位を作用させる手法が用いられる³⁾。しかし、本検討では、立坑及び立坑の杭基礎を地盤の三次元モデルに併せてモデル化する手法を用いた。これは、立坑は、規模が

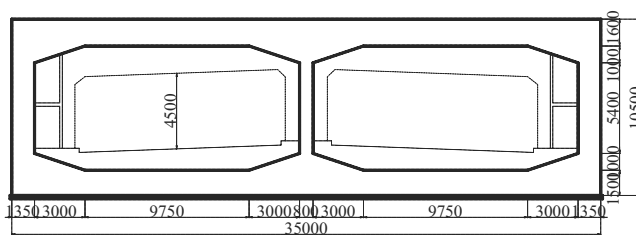


図-1 ボックスカルバート区間断面



写真-1 構造目地からの漏水の状況（地震後）

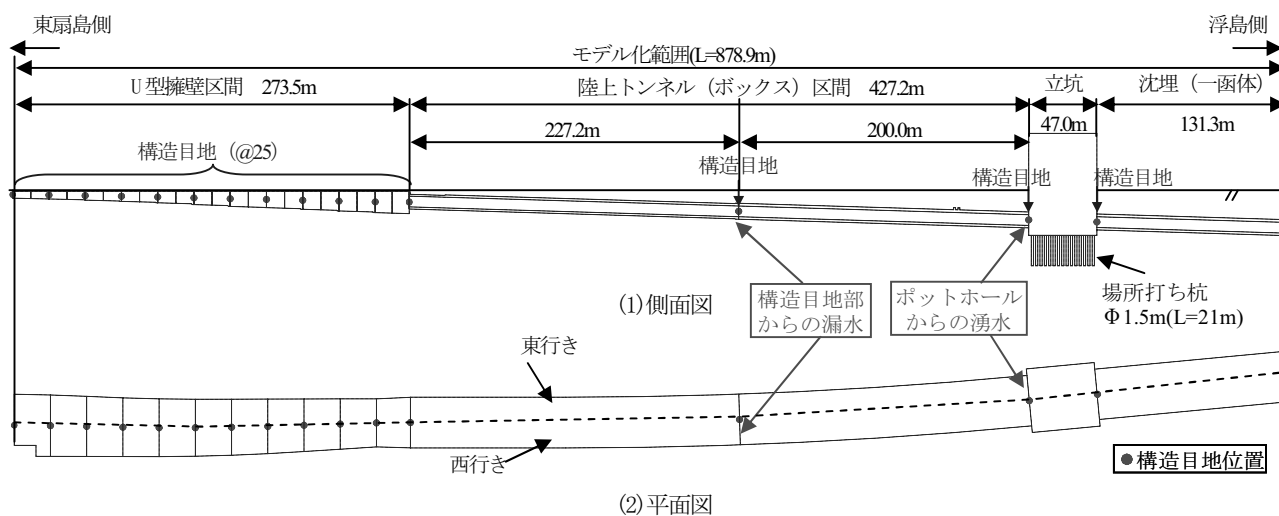


図-2 検討対象と損傷箇所

ネルから荷重が伝達された際の立坑と地盤間の相互作用を評価するために、立坑側面に、単位荷重を載荷することで、軸方向、軸直角方向、鉛直方向、鉛直方向回り（軸方向回り、軸直角方向回りは変形しない）の相互作用ばねを算定し、このばねを立坑位置に設置した。図-6に立坑地盤間の相互作用ばねの算定方法を示す。

d) 構造目地部のモデル化

漏水箇所の構造目地部には、図-7に示す可とう継手が設置されていたため、これを、ばね要素を用いてモデル化した。同ばねは、軸方向については、非線形ばね要素でモデル化し、圧縮側は遊間長(20mm)の範囲のみを可動とし、引張側については、可動とした。せん断ばねについては、図-8に示すスリッパバーが設置されていることから、剛な線形ばねでモデル化した。軸直角方向回りと鉛直方向周りの回転ばねは自由とした。図-9に構造目地部のモデル化を示す。

立坑と開削トンネルの構造目地部には、図-10に示す可とう継手が設置されている。このため、同箇所の可とう継手についても漏水箇所の構造目地部と同様にモデル化した。また、沈埋トンネル側にはゴムガスケットが設

置されているため、これを線形ばねでモデル化した。ばね値については、表-3に示す沈埋トンネルを設計した際の設計値⁷⁾とした。

U型擁壁区間の構造目地部には、200mm×8mmのサイズの止水板と図-8に示すスリッパバーが設置されている。このため、同箇所の構造目地部についても漏水箇所の継手部と同様のモデル化とした。

(2) 入力地震動

川崎航路トンネルには、地震計が設置されていない。このため、本検討においては、首都高速道路(株)が管理する地震計の内、検討対象近傍の東扇島で観測された基盤波形（以下、東扇島観測波と略す）を用いた（図-11）。図-12に入力地震動を示す。鉛直方向の地震動については、構造物への影響が小さいと考えられるため、入力水平方向のみとした。

また、トンネル構造物は軸方向に連続して長いことから、地震動の位相差を考慮した。ここで、伝播速度は、本トンネル近傍での既往の観測結果⁶⁾の下限值1000m/sを用いることとし、伝播方向を2ケース（東扇島側→浮島側、浮島側→東扇島側）考慮した。

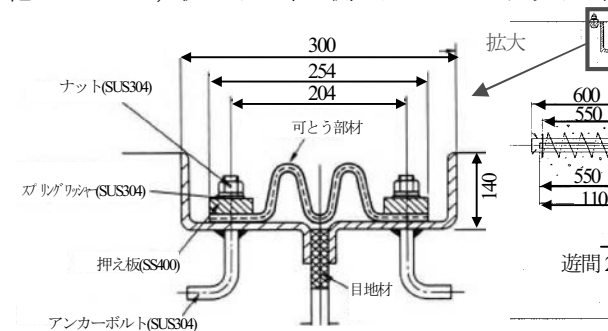


図-7 漏水箇所の可とう継ぎ手

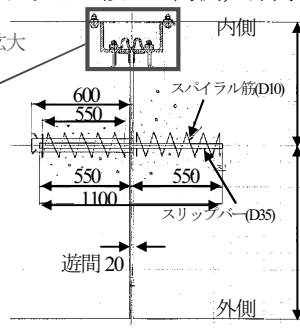


図-8 スリッパバー

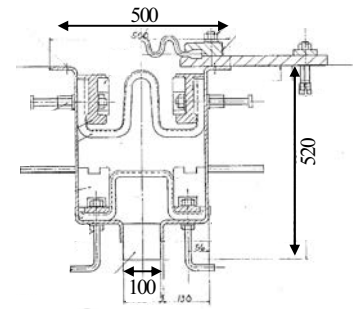


図-10 立坑の可とう継ぎ手

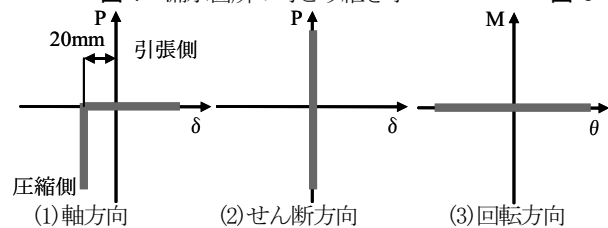
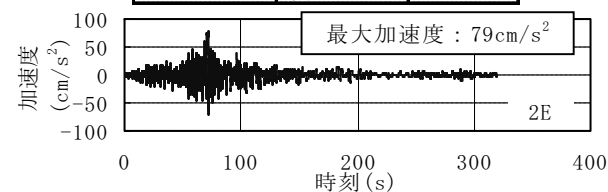


図-9 構造目地部のモデル化

表-3 立坑の可とう継手のばね定数

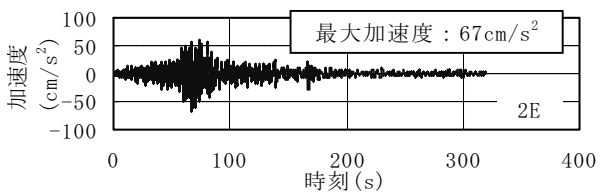
引張 (kN/m)		ばね定数
回転		
(kN・m/rad)	鉛直軸回り	9.3E+08
	水平軸回り	2.4E+08
せん断 (kN/m)	水平方向	4.6E+05
	鉛直方向	5.4E+07



(1) トンネル軸方向波形



図-11 地震観測点と検討対象の位置関係



(2) トンネル軸直角方向波形

図-12 2011年東北地方太平洋沖地震-東扇島観測基盤波

(3) 解析結果

図-13～図-18に一樣入力及び位相差入力で地震動を作用させた場合のトンネル軸方向，直角方向の地盤解析の結果を示す。同図には，トンネル軸芯位置での最大地盤ひずみ分布と構造物の位置，最大地盤変位のコンターを併せて示す。図-13，図-14より，一樣入力の場合は，立坑付近で軸方向，直角方向ともに発生する地盤ひずみが最大となることわかる。また，位相差入力では，一樣入力に比べ，全体的にひずみが大きく，漏水箇所のひずみは，位相差入力（東扇島側→浮島側，浮島側→東扇島側）と一樣入力を比較すると，軸方向加振で3.2倍，3.7倍，直角方向加振で4.3倍，4.1倍の応答差がある。このことから，当該地盤では，位相差の影響が地盤のひずみに大きく影響することが分かった。

表-4に漏水箇所の構造目地部の変位量を示す。構造目地部の変位量は，同一時刻における軸方向の構造目地部のばね変位量と鉛直軸回りの回転による開き量の和とした。ここで，回転による開き量は，回転角と断面幅の積により算出した。最大変形量は，軸方向加振時の位相差入力（浮島側→東扇島側）の場合であり，94mm程度の開き量であった。一樣入力の場合は19mm程度であり，位相差の影響が継手の開き量に大きく寄与していることが分かった。

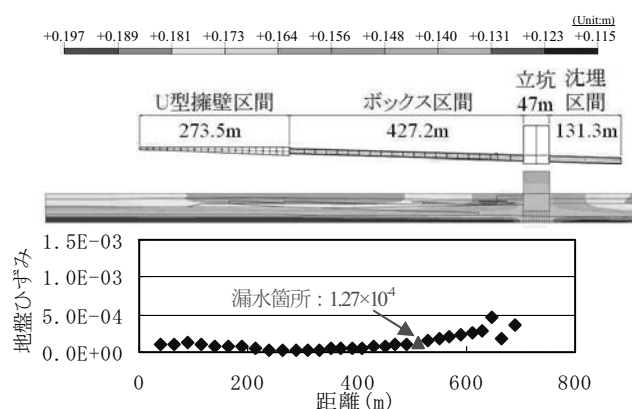


図-13 地盤ひずみ（軸方向 一樣入力）

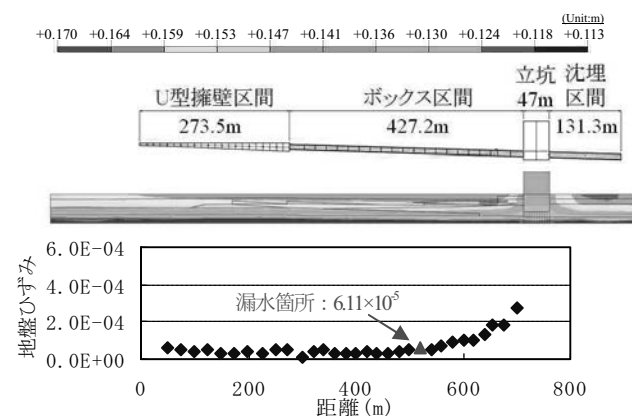


図-14 地盤ひずみ（直角方向 一樣入力）

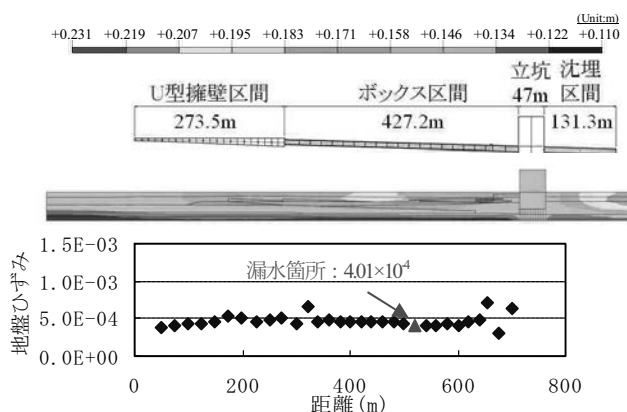


図-15 地盤ひずみ（軸方向 位相差：東扇島→浮島）

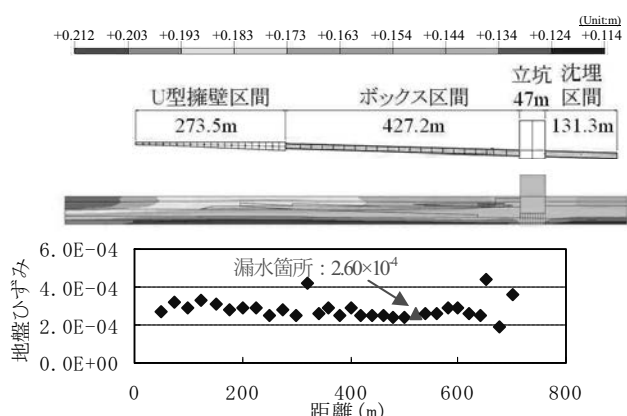


図-16 地盤ひずみ（直角方向 位相差：東扇島→浮島）

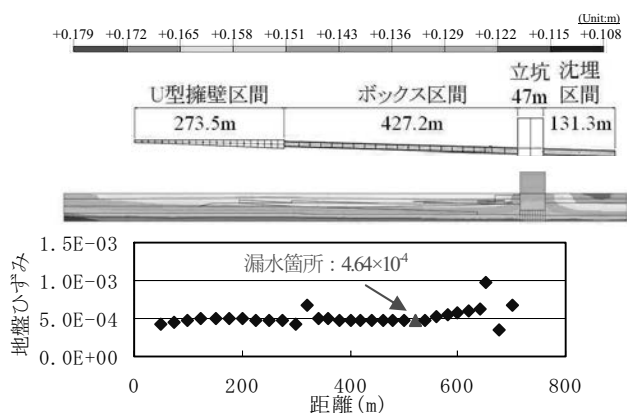


図-17 地盤ひずみ（軸方向 位相差：浮島→東扇島）

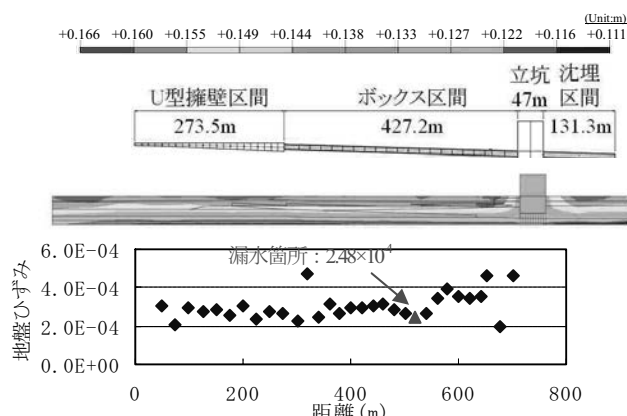


図-18 地盤ひずみ（直角方向 位相差：浮島→東扇島）

5. 漏水の発生原因に対する考察

漏水箇所の構造目地の構造より、地震時に漏水が発生した原因としては、図-19の漏水発生メカニズムに示す下記の①～④の経路が考えられる。

- ① 構造目地部の止水ゴムの破断による漏水。
- ② 止水板の周辺のコンクリートのひび割れによる漏水。
- ③ ジョイントコンクリートと金物の間の隙間からの漏水。
- ④ 止水板を固定しているボルトと止水ゴムの隙間からの漏水。

これらの条件の中で、①、②及び③の損傷が発生した場合、地震後も漏水が止まらないと考えられるが、地震直後の現地の状況より、補修を行う前に漏水が治まっていることから、本検討では、④の損傷が発生したものと考え、これを検証するため、漏水が発生する制限値を設定し、解析結果と比較することにより、原因の推定を行った。

表-5に漏水箇所の構造目地部の目開き量に対する制限値を示す。図-20に漏水に対する制限値を設定した際の水みちのイメージを示す。止水ゴムに作用する水平方向の引張力が、押え板と止水ゴムの間の摩擦力を超過すると、止水ゴムが滑動し押え板を固定しているボルト周囲の止水ゴムに変形が生じ、止水ゴムとボルトの間に隙間が生じる。この隙間が水みちとなる可能性があると考えられる。

このため、漏水に対する制限値は、押え板で固定された止水ゴムが滑動する時の目開き量とし、この時に漏水が発生するものと考え設定した制限値である。具体的には、下記の(1)～(3)のように設定した。

- (1) 押え板を固定しているボルトの締付けトルクは、押え板を梁、ボルト位置を支点、止水ゴムの反力を分布荷重とすると、梁としての押え板に発生する応力が許容応力度以下になるように導入されている。
- (2) 上記(1)の止水ゴム反力に伴う止水ゴムと押え板の間の摩擦力を、当該構造目地位置の作用水圧と構造目地の目開きに起因する水平力が超過し、水みちが生じる。
- (3) 上記(2)の状態に至る構造目地の目開き量を、漏水に対する制限値として設定した。

また、止水ゴムの損傷に対する制限値は、既往のゴムの引張試験を行った際の最大載荷力(30N/mm²)に相当する応力が止水ゴムに発生する計算上の変位量である。上記引張試験は、止水ゴムの性能確認のために実施されており、破断には至っていないことから、この制限値は破断に対して余裕があると考えられる。

表-4 漏水箇所の構造目地の開き量

加振方向	位相差入力	漏水箇所の継手の開き量(mm)		
		伸縮による開き量	鉛直軸回りの回転による開き量	合計開き量
軸方向	一樣	18.5	0.1	18.6
	東扇島側→浮島側	46.1	0.0	46.1
	浮島側→東扇島側	93.8	0.1	93.9
直角方向	一樣	0.1	1.1	1.1
	東扇島側→浮島側	1.4	1.2	2.6
	浮島側→東扇島側	1.7	1.4	3.0

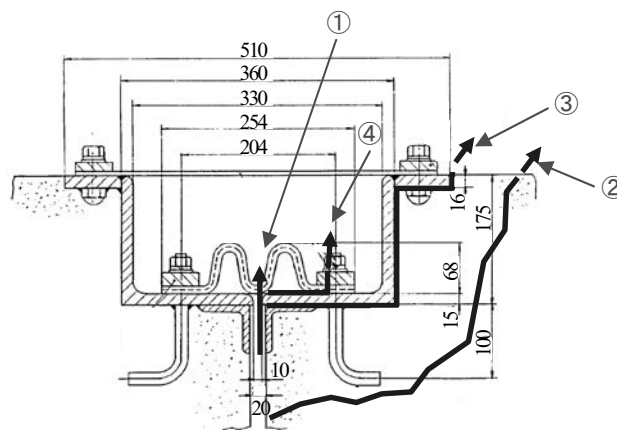


図-19 漏水発生メカニズム

表-5 漏水箇所の構造目地部の目開き量に対する制限値

限界状態	制限値(mm)
漏水	100
止水ゴムの損傷	115

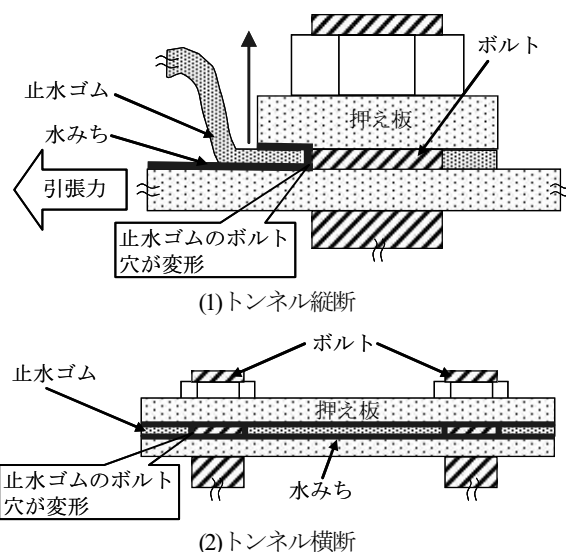


図-20 漏水に対する制限値を設定した際の水みちのイメージ

④の条件について、上記の制限値と再現解析の結果で推測された構造目地部の変形量を比較すると、変形量は、最大で94mmあり、漏水に対する制限値100mm相当の応答が発生したものと考えられる。これらのことから、「止水ゴムの損傷に対する制限値には余裕があるものの、漏水に対する限界値相当の変形量が発生している。」という状況に合致しているため、これが漏水が発生した原因であると考えられる。

6. 現行基準による目地部の検討

当該トンネルについて、現行の基準²⁾の入力地震動で縦断方向の耐震性能を照査した場合に、構造目地部の安全性の有無を確認するために、現行基準に従った検討を実施した。入力地震動は、同基準のレベル2タイプⅡ地震動波形の内、当該トンネルへの影響が平均的な一波（以下、現行基準TⅡと略す）とした。また、再現解析と同様、トンネル軸方向の位相差（位相速度1000m/s）を考慮したケースについても実施した。

図-21に本検討で用いた入力地震動を示す。また、図-22に現行基準の波形と前述した検討に用いた東扇島観測波の加速度応答スペクトルを示す。同図より、現行基準TⅡの方が全体的に大きい、2秒より長周期側では加速度応答スペクトルの差は小さいことが分かる。また、地震時における地盤解析モデルの固有周期は、1秒付近であるため、地震の影響は現行基準TⅡの波形が大きくなるものの、漏水箇所に着目したSHAKEの卓越周期は、1.5秒付近であり、加速度応答スペクトルの差は小さい。

図-23、図-24に一樣地震動を作用させた場合の地盤解析の結果を示す。加振方向は、軸方向、直角方向の2方向である。図には、トンネル軸芯位置での最大地盤ひずみ分布と構造物の位置、地盤変位のコンターを併せて示す。

漏水箇所の地盤ひずみを前述の東扇島観測波での一様入力応答と比較すると、軸方向では3.9倍、直角方向で8.0倍の地盤ひずみが発生している。最大ひずみ分布の傾向については、立坑付近で大きくなっており、両者で同様の傾向にあることが分かる。これより、東扇島観測波に比べて、現行基準TⅡの入力地震動が大きい、一様入力での構造目地部の開きが大きくなる、ことがわかった。表-6に漏水箇所の構造目地部の変形量を示す。漏水箇所では、一様加振の場合は50mm程度である。一方、最大値は位相差入力の際に生じ、現行基準TⅡの最大応答は117mmであり、東扇島観測波の1.2倍程度である。これより、構造目地の開きには位相差の影響が大きい、地震動の違いの影響は大きくないことがわかった。

また、この開き量は止水ゴムの損傷の制限値と同程度の値である。損傷の制限値は、止水ゴムの破断に対しては余裕が残されていると思われるため、現行基準TⅡの地震動が作用する場合には、ゴムの破断までは至らないものと推察される。

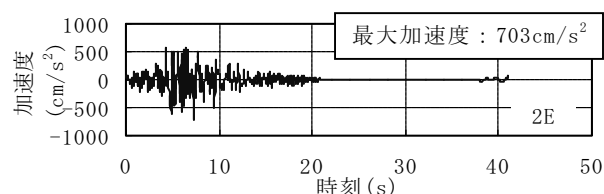


図-21 首都高速道路現行基準の波形 (TⅡE-B-3)

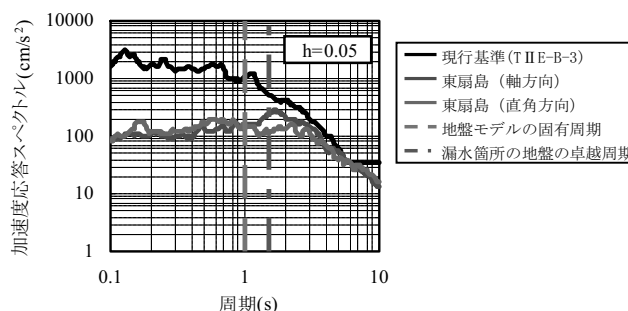


図-22 東扇島観測波と現行基準波形TⅡE-B-3の加速度応答スペクトルの比較

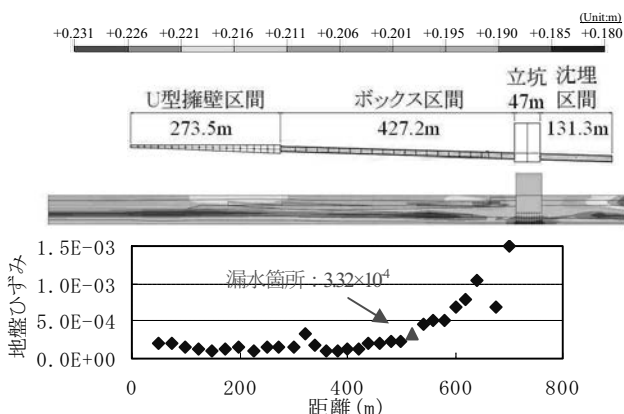


図-23 地盤ひずみ (軸方向 一様入力)

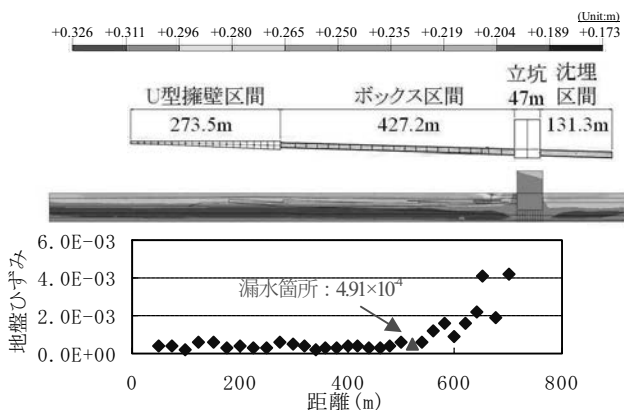


図-24 地盤ひずみ (直角方向 一様入力)

表-6 現行基準TⅡでの構造目地の開き量

加振方向	位相差入力	漏水箇所の継手の開き量(mm)		
		伸縮による開き量	鉛直軸回りの回転による開き量	合計開き量
軸方向	一様	49.6	0.4	50.0
	東扇島側→浮島側	88.5	0.0	88.6
	浮島側→東扇島側	116.8	0.2	117.0
直角方向	一様	0.0	14.5	14.5
	東扇島側→浮島側	-1.5	12.2	10.7
	浮島側→東扇島側	2.2	10.0	12.3

7. 結 論

2011年東北地方太平洋沖地震により構造目地部で漏水が発生した開削トンネルについて、漏水発生メカニズムを解析的に推定した。また、現行基準TⅡを想定した場合の検討を実施した。これらの検討の結果により得られた知見を以下に示す。

- (1) 位相差の影響が構造目地部の開き量に大きく寄与していることが分かった。
- (2) 再現解析の結果、止水ゴムの地震時の開き量は最大で94mm程度であり、止水ゴムの損傷に対する制限値には余裕があるものの漏水に対する制限値相当の応答が発生したものと考えられる。
- (3) 地震時及び地震後の現地の漏水発生状況と再現解析の結果より、漏水の原因は、地震時に一時的に止水ゴムが引張られ、漏水の制限値に達し、止水板を固定しているボルトと止水ゴムの隙間から漏水したものと考えられる。
- (4) 現行基準TⅡ地震動を用いて、構造目地部の止水ゴムの応答を検討した結果、構造目地部の止水ゴムの最大開き量は117mmであり、止水ゴムの損傷の制限値と同程度である。ただし、この制限値には余裕が残されていると思われるため、ゴムの破断までは至らないものと推測される。

本検討における、漏水に対する構造目地の開き量の

制限値は、押え板に発生する応力が許容応力度に達するまで、押え板を固定するボルトの締付けトルクが導入された際に、押え板と止水ゴムの間に発生する摩擦力より導いた計算値である。止水ゴムの損傷に対する制限値は、止水ゴムの性能確認のために実施された、ゴムの破断まで至らない引張試験における最大荷重より導いた計算値であり、実際の破断に対する限界値は確認できていない。

このため、漏水発生メカニズム等を、また、現行基準TⅡ地震動に対する安全性を、より正確に把握するためには、更なる検討が必要であると考えられる。

参考文献

- 1) 首都高速道路公団 湾岸建設局：多摩川・川崎航路トンネル工事誌，1995。
- 2) 首都高速道路株式会社：トンネル構造物設計要領（開削工法編），pp.2-49-2-54，2008。
- 3) 例えば，（財）沿岸開発技術センター：沈埋トンネル技術マニュアル（改訂版），pp.107-109，2002。
- 4) （社）日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震編，pp.32-33，2012。
- 5) （社）日本道路協会：駐車場設計・施工指針 同解説，pp.165-168，1992。
- 6) 清宮理，西沢英雄，横田弘：川崎港海底トンネルでの地震応答観測と応答解析，港湾技術報告書，vol.22，No.3，1983。
- 7) 土田肇，南兼一郎，清宮理，倉田栄一，西沢英雄：地震動の多点同時観測に基づくパイプラインの応力の検討，港湾技術報告書，vol.20，No.4，1981。