講演概要　函体と地盤の剛性比に着目した鉄道開削トンネルの設計事例分析

山門　風音[1]・島田　貴文[2]・西岡　英俊[3]
牛田　貴士[4]・仲山　貴司[4]・井澤　淳[4]

[1]学生会員　中央大学　理工学部都市環境学科（〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27）

[2]正会員　（株）HRC 研究所　東京事務所（〒101-0054 東京都千代田区神田錦町 2-5-4 第二亀谷ビル）
E-mail: t-shimada@hrc-ri.co.jp (Corresponding Author)

[3]正会員　中央大学　理工学部都市環境学科（〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27）

[4]正会員　（公財）鉄道総合技術研究所（〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38）

地中構造物の耐震設計は函体と地盤の相互作用を適切に考慮して設計を行う必要があり，相互作用の程度は主に両者のせん断剛性の比率に支配される．しかし，実構造物のせん断剛性比の実績分析は十分ではない．そこで本稿では，鉄道開削トンネルの実設計事例のせん断剛性比に関する分析を実施した．また，代表被害事例として神戸高速鉄道大開駅の実設計事例との比較を行った．分析の結果，せん断剛性比 G_s/G_g は概ね 0.05～80 までの広い範囲に分布し，その中でも函体高さ H が大きくなるほど G_s/G_g は低下する傾向を示すことがわかった．また，函体高さ 10m 弱の 1 層の開削トンネルに限定した場合は，G_s/G_g の分布範囲は 0.2～7 程度となり，大開駅はその中の分布下限に相当することが確認された．

Key Words: *cut and cover tunnel, shear deformation behavior, shear stiffness ratio*

1.　はじめに

線路下カルバートや開削トンネル等の矩形断面の地中構造物の地震時挙動は，主に周辺地盤のせん断変形が外力となり，函体に変形が生じる．そのため，これらの耐震設計においては，函体と地盤の相互作用を適切に考慮して設計する必要があり，一般には周辺地盤の変位の影響を地盤ばねを介して函体に作用させる応答変位法が用いられている．

この函体と周辺地盤の相互作用の程度は，函体と地盤のせん断剛性の比率（以下，せん断剛性比 G_s/G_g）の影響を大きく受けると考えられる．特に両者のせん断剛性が大きく異なる場合には，函体近傍地盤の塑性化が生じやすくなるなど，地盤ばねのモデル化誤差が大きくなる懸念がある．そのため，地盤ばねを用いた応答変位法を適用する際には，せん断剛性比 G_s/G_g に何らかの制限範囲があると考えられる．著者らはその制限範囲を明らかとすべく，函体のせん断剛性を広範（最大値と最小値の比で5～10倍程度）に変化させた模型実験[1),2)]およびその再現解析に取り組んでいる．

本稿では，既往の実構造物がどの程度のせん断剛性比の範囲にあるかについて事例分析を行った結果について報告する．この事例分析を行った主な目的は，せん断剛性比 G_s/G_g の制限範囲を明らかにするための模型実験を計画する上で，現実的な範囲の構造条件を設定するためである．また，それと同時に，これらの事例分析を行うことで，実務上の構造計画段階において，地盤条件に応じて概略の構造諸元を設定する際の参考資料を得ることも目的としている．

2.　対象とした設計事例の概要

本研究では，先行して実施していた 1 層 1 径間の線路下カルバートの設計事例に関する分析[3)]を基本とし，新たに多層多径間の駅部を含む鉄道開削トンネル（内空を列車が通過する矩形の開削トンネル）の設計事例を追加し，より広範な函体寸法の範囲で検討を行った．具体的には，工事誌等で構造諸元が公開されている事例のうち，函体高さ，函体幅，部材厚，中柱寸法，柱間隔，近傍の地盤情報（N 値，層厚，土質）が判明している 15 事例（**表-1**）を追加した．

なお，これら 15 事例のうち 1 事例は，1995 年兵庫県南部地震において大きな被害を受けた神戸高速鉄道大開駅[4]である．また，大開駅は昭和 39 年（1964 年）竣工であるが，その他の 14 事例は全てそれ以降に建設された事例である．さらにその中の 3 事例は，兵庫県南部地震を踏まえて制定された平成 11 年（1999 年）版の耐震標準を適用した設計事例である．また，地盤情報が複数得られた事例に関しては，1 つの函体諸元から求まるせん断剛性 G_s に対して，地盤情報に応じて異なる地盤のせん断剛性 G_g を組み合わせて求めたせん断剛性比 G_s/G_g を，それぞれ独立したケースとして分析を実施した．

3. せん断剛性比 G_s/G_g の算出方法

(1) 函体のせん断剛性 G_s

函体のせん断剛性 G_s は，文献[5),6)]での方法を参考として，以下の方法で求めた．骨組み解析にて，**図-1** に示すように下床版の両端をピンまたはスライダーで単純支持された単位奥行きの函体（函体幅 B，函体高さ H）をモデル化し，その上床版に水平力 P を等分布荷重として作用させた．弾性解析で得られた各側壁および中柱上端位置での水平変位の平均値 δ を用い，式(1)により G_s を算出した．

$$G_s = \frac{P/B}{\delta/H} \tag{1}$$

本検討では，函体の側壁・中柱のモデル化に際しては，格子点間を 10 要素に分割して梁要素でモデル化した．なお，隅角部のハンチは再現していない．各梁要素の曲げ剛性は，ひび割れ発生前の全断面が有効な状態での初期剛性として算定した．コンクリートのヤング係数 E_c は，設計基準強度 f'_{ck} が明らかな場合は，RC 標準により算定し，設計基準強度 f'_{ck} 自体が不明な事例については E_c=25kN/mm^2（f'_{ck}=24N/mm^{2}相当）と仮定した．

例として，大開駅での骨組み解析結果を**図-2**，**表-2** に示す．主に側壁，中柱に大きな変形が確認された．変位は節点 A～C で同程度である．対して，上下床板の変形は微小である．

(2) 地盤のせん断剛性 G_g

地盤のせん断剛性 G_g は，函体側方部地盤の各層の平均N値から，耐震標準に準じて，式(2)，(3)を用いて推定した各層の地盤のせん断弾性波速度 V_{s0i} を介して，式(4)により各層の初期せん断剛性 G_{gi} を算出した．そして，各層の層厚 l_i を重みとして各層の初期せん断剛性を平均した値を地盤のせん断剛性 G_g とした．なお，大開駅については，N 値の他に弾性波探査による地盤各層のせん断弾性波速度 V_{s0i} も得られているため，地盤のせん断剛性 G_g を N 値から推定するケースと弾性波探査による実測値から算定したケースの 2 ケースを分析対象とした．

表-1 対象とした鉄道開削トンネル設計事例の内訳

	1径間	2径間	3径間
1層	2事例	7事例	1事例
2層		1事例	
3層			1事例
4層			1事例
5層			1事例
6層			1事例

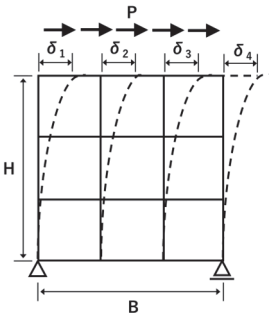


図-1 函体のせん断剛性 G_s の算出方法

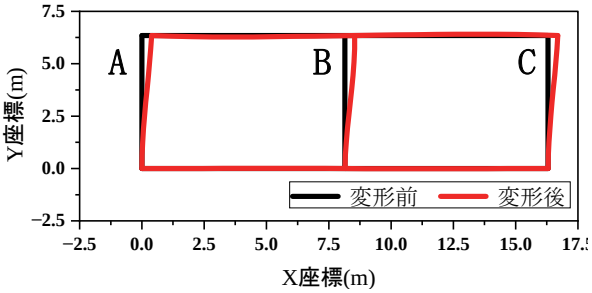


図-2 大開駅の変形図（$\tau=P/B$=1000 kN/m^{2}時）

表-2 大開駅の変形状況（$\tau=P/B$=1000 kN/m^{2}時）

	節点 A	節点 B	節点 C
節点水平変位 (m)	0.390	0.391	0.390
水平変位平均値 (m)	0.390		
函体ひずみγ_s	0.054		
函体剛性 G_s	18,368 kN/m^2		

粘性土の場合　V_{s0i}= 100 $N^{1/3}$　(2)

砂質土の場合　V_{s0i}= 80 $N^{1/3}$　(3)

$$G_{gi} = \gamma \cdot \frac{{V_{s0i}}^2}{9.8} \tag{4}$$

4. 設計事例分析結果

(1) 函体のせん断剛性 G_s と函体高さ H の関係

函体のせん断剛性 G_s と函体高さ H の関係を**図-3** に示す．**図-3** より函体のせん断剛性 G_s は 10 MN/m^2 弱から 1000 MN/m^2 超までの非常に広い範囲に分布するが，全体的には函体高さ H が小さいほど，G_s の値は大きくなると

ともに，その分布幅は小さくなる傾向が確認できる．なお，大開駅は，既往の設計事例の中でも G_s が小さく，概ね分布下限値に近いことが確認できる．

このような函体高さ H が小さくなるほど函体のせん断剛性 G_s が大きくなり，分布幅が小さくなる傾向を示すのは，函体寸法が小さくなるほど断面諸元（特に部材厚）が，地盤条件や荷重条件を反映した構造計算ではなく，耐久性の検討や最小部材厚等の仕様規定によって決定しやすくなるためと考えられる．

(2) せん断剛性比 G_s/G_g と函体高さ H の関係

せん断剛性比 G_s/G_g と函体高さ H の関係を**図-4** に示す．**図-4** より G_s/G_g は 0.05 から 80 までと，最大値と最小値の比では 1600 倍という非常に広い範囲に分布するとともに，全体的には函体高さ H が大きくなるほどせん断剛性比 G_s/G_g が小さくなる右下がりの傾向が確認できる．

函体高さ H が 4m 以下の比較的小規模な線路下カルバートの大半は，函体の方が地盤よりも剛性が大きくなっており，せん断剛性比 G_s/G_g が 10 を上回る事例も少なくない．函体高さ H が 10 m 弱の 1 層の開削トンネル（およびそれと同程度となる比較的規模が大きい線路下カルバート）については，せん断剛性比 G_s/G_g の分布範囲は狭くなるが，それでも 0.2～7 程度と約 35 倍の範囲に分布しており，函体の方が剛性が大きい事例と地盤の方が剛性が大きい事例の両方が存在していることがわかる．なお，大開駅は，1 層の開削トンネルの事例の中ではせん断剛性比 G_s/G_g は最も小さい値となっている．

一方，H が 10m を超える 2 層以上の開削トンネルについては，収集事例は少ないものの，その G_s/G_g は 0.05 から 8 程度（約 160 倍）まで，1 層の開削トンネルの事例よりも広範囲に分布していることがわかる．

(3) せん断剛性比 G_s/G_g と側壁部平均 N 値の関係

せん断剛性比 G_s/G_g と側壁部の平均 N 値との関係を**図-5** に示す．1 層の開削トンネルに限れば，G_s/G_g と N 値との間に明確な傾向は確認できない．これは，地盤条件に応じた適切な構造解析によって断面諸元が決定されていることが反映された結果と考えられる．なお，多層の開削トンネルは函体規模が大きく，より深部の地盤の影響を受けることから，側壁部平均N値が大きい事例が多くなる傾向にあり，現時点の限られた収集事例から平均N値が G_s/G_g に及ぼす影響を考察することは難しい．

一方，線路下カルバートのせん断剛性比 G_s/G_g については，N 値との関係で右下がりの傾向が確認できる．これは4.(1)で述べた通り，函体寸法が小さくなるほど地盤条件を反映した構造計算ではなく，仕様規定的に函体のせん断剛性 G_s が決定するためである．また，側壁部平均N値が10を超える範囲では，G_s/G_g が1.0を下回る事例も散見される．

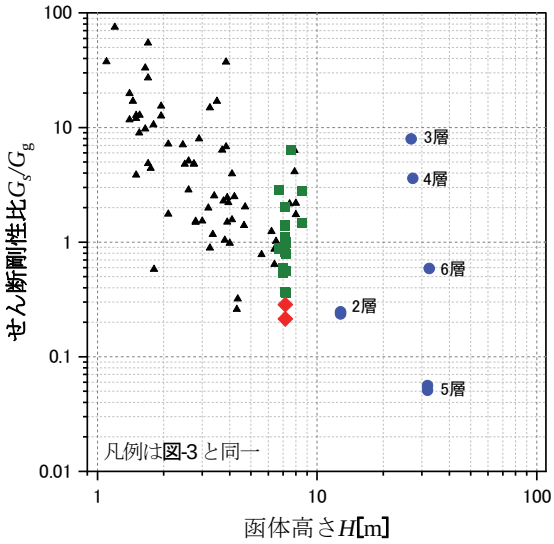


図-4 せん断剛性比 G_s/G_g と函体高さ H の関係

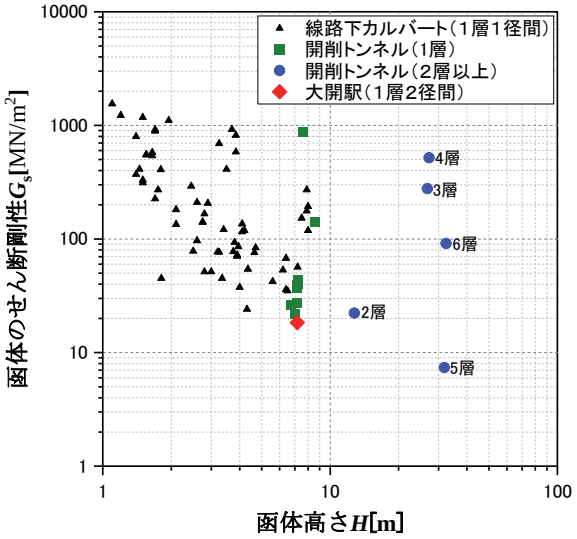


図-3 函体のせん断剛性 G_s と函体高さ H の関係

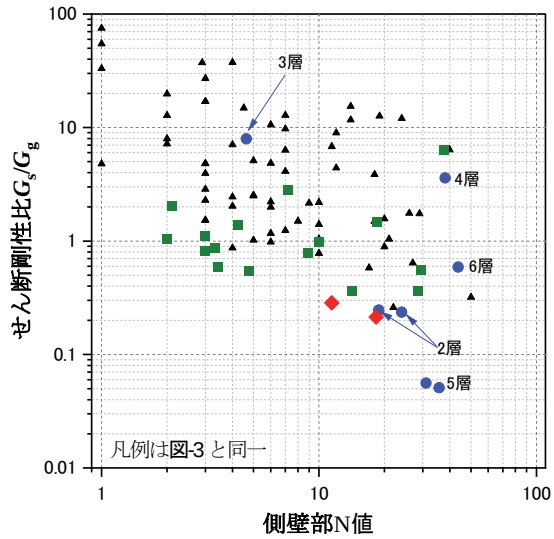


図-5 せん断剛性比 G_s/G_g と側壁部平均 N 値の関係

5. おわりに

本稿では，開削トンネルの設計事例を対象とした分析より，せん断剛性比 G_s/G_g の分布傾向を明らかにした．本研究で得た主な知見を以下に示す．

1) 線路下カルバートから駅部の多層多径間の開削トンネルの全体では，せん断剛性比 G_s/G_g は概ね 0.05～80 まで，1600 倍もの広い範囲に分布し，函体高さ H が大きくなるほど G_s/G_g は低下する傾向を示す．
2) 函体高さ 10m 弱の 1 層の開削トンネルは，函体の方が剛性が大きい事例と地盤の方が剛性が大きい事例の両方が存在し，G_s/G_g は 0.2～7 の概ね 35 倍の範囲に分布している．
3) 線路下カルバートのせん断剛性比 G_s/G_g は 1.0 を上回る事例が大半であり，10 を超える事例も少なくない．ただし，側壁部平均N値が10を超える範囲では，G_s/G_g が1.0を下回る事例も散見される．

なお，本検討では，函体と地盤のいずれも初期剛性に相当する値を用いている．既往の研究事例 [5),6)] では非線形化を考慮した等価線形剛性を用いており，直接的に数値を比較する場合はこの違いに留意する必要がある．

REFERENCES

1) 島田貴文，西野風雅，西岡英俊：地盤の非線形性が開削トンネルの地震時ひずみ伝達率に及ぼす影響に関する実験的検討，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol. 78, No. 4, pp. I_613-I_623, 2022. [Shimada, T., Nishino, F. and Nishioka, H.: Experimental study on the effect of nonlinearity of ground on shear strain ratio in cut and cover tunnel during the earthquake, *Transaction of the JSCE*, Vol. 78, No. 4, pp. I_613-I_623, 2022.]
2) 伊野将矢，西野風雅，西岡英俊，島田貴文：開削トンネルと地盤の剛性比に着目した地震時の函体変形特性に関する実験的研究，土木学会第 32 回トンネル工学報告集，2022. [Ino, M., Nishino, F., Nishioka, H. and Shimada, T.: Experimental study on deformation characteristics of boxes during earthquakes focusing on the ratio of stiffness between cut and cover tunnel and ground, *32nd Proceedings of Tunnel Engineering, JSCE*, 2022.]
3) 島田貴文，西岡英俊，西野風雅，松田敏輝，牛田貴士，仲山貴司，井澤淳：函体と地盤の剛性比に着目した線路下ボックスカルバートの設計事例分析，第 56 回地盤工学研究発表会，12-7-02, 2021. [Shimada, T., Nishioka, H., Nishino, F., Matsuda, T., Ushida, T., Nakayama, T. and Izawa, J.: Analysis of design case of box culvert under railway track considering stiffness ratio between box and soil, *56th Japan National Conference on Geotechnical Engineering*, 12-7-02, 2021.]
4) 矢的照夫，梅原俊夫，青木一二三，中村晋，江嵜順一，末富岩雄：兵庫県南部地震による神戸高速鉄道・大開駅の被害とその要因分析，土木学会論文集, No.537/I-35, pp. 303-320, 1996. [Yakato, T., Umehara, T., Aoki, H., Nakamura, S., Ezaki, J. and Suetomi, I.: Damage to Daikai subway station of Kobe rapid transit system and estimation of its reason during the 1995 Hyogoken-nanbu earthquake, *Transaction of the JSCE*, No.537/I-35, pp.303-320, 1996.]
5) 西岡勉，運上茂樹：ひずみ伝達特性を用いた地中構造物のせん断変形量の推定，土木学会論文集，No. 710/I-60, pp. 273-282, 2002. [Nishioka, T. and Unjo, S.: Estimation of the seismic shear deformation of the underground structure based on the shear strain transmitting characteristics between ground and structure, *Transaction of the JSCE*, No. 710/I-60, pp. 273-282, 2002.]
6) 立石章，岡二三生：地中構造物横断方向のレベル 2 地震動に対する静的耐震設計法の適用性，土木学会論文集，No. 752/I-66, pp. 179-192, 2004. [Tateishi, A. and, Oka, F.: Applicability of static seismic analysis methods for underground structures in across section against level 2 earthquakes, *Transaction of the JSCE*, No. 752/I-66, pp. 179-192, 2004.]

(Received March 31, 2023)
(Accepted June 9, 2023)

ANALYSIS OF DESIGN CASE OF RAILWAY CUT AND COVER TUNNELS CONSIDERING STIFFNESS RATIO BETWEEN TUNNEL AND GROUND

Kazane YAMAKADO, Takafumi SHIMADA, Hidetoshi NISHIOKA,
Takashi USHIDA, Takashi NAKAYAMA, and Jun IZAWA

The seismic design of underground structures must appropriately consider the interaction between the box and the ground. The degree of interaction is mainly governed by the ratio of the box's shear stiffness G_s and the ground's shear stiffness G_g. However, case analyses of the distribution of shear stiffness ratios of actual structures have not been adequately conducted. Therefore, this study analyzed the shear stiffness ratio of the design case of railway cut and cover tunnels. The analysis showed that the shear stiffness ratio G_s/G_g was generally distributed in a wide range from 0.05 to 100 and that G_s/G_g tended to decrease as the height of the box, H, increased. In addition, G_s/G_g was found to be distributed in the range of 0.2 to 7 for cases with a box height of around 10 m (equivalent to a one- or two-layer cut and cover tunnel).