

活断層を横切るシールドトンネルの耐震構造

田中 努¹・岩田 克司²・友納 弘³・大門 一郎⁴

¹フェロー会員 (株) エイト日本技術開発 防災保全事業部 (〒164-0012 東京都中野区本町5-33-11)
E-mail: tanaka-tsu@ej-hds.co.jp

²正会員 (株) エイト日本技術開発 東京支社防災保全部 (〒164-0012 東京都中野区本町5-33-11)
E-mail: iwata-ka@ej-hds.co.jp

³非会員 (株) エイト日本技術開発 東京支社防災保全部 (〒164-0012 東京都中野区本町5-33-11)
E-mail: tomonou-hi@ej-hds.co.jp

⁴非会員 東京都水道局 多摩水道改革推進本部 施設部 (〒190-0014 東京都立川市緑町6-7)
E-mail: okado-ichiro@waterworks.metro.tokyo.jp

ライフラインの幹線が活断層を横切るとき、その断層のずれが地表面まで達するか否かと、想定されるずれ量の程度により、対策の方法や規模が大きく変わる。本文では、水道管を内包する直径約3mのシールドトンネルが立川断層を横切るときの方針について調査研究した結果を報告する。立川断層は、逆断層型の縦ずれ主体の断層であるためトンネル縦断方向に曲げ・せん断の他に大きな軸圧縮が作用すること、断層面が地表まで現れないという曲構造の断層であることが特徴である。また、シールドトンネルの耐震構造は曲げや引張に対して工夫されているが、ここでは200m間で2mの軸方向圧縮変位を吸収しなければならなかった。その取り組みの考え方と得られたいくつかの知見を紹介する。

Key Words : active fault, shielded tunnel, seismic design, flexible joint, water supply, water pipe

1. はじめに

東京都水道局では送水管ネットワークの強化を目的として、多摩地区の水道幹線の整備を進めている。このうち、東大和給水所から拝島給水所に至る送水管はシールドトンネル内に敷設する構造で、図-1のように立川断層を横切る計画になっている。

立川断層は、基本的には東側が上盤となる逆断層型の



図-1 対象トンネルと立川断層の位置関係
(ベースマップは文献1から引用)

活断層で、今後30年間の発生確率が0.5～2%程度と日本の活断層の中では発生確率がやや高いグループに属している。断層活動時のずれ量は1.5m～3.0mと推定されているため、この断層ずれによるシールドトンネルおよび水道管の安全性が懸念される。

これらの設計を的確に行うために、立川断層のずれ量とずれが生じる位置を想定し、トンネル位置の周辺地盤の変位分布とシールドトンネルと水道管が受ける影響を数値解析により評価し、望ましい耐震構造を設定する必要がある。そこで、筆者らは、立川断層とシールドトンネルの専門家にご助言をいただき、断層位置特定を目指して地質調査を別途行い、耐震対策の仕様決定のためにメーカーの技術者と意見交換を行った。本文では、そこで得られた知見について報告する。

2. 設計条件

(1) シールドトンネルの構造諸元

シールドトンネルは図-2に示すように土被り約30mで洪積層（上総層群）中をほぼ水平に通過する。上総層群は砂、固結シルト、砂礫などで構成されており、せん断

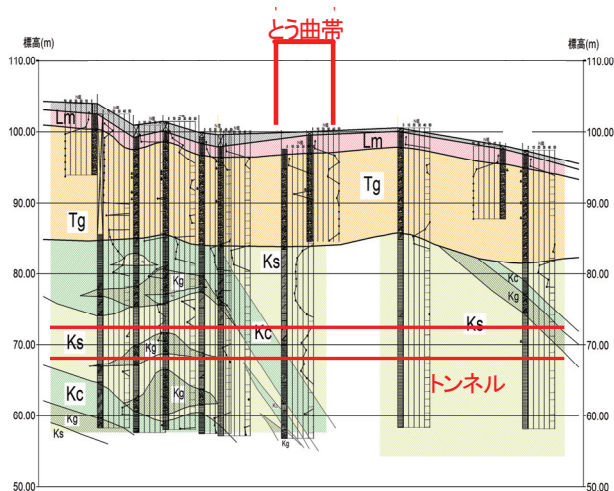


図-2 トンネルと地質縦断

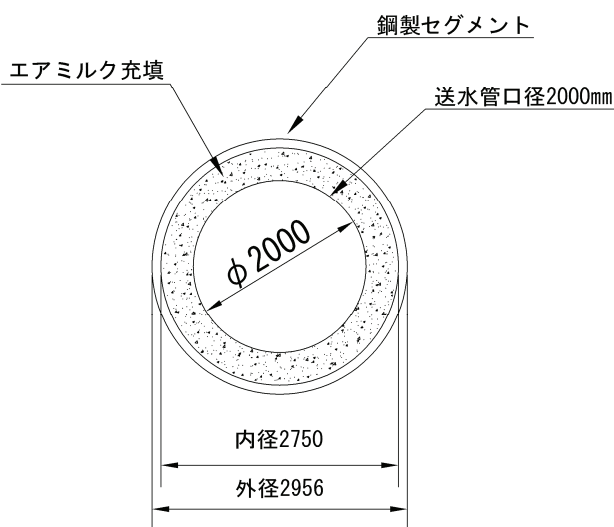


図-3 トンネルと水道管の断面構造

弾性波速度が300m/sを超えるため耐震設計上の基盤に相当する非常に堅硬な層である。また、上総層群の上には未固結の立川礫層や関東ローム層が分布している。

シールドトンネルの外径は約3mで、幅1.2m（2本主桁）の鋼製の標準セグメントを採用し、後述する断層対策として可とうセグメントを複数配置している。トンネル内には、図-3のように内径2mの水道管が敷設され、シールドトンネルとの間にはエアミルクが充填される。

(2) 立川断層の諸元

a) 断層の種類

立川断層は、前掲図-1のようにトンネルを北西～南東方向に横切り、延長約21km、東側が上盤となる逆断層型の活断層で、確実度Ⅰ（活断層であることが確実）、活動度Bと評価されている（文献2）。

b) とう曲構造

断層ずれは地表面に現れる場合もあるが、立川断層位置の表層は未固結の砂礫層が厚いため、地下深部で生じたずれが表層の中で分散され、地表では緩い傾斜として現れる「とう曲構造」であることが特徴である。現在の地形から読み取れる傾斜は、幅約200m間で約5mの高低差とされている。東京都防災会議は立川断層の震源断層部分の上端深度を2kmと位置づけている（文献3）ことから、地表に断層が現れないことは確実と考えられるが、断層ずれが生じる上端位置を推定する必要がある。

c) 断層のずれ量

断層のずれ量は、トレンチによる直接観察や断層両側のボーリング調査から火山灰や洪水による堆積物の連続性を調査する方法等によって評価されているが、立川断層の分布域にはローム層の下に厚い段丘砂礫層が分布していることもあり断層のずれ量の確認が難しく、表-1に示すように異なる見解が存在する（文献4、5）。立川断層北部の名栗断層を一体のものとして考えるか否かで横ずれの有無が変わり、地表に現れているとう曲変位5mが何回のずれで生じたのかの判断で再来期間が変わり次に発生するときの断層ずれ量が1.5m～3.0mと倍半分異なることになる。

表-1 立川断層の活動の特徴

項目	地震調査委員会(2003)	東京都(2000)
平均変位速度	0.2～0.3m/千年	0.25m/千年
最終活動時期	13,000～20,000年前	1,400～1,800年前
再来間隔	10,000～15,000万年	約5,000年
断層長	33km（北部の名栗断層を含めた「立川断層帯」）	21km

d) 設計で考慮する断層諸元の設定

社会資本整備においては、想定外を無くす配慮をしつつ、過剰なハード対策は避けるべきであるため、専門家ヒアリングを行って、両者の見解を踏まえた2ケースを設計条件として表-2のように設定した。このずれ量は、1回の本震で発生するか否か分からないが、地下30mの深さで大変形を受けた水道管とトンネルを修復するのは困難であるから、余震を含めてずれの全量として考え、震後も要求機能を満たすよう設計することとした。

表-2 設計で考慮する断層諸元

CASE	1. 縦ずれ型 (鉛直最大)	2. 横ずれ型 (水平最大)
断層角度	60度	80度
縦ずれ量	3.0m(最大)	1.5m
横ずれ量	—	3.0m(最大)
合成ずれ量	3.0m	3.4m

(3) シールドトンネルの要求性能と照査基準

活断層の影響を受けるトンネルの安全性を照査する方法は、基準として確立されたものが無いため、「水道施設耐震工法指針・解説」の考え方を基に以下のように設定した。

シールドトンネルは「耐震性能2」を基本とし、断層ずれによって限定的な損傷が生じてよいが、その補修を行わなくても、内包する水道管の通水機能に重大な影響を及ぼさないことを要求性能とした。そのため、照査基準は、表-3のように鋼製セグメントも可とうセグメントも耐荷力を越えないこととした。

表-3 シールドトンネルの照査基準

対象部位	評価基準
鋼製セグメント	・軸方向応力度 $\leq$ 限界応力度
可とうセグメント	・原則として伸縮量を吸収するが、可能伸縮量を超えた場合もセグメントが破壊しない。 ・発生せん断力 $\leq$ せん断耐力

3. 断層ずれによる周辺地盤の変形

(1) とう曲構造の断層変位の表し方

断層ずれの影響は、トンネル周辺地盤の変形を3次元FEM解析により求めることとした。局部的には数mの大変形が生じるため、地盤の非線形性をMohr-Coulombモデルで表し静的解析を行う。

立川断層は、前述のようにとう曲構造の断層であるが、断層ずれの起きる上端深さが不明である。そのため、FEMモデルで、現在の地表面に現れている約200m間で高低差5mを再現できるように断層ずれを与える深さと位置を調整し、図-4のように地表から深さ64mまでのモデルを構築した。

(2) トンネル軸線に沿う地盤の変位分布

このFEMモデルに、前掲表-2の断層ずれ量を与え、ト

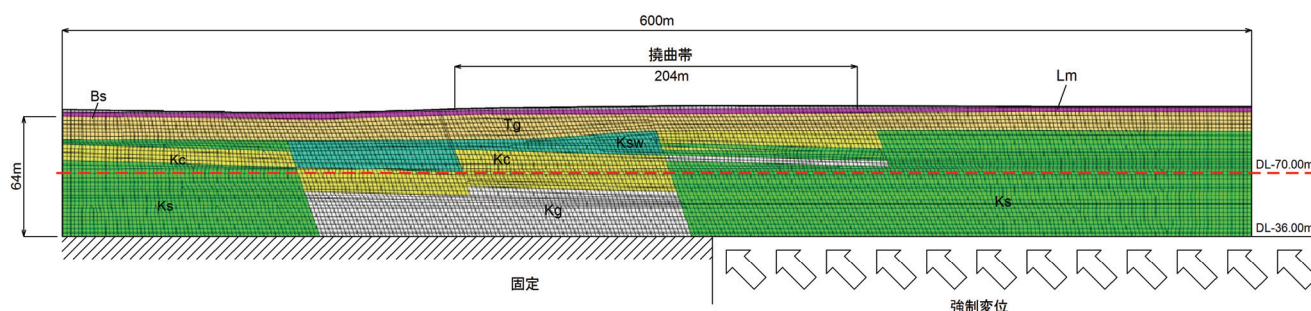


図-4 断層ずれによるトンネル周辺地盤の変形解析モデル

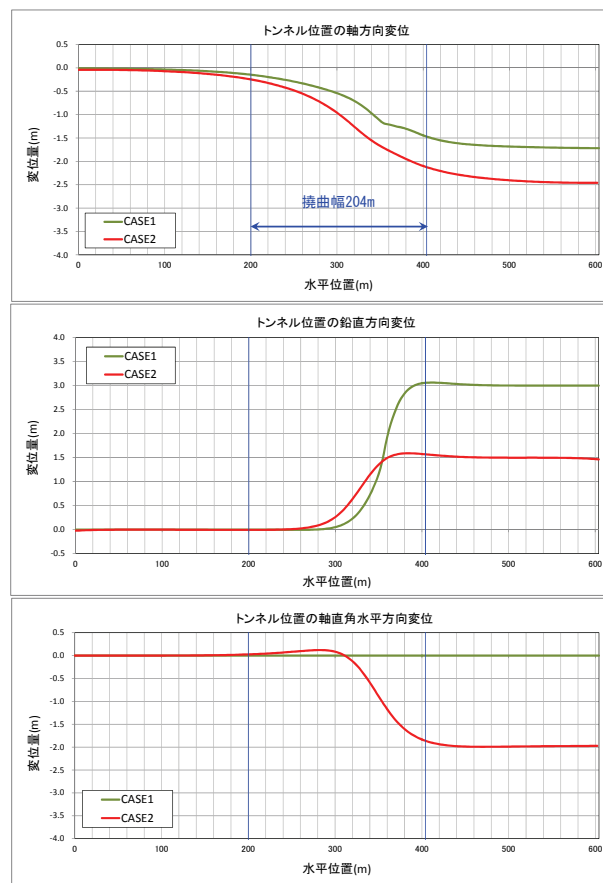


図-5 トンネル軸線の変位分布

ンネル軸線状の地盤変位分布を求めた。その結果を、図-5～6に示す。

図-5は、上から軸方向・鉛直方向・軸直角水平方向の順で示している。緑線はCASE1：縦ずれ型、赤線はCASE2：横ずれ型である。トンネル軸直角方向の変位は鉛直・水平とも、ほぼモデル下端で与えた変位量であるが、断層が地表面に達していないため、約100m間でS字状に現れている。またトンネル軸方向の変位は、断層が鉛直でなく傾いていることによって生じるが、圧縮であることに注意が必要である。しかも断層の傾きが緩い60度のCASE1よりも急な80度のCASE2の方が大きく、プレート内断層に多い横ずれ型の断層でもトンネルには圧縮変位が作用する可能性があることが分かる。

図-6は、CASE2：横ずれ型の場合の変位分布である。

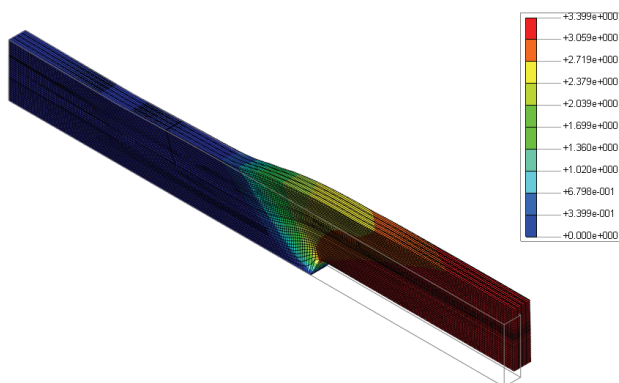


図-6 トンネル軸線の変位分布 (CASE2)

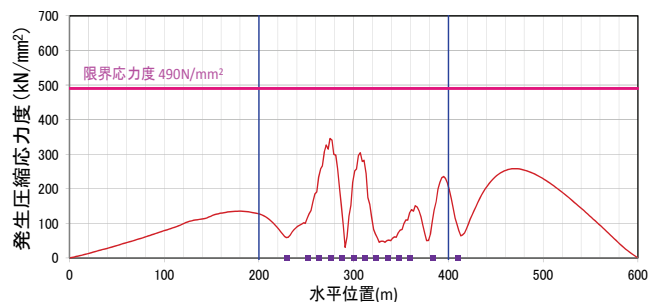


図-8 トンネルの軸方向応力度分布

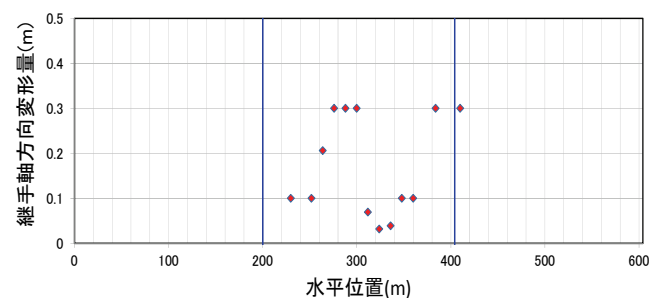


図-9 可とうセグメントの圧縮量

4. 断層ずれによるトンネルの変形

(1) トンネル変形の評価方法

シールドトンネルの変形は、トンネルを3次元の弾性支承上の梁モデルで表し、前述のトンネル軸線に沿った周辺地盤の変位分布を入力とした応答変位法の解析で求める。

トンネル内には、前掲図-3のように水道管が敷設されて、エアミルクで充填されるため、その相互作用を考慮できるように図-7のような梁ばねモデルを用いた。なお、トンネルの標準セグメントリングが連なる一般部は等価剛性の一様梁で表した。

(2) トンネルの変位と応力状態

シールドトンネルの耐震対策は、一般に曲げ・引張に耐えられるよう工夫されている。圧縮には施工時のジャッキ推力に抵抗できるように縦リブを配置するため、十分な耐力を有していると考えられるが、図-5のように

200m間で2.5m程度（平均1.25%の軸ひずみ）を吸収するのは難しい。

解析結果の一例として、図-8にトンネルの軸方向応力度分布を、図-9に可とうセグメントの圧縮量を示す。結果的に、曲げ・せん断の影響はあまり問題にならなかったが、2mの圧縮変位を吸収するために可とうセグメントを多数配置しなければならなくなり、変形の大きい約200m間に12m間隔で13箇所配置した。可とうセグメントの性能は地盤ひずみの大きさに応じて許容変位300mmと許容変位100mmの2種類を配置した。

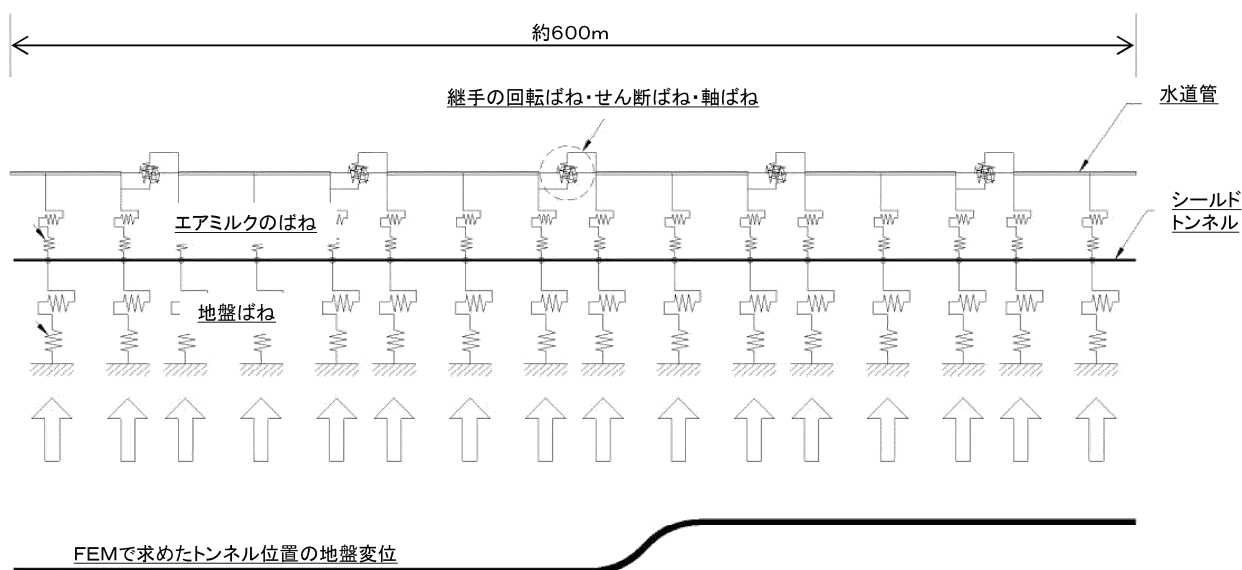


図-7 トンネルの梁モデル

5. 断層ずれを吸収するトンネル構造

(1) 弾性ワッシャーによる変位吸収

海岸に近い沖積平野の都市内などで、断層が地表に現れず、トンネル位置での変形量が数cm～数10cm程度と見込まれる場合は、影響区間に弾性ワッシャーを配置するのが経済的であるが、3章で述べたように、断層とトンネルの成す角とずれの方向により軸方向の圧縮が大きくなる場合があり、弾性ワッシャーの効果が無くなるため、注意が必要である。

(2) 可とうセグメントによる変位吸収

本トンネルのように、数mの変位を吸収する必要がある場合は、可とうセグメントを複数配置する方法が基本的な対応になると考えられる。本トンネルの設計に当たっては、メーカーと議論を重ねて300mmの圧縮変位を吸収できる可とうセグメントを選定して設置数を減らしたが、それでも高価である。また、文献6)で指摘されるように、可とうセグメントの伸縮に対してトンネル周囲の地盤が抵抗する可能性が十分考えられ、安易に変位吸収を期待することには注意が必要である。

(3) 裏込材の配慮

トンネルの変形は周辺地盤の変形がトンネルに伝わって生じるため、文献7)の免震トンネルのように、ゴム材のような超低剛性の裏込材を用いると、可とうセグメントや弾性ワッシャーの効果を十分に発揮させることができる。そのため、本トンネルでは、計算外の配慮として、裏込材に低強度の材料を用い、地盤からトンネルに伝わる力を低減する配慮をした。

6. 水道管の耐震構造とシールドトンネルとの相互作用

(1) 間詰め材の影響

本トンネルのように水道管を内包し間詰め材で埋める構造（前掲図-3）のシールドトンネルは、水道管の剛性や可とう部の変形の影響を受ける。このため、前掲図-7のような相互作用を考慮できるモデルで挙動を解析する必要がある。この構造は、トンネル断面を小さくできるので経済的であると共に、地震などの地盤変位に対してトンネルと共に水道管も抵抗するため頑丈である。しかしながら、本トンネルのように数mの断層変位を受ける場合などは、間詰めをしない空間か、水道管が錆びずに万が一トンネルの外に漏れても地下水に混ざらない液体を注入するなどすれば、地盤に接する外側のトンネルは変形してもトンネル内の水道管の変形は小さく抑えられる。本トンネルの設計では施工実績のある材料の中で最

も低強度のエアミルクを用いることとしたが、今後の研究開発が望まれる。

(2) 水道管の影響

内包する水道管には、鋼管とダクトイル管が考えられる。それぞれの変形を吸収する耐震構造は特徴的で、シールドトンネルへの影響も異なる。いずれも要求性能に応じて製品の組み合わせや形状変更などの自由度もあるため、総合的に判断する必要がある。

7. おわりに

本文では、水道管を内包する直径約3mのシールドトンネルが立川断層を横切する場合の対策について調査研究した結果として、トンネルと水道管に及ぶ影響を数値解析で評価する考え方と具体的方法事例、そして対策構造といくつかの注意点について示した。これらが、今後の活断層を横切るシールドトンネルの耐震対策の参考になれば幸いである。

この調査研究と同時に、立川断層位置の精度を上げるため、追加ボーリングとチェーンアレイ探査を行い、図-10のような砂礫層の構造が推定された。これによると、砂礫層内では、これまでの断層ずれに伴いいくつかの細かなずれが起きている可能性が伺えた。そこで、断層ずれがトンネルを横切った場合についても補足検討を行い、前述の耐震対策で対応可能であることを確認した。

なお、このシールドトンネルは、内部に送水管を敷設するための仮設であるため、ここで扱った断層ずれのように、レベル2地震動より極低頻度と思われる異常事態に対しては、要求性能を下げたり、間詰めを行わないなど、もう一歩踏み込んだ耐震上の配慮が可能な技術基準の新設や見直しが望まれる。

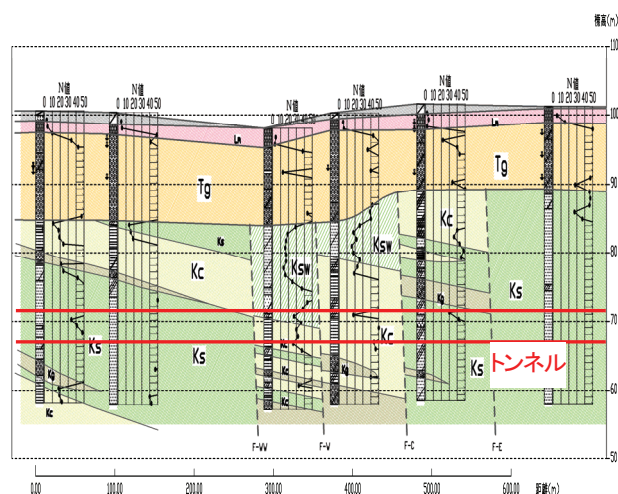


図-10 追加ボーリングとチェーンアレイ探査結果から推定された砂礫層の構造

謝辞： 本文は、東京都水道局多摩水道改革推進本部の業務を進めるために行った調査研究の成果を中心に報告した。立川断層については首都大学東京の山崎晴雄教授と産業技術総合研究所の宮下由香里主任研究員に、シーールドトンネルの解析と耐震構造の考え方については早稲田大学の小泉淳教授に、貴重な情報とご指導をいただきました。また興亜開発株式会社の中村通支店長他には、立川断層の位置についてそのチェーンアレイ探査結果と評価について度々の意見交換をさせていただきました。さらに西武ポリマ化成株式会社、JFEエンジニアリング株式会社、株式会社クボタ等の方々とも意見交換をさせていただきご提案もいただきました。本文に示した知見は、これらの方々のご意見やご助言により得られたものが多く、末尾ながら感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 都市圏活断層図（青梅）,国土地理院
- 2) 新編日本の活断層, 活断層研究会, 東京大学出版会, 1991.

- 3) 首都直下地震等による東京の被害想定, 東京都防災会議, 平成24年4月18日公表
- 4) 立川断層帯の長期評価について, 地震調査研究推進本部地震調査委員会, 平成15年8月
- 5) 立川断層調査報告書, 東京都地域活断層調査委員会, 平成11年3月
- 6) 田中努, 金井拓弥, 鈴木猛康: 継手とひびわれの影響を考慮したトンネル縦断方向の地震時挙動と軸剛性の評価, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学) Vol. 68(2012) No. 4, pp.I-867~I-875, 2012
- 7) 建設省土木研究所耐震研究室他: 地下構造物の免震設計法マニュアル(案), 建設省土木研究所共同研究報告書211号, 1998.

EARTHQUAKE-RESISTANT STRUCTURE OF SHIELDED TUNNEL RUNNING ACROSS ACTIVE FAULT

Tsutomu TANAKA, Katsuji IWATA, Hiroshi TOMONOU and Ichiro OOKADO

In the case that main line of lifeline running across active fault, method and scale of measures depend on whether fault displacement reaches ground surface or not and the amount of estimated displacement.

This paper reports the result of survey and research about measures in the case that shielded tunnel with a diameter of three meters enclosing water pipe runs across Tachikawa Fault. Tachikawa Fault has two characteristics. One is flexure ground structure whose surface does not appear on the ground. The other is that strong axial compression acts on the tunnel and the lifeline in the longitudinal direction since it is reverse fault which moves vertically.

Earthquake-resistant structure of shielded tunnel usually has strength against stretching and bending, but shielded tunnel in this case has to absorb two meters' displacement in axial compressive direction between two hundred meters.