

神戸大学工学部 正会員 上西 幸司
 (株) 竹中土木 後藤 尚
 神戸大学大学院 学生員 ○溝口 俊介

1. はじめに

震源から構造物までの距離が近い内陸直下型地震においては、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。特にトンネルなどの地中構造物は周辺地盤とともに挙動するため、構造物は動的擾乱に対する一つのセンサーとしても機能すると考えられる。その一例と考えられる現象が兵庫県南部地震の際西宮北有料道路の盤滝トンネルにおいて見られた¹⁾。本論文では、平面波を受ける覆工厚一定のトンネルの動的挙動に対して土被り厚が与える影響を中心として考察を行う。

2. 解析モデルおよび解析結果¹⁾⁻³⁾

本研究で用いる二次元モデルを図-1に示す。線形弾性体（地山）中の、円形断面、覆工厚一定のトンネル近傍に位置する自由表面に対して入射角 δ で調和疎密平面波が入射する場合、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。以下、解析結果について考察する。

まず、素掘りトンネルに対する土被り厚の影響について検討を行う。地山の密度は 2200kg/m^3 、ポアソン比は 0.25 、せん断弾性係数は 16GPa とした。トンネル表面 ($r = a$) における周 (θ) 方向の最大垂直応力と入射応力振幅の比 (σ_θ/σ_0)、およびトンネル表面における半径 (r) 方向最大変位と入射変位振幅の比 (u_r/u_0) の分布を図-2に示す。パラメータには土被り厚に対応する H とトンネル半径 a の比 H/a をとり、入射波の周波数 f は (a) 3Hz 、(b) 100Hz である。図-2(a)より、低周波数では H/a が小さいほど、つまり、土被りが浅いほど、自由表面で反射された疎密波が入射波と打ち消し合うため、 σ_θ/σ_0 の値が小さくなることがわかる。図-2(b)は高周波が入射する場合の半径方向変位の分布を表しているが、土被り厚に関わらず、 $\theta = 180^\circ$ 付近、つまりトンネル底部において変位（および速度、加速度）が約 2 倍に増大されることがわかる。すなわち、大きく加速された路面が浮き上がる可能性がある。これに対し、 $\theta = 0^\circ$ 付近、すなわちトンネル天井部では、土被り厚により波の散乱の程度が異なっている。図-3は疎密波の入射角 δ をパラメータとし、入射波の周波数 $f = 3\text{Hz}$ 、 $H/a = 2$ の場合について示している。図-3(a)より、疎密波の入射角度が 45° の場合、入射波と反射波が打ち消し合いにくいため、周方向応力が最も大きく増幅されることがわかる。図-3(b)は半径方向変位を示しているが、 $\delta = 0^\circ$ の時、トンネル底部、天井部で最も大きい値を示すことがわかる。

次に自由表面が覆工厚一定のトンネルの動的挙動に与える影響について考察する。解析に用いた物性値を表-1に示す。トンネル内周部 ($r = a$) における周方向無次元最大応力 σ_θ/σ_0 、半径方向無次元変位 u_r/u_0 の分布を入射波の周波数 $f = 100\text{Hz}$ の場合について図-4に示す。パラメータには覆工と地山の剛性比 G_2/G_1 をとる。図-4(a)より、剛性比 G_2/G_1 の値が大きいほど、すなわち覆工に対して地山が軟弱であるほど、より応力が増大することがわかる。特に G_2/G_1 が大きな値をとる場合、スプリングライン ($\theta = 90^\circ, 270^\circ$) 付近で σ_θ は 4 倍以上に増幅され、盤滝トンネルで見られたような覆工の圧壊¹⁾がおきる可能性が高くなることが示されている。半径方向変位（図-4(b)）については、剛性比 G_2/G_1 による相違はほとんど見られない。しかし、トンネル底部において変位が約 2 倍に増大している。

3. まとめ

本研究では自由表面に近い覆工厚一定のトンネルの動的挙動につき二次元弾性モデルを用いて波動解析を行った。その結果、低周波数の疎密波が自由表面に対して垂直に入射する場合、土被りが深いほどトンネル接線方向の応力が増幅されること、低周波が自由表面に対して約 45° の角度で入射する場合、トンネル接線方向の応力が最も大きくなること、高周波が入射する場合、土被り厚によりトンネル天井部での波の散乱の程度が異なること、覆工に対して地山が軟弱である場合に動的応力集中の度合いが高まることが示された。今後、実際のトンネル形状を考慮に入れ、さらに衝撃的、過渡的な応答をも含めた研究を進めていく必要がある。

参考文献

- 1) 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、pp.123-132、1999.11.
- 2) 後藤尚：土被りの浅いトンネルの動的挙動に関する理論的解析、卒業論文、神戸大学工学部建設学科、2000.3.
- 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.

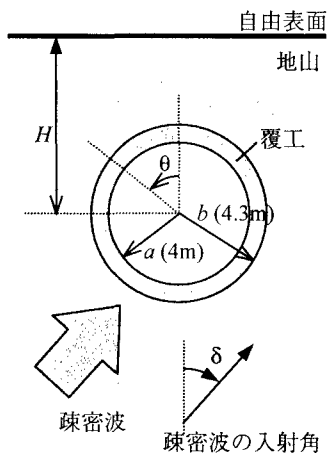
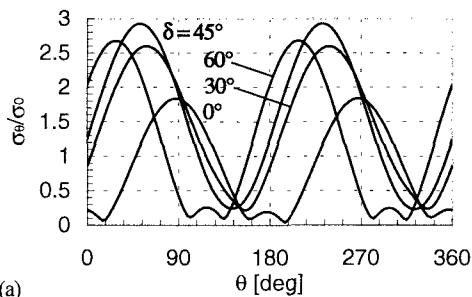


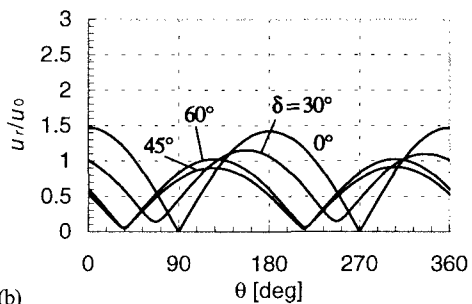
図-1 解析モデル

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

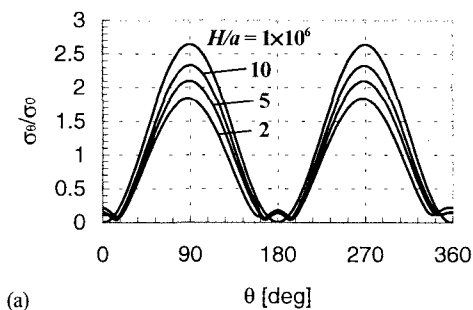


(a)

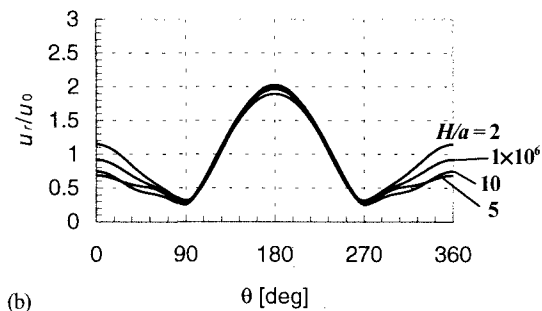


(b)

図-3 入射角度の影響 ($f=3\text{Hz}$, $H/a=2$). 素掘りトンネル表面における (a) 最大応力 σ_θ および (b) 最大変位 u_r .

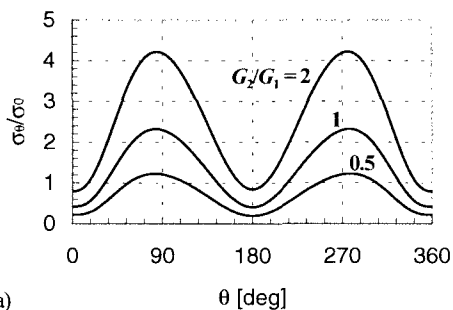


(a)

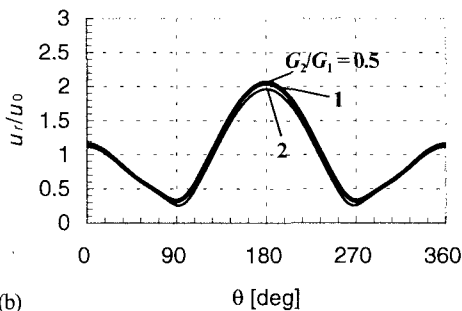


(b)

図-2 土被り厚がトンネルの動的応力、変位に及ぼす影響。素掘りトンネル表面における (a) 接線方向最大応力 (入射周波数 $f=3\text{Hz}$) および (b) 半径方向最大変位 ($f=100\text{Hz}$)。



(a)



(b)

図-4 剛性比の影響 ($f=100\text{Hz}$, $H/a=2$). トンネル覆工内周部における (a) 接線方向最大応力および (b) 半径方向最大変位。