

1. はじめに

内陸直下型地震は震源から構造物までの距離が近いこと、地震波動に高周波成分が入り、構造物が従来の解析では予想されなかった力学的挙動を示す可能性がある。また、地震によって被害を受けた構造物の破壊現象から逆にその入力波動を推定することが可能であると考えられる。本論文では、兵庫県南部地震による西宮市盤竜トンネルの被害状況を通して、内陸直下型地震の波動特性ならびに地中構造物の力学特性について波動理論を用いて考察を行う。

2. 盤竜トンネルの被害状況

本研究の対象である西宮北有料道路の盤竜トンネルは、NATM により兵庫県南部地震の約 4 年前に完成した全長 1766m の山岳トンネルである。1995 年の震災時には、トンネル中央部付近の断層破砕帯で側壁部鉄筋コンクリート 2 次覆工のコンクリートが一部剥離し、鉄筋が露出した。また、高さ 10cm 程度の路面の盛り上がりが生じたが、インバートに変状は見られなかった。この被害については、従来のせん断力を中心とした振動解析では未だ十分に説明がなされていない。¹⁾ そこで本研究では、地震時に伝わる疎密波の影響を考慮に入れ、トンネル破損の発生機構について理論的に考察する。

3. 解析モデルおよび解析結果

本研究で用いる二次元モデルを図-1 に示す。無限に広がる線形弾性体（地山）中の、円形断面、覆工厚一定のトンネル下方より調和疎密平面波が入射すると仮定すれば、地山、覆工内の応力、変位分布は、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計算することができる。²⁻⁴⁾ 以下、解析結果について考察する。なお、解析に用いた物性値を表-1 に示す。⁴⁾

トンネル内周部 ($r = a$) における周 (θ) 方向の垂直応力と入射応力の比 (σ_θ/σ_0) の分布を図-2 に示す。パラメータには覆工と地山の剛性比 G_2/G_1 をとり、(a) では入射波の周波数 $f = 3\text{Hz}$ 、(b) では周波数 $f = 100\text{Hz}$ の場合を示している。図-2 より、剛性比 G_2/G_1 が大きくなれば σ_θ/σ_0 の値が大きくなることがわかる。また (a)、(b) ともに $G_2/G_1 = 2$ の場合、動的応力集中は静的応力集中の最大値 ($\sigma_\theta/\sigma_0 = 3$) より大きくなることを示している。盤竜トンネルにおいては、この動的応力集中により座屈が生じたと考えられる。図-3 は、トンネル内周部における半径 (r) 方向変位と入射変位の比 (u_r/u_0) の分布を示している。周波数 $f = 3\text{Hz}$ では $\theta = 90^\circ$ を軸にほぼ左右対称で、変位の増幅はみられない。つまり、入射波長がトンネル半径に比べ十分に長いので波は減衰されずに伝播すると考えられる。これに対し、 $f = 100\text{Hz}$ ではトンネル下部 ($\theta = 0^\circ$) で $u_r/u_0 = 2$ という大きな値を、また、トンネル上部 ($\theta = 180^\circ$) では $u_r/u_0 = 0.7$ という比較的小さな値を示している。変位比は速度比、加速度比に等しいので、盤竜トンネルにおいては、高周波数の入射波が路面で反射され変位（速度、加速度）が増幅されたため、路面が浮き上がり、トンネル天井部では高周波の入射波がすで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。

トンネル側壁部 ($r = a, \theta = 90^\circ$) において覆工の圧縮破壊を起こす入射平面波の応力の最小値 σ_t と入射周波数 f の関係を、剛性比 G_2/G_1 をパラメータとして図-4 に示す。図より、一般的な地震波の周波数領域では、剛性比が大きいほど、すなわち覆工に対して地山が軟弱であるほど、より小さな入射応力で覆工破壊が起きることがわかる。これは、盤竜トンネルの被害が剛性の小さい断層破砕帯においてのみ見られたことを説明すると考えられる。図-5 は、トンネル側壁部 ($r = a, \theta = 90^\circ$) において覆工の圧縮破壊を起こす入射平面波の変位の最小値 u_t と入射周波数 f の関係を示している。入射波の周波数が 100Hz の場合、およそ 4mm の入射変位で覆工の圧縮破壊が起きることがわかる。

4. まとめ

本研究では、兵庫県南部地震による盤竜トンネル被害の発生機構を解明するため、二次元弾性体モデルを用いて波動解析を行った。その結果、トンネル側壁においては動的応力集中により座屈が生じたこと、高周波数の入射波の路面での反射により路面が浮き上がったこと、トンネルによる高周波の散乱のため天井部に被害が生じなかったことが示された。また、トンネル覆工内周部においては、覆工に対して地山が軟弱である場合、すなわち剛性の小さい断層破砕帯などにおいて、動的応力集中の度合いが高まることが示された。今後の研究としては、疎密波のトンネルに対する入射角度の影響を、実際のトンネル形状を考慮に入れて考察することなどが挙げられる。

参考文献

- 1) 高田至郎、森川英典：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) 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－，修士論文，神戸大学大学院工学研究科土木工学専攻，1973.3。
- 3) 葛西俊一郎：波動を受けるトンネルの力学的挙動に関する理論的研究，修士論文，神戸大学大学院工学研究科土木工学専攻，1974.3。
- 4) 溝口俊介：平面波を受ける地中構造物の力学特性に関する理論的研究－兵庫県南部地震時における盤竜トンネルの動的挙動－，卒業論文，神戸大学工学部建設学科，1999.3。

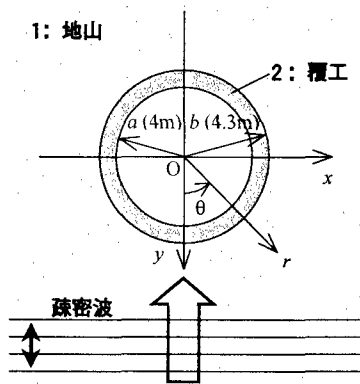
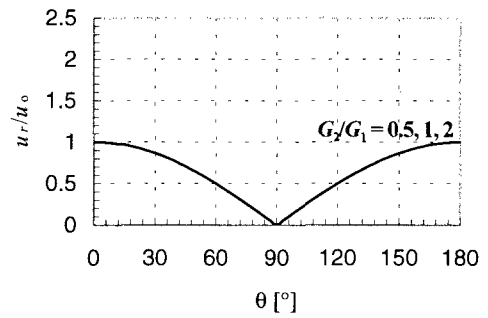


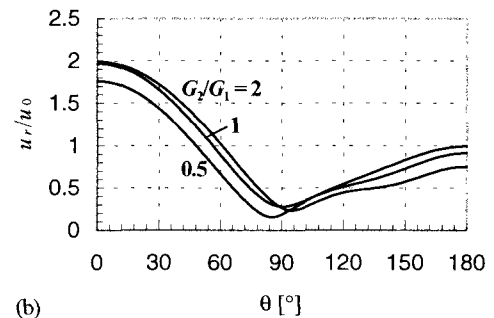
図-1 解析モデル

表-1 解析で用いた物性値

	1: 地山	2: 覆工
密度 [kg/m ³]	2200	2200
ポアソン比	0.25	0.15
せん断弾性定数 [GPa]	8, 16, 32	16
圧縮強度 [MPa]	—	52



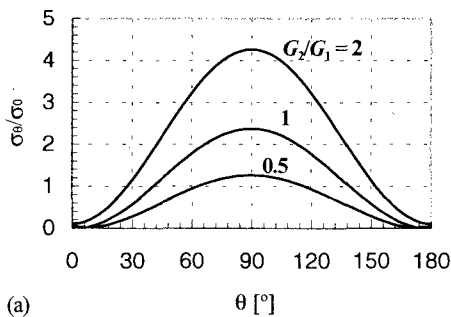
(a)



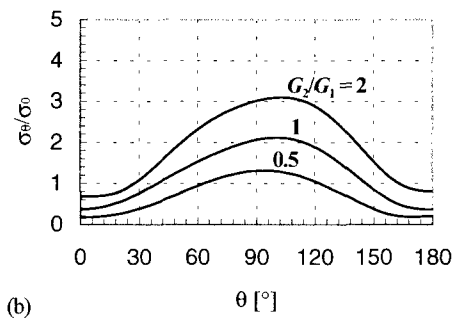
(b)

図-3 トンネル内周部における動の変位.

(a) 入射波周波数 $f=3\text{Hz}$, (b) $f=100\text{Hz}$



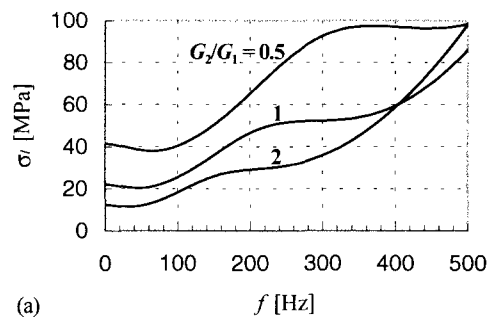
(a)



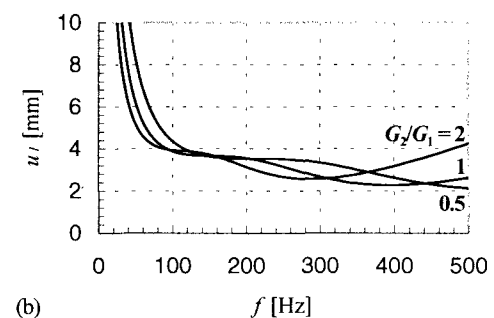
(b)

図-2 トンネル内周部における動的応力.

(a) 入射波周波数 $f=3\text{Hz}$, (b) $f=100\text{Hz}$.



(a)



(b)

図-4 トンネル側壁部 ($r=a, \theta=90^\circ$) の圧縮破壊に必要な入射波の (a) 応力, (b) 変位.