

シールドトンネルの耐震設計解析モデルに関する 数値実験による基礎的研究

岸 大智¹・岩波 基²・山口 哲司³

¹ 学生会員 早稲田大学理工学術院 建設工学専攻 (〒169-8555 東京都新宿区大久保三丁目 4-1)

E-mail: kishi11142455@fuji.waseda.jp

² 正会員 早稲田大学理工学術院 社会環境工学科 (〒169-8555 東京都新宿区大久保三丁目 4-1)

E-mail: miwanami@waseda.jp

³ 正会員 株式会社熊谷組 土木設計部 (〒162-0004 東京都新宿区津久戸町 2)

E-mail: tyamagu@ku.kumagaigumi.co.jp

現在, 日本の都市部ではトンネルの多くにシールド工法が採用されている. シールドトンネルは地震に強い構造物であり, 実際に地震によるシールドトンネルの損傷事例はほとんど報告されたことはない. そのため, 地震時にどのような挙動を起こし損傷に至るのかは未知の部分が多い. 断層を横断するような位置にある場合や立坑との接続部など, 地震時にシールドトンネルに損傷が発生する可能性が高い箇所が存在していることはわかっているものの, それらに関する詳しい検討はなされていない. そこで本研究では, 断層上を通過しているシールドトンネルを想定し, 断層が動いた際にどのような挙動が起こるのかということについて検討を行った. 本文はその結果を報告するものである.

Key Words: shield tonnnel, seismic design, dislocation

1. はじめに

現在, 日本の都市部ではトンネルの多くにシールド工法が採用されている. シールドトンネルは元々十分な耐震性能を有しているとみなされてきたことから耐震設計が必要ないとされ, 比較的古いトンネルは耐震設計照査を行わないまま建設されてきた. その様な中で 1995 年に発生した兵庫県南部地震によって, 開削トンネルが大規模な被害を受けたことにより, 地下構造物の耐震設計法が見直されることとなり, 地震時構造解析手法や設計地震動などの現行の耐震設計の内容が規定された. しかし, シールドトンネルは地震に強い構造物であることから, 地震によるシールドトンネルの損傷事例はほとんど報告されたことはなく, どのような挙動を起こし損傷に至るのかは未知の部分が多い.

地震動に対して強いと考えられるシールドトンネルであっても, トンネルが断層を通過するような位置にある場合や立坑との接続部, 急曲線部や地盤の急変部など, 地震時にシールドトンネルに損傷が発生する可能性が高い箇所があることはわかっている. しかし, 上記の条件下にある場合に地震が発生した際に, シールドトンネル

にどのような影響があり損傷が起こるのかという詳しい検討はなされていない.

本報告では, 損傷が発生する可能性が高いとされる条件の中から, 断層を通過するシールドトンネルに着目し検討を行った. 検討方法としては, 3次元 FEM モデルを用いてシールドトンネルとその周辺地盤を表現し, 断層が動いた際にシールドトンネルに起こる変形や応力の分布を算出し, 破壊に至るモードの推測を試みた. そこで, 正断層, 逆断層など, 断層の種類ごとに解析を行い, それぞれの違いについて述べる.

2. 研究対象

本研究で検討に用いた地盤やトンネルの詳細を以下に示す.

(1) 地盤条件

本研究で解析の対象とした地盤は, 地表面から層厚を 30m とし, 洪積砂層の固結した地盤とした. 一様地盤として設定し, 地盤の中央部に断層を作成した. 断層が明

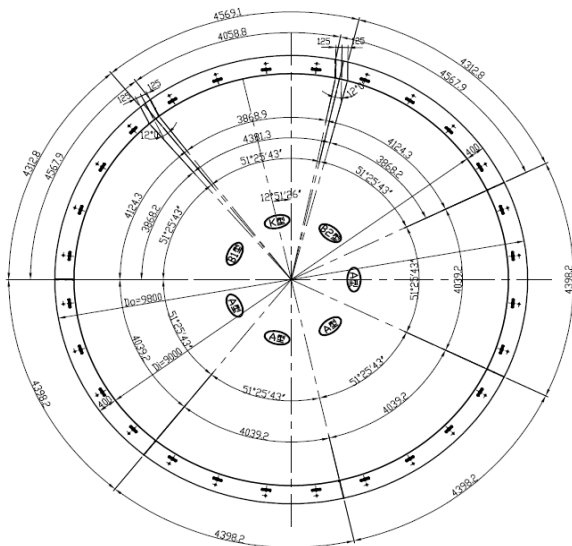


図-1 セグメント配置図

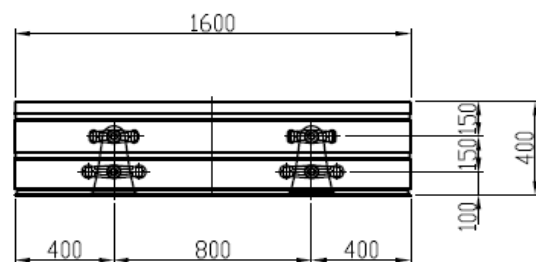


図-2 セグメント側面

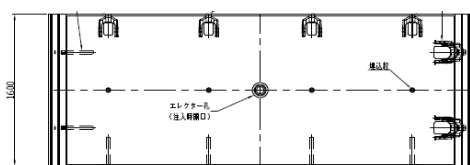


図-3 Aセグメント

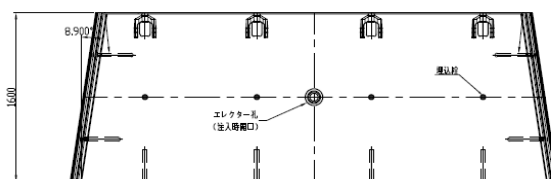


図-4 Kセグメント

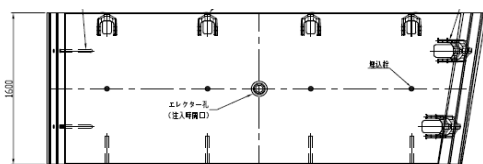


図-5 B1セグメント

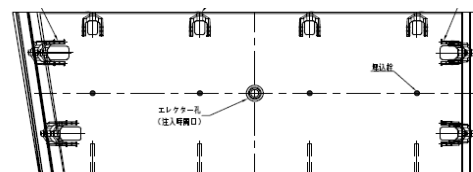


図-6 B2セグメント

表-1 地盤の概要

地質	深さ(m)	変形係数(kN/m ²)	ポアソン比	N 値
砂	0~30	1.4×10^5	0.35	50

表-2 コンクリートの物性値²⁾

設計基準強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	ポアソン比
42	33	0.2

確に生じる地盤はもっと岩盤に近い硬質地盤であるが、シールド工法の対象地盤が洪積層程度までが多いため本報告では洪積砂層を対象とした。表-1 に地盤の物性値を示す。

(2) トンネル概要

対象としたトンネルは外径 9.8m、内径 9.0m、延長 22.4m の地下鉄複線シールドトンネルで、セグメントは 7 分割である。なお、トンネル中心が対象地盤の地表から 15m に位置しているものとした。図-1 から図-6 にトンネルの詳細図を示す。また、セグメントに使用されているコンクリートの物性値²⁾を表-2 に示す。

(3) 断層変位

今回の検討では断層の変位量として、1995 年の兵庫県南部地震の際に震源となった、兵庫県淡路市にある野島断層を参考にした。

野島断層は兵庫県南部地震の震源となった六甲・淡路島断層帯の中で最も震源に近い断層であり、最大の変位を記録したものであり、縦方向に 1.2m の変位が発生した。そこで、1.2m の変位をトンネルの通過している地盤に発生させることとした。

3. 解析

断層が動いた際にシールドトンネルに起こりうる挙動や損傷、破壊形状の再現するために、シールドセグメ

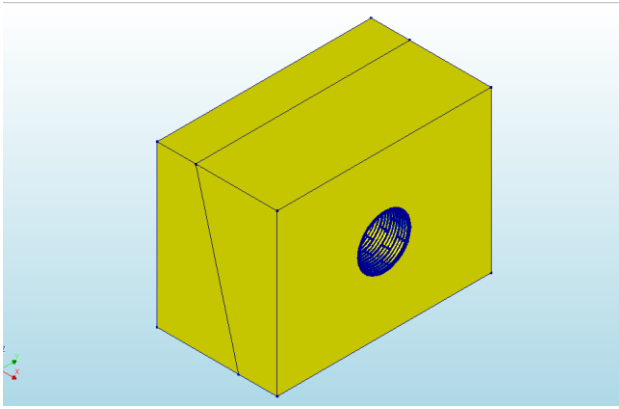


図-7 モデル図

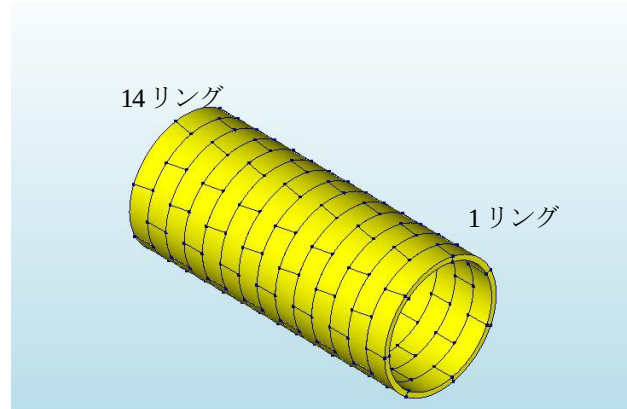


図-8 モデルのトンネル部

表-3 鉄筋およびボルトの物性値²⁾

種類	径(mm)	ヤング率(kN/mm ²)
ボルト	24	210
鉄筋	13	205
	16	
	19	
	22	

ント継手を考慮した弾性三次元 FEM を用いた解析を行った。本研究では、まず弾性解析の範囲内で、断層が動いたことによるシールドトンネルの挙動を確認した。以下に解析の詳細を示していく。

(1) 解析モデル

a) 地盤

地盤は地表面からの深さ 30m、トンネル軸方向 22.4m、トンネル軸直角方向 40m の範囲を解析領域とした。トンネルの土被りは、対象としたトンネルが実際に設置された位置を参考にした³⁾。トンネル軸直角方向はモデルが大きくなりすぎることによって解析時間の長大化等の影響が出ることを考慮し、上記の大きさとして解析の簡素化を図った。

b) シールドトンネル

トンネルのモデルは図-1 から図-6 にしたがって作成した。図-8 の手前側のリングを 1 リング目として、合計でセグメントリングを 14 リング分を作成し、トンネル延長は 22.4m とした。これは断層の影響範囲が地盤変形係数とトンネル全断面の軸方向剛性との関係から 20m 程度の長さと考え設定した。セグメントに使用されているコンクリートの物性値は前頁の表-2 に示した。

今回の解析では影響がないが、セグメント内部の鉄筋は配筋図にしたがってモデルに表現した。しかし、直径の小さい組立鉄筋と思われる鉄筋は省略した。セグメント間、リング間継手はボルトで再現した。表-3 にボルトおよびセグメントに使用されている鉄筋の物性値を示

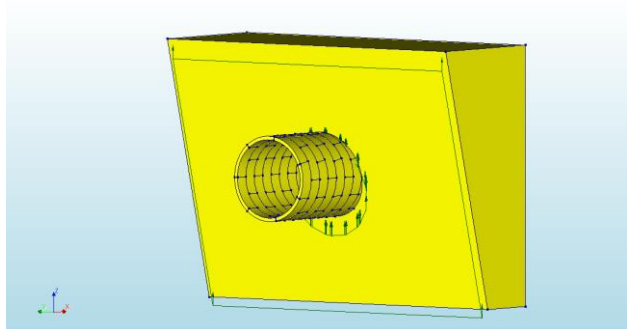


図-9 強制変位入力位置

す。ここで使用した鉄筋の規格は SD345 である。

c) 断層

本研究では 2 章で述べたように兵庫県の野島断層を参考に縦方向に 1.2m の強制変位を与えることで断層を表現した。強制変位は図-9 に示す位置に入力した。実際の断層では縦方向だけではなく横方向のずれも生じるが、断層の挙動の再現をすることが初めての試みであったことから、横方向の動きは考えず縦方向の動きのみを再現することとした。この研究においては正断層と逆断層の 2 種を想定して解析を行った。

断層は地盤およびトンネルの中央部付近を通過するような位置に設定した。

d) その他の条件

境界条件としては地盤の底面を全固定、地盤の側面部分を鉛直方法で固定した。

4. 解析結果

三次元 FEM 解析による解析結果を以下に示していく。

(1) 変形

次頁の図-10 から図-13 に地盤を除くトンネル本体の変

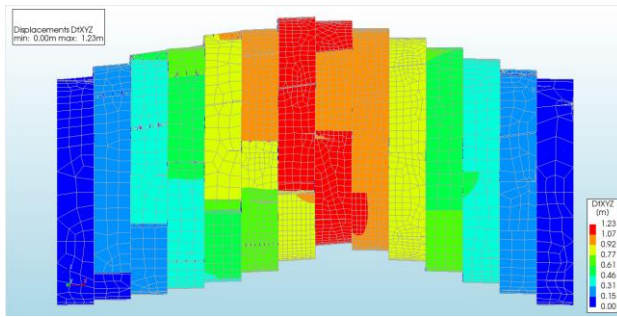


図-10 逆断層結果図(側面図)

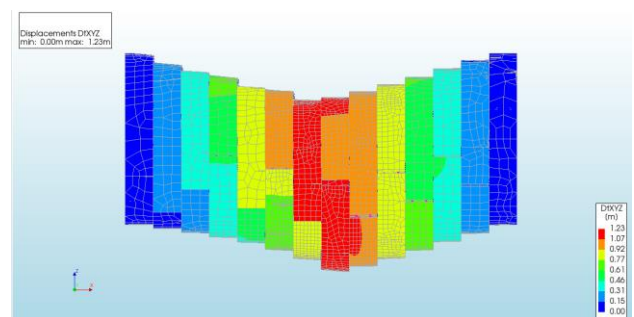


図-11 正断層結果図(側面図)

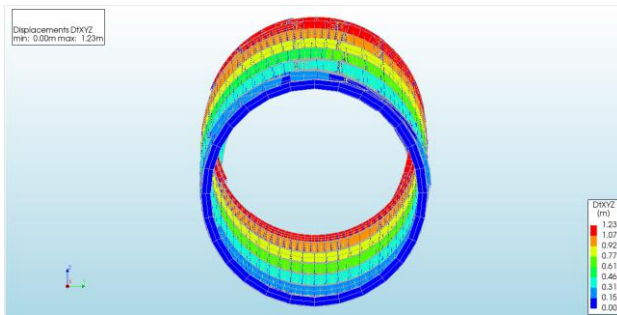


図-12 逆断層結果図(正面)

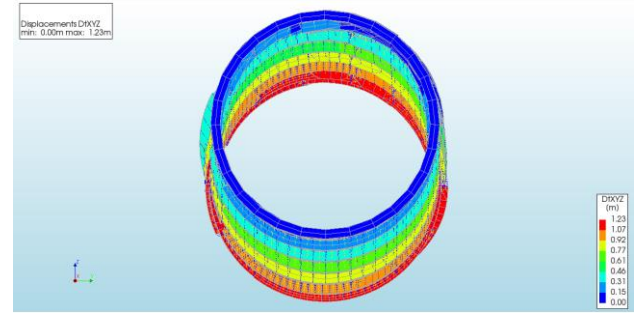


図-13 正断層結果図(正面)

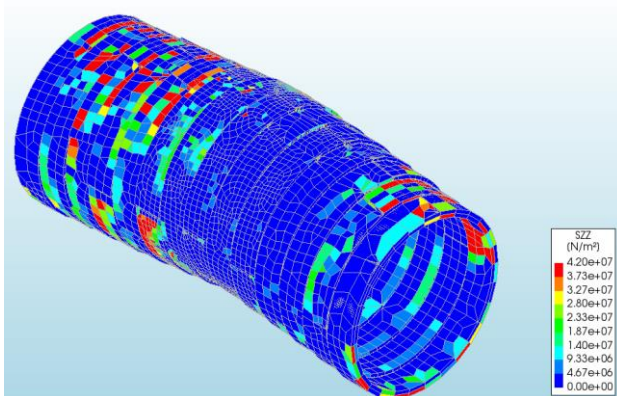


図-14 逆断層応力コンター図

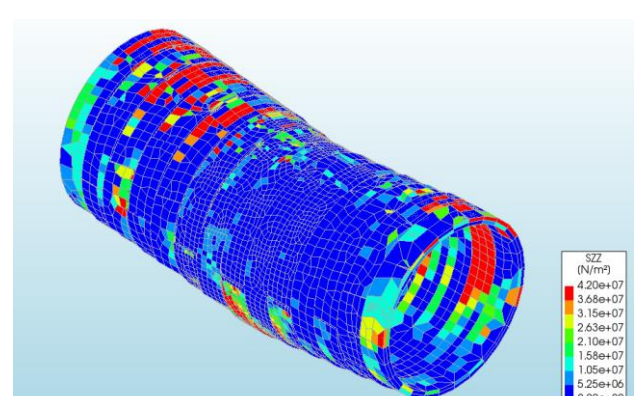


図-15 正断層応力コンター図

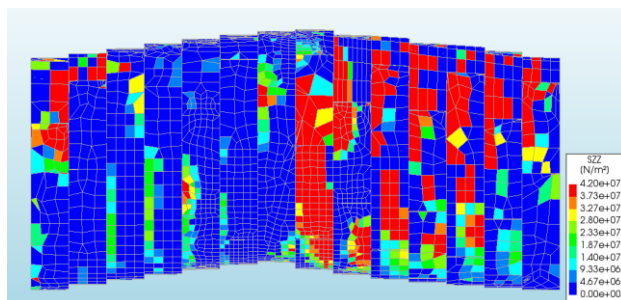


図-16 逆断層応力コンター図(側面)

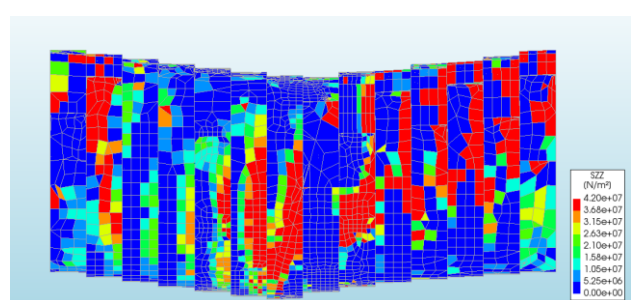


図-17 正断層応力コンター図(側面)

形図を示す。逆断層を想定した場合も正断層を想定した場合もともに、断層と交差しているトンネル中央部両側のリングで最も変位が生じ、そこから遠ざかるにつれて変位量も小さくなるという結果になった。また、変形はセグメント自身の変形よりも、リング間継手での変形が

大きい結果となった。

(2) 応力

トンネル本体に発生した応力のコンター図を上の図-14から図-17に示す。コンター図で赤く示されている部

表-4 ボルトが降伏していると思われる位置

継手種類	逆断層	正断層
リング間	5~7 リング下半分	5~7 リング下半分
	12~14 リング上部	8~10 リング上部 と下部
セグメント間	8~12 リング右上 部 6~9 リング下部 10~14 リング上部	6~7 リング下部 10~14 リング上部

分は、このトンネルに使用されているコンクリートの設計圧縮基準強度である 42N/mm^2 と同等かそれよりも大きな値を示した部分である。逆断層、正断層ともに似た様な応力分布の傾向を示した。断層に最も近い第 7,8 リングに応力が大きい部分が多く分布しており、8~14 リングのトンネル後半部に広がっている傾向がある。この結果から、リング継手部の継手とその定着分に応力が集中し、破壊が進行することが推察される結果となった。しかし、本報告では、弾性解析であるため、コンクリートにひび割れが生じる応力に達した後に、次のひび割れが発生する順番を詳細に把握することは出来なかった。

トンネルの継手部分については逆断層で 7,8,9,10 リング、正断層で7,8,9 リングにおいて、セグメント同士が約 0.4m 離れている箇所が確認できた。

また、継手のボルトの降伏応力である 480N/mm^2 以上の力が働き、ボルトが降伏してしまっていると思われる箇所が多数あった。表-4 にその箇所をまとめて示す。

5. まとめ

今回の検討で得られた知見を以下にまとめる。

- ・トンネル中央部の断層と交差する位置で、セグメント継手ボルトが降伏し、その周辺のコンクリート応力が大きい部分でトンネルの損傷が最も激しくなる。
- ・リング間およびセグメント間のボルトの降伏と思われる現象は、ひとつの継手で集中するのではなく、複数のリングにまたがって発生すると考えられる。そのた

め、トンネルの形状保持は困難と考えられる。

- ・トンネルの変形や損傷については、まず最初に中央部付近から発生し、断層の変位が大きくなるにつれて周囲に拡大した。この後はボルトが降伏していると考えられる箇所のセグメントの開きが原因となりトンネルの崩壊に至ると予測される。

しかし、本研究では弾性解析の結果であることから、変形後の結果しか確認することが出来ず、どこにどのようなタイミングで損傷が発生して降伏が起こったかということは、正確に認識することは出来なかった。また、どの位置から崩壊等が発生する可能性があるのかは、この結果からだけでは確実に判断することができないと考えている。

6. おわりに

本研究では、断層によるシールドトンネルの損傷発生 の挙動傾向を明らかにすることが出来た。しかし、本報告では弾性解析を行ったため、損傷の過程等を詳細に再現できず、その過程や順序等を変形量と応力度の大きさからの考察にとどまっている。

不明瞭な点を明確にするために同じモデルを用いて非線形解析を行うことで、本報告の結果よりも詳細に破壊する過程を追うことが出来るため、今後は非線形解析を用いて断層によるトンネルへの影響を再現する検討をすすめる予定である。

参考文献

- 1) 土木学会：トンネル・ライブラリー第 23 号 セグメントの設計【改訂版】，2010
- 2) 土木学会：トンネル標準示方書〔共通編〕・同解説/〔シールド工法編〕・同解説，2016
- 3) 東京地下鉄株式会社：営団地下鉄建設技術史【別冊 副都心線 池袋~渋谷間】，2010

(2021. 8. 6 受付)

BASIC RESEARCH BY NUMERICAL EXPERIMENTS ON SEISMIC DESIGN ANALYSIS MODEL OF SHIELD TUNNEL

Daichi KISHI, Motoi IWANAMI and Tetuji YAMAGUCHI

Currently, the shield method is used for many tunnels in urban areas of Japan. The shield tunnel is a structure that is resistant to earthquakes, and there have been few reports of actual damage to shield tunnels due to earthquakes. Therefore, there are many unknown parts about how they behave during an earthquake and cause damage. Although it is known that there are places where the shield tunnel is likely to be damaged during an earthquake, such as when it is located across a fault or when it is connected to a shaft, detailed studies have been conducted on them. Not. Therefore, in this study, we assumed a shield tunnel passing over the fault and investigated what kind of behavior would occur when the fault moves. The text reports the results.