

上下動を受ける地中構造物の力学的挙動に関する理論的研究

THEORETICAL STUDY ON THE MECHANICAL BEHAVIOR OF UNDERGROUND STRUCTURES SUBJECTED TO VERTICAL OSCILLATIONS

上西幸司^{*}・溝口俊介^{**}・櫻井春輔^{***}

Koji UENISHI^{*}, Shunsuke MIZOGUCHI^{**} and Shunsuke SAKURAI^{***}

In the case the epicenter of an earthquake is located very close to a densely populated urban area, extensive damage may be caused in that area by the high frequency components of the seismic waves that interact with the structures before attenuation. From the structural damage caused by such earthquakes, it may be possible to estimate the characteristics of the associated seismic waves. In particular, underground structures such as tunnels vibrate with their surroundings and they are expected to function as sensors that detect waves of specific frequencies. In this contribution, the characteristics of the vertical seismic waves associated with the 1995 Hyogo-ken Nanbu (Kobe), Japan Earthquake are estimated from the earthquake-induced damage to two tunnels (built by NATM and cut-and-cover methods) located very close to the epicenter.

1. はじめに

坑道やトンネルなどの地中構造物は、従来耐震性に優れているといわれてきた。しかしながら、1995年兵庫県南部地震（阪神・淡路大震災）の際、数は比較的少ないものの、地中構造物においても被害が見られた。そこで本研究では山岳トンネル（兵庫県西宮北有料道路盤滝トンネル）および函型トンネル（神戸高速鉄道大開駅）における被害を例として、地震上下動の地中構造物動的挙動に対する影響について考察を行う。

2. 山岳トンネルの動的挙動

兵庫県南部地震の際、盤滝トンネル（NATMトンネル）は中央部付近の断層破碎帯で側壁部2次覆工のコンクリートが一部剥離、鉄筋が座屈、露出し、路面も高さ10cm程度浮き上がった（図-1）が、インバートには変状が見られなかった^{1),2)}。地震によるトンネルの被害としてはこれまでにトンネル入口部の崩壊、あるいはトンネルを横断する断層とともにトンネルが動くことにより生じるものが報告されている³⁾が、盤滝トンネルにおける被害は、トンネル中央部付近で起こったこと、断層破碎帯に位置してはいるもののインバートをはじめ構造物は

^{*} 正会員 Dr.rer.nat. 神戸大学助手 工学部建設学科

^{**} 学生会員 神戸大学大学院自然科学研究科博士前期課程

^{***} 正会員 Ph.D. 工博 広島工業大学学長

十分に健全であったこと¹⁾より、断層のずれそのものにより起きたのではなく、地震波がトンネルと動的に干渉することにより発生したと考えられる。しかしながら、その被害発生機構については、水平動、せん断力を中心とした従来の振動解析では未だ十分な説明は得られていない^{11,12)}。そこで、ここでは図-2に示す二次元モデルを用い、地震上下動の影響を考慮に入れて盤滝トンネルの被害について考察する。盤滝トンネルの土被りは十分に厚いので、無限に広がる地山中の円形断面、覆工厚一定のトンネル下方から平面疎密調和波が入射すると仮定し、地山、覆工ともに線形弾性体、平面ひずみ状態にあるものとする。この場合、地山、覆工内の変位、応力分布は、スカラーおよびベクトル・ポテンシャルを用いて解析的に求めることができる^{17,19)}。地山ポアソン比 0.25、覆工ポアソン比 0.15、地山、覆工の密度比 1、 $a=4\text{m}$ 、 $b=4.3\text{m}$ としたときの解析結果を以下に示す。

トンネル内周部 ($r=a$) の各地点で発生する周 (θ) 方向の最大垂直応力と入射応力の比 (σ_θ/σ_0) の分布を図-3に示す。パラメータは覆工と地山の剛性比 G_2/G_1 であり、入射波の周波数 f は 3Hz である。図-3より、断層破砕帯などのように剛性比 G_2/G_1 が大きい場合、 σ_θ/σ_0 の値も大きくなるのがわかる。

図-4は、トンネル内側の側壁部 ($r=a, \theta=90^\circ$) において覆工 (せん断弾性係数 16GPa) の圧縮破壊 (圧縮強度 20MPa) を起こす入射平面波の変位の最小値 u_i と入射周波数 f の関係を示している。例えば、入射波の周波数が 100Hz の場合、およそ 1.6mm の入射変位で覆工の圧縮破壊が起きることがわかる。この入射波動は 100cm/s に相当するが、兵庫県南部地震時には速度 58cm/s が計測されていること、実際のトンネルでは、重力などにより静的な応力、変位を既に受けているため、図-4で与えられる値より小さな入射応力、入射変位 (動的影響) により破壊がおきると考えられることから、非現実的な波動ではないといえる。なお、高周波の疎密波が入射した場合、トンネル下部で変位 (速度、加速度) は 2 倍に増幅するが、天井部では減衰することが示されている^{8),9)}。盤滝トンネルでは高周波数の入射波が路面で反射され変位 (速度、加速度) が増幅したため、路面が浮き上がり、天井部では高周波の入射波が既に減衰していたため被害が発生しなかったと考えられる。

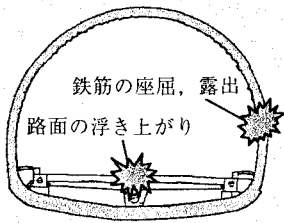


図-1 兵庫県南部地震による盤滝トンネルの被害

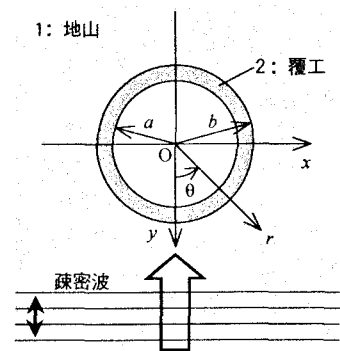


図-2 疎密波と円形トンネルの干渉の解析モデル

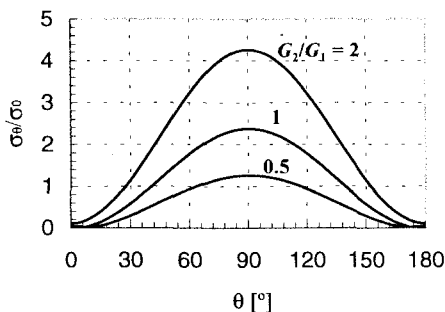


図-3 トンネル内周部における動的応力の最大値

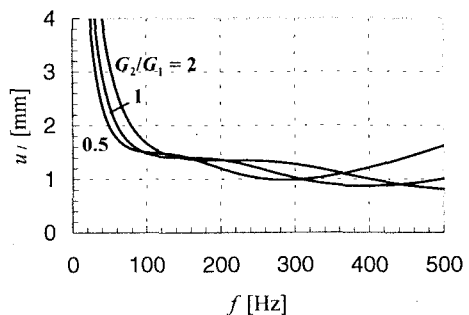
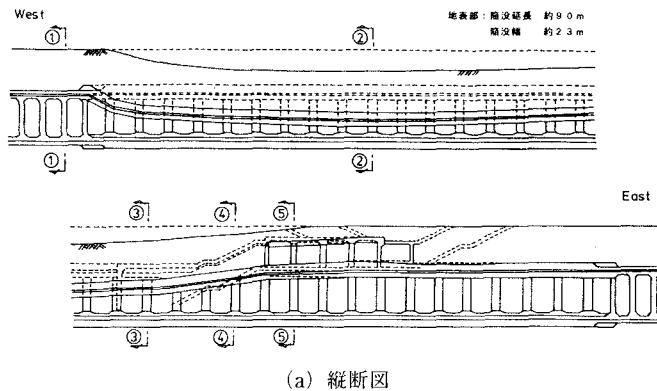


図-4 トンネル側壁部の圧縮破壊に必要な入射波の変位

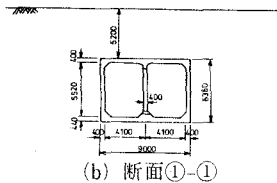
3. 函型トンネルの動的挙動

兵庫県南部地震においては、開削工法により建設された函型地中構造物に大きな被害が見られた。特に、神戸高速鉄道大開駅付近では 30 本の中柱が破損し、トンネル直上を走る国道 28 号線が長さ 90m にわたって陥没した^{11, 31, 161-171}。その被害状況を、トンネル縦断図 (図-5(a))、横断図 (図-5(b)-(f)) で示す。図-5(c)-(e)に見られる大開駅構内の圧壊は、中柱 (40×100cm, 中心間隔 3.5m) の損傷により始まったと考えられている¹¹。なお、大開駅東側および西側の線路部の中柱 (40×60cm, 中心間隔 2.5m) は、鉄筋が露出する程度の損傷を受けたものの被害は軽微であった (図-5(b)参照)¹¹。

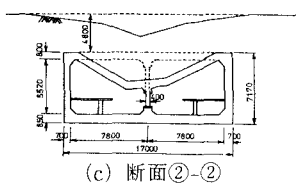
大開駅構内などにおける中柱破壊の発生原因として、水平動のみによるせん断破壊、曲げ破壊およびそれらの組み合わせ、軸方向の衝撃力による座屈などが挙げられている¹⁶¹⁻¹⁷¹。しかし、一般に地中構造物は周囲の地盤、岩盤と同じ挙動をとるため、地上構造物で見られるような大きな水平振動を起こすことは難しいと考えられること¹¹、また、大きな上下動および上下動による構造物の破損が報告されていること^{161, 171}から、中柱の破壊については、上下動が深く関わりを持つと推定されている¹¹。また、土被りの非常に薄い駅コンコース部 (図-5(f)) や神戸三宮の地下街では被害が軽微であった¹¹ことから、土被り厚、言い換えれば中柱に作用する静荷重が中柱の破壊において重要な役割を果たしたと考えられる。そこで、上下動、土被り厚 (中柱に作用する静荷重) に注目し、大開駅付近において被害が特定断面形状、土被り厚のトンネル (図-5(c)-(e)) に集中した原因について、図-6 に示す簡単な波動モデルを用いて考察する。なお、ここでは研究の第一段階として中柱の定常的な応答を考察する。中柱は断面積 A 、高さ h 、密度 ρ 、縦弾性係数 E で、常に荷重 M を支持しているものとし、この中柱に変位振幅 u_0 、波長 λ の調和波が入射すると仮定する。このとき、音速を c_b とすれば、変位 u に関する波動方程式 $\partial^2 u / \partial t^2 = c_b^2 \partial^2 u / \partial x^2$ を満たす一般解は、



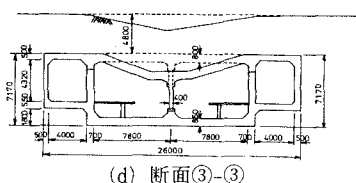
(a) 縦断図



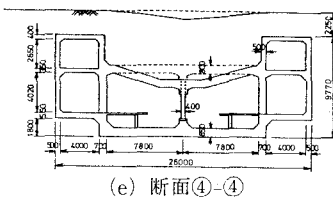
(b) 断面①-①



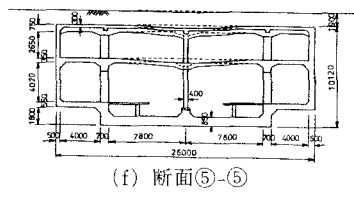
(c) 断面②-②



(d) 断面③-③



(e) 断面④-④



(f) 断面⑤-⑤

図-5 兵庫県南部地震による神戸高速鉄道大開駅の被害状況¹¹。(a) 大開駅縦断図、(b)-(f) 横断図 (単位 mm)。

$$u = ae^{2\pi i(c_b t + x)/\lambda} + be^{2\pi i(c_b t - x)/\lambda} \quad (1)$$

と書き表される。ここで、 a, b は境界条件により決まる定数である。応力の符号について引張を正、圧縮を負とし、応力 σ とひずみ $\partial u/\partial x$ の関係 $\sigma = E \partial u/\partial x$ を考慮に入れば、境界条件は、

$$x=0 \text{ において: } u = u_0 e^{2\pi i c_b t/\lambda}, \quad x=h \text{ において: } M \partial^2 u/\partial t^2 + AE \partial u/\partial x = 0 \quad (2)$$

となる。式(1)を式(2)に代入し、境界条件が時間によらず常に成立することを考慮すれば、

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ (-M\omega^2 + 2\pi i AE/\lambda)e^{2\pi i h/\lambda} & -(M\omega^2 + 2\pi i AE/\lambda)e^{-2\pi i h/\lambda} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} a \\ b \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} u_0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

が得られる。ここで、 $\omega (= 2\pi c_b/\lambda)$ は角振動数である。この連立方程式を解けば、定数 a, b が求まる。ただし、式(3)左辺の行列が逆行列を持たない場合、すなわち、

$$2\pi M \sin(2\pi h/\lambda) - A\rho\lambda \cos(2\pi h/\lambda) = 0 \quad (4)$$

が成り立つとき、解は得られない。物理的には、このとき中柱が共振を起こすことを意味する。式(4)より、共振に関するパラメータは、支持荷重 M 、中柱の断面積 A 、高さ h 、密度 ρ 、および入射波長 λ であることがわかる。大開駅中柱の実際の形状を参考にし、断面積 $A: 0.4 \times 1.0 \text{ m}^2$ (駅構内) / $0.4 \times 0.6 \text{ m}^2$ (駅間部)、高さ $h: 5.5 \text{ m}$ 、密度 $\rho: 2200 \text{ kg/m}^3$ 、波の速度 $c_b: 4100 \text{ m/s}$ として、中柱の共振を起こす入射周波数と支持荷重の組み合わせを求めた結果を図-7 に示す。図-7 より、トンネル周囲の地盤密度を 1800 kg/m^3 、中柱間隔を駅構内で 3.5 m 、駅間部で 2.5 m 、入射周波数を約 17 Hz とした場合、大開駅構内では $M = 235 \text{ ton}$ 、駅間部では $M = 140 \text{ ton}$ 程度の支持荷重のときのみ、すなわち、ラーメン構造の断面②-② ($M = 225 \text{ ton}$)、③-③、④-④ (ともに $M = 240 \text{ ton}$) および類似断面においてのみ中柱が共振、あるいはそれに近い状態になることがわかる。兵庫県南部地震のような内陸直下型地震においては、震源から構造物までの距離が近いため地震波に高周波成分が入りやすいと考え、大開駅付近において 17 Hz 程度の地震波が卓越していたとすれば、断面②-②、③-③、④-④の形状の断面においては被害が甚大であったのに対し、断面①-①や⑤-⑤およびそれらに類似した断面では被害が軽微であったことを説明することができる。

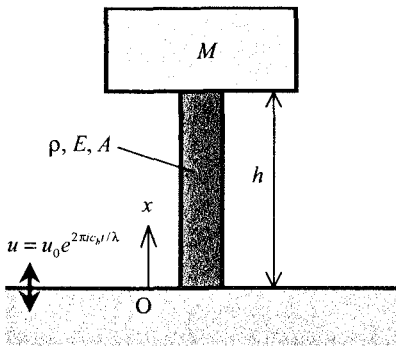


図-6 トンネル中柱の周波数応答解析モデル。

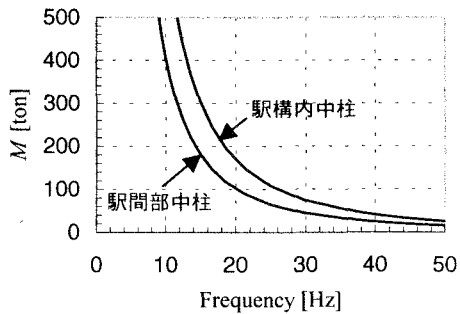


図-7 大開駅付近中柱の共振を起こす入射周波数と中柱支持荷重の関係。

4. まとめ

本研究では、上下動を受ける山岳トンネルならびに函型トンネルの力学的挙動について考察を行った。その結果、高周波の疎密波が山岳トンネルと干渉する場合、動的応力集中によりトンネル内壁側部が損傷する可能性が

あることがわかった。また、覆工に対して地山が軟弱である場合、すなわち地山剛性の比較的小さい断層破碎帯などにおいて、動的応力集中の度合いが高まることが示された。

また、簡単なモデル解析により、函型トンネルの中柱が特定の周波数の上下動により共振を起こすこと、同一寸法、材質の中柱でも支える重量（土被り厚）の大小により共振を起こす波の周波数が異なること、また、兵庫県南部地震によって被害を受けた神戸高速鉄道大開駅の被害状況から逆にその入力波動を推定し、地中構造物が地震動に対する一つのセンサーとしても機能することを示した。道路や鉄道高架橋の橋脚の波動による損傷はトンネル中柱の波動による破損と類似していることが知られているので、これらの損傷についても本モデルを応用して、定常的な応答のみならず、衝撃応答も含めて、考察を進めていくことが可能である。

5. 参考文献

- 1) 高田至郎, 森川英典 (編): 兵庫県南部地震緊急被害調査報告, 神戸大学工学部地震情報センター, 1995.
- 2) 小山幸則, 朝倉俊弘, 佐藤豊: 兵庫県南部地震による山岳トンネルの被害と復旧, トンネルと地下, Vol.27, No.3, pp.51-61, 1996.
- 3) Earthquake Engineering Research Center (ed.): *Geotechnical Reconnaissance of the Effects of the January 17, 1995, Hyogoken-Nanbu Earthquake, Japan*, Report No. UCB/EERC-95/01, Earthquake Engineering Research Center, University of California at Berkeley, 1995.
- 4) Pao, Y.H.: Dynamical stress concentration in an elastic plate, *J. Appl. Mech.*, Vol.29, pp.299-305, 1962.
- 5) 梶太郎: 地中構造物の振動特性に関する基礎的研究—円形トンネルの動的挙動—, 神戸大学大学院工学研究科修士論文, 1973.
- 6) Balendra, T., Thambiratnam, D.P., Koh, C.G., and Lee, S.L.: Dynamic response of twin circular tunnels due to incident SH-waves, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.12, pp.181-201, 1984.
- 7) Moore, I.D., and Guan, F.: Three-dimensional dynamic response of lined tunnels due to incident seismic waves. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.25, pp.357-369, 1996.
- 8) 溝口俊介: 平面波を受ける地中構造物の力学的特性に関する理論的研究—兵庫県南部地震時における整道トンネルの動的挙動—, 卒業論文, 神戸大学工学部建設学科, 1999.
- 9) 上西幸司, 溝口俊介, 櫻井春輔: 地震波による山岳トンネル被害発生の機構に関する理論的考察, 建設工学研究所論文報告集第41-B号, pp123-132, 1999.11.
- 10) Hassani, N.: *A Study on Development of Distinct Element Algorithm for Fracture Analysis and Failure Monitoring of Structural Media under Dynamic Loads*, Ph.D. Thesis, Kobe University, Kobe, 1997.
- 11) EQE International: *The January 17, 1995 Kobe Earthquake*, EQE International, San Francisco, 1995.
- 12) 飯田廣臣, 山原陽一, 横山正樹: 大開駅の震災と復旧, トンネルと地下, Vol.27, No.1, pp.7-18, 1996.1.
- 13) 佐俣千載: 兵庫県南部地震での地下鉄構造物の被害と復旧, 土木学会論文集, No.534/V1-30, pp.1-17, 1996.3.
- 14) 中村晋: 層間変形に基づく地中構造物の耐震設計法に関する提案, 土木学会論文集, No.605/I-45, pp.217-230, 1998.
- 15) 松田隆, 大内一, 佐俣千載: 中柱を有する埋設函体構造物の地震時損傷メカニズムに関する解析的研究, 土木学会論文集, No.563/I-39, pp.125-136, 1997.4.
- 16) 園田恵一郎, 小林治俊, 中島大使: 地震による土木構造物の衝撃的破壊について, 兵庫県南部地震における構造物の衝撃的破壊に関するシンポジウム講演集, pp.37-44, 1997.3.
- 17) K. Sonoda and H. Kobayashi: On the impact-like failure of reinforced concrete structures by Hyogo-ken Nanbu Earthquake (Kobe, 1995), *Proceedings of First International Conference on Earthquake Resistant Engineering Structures*, pp.693-704, Computational Mechanics Publication, Southampton, 1996.