

シールドトンネル横断面方向の非弾性断面力について

神戸大学工学部 会員 高田至郎 日本技術開発(株) 会員 尾儀一郎
○日本技術開発(株) 会員 李 騰雁 日本技術開発(株) 会員 真鍋 進

1. はじめに 近年,世界各地で地震が多発しており,地下構造物を含む土木構造物が甚大な被害を受けている。シールドトンネル横断面方向の地震時挙動については多くの研究が実施され,多大な成果を得ている。とくに,志波ら¹⁾と高田ら²⁾は弾性床土リングの支配方程式からシールドトンネル横断面方向の簡易な耐震計算式を提案している。しかし,これらの方法はあくまでも均質的な地盤などの仮定のもとで成立したものであり,地盤構成が複雑な場合にトンネルの挙動特性をすべて反映したものではない。本文は非線形有限要素法を用いて不整形地盤中に埋設されたシールドトンネルの地震時挙動特性を検討するとともに,高田らが提案した簡易計算法との比較を行い,その妥当性を検討するものである。

2. 解析条件と検討流れ 図 - 2.1 に検討対象となる地盤条件を示す。地盤は沖積層と洪積層から構成される。地盤不整形の場合は沖積層と洪積層の境界線を図 - 2.1 の斜線のように谷状と仮定し旧河道をモデル化する。沖積層の地盤に対しては R-O モデルで地盤の非線形特性を考慮する。R-O モデルの骨格曲線と履歴曲線は次式のように表される。

$$\text{骨格曲線: } \gamma = \frac{\tau}{G_0} (1 + \alpha |\tau|^\beta)$$

$$\text{履歴曲線: } \frac{\gamma \pm \gamma_0}{2} = \frac{\tau \pm \tau_0}{2G_0} (1 + \alpha \left| \frac{\tau \pm \tau_0}{2} \right|^\beta)$$

ここで, γ はせん断ひずみ, τ はせん断応力, G_0 は初期せん断剛性である。 τ_0 , γ_0 はそれぞれ履歴折り返し点のせん断ひずみとせん断応力である。 α , β は R-O モデルのパラメータで,初期せん断剛性 G_0 ,最大減衰定数 $h_{\max}$ と基準ひずみ γ_r の三つ定数によって決まるものである。沖積層地盤の基準ひずみと最大減衰定数は表 - 2.1 に示すように安田・山口式³⁾で求める。また,洪積層は線形弾性と仮定している。表 - 2.2 は地盤の物性値を示すものである。

表 - 2.1 沖積層の非線形特性

土質	D50	最大減衰定数	基準ひずみ
埋土	0.007	0.15	0.001914
シルト質砂	0.1	0.20	0.000746
砂混じりシルト	0.04	0.18	0.000976
シルト質粘土	0.005	0.15	0.002039

シールドトンネルの種類は一次覆工のみの RC セグメントと,外径と内径をそれぞれ 5m と 4.7m とする。トンネルは地下 15m の沖積層内に埋設すると仮定する。

トンネルの非線形特性は表 - 2.3 に示すようである。入力地震動は兵庫県南部地震でポートアイランドの地下 83m で観測された地震波を採用する。図 - 2.2 は入力地震波である。

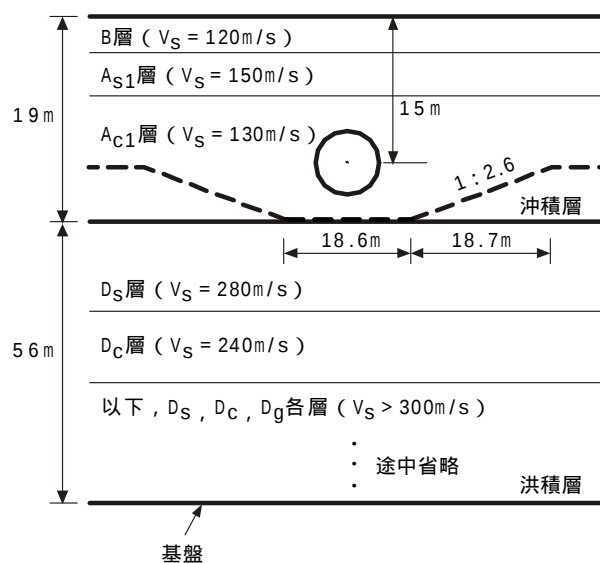


図 - 2.1 地盤構成とトンネル埋設位置

表 - 2.2 地盤の構成と物性値

深さ(m)	層厚(m)	土質	γ (tf/m ³)	G (tf/m ²)
1	1	埋土	1.60	2351
7	6	シルト質砂	1.70	3903
9	2	砂混じりシルト	1.70	2932
19	10	シルト質粘土	1.65	2845
29	10	シルト混じり砂	1.90	15200
32	3	砂質シルト	1.90	11167
34	2	シルト混じり砂	2.00	11755
42	8	砂混じり粘土	1.90	11167
46	4	シルト混じり砂	1.95	15600
56	10	砂礫	2.10	34286
58	2	シルト質粘土	1.75	13018
60	2	砂	1.95	31837
65	5	粘土	1.75	16071
66	1	シルト質砂	2.00	25000
71	5	粘土	1.75	21875
73	2	砂	2.00	25000
75	2	粘土	1.75	25786

キーワード: 不整形, シールドトンネル, 耐震計算, R-O モデル, 有限要素法

連絡先: 〒164-8601 東京都中野区本町 5 - 33 - 11 日本技術開発(株)地震防災部 Tel. 03-5385-5111, Fax. 03-5385-8525

本文の検討の流れとしては、まず整形と不整形地盤に対して非線形地震応答解析を行い、地盤不整形性がトンネルに対する影響を検討するとともに高田らの簡易法と比較を行う。次に、高田らの方法で地盤のせん断剛性などがトンネルの応答に与える影響を検討する。高田らの方法は図 - 2.3 に示す式で地盤とトンネルの非線形性に基づき、地盤のすべりと RC 構造物のクラック発生、鉄筋降伏、破壊の 4 ステップに分けてトンネルの耐震計算を行うものである。詳細については文献²⁾を参照されたい。

3. 解析結果 図 - 3.1 にトンネル中心位置の地盤深さ方向の最大加速度と最大変位の分布を示す。図 - 3.1 から分かるように整形と不整形地盤の応答変位はほぼ同じである。応答加速度については洪積層の地盤において整形と不整形の応答がほぼ同じであるが、沖積層地盤においては地盤の不整形の影響で整形地盤と不整形地盤の応答加速度はかなり違う。表 - 3.1 に動的解析と簡易計算の結果を示す。地盤剛性がトンネル応答に対する影響を検討するために簡易計算法については地盤剛性の推定方法の違いによって三つのケースに分けて行う。

動解からの推定とはトンネル無しの整形地盤の地震応答解析結果からせん断剛性を求めるものである。また、地盤のみの解析結果よりトンネル上下端の最大相対変位が約 9.83cm の結果が得られた。

表 - 3.1 よりトンネルに生じる断面力は整形地盤と不整形地盤の差はほとんどないことが分かる。また、せん断力を除いて簡易計算法（動解からの推定）と動的解析結果は良く一致し、簡易法の妥当性が証明される。せん断力の違いは最大せん断力と曲げモーメントの発生断面の違いによって剛性の評価が曲げに依存する簡易法のほうはトンネルの剛性を小さく評価してしまうためであると考えられる。トンネルの等価剛性(M_y/ϕ_y)でせん断力を計算すると、約 4.65tf で、動解の結果と良く一致することが分かった。また、トンネルの曲げモーメントが降伏モーメントを越えたので、地盤のせん断剛性の変化によって曲げモーメントとせん断力に与える影響はそれほど大きくない。しかし、軸力は地盤のせん断剛性に依存するので、大きな影響を受けている。

4. まとめ 今回の検討結果から以下の結論が得られる。1)地盤不整形性がトンネルの断面力に与える影響は小さい。2)地盤のせん断剛性はトンネルの断面力に大きな影響を持っていることが明らかとなり、簡易法で計算する時に適切に評価する必要がある。地盤せん断剛性は動解により設定するのが良い。

【謝辞】本研究は「土木学会関西支部シールドトンネルの合理的耐震設計法に関する調査研究委員会」の研究活動の一環として実施されたものである。関係各位に謝意を表す。

参考文献 1)志波ら：応答変位法によるシールドトンネルの地震時断面力の算定法，土木学会論文集，第 404 号 / I - 11，pp.385 - 394，1992。2)高田ら：非線形特性を考慮したシールドトンネル横断面の耐震計算法，第 10 回日本地震工学シンポジウム，pp.3109 - 3114，1998。3)安田・山口：様々の不覚乱土における動的変形特性，第 20 回土質工学研究発表会，pp.539 - 542，1985。

表 - 2.3 トンネルの非線形特性

	曲げモーメント (tf・m)	曲率 (1/m)
ひび割れ	1.058	1.22×10^{-3}
鉄筋降伏	3.023	1.99×10^{-2}
終局	3.812	1.70×10^{-1}

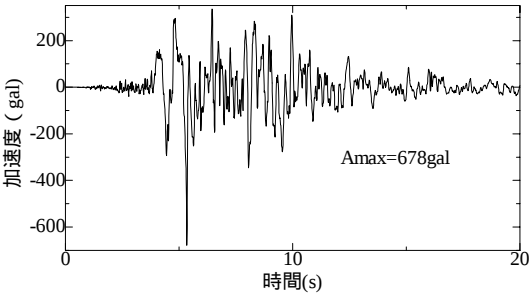


図 - 2.2 入力地震動

曲げモーメント M : $M = \frac{3\beta EI UC}{2R^2} \sin(2\varphi)$ せん断力 Q : $Q = \frac{3\beta EI UC}{R^3} \cos(2\varphi)$

軸力 N : $N = \frac{3\beta EI UC}{R^3} \left(1 + \frac{GR^3}{6EI} \right) \sin(2\varphi)$ $C = \frac{4GR^3(1-\nu)}{6EI(3-4\nu) + GR^3(3-2\nu)}$

$C^* = \frac{GR^3(11-12\nu)}{18EI(3-4\nu) + 12GR^3(1-\nu)}$ (C^* : 地盤すべり発生時の C)

図 - 2.3 簡易法の算定式

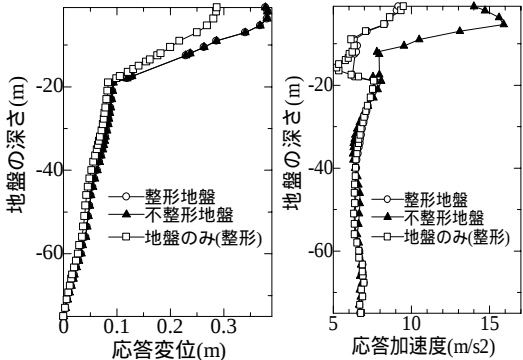


図 - 3.1 最大加速度と変位の分布

表 - 3.1 トンネルの断面力

発生断面力	軸力(tf)	せん断力(tf)	曲げモーメント(tf・m)
発生位置	頂点から45度	頂点	頂点から45度
整形地盤の場合	69.70	4.47	3.067
不整形地盤の場合	70.00	5.25	3.096
高田の方法	動解からの推定	2.61	3.078
	0.64 × 初期せん断剛性	2.62	3.084
	初期せん断剛性	2.62	3.084