

(125) 人工地震観測に見られるシールドトンネルの挙動

鹿島建設技術研究所 正員 大保 直人
 同上 正員 永井 文男
 同上 正員 林 和生

1. はじめに

シールドトンネルの耐震性について各研究機関で自然地震観測、室内実験、解析等によって検討されている。本文では、震源の規模、振動振幅の大きさ及び波動の伝播方向等自然地震と異なる点もあるが、震源の情報が明確な人工地震波を用いて実体波及び表面波がシールドトンネルに与える影響と、人工地震と同程度の大きさの震動に対するトンネル内の各地点の振動特性を常時微動で推定できるかどうかを検討した。

2. 人工地震観測の概要

東京都防災会議の主催で、1986年11月9日午前2時2分に、夢の島・地下100mでダイナマイト500kgを用いた人工地震発破が実施され、これが発生した人工地震波を、営団地下鉄8号線東雲A線工区のシールドトンネル内と地表で多点同時観測した。図1に、夢の島及び当トンネルの位置関係を示す。また、図2にシールドトンネルの縦断方向の地質断面及び地震計の配置を示す。

シールドトンネル内に約300m間隔に4点(T1~T4)さらにトンネル(T1、T4)のほぼ真上の地表の2点(G1、G2)の各観測地点に固有周期2秒の速度型地震計を3成分(トンネル軸(X軸)、軸直角(Y軸)及び上下動方向(Z軸))に設置し、速度振幅波形の同時観測を行った。併せて、常時微動観測を行い各観測地点の地盤特性を把握した。

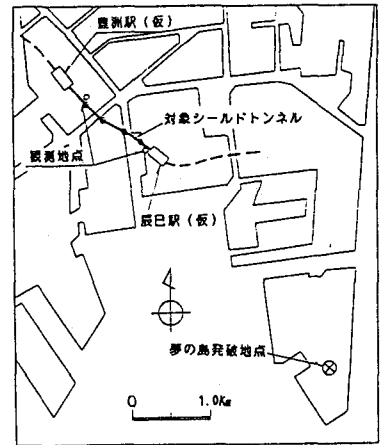


図1 トンネルと発破地点の位置

3. 人工地震波によるシールドトンネルの経時的振動特性

人工地震波の波動伝播方向であるトンネル軸方向の観測記録を

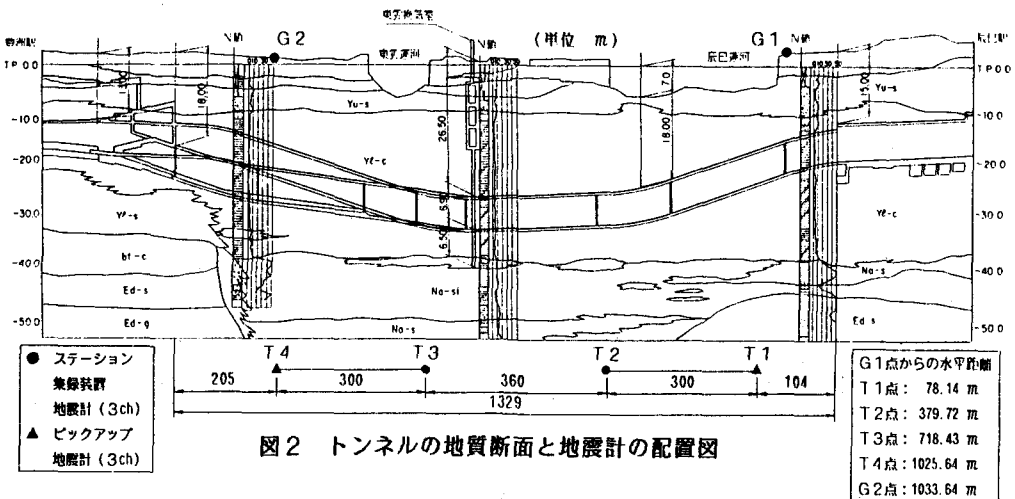


図2 トンネルの地質断面と地震計の配置図

中心に考察を行う。地表のG1、G2地点で観測された速度波形を図3に示す。トンネル内のT1地点で観測された速度波形及び加速度・変位波形を図4に示す。なお、発破時刻を時間軸上の原点として示している。地表（G1～G2地点）での人工地震波の伝播速度を求めるために、図3 (a)～(b)の顕著な位相①～⑦の走時曲線を実線で図5に示す。但し、横軸はG1地点を基準にした水平距離であり、縦軸はG1地点からの走時である。

図3、5より、地表（G1～G2地点）では、初動は中間層 ($V_s \approx 1.5 \text{ km/sec}$)のP波速度(①)に対応しており、初動の後に基盤層 ($V_s \approx 3.0 \text{ km/sec}$)のP波速度(②)及び表層 ($V_s \approx 0.7 \text{ km/sec}$)のP波速度(③)に相当する波動が到達していることが認められる。P波到達後に、中間層のS波速度(④)及び表層のS波速度(⑤)に対応する波動が到達していることが認められる。

これらの位相①～⑤は、夢の島爆破実験において走時曲線より推定した東京の地盤のP波・S波の速度構造¹⁾に良く対応している。

位相⑥、⑦の区間の波動は、直接S波(⑤)以降に到達し約30秒間継続しており、振動数が1.0Hz(位相速度800m/s)から1.5Hz(位相速度200m/s)と分散の性状がみられる。この区間の性状は図2に示す地盤構造から得られるレイリー波の理論分散曲線に対応しておりレイリー波と推定される。

トンネル内(T1～T4地点)において、地表の走時曲線と比較するために、位相①～⑦(図4(b))に対応するT1地点からの走時を破線で図5に示す。この走時曲線より、位相①～⑦に関して地表(G1～G2地点)とトンネル(T1～T4地点)の走時速度はほぼ同じであり、トンネル内は地表とほぼ同時に位相①～⑦それぞれに対応する波動が到達していることが分る。

T1地点のトンネル軸方向の速度波形(図4(b))に対するランニングフーリエスペクトルを図6に示す。この図より、位相①、④及び⑥付近で振動性状が変化しており、P波(①～③)、S波(④、⑤)及びレイリー波(⑥、⑦)は振動性状からも区別できる。

4. 人工地震波によって生じるトンネルのひずみについて

トンネル軸、軸直角及び上下動方向の、T1地点とT2地点の各

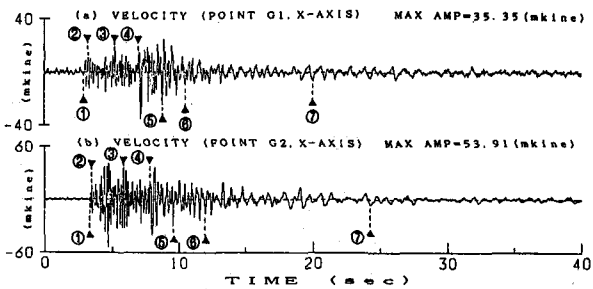


図3 G1・G2地点の速度波形(軸方向)

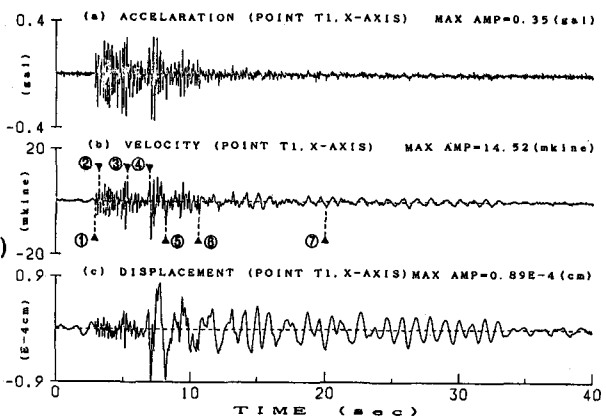


図4 T1地点の加速度・速度・変位波形(軸方向)

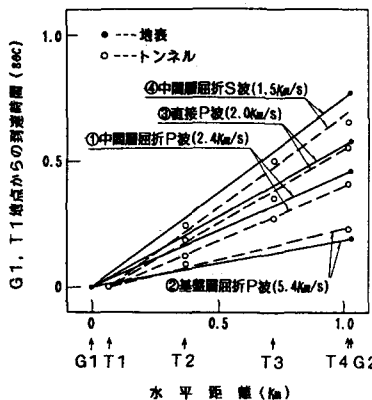


図5(a) 走時曲線

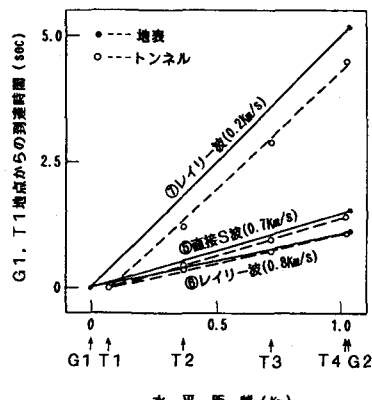


図5(b) 走時曲線

時刻における変位振幅の差をT1・T2地点間の距離で割って求めたひずみ波形をそれぞれ図7、8及び9に示す。併せて、ひずみ波形に速度波形(図4(b))の位相①、④及び⑥に対応する位置を示す。

これらのひずみ波形において、速度波形のP波、S波及びレイリー波それぞれの区間で発生するひずみ波形の振動性状は他のそれと異なり、それぞれの波動タイプとひずみ発生に関係が認められる。

トンネル軸方向(図7)において、最大ひずみはS波によって生じているが、レイリー波によって生じたひずみは余り減衰しないで約30秒間継続し、S波同様トンネルに強い影響を与えていると考えられる。トンネル軸直角方向(図8)では、レイリー波によって生じたひずみが支配的である。

上下動方向の速度波形(図9(a))では、P波が卓越しており¹⁾、S波は確認できなかった。この成分のひずみ波形(図9(b))では、レイリー波によって生ずるひずみがP波によって生じるひずみに比べて支配的である。また、上下動方向の最大ひずみはトンネル軸・軸直角方向のその約2倍であった。

5. 最大加速度振幅分布

図10に人工地震時の各観測地点の最大加速度振幅分布を示す。最大加速度振幅の大きさは、G1地点を除くと、上下動、軸、軸直角方向の順に小さくなっている。

G2地点での最大加速度振幅は4.3galであったが、G2地点より発破地点に近いG1地点のそれは1.2galであり、これはG1地点とG2地点との地盤特性の違いによると考えられる。また、T1~T4地点(トンネル内)は約1km離れているが最大加速度振幅はほぼ同じ程度であった。G1/T1地点及びG2/T4地点との最大加速度振幅を比較すると、地表の振動レベルはトンネルに対して約3倍であった。

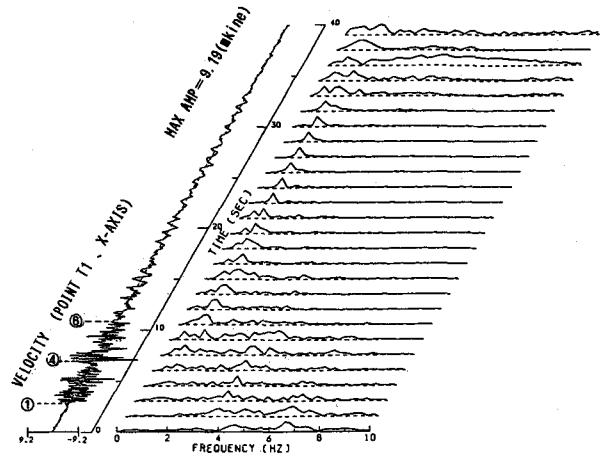


図6 ランニングフーリエスペクトル(軸方向)

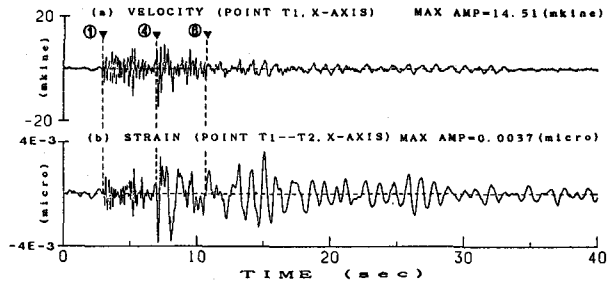


図7 T1~T2地点間のひずみ波形(軸方向)

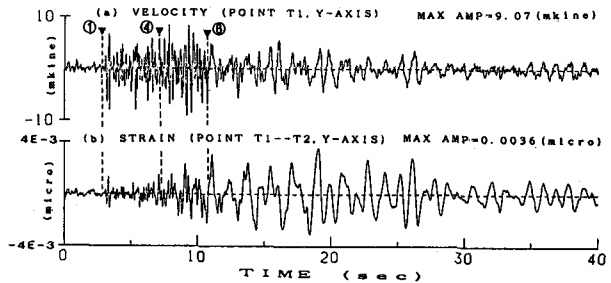


図8 T1~T2地点間のひずみ波形(軸直角方向)

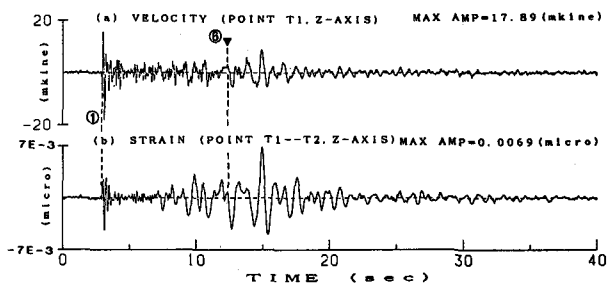


図9 T1~T2地点間のひずみ波形(上下動方向)

6. 常時微動と人工地震時における振動特性の比較

常時微動と人工地震時のトンネル軸方向における G1/T1、G2/T4及び T4/T1地点の伝達関数をそれぞれ図11 (a)~(c)に示す。

G1/T1地点及び G2/T4地点の伝達関数 (図11(a), (b))において、人工地震時にはトンネルに対する地表の伝達率は3~5程度であり、最大加速度振幅分布に適合する。また、常時微動の G1/T1地点及び G2/T4地点の伝達関数と人工地震のそれとは、各ピークに対応する振動数と振幅の大きさを比較すると、振動性状の傾向が良く似ており、常時微動により人工地震レベルの震動を受けた場合のトンネルと地表との伝達率を推定できる。

常時微動と人工地震の場合共に、G1/T1地点の伝達関数 (図11(a))では、周期0.5sec前後の成分が卓越しているが、G2/T4の伝達関数 (図11(b))では、周期0.5sec前後の成分よりも、周期0.1~0.2secの成分が卓越している。これは、G1~T1地点間及びG2~T4地点間の地盤との地盤特性の違いによると考えられ、人工地震時におけるトンネルより上層の地盤特性を常時微動により推定できる。

T4/T1地点の伝達関数 (図11(c))において、常時微動と人工地震の場合の各ピークに対応する振動数を比較すると、周期0.1~0.15secの成分を除いて振動性状の傾向が良く似ている。周期0.1~0.15secの成分については、常時微動と人工地震との振動源の違いと考えられる。したがって、トンネル内の各地点において、常時微動の伝達関数の各ピークに対応する振動数により、人工地震時の地盤特性をある程度推定できる。

7. まとめ

地表とトンネル内での人工地震及び常時微動の観測により以下のことがいえる。

a. ひずみ波形において、P波、S波及びレイリー波とひずみ発生の間に関係が認められ、それぞれの波動に対するひずみの大きさを比較すると、S波と同程度にレイリー波がトンネルに強く影響を与えていると考えられる。

b. トンネル軸方向に関して、常時微動の振動性状と人工地震波の震源情報を把握することにより、人工地震時におけるトンネル内の各地点の地盤特性を推定できる。

最後に、人工地震・常時微動の観測の遂行においてお世話になった東京大学生産研究所田村教授、帝都高速度交通営団及び首都圏基盤構造研究グループの皆様深く謝意を表す。

参考文献1)嶋悦三他：東京の基盤構造、第1回第2回夢の島爆破実験による地下深部探査、地震研究所集報 Vol. 51, pp.1-11

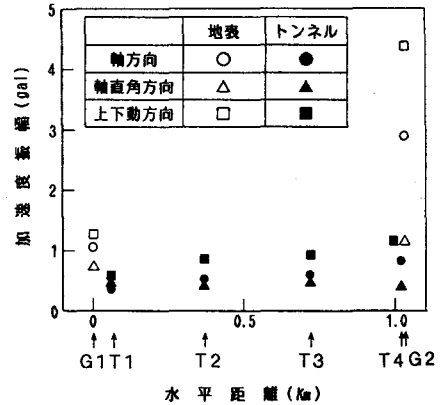


図10 最大加速度振幅分布

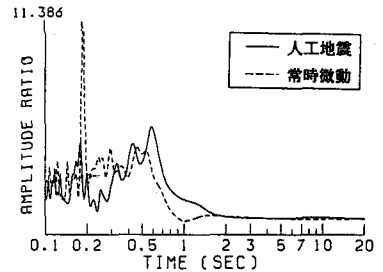


図11(a) G1/T1地点間の伝達関数(軸方向)

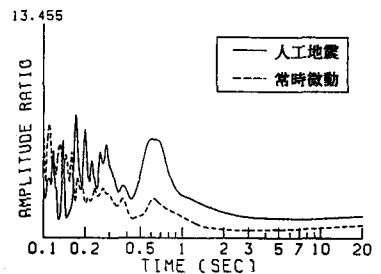


図11(b) G2/T4地点間の伝達関数(軸方向)

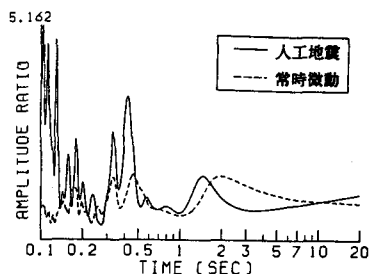


図11(c) T4/T1地点間の伝達関数(軸方向)