

(52) 表面波による沈埋トンネルの地震時挙動

大成建設(株) 石田 修 泉 博允
同上 志波由紀夫 田崎信一
首都高速道路公団 和田克哉

1. はじめに

著者らは、沈埋トンネルの合理的な耐震設計手法の確立を目的として、東京港海底トンネルにおいて、函体ひずみの測定を主とした地震観測を実施している。これまでに観測記録を分析・整理して、その地震時挙動特性について明らかにし、さらに数値シミュレーションを行うことにより、沈埋トンネルの地震応答解析手法について検討してきた。^{1), 2)} これまでの地震観測結果から、図-1に示すように、比較的浅い位置で発生した震央距離の遠い地震(図中●印 $H/\Delta \leq 0.5$)では、加速度が小さいにもかかわらず、函体には大きなひずみが発生する傾向にある。これは、地震動の後半部に比較的長周期の表面波と思われる波動が卓越し、軸ひずみが卓越した結果であり、実体波により生ずるひずみより大きい場合がある。即ち沈埋トンネル等の地中線状構造物の地震時の検討を行う場合には、実体波のみならず、表面波による検討も行う必要があることを示唆している。

このような観点に立ち、本報告では表面波に対する応答解析手法を検証するために、1984年9月14日の長野県西部地震におけるやや長周期の地震動におけるトンネルの挙動について考察し、数値シミュレーションを行ったのでこの結果を報告する。

2. 長野県西部地震(1984年9月14日)におけるトンネルの挙動

2.1 地震観測体制 東京港海底トンネルは、長さ115mのエレメントが9函からなる全長1035mの沈埋トンネルで、エレメント間は可撓性継手で連結されている。地震観測は図-2に示すように、加速度計4台、函体表面ひずみ計7台及び継手ひずみ計4台で行われている。

2.2 観測記録の分析 長野県西部地震はマグニチュード6.8、震源深さ約2kmの浅発型地震で、観測地点までの距離は約200kmである。震央の方向は図-3に示すように、トンネル軸に対し約 47° の角度をなしている。図4~6に観測記録波形(加速度、函体と継手の軸ひずみ、曲げひずみ)を示す。地表面の最大加速度は 5.3 gal で、時刻50秒付近までは周期1秒程度の波が卓越しているが、時刻50秒以降には周期5秒程度のやや長周期の波が卓越している。地盤と函体の加速度波形がほぼ等しいことから、地盤とトンネルはほぼ同様な挙動をしているものと推定される。函体に生ずるひずみは軸ひずみが卓越し、その最大値は 8.7μ で長周期成分の卓越する時刻で生じている。曲げひずみは短周期成分が卓越し、その値は軸ひずみの $1/3 \sim 1/6$ である。なお、軸ひずみは1970年の観測開始以来最大であった。継手の軸ひずみ波形は函体の軸ひずみ波形とほぼ相似形をなしており、その最大値は 55μ である。継手の軸ひずみは函体のひずみの5~10倍、継手の曲げひずみは函体のひずみの2~8倍を示し、可撓性継手の効果が見られる。

2.3 表面波の検討 地震動の後半部に現われている比較的長周期成分の波動について考察する。地震波動が回折することなく観測地点に到達したものとして、基盤(A-1)の加速度波形を数値積分して求めた変位波形を、震央及び震央直交方向の両成分に分離して図-7に示す。また、基盤(A-1)及び函体(A-4)の変位軌跡を図-8に示す。これによれば、トンネルと地盤はほぼ同様な挙動をしており、変位振幅は震央直交方向成分が卓越し、その波形には周期が約8秒から4秒へと次第に短くなる表面波特有の分散性が見られる。また、図-9の地表面加速度(A-2-X)の非定常スペクトル³⁾からも、周期4秒から8秒の波に分散性が現われている。以上のことから、地震動の後半部に現われる4~8秒のやや長周期の波動はラブ波であると推定される。また、約600m離れた2測点(A-1とA-4)の変位波形の相互相関々数から平均的な位相遅れを求めると0.35秒となり、この波動のトンネル軸に沿ったみかけの平均伝播速度は、

約1700m/sec、震央方向に換算した平均伝播速度は約1100m/secと推定される。

2.4 函体ひずみの発生要因 管軸方向に伝播する波動による無限長の地中埋設管路の軸ひずみ(ε_A)、曲げひずみ(ε_B)は、正弦波動の振幅(U)、伝播速度(V)、波長(L)、管路の断面定数(A, E, I, e)及び地盤のパネ定数(K)により、次式のように表わされる。

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_A &= \alpha_1 \cdot 1/\sqrt{x} \cdot \dot{U}_x & \text{ここで } \alpha_1 &= 1/\{1+(EA/Kx)/(2\pi/L)^2\} \\ \varepsilon_B &= \alpha_2 \cdot e/\sqrt{y^2} \cdot \dot{U}_y & \text{ここで } \alpha_2 &= 1/\{1+(EI/Ky)/(2\pi/L)^4\} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots \text{式(1)}$$

即ち、軸ひずみは地盤の速度に、曲げひずみは地盤の加速度に比例することになる。

図-10には、軸ひずみ(S-3-A)と地盤の速度(V-2-X)の時刻歴波形とフーリエスペクトルを、図-11には、曲げひずみ(S-3-B)と函体の加速度(A-4-Y)の時刻歴波形とフーリエスペクトルを示す。これによれば相互の波形、スペクトルは類似しており、トンネルは主に伝播性の波動により変形してひずみが発生していると考えられる。

図-12には式(1)で表わされる、ひずみと波長の関係を示す。これは変位振幅を実測値とほぼ等しく $U_0=1.0$ cmとし、函体の断面定数、地盤パネは本トンネルの値を代入して算定したものである。これによれば、今回の表面波の平均伝播速度及び卓越周期から推定した波長約8000mの場合には、軸ひずみは7.6 μ 、曲げひずみは0.1 μ と推定され、軸ひずみの実測値は推定値とほぼ一致している。一方、曲げひずみの実測値は推定値より大きく上回っている。また、実測曲げひずみ波形には表層地盤の固有周期と思われる周期も卓越していること等から総合的に判断すると、函体の軸ひずみは主に伝播性の波動により生じ、曲げひずみは伝播性の波動以外に、表層地盤の部分的な応答により生じたものと考えられる。

3. 数値シミュレーション

3.1 解析方法 地盤観測結果から、函体に生ずるひずみには伝播性の波動(表面波)により発生するものと、表層地盤の応答(実体波)により発生するものがあることが推定された。そこで、表面波の場合と実体波の場合で解析を別々に行い、その後合成してひずみを算定する方法により数値シミュレーションを行った。解析手法は沈埋函の慣性力を無視し、トンネルを弾性床上の梁にモデル化し、トンネル軸に沿った地盤の変位を地盤パネを介して静的に強制入力する方法である。表面波の場合は、地表面の変位波形(D-2)を前述の平均伝播速度でトンネル左方から伝播させる方法とした。実体波の場合は、通常はFEM等により地盤の応答解析を行って応答変位を求め、これをトンネル各位置の地盤パネを介して多点入力する方法を用いるが、今回は函体の変位と地盤の変位がほぼ等しいと仮定して、実測された各測点の応答変位を用いた。この時各測点間の地盤の変位は直線補間により求めた。解析モデルの概念図を図-13に示す。

入力変位は表面波と実体波に分離し、分離後の波形を各々の入力変位とした。なお、表面波と実体波の分離については、図-7に示した基盤の変位波形及び図-9の非定常スペクトルから、分散性の顕著な周期帯に着目し、周期4秒以上の波動を表面波、それ以下を実体波とみなした。⁴⁾分離後の変位波形(D-2-X)を図-14に示す。

3.2 解析結果及び実測値との比較 図-15~17に、最大ひずみ分布、ひずみ波形及びフーリエスペクトルについて解析値と実測値を比較して示す。軸ひずみについては、最大ひずみ分布、ひずみ波形、スペクトルともに、解析値と実測値は良く一致している。表面波により発生する軸ひずみは合成波の90%以上を占めており、軸ひずみが主に表面波により発生していることが確認された。曲げひずみについては、最大値、波形、スペクトルともに解析値と実測値には良好な一致が得られなかった。曲げひずみの一致度が悪いのはトンネル軸に沿った地盤の変位を忠実に再現できなかったことによるものと考えられる。

4. ま と め

長野県西部地震における沈埋トンネルの挙動について考察し、ひずみを発生させる要因として、表面波と実体波の2つを考慮し、数値シミュレーションを行った。この結果、軸ひずみ波形は実測値と良く一致し、軸ひずみの大部分は表面波により生じていることが確認された。曲げひずみについては、実測値との一致は余り良好ではなく、これはトンネル軸に沿った地盤の変位を忠実に再現できなかったためと考えられる。

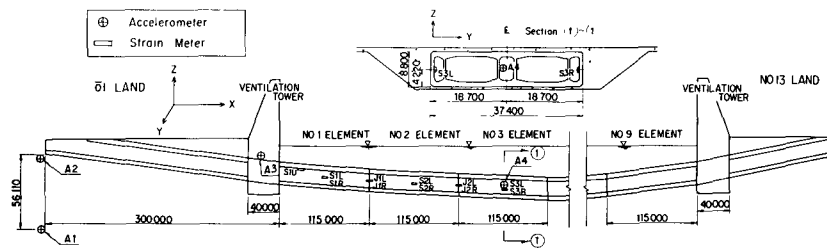


図-2 地震観測計器配置図

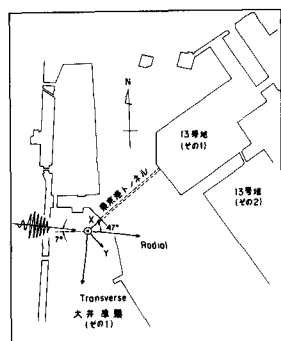


図-3 地震波動の伝播方向

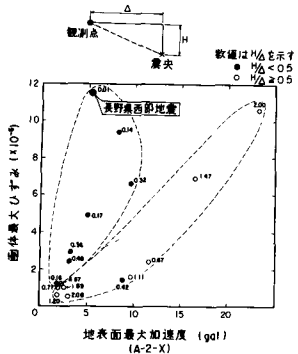


図-1 地表面最大加速度と函体最大ひずみの関係

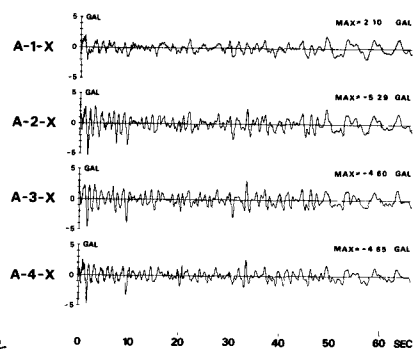


図-4 加速度波形

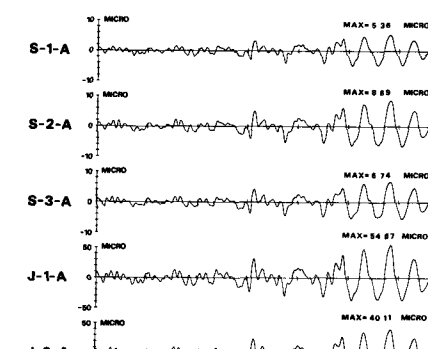


図-5 函体、継手の軸ひずみ波形

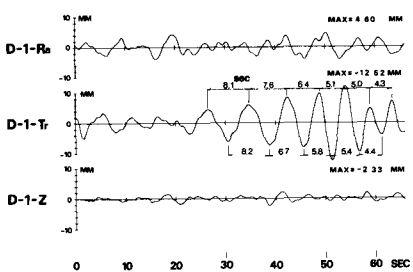
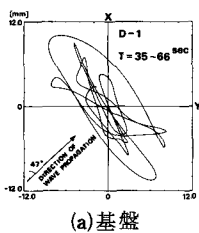
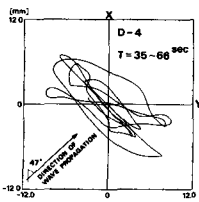


図-7 基礎の変位波形



(a) 基礎



(b) 函体

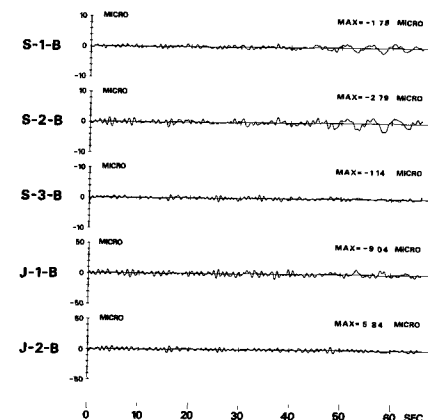


図-6 函体、継手の曲げひずみ波形

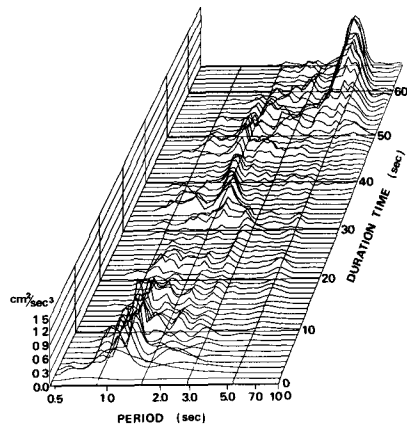


図-9 非常スペクトル (A-2-X)

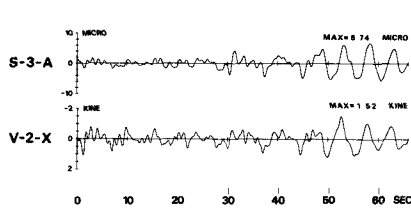
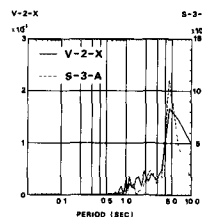


図-10 軸ひずみと速度の時刻歴波形とフーリエスペクトル



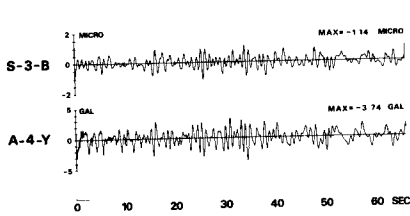


図-11 曲げひずみと加速度の時刻歴波形とフーリエスペクトル

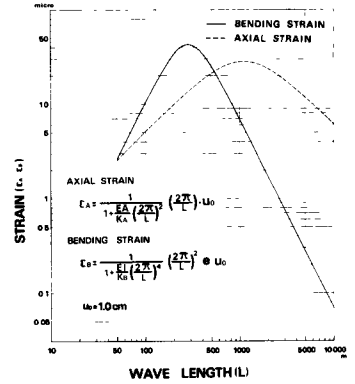
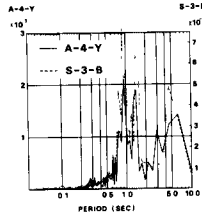


図-12 軸ひずみ、曲げひずみと波長の関係

断体の断面形状	断面2次モーメント(I)	1245 m ⁴
断面形状	弾性定数(E)	3.5×10 ⁹ 1/m ²
断体のせん断係数	軸方向(k _{yx})	3.8×10 ⁹ 1/m
断面形状	軸角方向(k _{xy})	2.2×10 ⁹ 1/m
断面形状	軸角方向(k _{xy})	1.03×10 ⁹ 1/m ²
断面形状	軸方向(k _{yx})	14,200 1/m ²
断面形状	軸角方向(k _{xy})	14,200 1/m ²

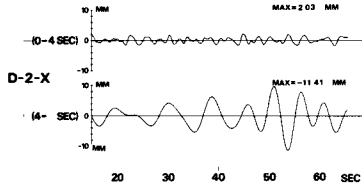
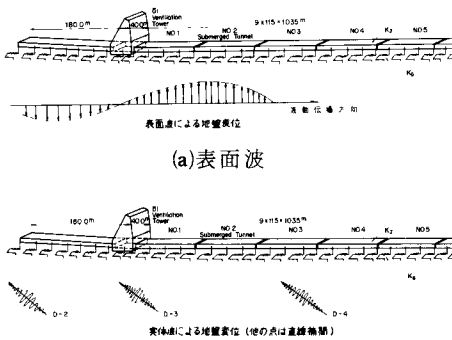


図-14 分離後の入力変位波形



(a)表面波

(b)実体波

図-13 解析モデル

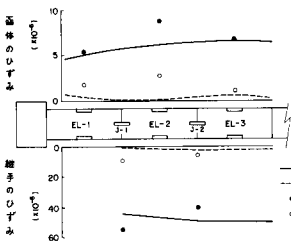


図-15 最大ひずみ分布の比較

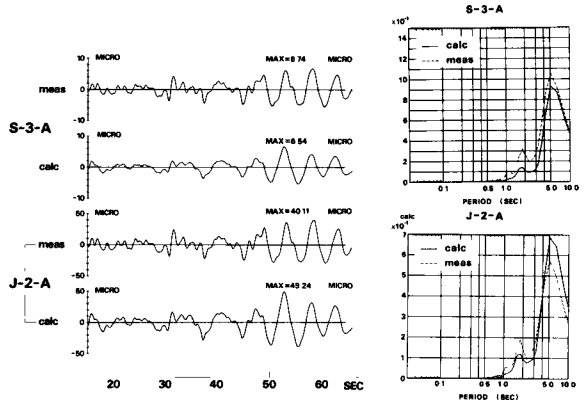


図-16 軸ひずみの時刻歴波形とスペクトルの比較

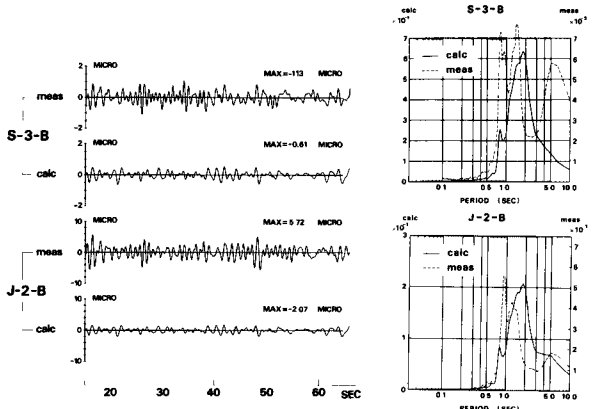


図-17 曲げひずみの時刻歴波形とスペクトルの比較

< 参考文献 >

- 1) 浜田政則 他 ; 実測及び数値解析による沈埋トンネルの地震時応力, 第14回 地震工学研究発表会, 1976
- 2) 志波由紀夫 他 ; やや長周期の地震波動による沈埋トンネルの地震時応力, 36回年次学術講演会, 1981
- 3) 亀田弘行 ; 強震地震動の非定常パワースペクトルの算出法に関する一考察, 土木学会論文報告集, 1975.3
- 4) 杉戸真太 他 ; 強震記録における表面波, 実体波の分離について, 36回年次学術講演会, 1981