

扇島沈埋トンネルの地震時挙動

日本鋼管(株) 技術研究所 正員 平井康善
正員 大石 博

1. まえがき

沈埋トンネルは、支持力をあまり必要としないため、軟弱地盤に適した構正形式であるが、その地震時挙動に関しては、いまだ仮定の域を脱していない部分が多い。このように観点から、実際の沈埋トンネルにおける地震観測が、強く求められ、トンネルの地震時挙動把握のため、扇島沈埋トンネルで、地震観測を、1975年3月より実施した。今までは、横渡震度Ⅲ以上の地震を、7回観測し、いくつもの結論を得ている。

ここでは、地震観測から得られた結果と、観測結果に基づいた沈埋トンネルの設置管状構造物の地震応答解析法について概説する。

2. トンネルの概要と地震観測体制

扇島沈埋トンネルは、全長1540mで、このうち、運河部の664.3mを、沈埋工法で施工している。沈埋工法とは、3径間箱型断面の鋼鉄エレメントを基より打設し、その寸法は、幅21.6m×高さ6.7m×長さ110mである。トンネル断面および土質条件を、図-1に示す。なお、トンネルは、K.P.-21mに沈没してあり、その付近は、沖積層で、N値は、2~4にすぎない。

観測に用いている計器を、図-2に示す。トンネル内には、強震計6台のほか、ひずみ計(10本)、鉄筋計(2本)を取りつけた。一方、周辺地盤の動的挙動も併せて観測する必要から、水江・東扇島の地表面にも強震計を設置し、さらに、東扇島の地表部(GL+0m)と地中(GL-60m)にも、加速度計を設置した。なお、これらの計器に付帯するスロー・増幅器、記録器などの計器は、東扇島立坑内の計測室の中に設置されている。

3. トンネルの地震時挙動

現在までに、震度(横渡)Ⅲのものも、5回、Ⅳのものも、2回記録している。ここでは、1978年6月12日の宮城県沖地震の記録について述べ、今までに得られた主要観測結果について、記述する。

図-3は、4に、宮城県沖地震時の地盤・トンネルの軸方向・軸直方向の加速度記録を示す。記録の初期には、短周期の波形が優勢であるが、20秒以後は、1秒程度の周期の波形が卓越している。また、時間の経過に伴って、卓越する周期は、長くなり、大きくなる。地盤とトンネル内の加速度波形は、類似しているが、最大加速度は、両地盤で大きく、立坑では、地盤の7~8割程度の値を示し、トンネル中央部では、立坑の値より、若干大きい値を示している。

図-5は、地盤とトンネル内の加速度のパワー・スペクトル図を示す。両地盤(A、J)のスペクトル形状を比較すると、水江側(A)の卓越周期が、少し短い。大略的には、一致した形状を示している。また、地盤と立坑(A+B、J+I)のスペクトルを比較すると、高周波数領域において、立坑は、地盤の動きに追随していない様に見える。トンネル中央部(D)においては、地盤にみられる高周波数の波形が、みられなくなる。

図-6は、H点の東京側と横浜側のひずみ波形と、両者より分離した軸ひずみと曲ひずみの波形を示す。ひずみ波形は、図-3、4の加速度波形に比べ、減衰性は、小さい。また、加速度波形と同様、時間の経過に伴って、卓越している周期は、長くなり、大きくなる。図-6からも明らか同様、軸ひずみの最大値は、曲ひずみの最大値の約2.5倍を示している。他断面のひずみ波形に関しても、同様の傾向を示している。また、単位加速度あたりのひずみ値は、今までの記録した地震の中で、最も大きい。

図-7は、軸ひずみ波形と曲ひずみ波形のパワー・スペクトル図を示す。曲ひずみ波形のパワー・スペクトルは、1Hz周辺に卓越周波数を示し、軸ひずみの卓越周波数は、0.5~1.0Hzにみられる。曲ひずみの卓越周波数より、低い。図-8は、J点の加速度波形から数値的に求めた速度波形のパワー・スペクトル図を示す。この速度のパワー・

スペクトルは、図-7の軸ひびきのパワースペクトルとよく類似し、曲ひびきのパワースペクトルは、図-5の地盤加速度のパワースペクトルとよく類似している。このことは、ト=ネロ躯体に発生するひびきと、表面波の波動による、復替時に至っていることを示しているとも思われる。

今までの7回の地震波の解析より、次の様な結果を得た。

- (1)地震動の種類により、地盤は、方向性により振動性状に差異をあらわす。また、一般に、鉛直動は、水平動より小さいといわれているが、近距離地震の場合、水平動と同程度の最大値を示すことがある。
- (2)ト=ネロは、地盤と同じ様な振動をしていると思われ、短周期で振動する場合、ト=ネロ、特に立坑は、地盤の振動に、追随していることが認められる。
- (3)解析した地震の中で、一例(震源 東京湾北部)を除いて、軸ひびきのひびき、曲ひびきより大きな値を示している。また、軸ひびきのひびき、曲ひびきより長い周期の波形が卓越する。つまり、短周期の地震動については、曲ひびき、長周期の地震動については、軸ひびきが卓越するとも思われる。
- (4)ト=ネロに発生するひびきの大きさは、地震動の最大加速度だけでなく、地震動の持つ周期特性にも影響を受ける。一般に、長い周期波形を含んでいる地震動に対して、大きなひびきを示す。

4. 表面波を考慮した埋設管状構造物の地震応答解析法

現理ト=ネロ、パイプラインなどの埋設管状構造物の地震応答解析法は、いくつか提案されているが、一般に地震入力としては、地震基盤に位相の異なるSH波を用いるものが多い。

強震時に及ぶ波動伝播特性に関する実体的研究によると、強震時の波動伝播特性は、S波重複反射より成る Love 波、Rayleigh 波のような表面波によるものが多いことが指摘されている。また、上記観測においても、ト=ネロに至るひびきは、表面波の波動によるものが、優勢であることが認められている。

そこで、ここでは、表面波の影響を考慮した埋設管状構造物の地震応答解析法を、考察した上で、その手法について、概説する。

表面波を考慮した埋設管状構造物の地震応答解析法の手法は、次のようになり、

- (1) 構造物埋設以前の地盤について、表面波が進行した場合の構造物埋設予定地点の変位分布を求める。
- (2) (1)で求めた変位分布を、非弾性床土の梁のバネ部に強制入力し、構造物の応答を求める。

また、地盤の変位分布は、次の手順で求める。

- (1) 表面波としての地盤の変位分布を、定常振動問題として求める。
- (2) (1)で求めた定常状態の地盤変位を、フーリエ変換し、各層地盤変位応答を求める。

成層地盤の場合、文獻(2)に示す手法により解析を行う。円振動数を ω 、波数を k 、と、

$$\text{Love 波の変位関数} \quad u_y = U_y(\omega) \cdot \exp \{ i(\omega t - kx) \} \quad (1)$$

$$\text{Rayleigh 波の変位関数} \quad u_x = U_x(\omega) \cdot \exp \{ i(\omega t - kx) \} \quad (2)$$

$$u_z = U_z(\omega) \cdot \exp \{ i(\omega t - kx) \} \quad (3)$$

とすると、離散化した形の運動方程式は、

$$\text{Love 波に関して} \quad ([A]k^2 + [G] - \omega^2[M])\{\Phi\} = 0 \quad (4)$$

$$\text{Rayleigh 波に関して} \quad ([A]k^2 + i[B]k + [G] - \omega^2[M])\{\Phi\} = 0 \quad (5)$$

の様な形になり、複素固有値問題に帰着される。

(4),(5)式において、各周波数 ω に対して、固有ベクトル $\{\Phi_j(\omega)\}$ と、固有値 k_j が、決定されるから、 $x=0$ における定常振動変位は、

$$\{u(\omega)\} \cdot e^{i\omega t} = \sum_j A_j(\omega) \cdot \{\Phi_j(\omega)\} \exp \{-i k_j x\} \cdot e^{i\omega t} \quad (6)$$

の形で表すことができる。 $A_j(\omega)$ の決定法は、後述する。

つまり、円振動数 ω に対して、応答 $\{u(\omega)\}$ が求まるので、円振動数 ω に関して計算をくり返し、並フーリエ変換

要は、任意の地点の過渡応答変位を求め、以上により、構造物基礎地点の地盤変位時刻歴分布を得らる。ここで、得られた変位は $u_p \in$ 。

$$[K_p]\{u_p\} = [K_s](\{u_s\} - \{u_p\}) \quad (7)$$

(7)式に代入し、構造物の応答変位 $\{u_p\} \in$ を求め、 $E=1$, $[K_p]$: 埋設物の剛性行列, $[K_s]$: 土の剛性行列
 入り地震動時、次の様子取り扱へる。 $A_j(\omega) \in$ 決定する。現在、Love波、Rayleigh波の変位記録時、存在
 1対、既存の地震記録資料から、Love波、Rayleigh波成分を分離する = b 、 $U_j \in$ である。 ω
 $T=T=\tau$ は、既存の地震波を、 τ を代表成分を求めらる $a=1$ 、 T 、取扱う。

今、地震波の進行方向が既知であるとして、採掘方向に、 m 個の地震波記録を、存在する場合、次の様子で順次
 地震波を決定する。

ω の円振動数に m 個の地震波の n - 1成分 $\{U_1(\omega), \dots, U_{n-1}(\omega)\}^T$ と E 場合、(6)式の $\{A_j(\omega)\}^T$
 と $A_j(\omega)$ の間は、次の様子関係が成り立つ。

$$\begin{Bmatrix} U_1(\omega) \\ U_2(\omega) \\ \vdots \\ U_n(\omega) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} |A_1| & - & |A_n| \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} A_1(\omega) \\ A_2(\omega) \\ \vdots \\ A_n(\omega) \end{Bmatrix} \quad (8)$$

今、 $\{U_1(\omega), \dots, U_{n-1}(\omega)\}^T$ と $\{|A_1|, \dots, |A_n|\}$ とは、既知である T 、(8)式より、 $\{A_1(\omega), \dots, A_n(\omega)\}^T$
 を決定する。一般に、採掘方向に、 m 個の地震波が存在する = T 、 n 個の場合、考慮する
 地盤 n - 1点、1次元 n - 1点の場合、 n - 1次元の重要性 T 、 n - 1次元の
 のみ考慮 T 、工学的な精度が十分である T 、 n - 1次元の T 、 n - 1次元の考慮 T 、
 則ち地盤に n - 1点、同様の方法を適用する。

5. あとがき

今までは記録された地震は、 n - 1次元の規模であった、異なる性質を有している、地震波の特性により、地
 盤 n - 1次元 T 、異なる T 、 n - 1次元 T 、 n - 1次元 T 、 n - 1次元 T 、 n - 1次元 T 、 n - 1次元 T 、
 研究にも力を投入、詳細な地盤 n - 1次元 T 、 n - 1次元 T 、 n - 1次元 T 、 n - 1次元 T 、 n - 1次元 T 、
 施すに n - 1次元、御指導 御助言を賜、 T 、 n - 1次元 T 、 n - 1次元 T 、 n - 1次元 T 、 n - 1次元 T 、
 n - 1次元 T 、 n - 1次元 T 、 n - 1次元 T 、 n - 1次元 T 、 n - 1次元 T 、 n - 1次元 T 、 n - 1次元 T 、

- 【参考文献】 1) 神山貞；地震時における地盤内の応力 - 応変の評価 土木学会論文集 No. 250, 1976. 6
 2) J. Lyman; Lumped Mass Method for Rayleigh Waves, B. S. S. A., Vol. 60, No 1, 1970 11 pp 89 ~ 104

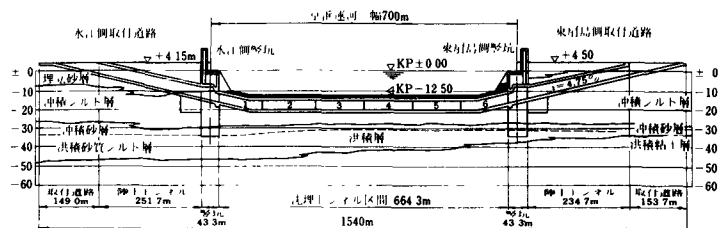


図-1 ト-文心断面図

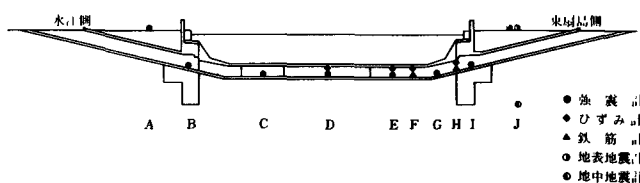


図-2 観測計器設置位置

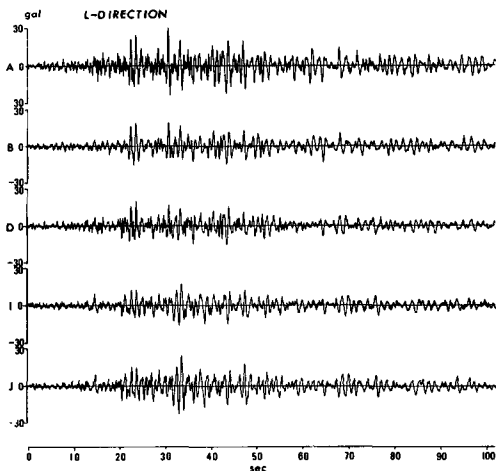


図-3 軸方向加速度波形

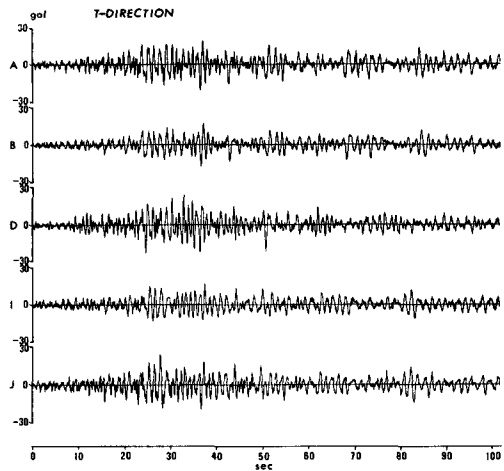


図-4 軸直角方向加速度波形

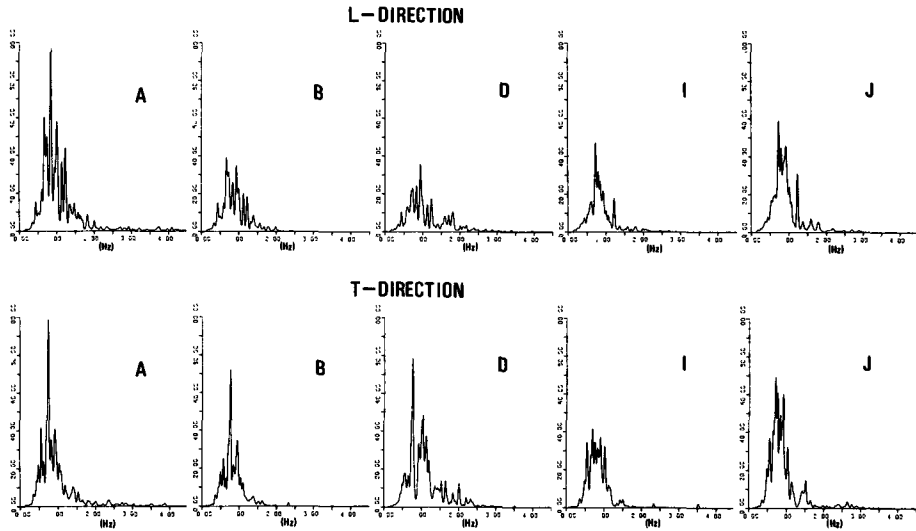


図-5 加速度波形パワースペクトル

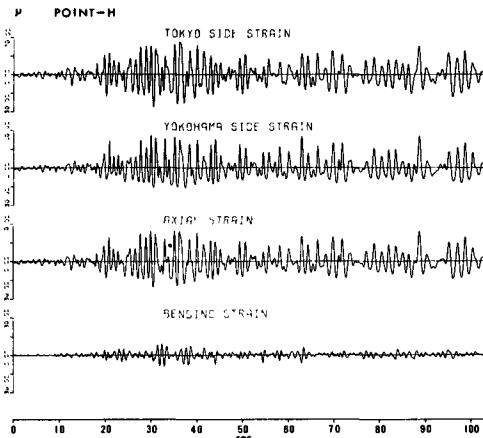


図-6 ひずみ波形 (H点)

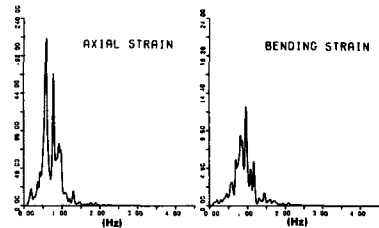


図-7 ひずみ波形パワースペクトル (H点)

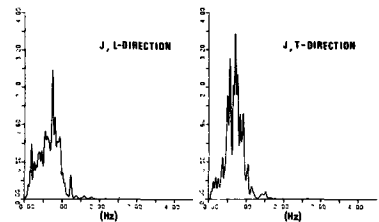


図-8 速度波形パワースペクトル