

実測および数値解析による沈埋トンネルの地震時応力

大成建設 正員 ○浜田政則
同上 正員 泉 博允
同上 正員 佐藤誠一

1. はじめに

著者等は東京港海底トンネルにおいてコンクリート壁の歪の測定を主とした地震観測⁽¹⁾を継続している。本報告は実測された歪と理論解析値とを比較することにより、既に提案しているトンネルの地震応答解析法の妥当性について検証したものである。⁽²⁾

2. 地震観測より得られた沈埋トンネルの動特性

観測された加速度波形と歪波形の例を図-3、図-4に示す。図に示す軸歪および曲げ歪の波形は、左右の側壁において測定された歪波形より算定されたものである。地震観測記録の1つは1975年8月12日鳥島近海に発生したマグニチュード6.9、震源深さ400kmの遠距離地震であり、他の1つは同年12月15日千葉県中部に発生したマグニチュード4.6、震源深さ70kmの比較的近距离の地震である。加速度波形、歪波形のパワースペクトルを図-5に示す。これらの観測記録より得られたトンネルの加速度および歪の性質について次に述べる。

- 1) 地表面(A3)の加速度波形とトンネル内の測点(A5, A6)の加速度波形は振巾、周波数とも良く類似しており、トンネルと地盤はほぼ同様に振動している。
- 2) 歪波形に卓越する周期は、トンネル内の加速度波形に卓越する周期に一致しており、また歪の振巾はトンネル軸に沿って変動する。
- 3) 8月12日の地震においては、地震動の主要動部で曲げ歪が軸歪よりも大きく、地震動の後半部(図-6)で軸歪が曲げ歪よりも大きい。また軸歪には3.0秒以上の長周期成分が含まれるが、曲げ歪にはこれが見られない。以上のことは比較的短周期の地震動については曲げ歪が、長周期の地震動については軸歪が卓越することを示している。
- 4) 上下床版の歪記録より算定された鉛直面内の曲げ歪を図-7に示す。この歪は主として地震動の鉛直成分に関係するものと考えられる。測点S1では鉛直面内の曲げ歪の大きさは軸方向歪とほぼ同等であるが、測点S5においては軸方向歪の約 $\frac{1}{2}$ である。S1で鉛直面内の曲げ歪が比較的大きいのは、換気塔が上下方向にほとんど変位せず、トンネル部と変位差が生じるためであると推定される。

3. 数値解析値と実測値との対応

数値解析に用いたモデルを図-8に示す。地盤は東京礫層以上の表面層をモデル化し、大井側陸上部の取付道路部から5号函の航路海底部までを考慮している。トンネル軸に沿った地盤各部の基本振動周期は、弾性波探査、微動測定、発破による振動観測、および2回の地震観測結果を参考として、大井側取付道路部で0.80秒、換気塔付近で1.07秒、4号函付近で0.75秒と設定した。トンネルに作用するバネ定数は弾性波探査より求めた弾性係数を用いて、2次元および3次元有限要素法により算定した。このバネ定数をそのまま用いて算定した曲げモーメントおよび軸力は実測値より大幅に大きくなった。そこで地盤バネ定数を低減させて試算を繰り返したが、軸方向については $\frac{1}{2}$ 、軸直角方向については $\frac{1}{2}$ とした場合が最とも実測値に近い値を得たので、以下この結果について述べる。なおトンネルエレメントは、各々厚さ25mmの波型鋼板により結合されているが、この波型鋼板の室内試験によるバネ定数からトンネルエレメント間のバネ定数を算定した。入力地震動は東京礫層(GL-35m)の軸方向、軸直角方向の観測加速度波形を用いた。地盤の減衰定数は一律に5%と仮定した。

数値解析により得た曲げモーメント、軸力を実測値と対比して図-9~図-11に示す。最大曲げモーメントの分布を図-9(a)に示すが解析による曲げモーメントは大きさおよびトンネル軸に沿った分布形状とも実測値に良く一致している。トンネルエレメント間のジョイント部の測点S3、S7では曲げモーメント

が減少しており、波型鋼板によるフレキシブルジョイントの効果が実測および解析の双方に認められる。測点 S 1、S 6、S 9 における曲げモーメントの時刻歴を図-10 に示す。測点 S 1、S 6 では実測値は短期成分を除いて良好な一致が見られるが、S 9 では多少の位相のずれが認められる。図-11 (b) に測点 S 6、S 9 の曲げモーメントのパワースペクトルを示す。測点 S 6 での曲げモーメントの卓越周期は実測、解析とも 0.85 秒と一致しているが振巾では両者に相当の差が見られる。また測点 S 9 ではパワースペクトルの形、大きさは良く類似しているが卓越周期に若干のずれがある。この点は海底部地盤の周期の設定に原因があると考えられる。また実測値では 0.3 秒～0.5 秒付近に高次振動成分が認められるが、解析値では見られない。これは解析モデルがトンネル軸に沿った各地盤の基本振動のみを考慮していることにも 1 つの原因があると考えられる。

図-9 (b) に最大軸力分布を示す。最大軸力の分布は曲げモーメントの場合ほど良好な一致は得られない。特に測点 S 2 では解析値は実測値の約 1/2 であり、大きな差が認められる。また実測値ではエレメント間において軸力が低減しており、フレキシブルジョイントの効果が表われているのに対し解析値ではこの効果が表われていない。

4. おわりに

曲げモーメントについては解析値と実測値とで振巾、周波数特性とも比較的良好的な一致が得られたが、軸力については良好な結果は得られなかった。このことの 1 つの原因として次のことが考えられる。すなわちトンネルの曲げ変形はその剛性が地盤のパネに比較して小さいため、ある断面のモーメントはその地点の比較的近傍の地盤変位により決定されるが、軸方向変形ではトンネルの剛性が大きいため、トンネル軸に沿った広範囲の地盤変形が影響を与えると考えられる。このため、軸力について解析値と実測値の良好な一致を得るためには地盤モデル全域に渡って実地盤と良好な近似が成立っていなければならない。また、同様の理由から基盤地震動のトンネル軸に沿った位相遅れ等も軸力の大きさに影響を与えると考えられる。今後これらの点を含めて検討を進める予定である。

- 参考文献) (1) 浜田、秋元、泉 「Dynamic Stresses of Submerged Tunnel during Earthquakes」 第 4 回地震工学シンポジウム 1975
 (2) 田村、岡本、浜田 「Dynamic Behavior of A submerged Tunnel during Earthquakes」 生研報告 March, 1975

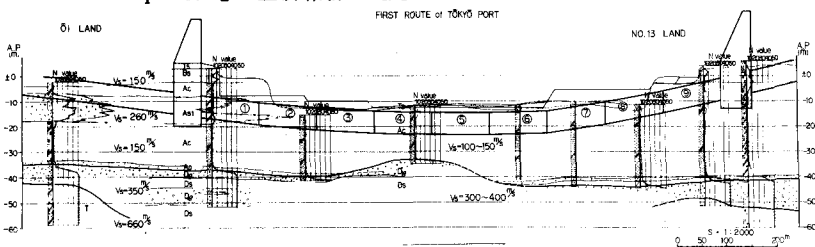


図-1 地層縦断面図

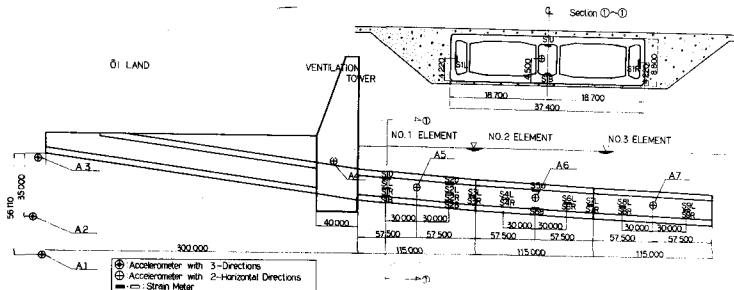


図-2 計器配置図

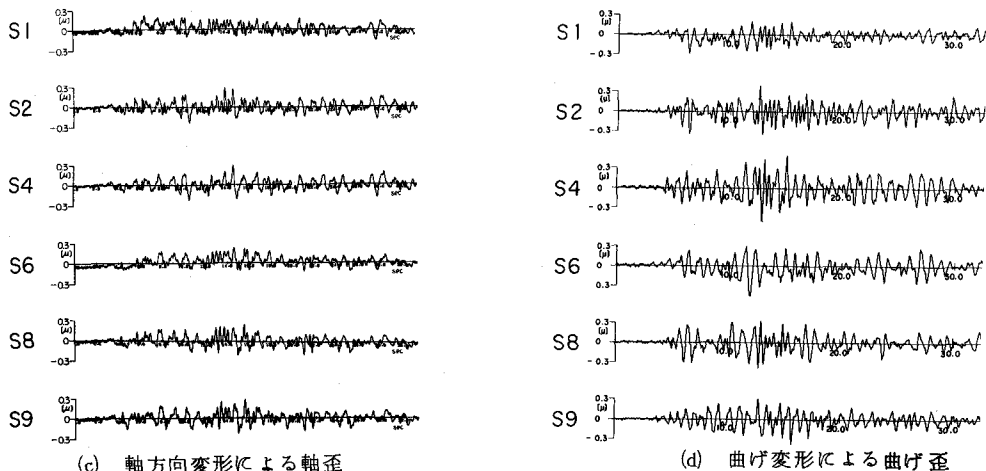
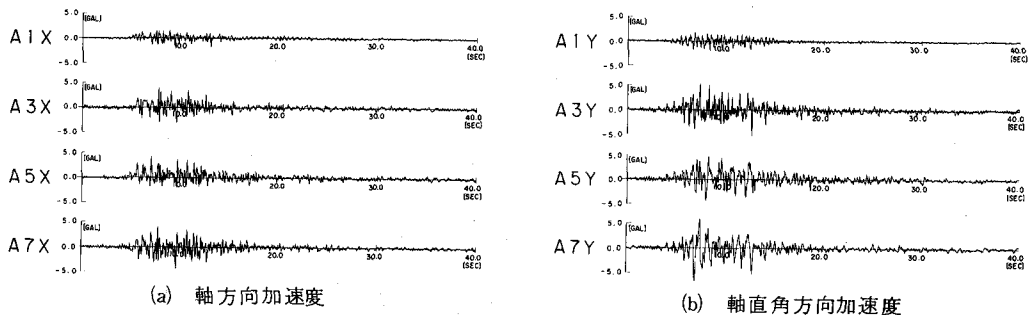


図-3 1975年8月12日の地震記録 (M=6.9, Δ=600 Km, Depth=400 Km)

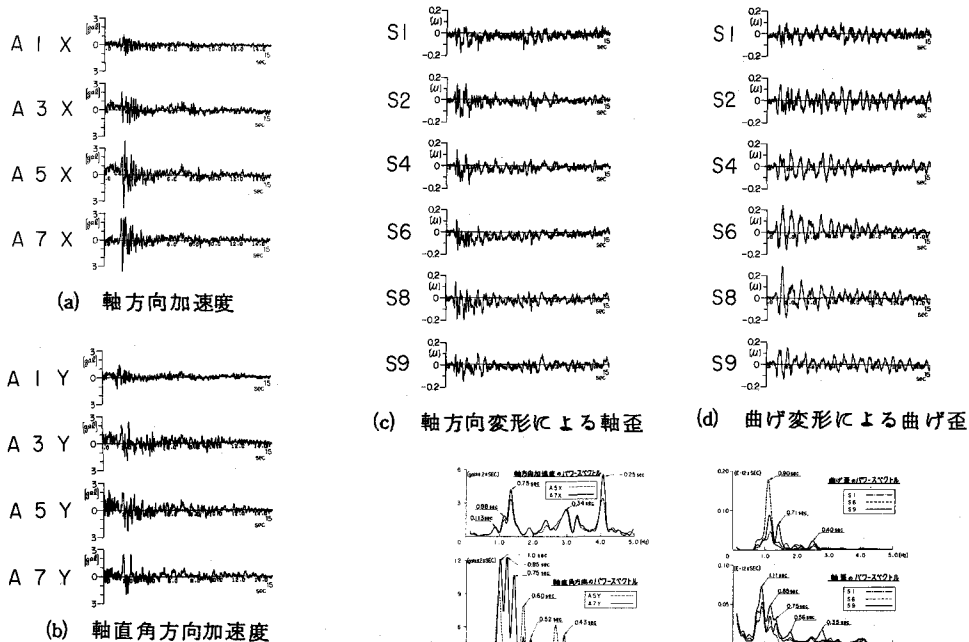


図-4 1975年12月15日の地震記録
(M=4.6, Δ=60 Km, Depth=70 Km)

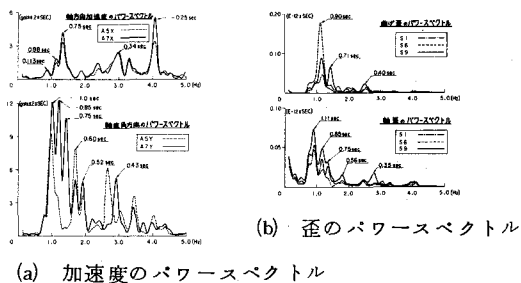


図-5 8月12日の地震記録のパワースペクトル

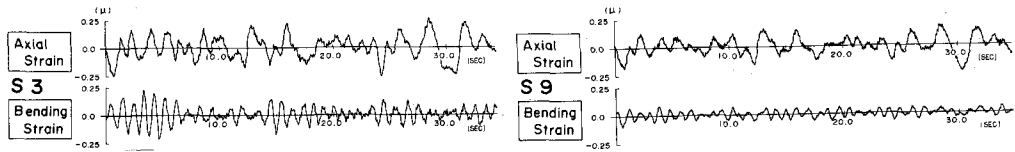


図-6 8月12日の地震の後半部分の歪記録

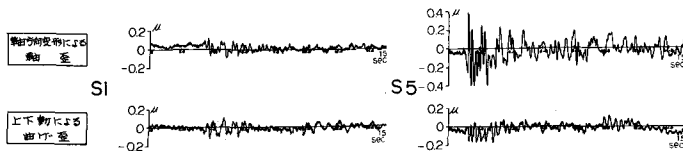


図-7 上下地震動による曲げ歪と軸方向変形による歪の比較 (12月15日の地震)

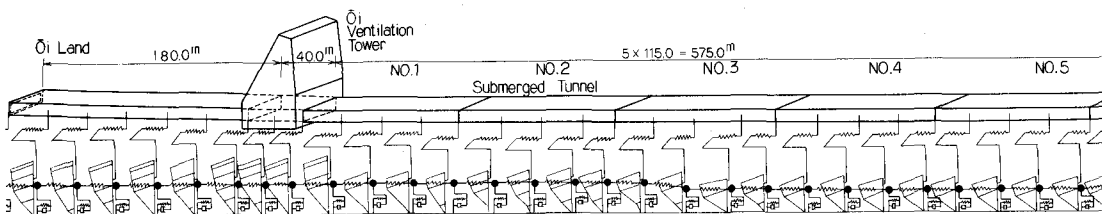


図-8 解析モデル図 (軸方向)

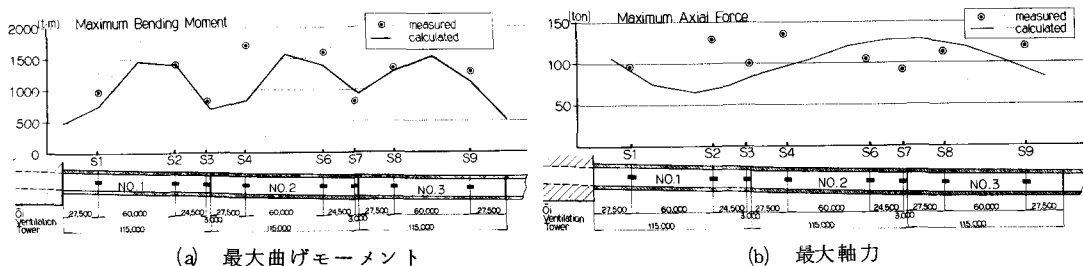


図-9 最大曲げモーメントおよび最大軸力分布図 (実測値との比較)

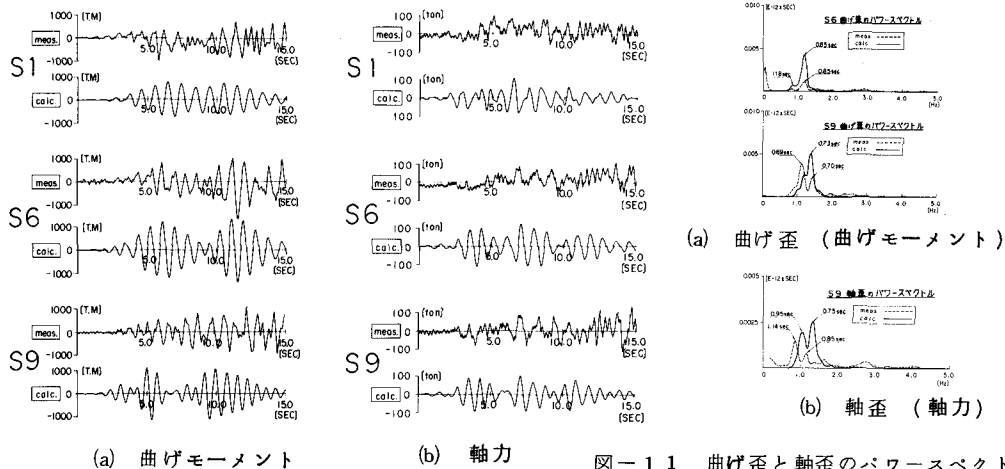


図-10 曲げモーメントと軸力の時刻歴 (実測値との比較) (実測値との比較)