シールドトンネルセグメント継手を考慮した 三次元モデルに関する基礎的研究

ZHOU Jiawei¹ · CHENG Chuantao² · 山口 哲司 ³ · 岩波 基⁴

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: syuukai@asagi.waseda.jp

²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: chengchauntao@gmail.com

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

⁴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

現在,日本の都市部では社会基盤のインフラトンネルの多くにシールド工法が採用されている.土木学 会のトンネル標準示方書ではセグメントの構造設計にあたって,はりーばねモデル計算法が標準となって いる.この計算法は千鳥組の添接効果の差異が忠実に反映するなどメリットがある.一方,日本のように, ばね定数の設定を継手開発時に行った実験で算出していない曲がりボルトのような継手では,ばね定数の 値が詳細に算出できないのが現状である.そのため,大変形を生じるシールドトンネル継手部の詳細解析 が行われてこなかった.そこで本研究では、シールドトンネルのセグメントと継手を忠実に反映する三次 元モデルを作り,地震の詳細な挙動再現を目指している.本文は、常時における三次元モデルの結果をは りーばねモデルによる解析結果を比較して妥当性について検討した結果を報告するものである.

Key Words: shield tunnel, seismic design, 3D model, joint

1. はじめに

現在,日本の都市部では社会基盤インフラトンネルの 多くにシールド工法が採用されている.そして,シール ドトンネルのセグメント構造設計にあたっては,はりー ばねモデルが使用されることが多い.この計算法によれ ば、セグメントの分割数やその分割位置,セグメント継 手の曲げ剛性の大きさ、リング継手の配置およびそのせ ん断剛性の大きさ、千鳥組の配置の方法等によって千鳥 組の添接効果の差異が忠実に反映できるため、力学的に は、セグメントリングが保有する耐荷機構を説明できる 有効な方法である.

しかし、シールドセグメントの耐震設計では、地盤の 地震時挙動を求めて、はりーばねモデルに地盤ばねを介 して入力する構造解析が日本の標準的な方法である.

また,地盤とシールドセグメントを両方モデル化して 解析する場合には、2次元解析が用いられ、トンネル横 断面については、セグメントをリングとしてモデル化し て解析を実施しされることが多い.これは、第一に、耐 震設計レベルでは、継手の非線形性を考慮する領域まで 変位が至らないと考えられていることと、等価弾性地盤 に拘束されているセグメントでは、継手に目開きが生じ る変形挙動を表現できないためである.また、従来行わ れてきたシールドトンネルと地盤の模型実験でも、セグ メントの非線形な状態に至る実験が振動台の制約から行 われなかったことにも起因している.したがって、曲が りボルトのような締結力がほとんど無い継手や人類が経 験したことがないレベルの巨大地震が作用した場合のシ ールドに関する継手挙動は詳しい検討はなされていない 現状である.

本研究では、シールトンネルの継手部挙動を再現でき るモデルの構築を目指して検討を行っている.そこでま ず、三次元でのシールドトンネルのセグメント、セグメ ント継手、リング継手とその周辺地盤を忠実に構築した. そして、常時の土圧が作用する場合におけるシールドト ンネルの継手に起こる挙動や損傷の再現を試みた.

2. 検討対象

本研究で検討に用いた地盤やトンネルの物性値の詳細 は以下のように示す.

(1) トンネル

本研究で対象としたシールドトンネルは外径 9.8m, 内径 9.0mの地下鉄複線シールドトンネルである.一つ リングにあたりセグメントを7分割している.リング間 の連結は千鳥組式であり,両リング間は25°42′52″の 傾きがある.トンネル中心は対象地盤の地表から75.60 mに位置している.図-1から図-7にトンネルの詳細図 を示す.また,シールドトンネルセグメントと継手に使 用されている材料の物性値を表-1に示す.



図-1 セグメント配置図



図-2 セグメント組合せ図





(2) 地盤

本研究で解析の対象とした地盤は、地表面から設計上の基盤面までの深さが 137.80m で、シールドトンネルにある地層は安定した洪積砂質層である. 表-2 に地盤の物性値を示す.

地質 記号	層下端深度 GL-(m)	単位体積重量 (kN/m ³)	N値 (平均値)	粘着力 (kN/m²)	内部摩擦 角(°)	変形係数 (MN/m²)	透水係数 (cm/sec)
Ac	325	14	0	0	0	0	-
As	5 50	18	9	0	27	5	-
Ds1	12.60	19	15	0	30	9	6.59×10 ⁻⁴
Dc1	16.70	17	21	30	27	22	-
Ds2	18.80	17	50	0	42	22	6.56×10 ⁻³
Dc2	21 30	17	36	30	27	59	-
Ds3	29.40	19	50以上	0	42	41	4.61×10 ⁻³
Dc3	36.00	17	50以上	170	29	35	-
Ds4	49.10	19	50以上	0	42	52	4.86×10 ⁻³
Dc4	52.40	18	30	220	3	21	-
Ds5	60.00	19	50	0	42	49	2.56×10 ⁻³
Dg0	64.70	20	50以上	0	42	35	1.68×10 ⁻³
Ds5	75.60	19	50以上	0	42	56	2.56×10 ⁻³
Dc5	79.85	17	34	370	8	24	-
Ds6	88.75	19	41	0	40	54	5.82×10 ⁻⁵
Dc6	95.40	18	45	420	6	32	-
Ds7	9635	18	-	-	-	56	2.41×10 ⁻³
Dc7	103.15	18	37	300	7	26	-
Dg1	107 50	20	50以上	0	42	35	1.18×10 ⁻³
Ds9	11030	19	50以上	0	42	35	2.41×10 ⁻³
Dc8	119.70	17	42	350	8	95	-
Ds10	122.00	19	50以上	0	42	26	2.41×10 ⁻³
Dc9	130.05	18	37	410	9	26	-
Ds10	137.80	-	-	-	-	56	9.85×10 ⁴

表-2 地盤の物性値



図-8 地盤モデル図



図-9 トンネルモデル図



図-10 トンネル全体応力図



図-11 リング6垂直方向応力図

表-3 三次元モデルのボルト組合せの応力

番号	応力 (\/m²)
No. 1	-12873
No. 2	2560.0
No. 3	-426.7
No. 4	2560.0
No. 5	2560.0
No. 6	1066.8
No. 7	2560.0



図-12 二次元モデル曲げモーメント図



図-13 二次元モデル軸力図





図-14 二次元モデルせん断力図

表-4 二次元モデルのボルト組合せの応力

番号	応力 Ŵmi?
No.1	-128.75
No.2	2663.03
No.3	-128.30
No.4	3013 26
No.5	270.05
No.6	180.47
No.7	2983.77



3. 解析概要

(1) 解析方針

常時におけるシールドトンネルセグメント間とリング 間に存在するインサート継手に生じる挙動を再現するた めに、セグメントと継手のボルトを表現して解析とを行 う. 三次元 FEM 解析コードには Abaqus/CAE を使用する. また、三次元モデルの妥当性を確認するため、解析ソフ ト Moleman を使い、はりーばねモデルを用いたシールド トンネルの横断方向断面力解析を行った.

(2) 二次元解析モデル

三次元 FEM を用いて以下のようにシールドトンネル と周辺地盤を作成した.

a) 地盤

三次元FEM解析に使った地盤は地表面から深さ137.80 m,トンネル軸方向の長さはトンネルリング10リング 分で16.00m,トンネル軸直角方向はトンネル中心から 左右50.00mずつ,合計100.00mサイズでモデル化した. また,地震動に関する非線形解析にあたって,左右およ び下地盤境界は地震波を反射し,実際の地盤挙動と大き く相違が生じることをしないように,境界のところに波 を吸収することができる境界要素を設置した.各地層の 深度および物性値は表-2のように示す.図-8は地盤の モデル図である.

b) シールドトンネル

トンネルは図-1~7 に忠実に作成した.トンネルセグ メントリングは合計 10 リング分作成し,全長 16.00mとし た.セグメント間継手とリング間継手の挙動に影響がな いトンネル軸方向の長さを設定した.また,動的解析の 場合もモデルの境界面の影響をなくすため,20m 程度の 長さがあれば中間部分の挙動に問題を生じないものと判 断した.トンネルのモデル図は図-9 で示す.

地震時のセグメント本体にひび割れが生じた場合も想 定して、セグメントの内部鉄筋も配筋図に沿ってモデル に表現した.ただし、主鉄筋とせん断補強筋のみを考慮 した.詳細な物性値は**表-1**のように示す.

c) 継手

セグメント間のインサート継手配置は図-7 のように, ひとつのセグメント継手当たりボルト4本設置する. セ グメントのリング間継手は図-2 のように, 1セグメン トにつきボルト4つに配置する. 1リングで合計セグメ ント継手28個, リング継手28個である.

また,実際インサート継手を締め付けるためにセグメントに埋め込んだ鉄製ボックスは強度上周りのセグメントよりはるかに強く,その有無がボルトの挙動に大きな影響を与えることはないと考えられるため,モデル化していない.

継手本体に対し、三次元ソリッド要素として作成され たモデルは一番理想的であるが、膨大なインスタント数 は性能上計算時間の延長と収束上の問題が改善しにくい 観点から、今回は計算しやすい、ボルトの応力状態も表 現できる三次元梁要素にした.

(3) はりーばねモデル

はりーばねモデル解析にあたって三次元 FEM 解析を 全く同じ条件で行った.

(4) 荷重条件

三次元モデルとはりーばねモデルは土圧と自重のみを 荷重とした.なお、セグメントは土被り20mのシールド トンネルの使用であり、それに70m以上の土被りを全土 圧で作用させて、大きな継手変形を起こして両者の比較 を行うものとした.重力加速度は9.8065m/s²とする.

4. 解析結果

(1) 三次元モデル

シールドトンネル三次元モデル全体の Mises 応力状況 図は図-10 に示す.モデル境界に近いセグメントの挙動 は実際挙動に誤差が大きいと考えられるため、トンネルの中間部にある第6リングを主な対象として注目する. (解析対象と呼ぶ).解析対象の応力図は図-11に示す.

トンネル進行方向を見てK型セグメント左側のB1型セ グメントとのリング継手を No.1 とし,逆時計回りで No.2 から No.7 と名付ける. 各断面継手の応力は表-3 に まとめる.

表-3から見ると、番号 No.2, No.4, No.7 三つの断面上 ボルトが降伏している.

(2) はりーばねモデル

はりーばねモデルの継手の分布と曲げモーメント図の 結果は図-12 に示す.軸力図は図-13 に示す. せん断力 図は図-14 に示す.

そして,はりーばねモデルに用いたボルトの応力は表 -4 にまとめる.

三次元モデルと二次元モデルのボルト応力関係をより 見やすく表現するため、図-15 に示したように、各継手 の応力状態を比較した.

図-15 から見ると、三次元モデルとはりーばねモデル の継手応力は No.5 を除く概ね一致することを確認した. また、はりーばねモデルではボルトを降伏しないという 設定で計算したため、三次元モデルの降伏しているとこ ろより応力のほうが大きいことを確認した.そして、 No.1、No.3、No.5、No.6 に対し、三次元モデルの応力は はりーばねモデルより大きい理由としては、三次元モデ ルは多リング系千鳥組式トンネルのため、リング間の添 接効果とはりーばねモデルで継手よりセグメントのほう が応力をより多く引き受けていると考えられる.

5. まとめ

以上の結果から,地盤中にあるはり要素としてモデル した継手を持つシールドトンネルは自重荷重上で解析値 がはりーばねモデルで模擬した結果とと概ね一致する結 果となった.そのため,シールドトンネル継手の三次元 モデルは現在のシールドセグメント解析における継手の 挙動を表現できるものである行うことが出来ると考えら れる.

今後はこのモデルを用いて動的解析を行い,セグメント継手が地震力を受ける際に起こりうる挙動を検討する 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) 土質工学会:現場技術者のための土と基礎シリーズ 13 地盤工学における数値解析の実務, 1987.

- 3) 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.
- 日本道路協会:道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 2012.
- 5) 村上博智,小泉淳:シールドセグメントリングの耐 荷機構について,土木学会論文報告集,第 272 号, pp.103-115,1978年4月.
- 6) 土木学会:動的解析と耐震設計[第4巻]地震動・

動的物性, 技報堂出版, 1989年.

 (7) 鉄道総合研究所:鉄道構造物等設計標準・同解説シ ールドトンネル, 2002.

(2021.8.6 受付)

BASIC SYUDY ON 3D SHIELD TUNNEL MODEL CONSIDERING SHIELD TUNNEL SEGMENT JOINTS

Jiawei ZHOU, Chuantao CHENG, Tetuji YAMAGUCHI and Motoi IWANAMI

The shield tunneling method is currently used for most of the infrastructure tunnels in urban areas in Japan. The standard tunnel specifications of the Japan Society of Civil Engineers (JSCE) use the beam-spring model calculation method as the standard for the structural design of segments. This method has merits such as faithfully reflecting the differences in the effect of staggered contact. On the other hand, for joints such as bent bolts, where the spring constant is not calculated based on the experiments con-ducted during the development of the joint, as in Japan, the value of the spring constant cannot be calcu- lated in detail. For this reason, detailed analysis of shield tunnel joints, which are subject to large defor- mation, has not been conducted. In this study, we aim to create a three-dimensional model that faithfully reflects shield tunnel segments and joints to reproduce detailed earthquake behavior. In this paper, the results of the three-dimensional model are compared with those of the beam-spring model, and the valid- ity of the model is discussed.