

# 扇島海底トンネル地震観測

早稲田大学理工学研究所  
日本鋼管株式会社

那須信治  
蝦名淳一 高野護国  
田村 徹 ○大石 博

## 1. まえがき

日本鋼管京浜製鉄所合理化計画に基づく新工場建設の一環として、京浜運河を隔てた水江地区と扇島地区を連絡する沈埋トンネルが建設された。このトンネルの保守管理および地震時のトンネルの挙動把握のため地震観測を実施することにした。

この地震観測では、沈埋トンネル本体のみならず、周辺地盤にも強震計を設置した。さらに、ひずみ計・鉄筋計をトンネル本体に設け、地震時の構造物とその周辺地盤の挙動を同時に観測できる地震観測体制を完成させ、昭和50年3月より観測に入った。ここでは、トンネルの地震観測体制と、2・3の観測波形の解析について報告したい。

## 2. 扇島海底トンネル概要と周辺地盤

扇島海底トンネルは、図-1に示すように、全長1540mで、運河部664.3mを沈埋工法で施工され、両サイドに、4.75%の勾配を有する取付道路が続く往復4車線分離型の道路である。沈埋管は、3径間箱型断面の鋼殻エレメント6基よりなっていて、その寸法は、幅21.6m×高さ6.9m×長さ110mである。

トンネル位置付近の一般的な地質は、表層からKP-32mまでは沖積層、これより下が洪積層である。沖積層・洪積層とも、その連続性は一樣であり、おおむね水平な地層境界をもっている。沖積層は、上層から砂層、粘土層および砂層の順に堆積し、砂層はいずれもシルト分を不規則に含んでいる。また洪積層は、KP-32m以降に砂層(砂れき層)と粘土層が互層状に分布して、砂層は密に締っており、粘土層は硬質である。沈埋管は、KP-21m付近に沈設されているが、この付近は、沖積粘土層で、N値は2~4にすぎずまた、一軸圧縮強度は、1.2~1.5 Kg/cm<sup>2</sup>である。

## 3. 地震観測体制

観測に用いている計器の配置図を、図-2に示す。両護岸(水江側と東扇島側)の地表面に各1台、トンネル内に6台の計8台の強震計(米国、キネメトリックス社製)を設けている。また、トンネルの4断面に計10台のひずみ計、トンネルの

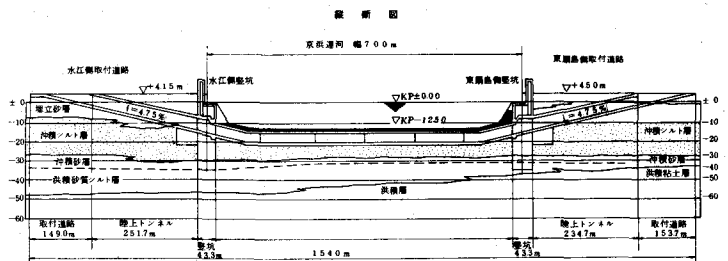


図-1 トンネル断面図

2断面に計8台の鉄筋計、および東扇島側の地表面と地下-60mに、各1台の3成分加速度計を設置している。なお、スターター・増幅器・記録器(データレコーダー)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。ひずみ計は、W.S.G.型のひずみ計に、カップリングで延長ロッドをつけたもので、標点距離を延長することにより、微小ひずみを測定可能にしている。

駆動方式としては、次のような方式を用いている。トンネル内の強震計の3台のうち2台が、10galを感じるか、地中加速度計の垂直成分が2galを感じるかのOR回路により、駆動信号が発せられ、強震計8台の

カセット・レコーダーと2台のデータ・レコーダーがスタートする。駆動停止は、記録中、最後にスタートレベルを感じた後30秒である。

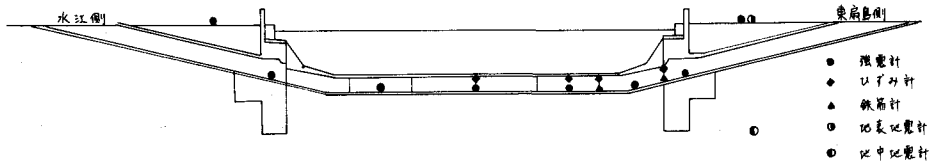


図-2 観測計器設置位置

#### 4. 扇島海底トンネルの振動性状

##### 4.1 常時微動観測

最近、常時微動を利用して、構造物や地盤の振動性状を調べる試みがよく行なわれている。扇島海底トンネルにおいても、地震観測波形との比較検討のために常時微動観測を、昭和49年11月13・14日の夜間、全車輛通行止の状態で行った。微動計としては、固有周期1秒の動コイル型換振器を使用した。測定点を、トンネル内9点、地盤2点の計11点に設け、それぞれトンネル軸直角方向、トンネル軸方向、垂直方向の3方向について測定した。なお、6点同時測定を行った。記録は、データ・レコーダーで行い、変位波形をそれぞれ15分間収録した。なお、測定データは、A-D変換器でデジタル化を行い、計算機により解析を行った。

記録波形のパワースペクトル図の一例として、図-3にトンネル軸方向・トンネル内6点の結果を示す。パワースペクトルより卓越周波数を求めると、トンネル軸方向に関しては、0.26~0.30Hz、0.70~0.80Hz、1.00~1.13Hz、1.36~1.40Hz、2.03~2.10Hzに、トンネル内・地盤ともあらわれている。また、東扇島地盤の方が、水江地盤よりも長周期の波がきわだっている。この卓越周波数は、測定の方向性・測定地点の差異により、わずかなずれがみられ、同一地点においても、測定時刻の差異により、卓越周波数が異なることがあった。

図-4は、重複反射理論に基づいて、地表の実波形より地中の数点の波形を推定し、その波形のパワースペクトルを求めたものである。GL-30mとGL-50mにおいては0.7Hz以上の卓越周波数は、消えていっている。つまり0.7Hz以上の卓越周波数は、GL0m~GL-50mの地盤に依存し、0.3Hzの卓越周波数は、さらに深い地盤構造を反映するものと思われる。このような長周期成分は、強地震の際に卓越することがいわれている<sup>1)</sup>ので耐震面の重要なファクターと思われる。

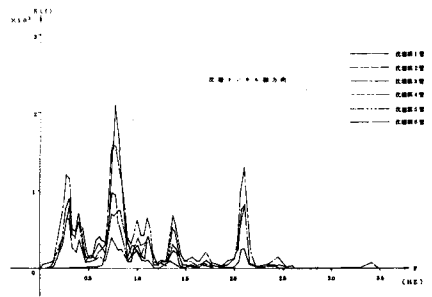


図-3 パワースペクトル 常時微動記録

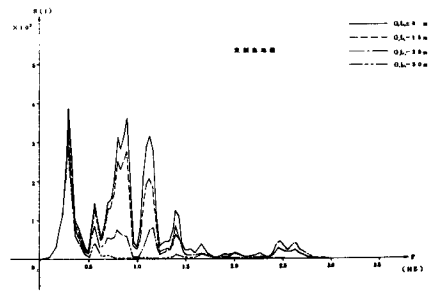


図-4 パワースペクトル 重複反射理論

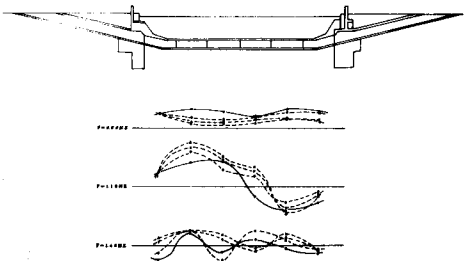


図-5 振動モード

卓越周波数における振動モードを、図-5に示す。図-5は、フーリエ係数より求める方法(実線)<sup>2)</sup>と、バンドパスフィルターを通した波形より求める方法(破線)とを比較したものである。0.80Hz、1.10Hzは、両者は、ほぼ傾向的に一致しているが、1.40Hzの場合、破線に関してばらつきがみられる。

#### 4.2 人工地震観測

川崎市およびその周辺に認められた地盤の異常隆起現象と、地震との関連を解明するための資料として、通産省工業技術院地質調査所・国立防災科学技術センター・東京大学地震研究所の共催で、昭和50年12月4日に、川崎市東扇島埋立地盤で、ダイナマイトによる人工地震実験が行なわれた。(薬量300Kg、埋立深さ90m)

爆発地点が、扇島海底トンネルの東扇島立坑から斜めに約700mで、トンネルの震動性状を調べるのに好都合な位置にある。そこでこれを利用して人工地震観測を行った。測定点は、トンネル内3点×3方向(動コイル型速度計設置)と、東扇島地盤の地表と地下-60m(圧電型加速度計設置)である。

トンネル内で記録された変位波形を、図-6に示す。爆発後、3秒程度は、高サイクルの振幅のそれほど大きくない波形があらわれ、その後、振幅の大きな波形があらわれている。その最大値は、トンネル軸直角方向、垂直方向で40~50マイクロン、トンネル軸方向で、10~20マイクロンで、常時微動の10倍程度の大きさを示している。

地盤の加速度波形は、爆発後、非常に大きな値を示し、爆発3秒後程度で波形は減衰している。波形の示す最大加速度は、地下-60mで、20~30gal、地表で40~50galを示し、約2倍に増幅されている。

表-1は、パワースペクトルより求めた卓越周波数を、常時微動時と人工地震時とを比較したものである。卓越周波数に、わずかなずれがあるにせよ、ほぼ同じ傾向を示している。人工地震程度の大きさのものであると、常時微動時とほぼ同じような振動性状を示すものと思われる。

#### 4.3 実地震観測

これまでに、昭和50年8月12日の鳥島近海の地震(OST-1)と、昭和50年12月15日の千葉県中部の地震(OST-2)に関してシステムの一部の地震波形が取得された。

(両地震とも、東京・横浜で震度Ⅲ)

取得された波形は、地中加速度計の波形と、ひずみ計・鉄筋計の一部のひずみ波形である。OST-2の波形の一部を、図-7に示す。なお強震計に関しては、地震規模が十分に大きくないため、地震波形は取得されなかった。

地中の加速度波形は、両地震とも最大値3gal程度で、周波数特性も、2つの地震波でそれほど差異を示し

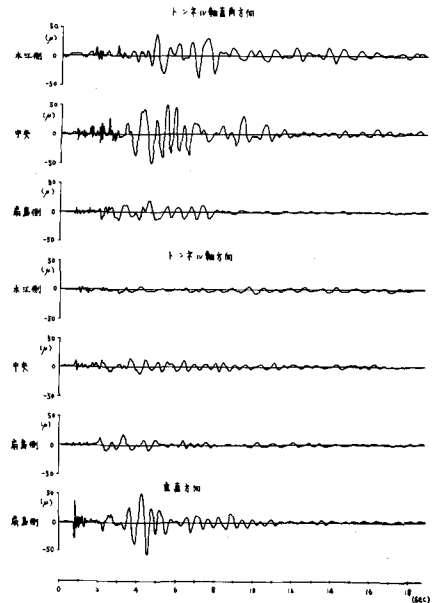


図-6 人工地震波形

表-1 トンネル軸直角方向の卓越周波数

観測地点	卓越周波数 (Hz)								
	0.50	0.85	(1.15)	1.30	2.10				
本立側	0.25	0.50	0.85	1.10	(1.30)	1.65	2.10		
中実	0.15	0.45	(0.90)	1.10		1.70	2.00		
扇島側									
人工地震時									
本立側	0.80	1.15	1.55	(2.10)	2.25	2.50			
中実	0.80	1.15	(1.40)	1.55	1.75	2.05	(2.30)	2.65	(3.10)
扇島側	0.85	1.00	1.45			(2.20)	2.65	3.10	

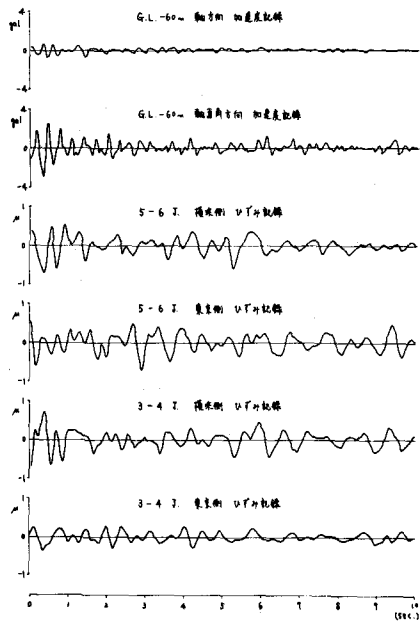


図-7 地震波形 (O S T - 2)

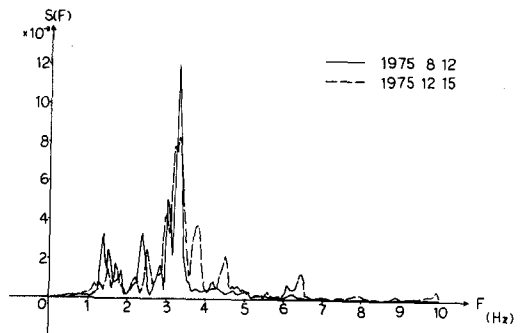


図-8 パワースペクトル 加速度波形

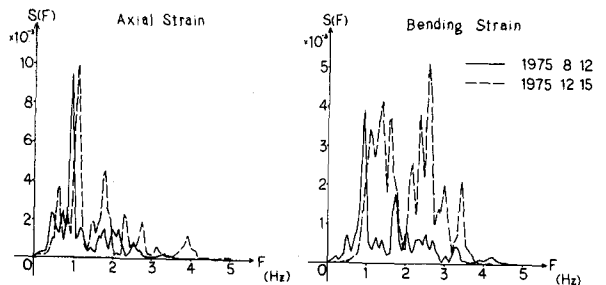


図-9 パワースペクトル ひずみ波形

ていない。(図-8)

しかし、ひずみ波形は、絶対値および周波数特性に関し、2つの地震で異なった振動性状を示している。 $\bar{O} S T - 1$ は、軸ひずみの方が、曲ひずみより大きな値を示しているが、 $\bar{O} S T - 2$ では、逆になっている。また周波数特性は、図-9に示すように、 $\bar{O} S T - 1$ では、軸ひずみ、曲ひずみのスペクトルは類似の形状を示している。しかし、 $\bar{O} S T - 2$ では、両者の形状は、かなり異なり、曲ひずみにおいては、1.0Hz以下の卓越周波数は、存在していない。また、常時微動の卓越周波数と、 $\bar{O} S T - 1$ のひずみの卓越周波数とは、かなりいい一致を示している。

このように、ひずみ波形は、地震波の伝播方向や地震動の種類(近距離地震と遠距離地震)により、かなり異なる性状を示すと思われる。

## 5. むすび

以上、扇島海底トンネル地震観測体制の概要と種々な観測波形の解析について述べた。2回の地震により観測体制の正常な作動が確認されたので、今後、多種多様な地震の観測が期待できる。そこで、得られた結果は、順次発表していきたいと考えている。

おわりに、本地震観測の計画と実施にあたり、貴重な御指導、御助力を賜った、早稲田大学理工学研究所 風間了・森岡敬樹両先生、その他多くの方々に対し、ここに深く感謝の意をあらわします。

参考文献 1) 浅田秋江、河上房義 地盤振動特性に関する二・三の考察 土木学会論文集 №2336

2) 小坪清貢、烏野清 常時微動測定による構造物の振動性状解析 土木学会論文集 №222