

(18) 川崎港海底トンネルにおける地震観測

運輸省港湾技術研究所 正員 ○南 兼一郎

同 上 正員 清宮 理

同 上 藤澤 孝夫

1 まえがき

昭和54年10月開通した川崎港海底トンネルで、地震時のトンネルの挙動を把握するため、開通直後より、地震観測を実施している。昭和56年4月までに、11個の地震の記録を取得した。ここでは、取得された記録の解析と取得された地震波を入力とした地震応答計算の結果について報告する。

2 海底トンネルの概要と周辺の地盤

川崎港海底トンネルは、川崎市千鳥町と東扇島埠頭を結ぶ総延長2,180m、うち、沈埋区間840mの3種1級の4車線道路トンネルで、沈埋部は、1函100mと110mのエレメントそれぞれ4函、計8函より構成されている。(図-1)

土質条件は、図-2に示すように、地表から-10m~-13m付近までが、N値10~20程度のシルト質砂層、-10m~-30m付近は、N値が1~4と軟弱なシルト層、-30m~-40m付近は、砂分を不規則かつ多く含む砂質シルト層で、N値は、5~15であり、-40mから2~3mは、砂または、礫層でN値50以上とかなり締った層である。-45m付近からは、洪積層と考えられる粘性土層がある。この土層は、千鳥町側では、N値10~20と硬く、腐蝕物を含み、一般に暗色を示す。またこの土層は扇島側では、やや明るい青灰~暗灰を示し浮石、貝殻片を時に含んでおり、層厚は、8~18mと変化が激しく、N値も10~50とばらついている。-53m付近からは、N値50以上の非常に締った砂層で、航路中央より千鳥町側には、-65mより保土谷礫層が現われる。

3 観測計器

観測に使用した計器の配置は、図-3に示すとおりである。両換気所近傍の地表、地中(-60m)及び沈埋函に、18成分の加速度計が設置されている。また、沈埋函の継手部(千鳥町側から数えて、1号函と2号函の間)及び沈埋函(5号函と7号函)の3断面に表面ひずみ計が対をなして計6台設置されている。鉄筋計は施工管理用として設置されたものを地震時の観測のために、転用したものであるが、表面ひずみ計と同位置及び沈埋函(7号函)の上下床版に各々対をなして計4台設置されている。記録装置のスターターのトリガーレベルは、1galにセットされている。

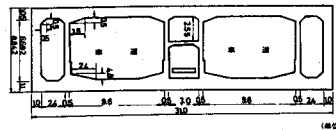
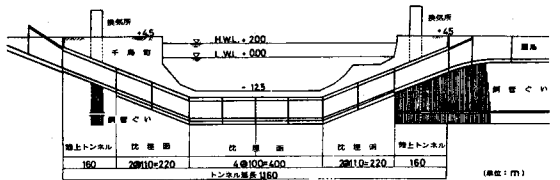


図-1 川崎港海底トンネル

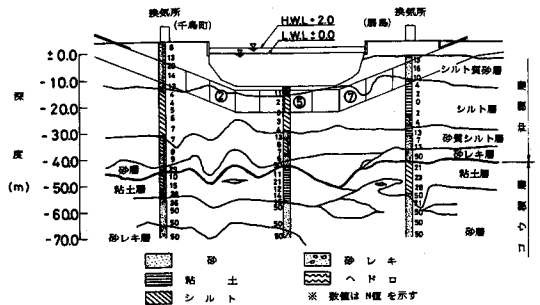


図-2 想定土層図

は、1galにセットされている。

4 地震観測結果

今までに取得された地震の記録は、表-1に示す11個であり、そのうち、横次で震度Ⅲ以上のものが7個ある。それらの地震記録で、最大の加速度は、KWSK-9の75.9galである。KWSK-9は1979年9月25日の千葉県中部の地震、KWSK-6は1979年6月29日の伊豆半島東方沖の地震の記録である。なお、KWSK-6までは、加速度計の記録のみである。KWSK-6及びKWSK-9での各測定計器毎の最大値を図-4, 5に示す。KWSK-9での最大の加速度は、航路部の沈埋函で生じているが、最大のひずみは、千島町側の護岸付近に生じている。ひずみ、加速度とも、航路部と扇島側の護岸付近の値は、同程度である。鉄筋計と表面ひずみ計の測定値に若干の差があるのは、ひずみの絶対値が小さいことによると思われる。図-6に、KWSK-6のうち、扇島側の地中(-60m)及び地表での加速度記録を、図-7にそれらのパワースペクトル(記録開始後から30秒間)及び周波数伝達関数を示す。また、図-8, 9にKWSK-9のうち、千島町側及び扇島側の地表及び地中(-60m)の加速度記録、航路部の沈埋函の加速度記録、パワースペクトル(記録開始後6秒から20秒間)及び周波数伝達関数を示す。KWSK-6の記録には、比較的周期の長い波が含まれており、かなり長時間にわたって揺れが続いている。これは、震源が浅く、震央距離が長いためと考えられる。KWSK-9の記録では、揺れは衝撃的で短時間で小さくなっている。これは、震央距離が短く、震源が深い、いわゆる直下型の地震であるためと考えられる。地中(-60m)での加速度波形のスペクトルから、KWSK-9では、軸直角方向の地震動の特性が異なっていることがわかる。表層地盤の卓越振動数は、図-7, 9のスペクトルと周波数伝達関数から0.8~0.9Hzと2.4Hz前後と推定される。一方、沈埋函内の記録の卓越振動数は、軸方向ではすべて2Hz前後で、軸直角方向では、0.8~0.9Hzである。但し、航路部では、軸直角方向にも2Hz前後の無視できない成分がある。図-10に沈埋函のひずみ記録の一例(KWSK-9)を示す。図に示す軸ひずみ及び曲げひずみの波形は、左右の側壁において測定されたひずみ波形より計算されたものである。加速度記録では、記録開始後7秒付近で、最大の加速度を生じ、その後、すまやかに小さくなっているが、軸ひずみ記録では、記録開始後15秒付近でも大きなひずみが現われ、その後も、さほど小さくなっていない。曲げひずみは、0.8Hz前後、軸ひずみは、0.7Hz前後に卓越周波数があり、これらの値は、表層地盤の加速度の卓越周期とほぼ一致している。KWSK-9のP-9(航路部沈

表-1 地震波諸元

| 記録番号 | 発震年月日 | 緯度経度 | マグニチュード | 深度 (km) | 震央距離 (km) |
|----------|-----------|----------------------|---------|---------|-----------|
| KWSK-1 | 1980.3.12 | N 34°57' E140°31' | 5.6 | 80 | 92 |
| KWSK-2 | 1980.3.31 | N 35°30' E135°31' | 5.9 | 360 | 384 |
| KWSK-3 | 1980.4.22 | N 32°09' E137°55' | 6.6 | 400 | 409 |
| KWSK-4 | 1980.5.8 | N 34°53' E140°27' | 5.7 | 60 | 126 |
| KWSK-5 | 1980.6.18 | N 35°38' E140°01' | 4.6 | 80 | 27 |
| KWSK-6 | 1980.6.29 | N 34°55' E139°14' | 6.7 | 10 | 81 |
| KWSK-7 | 1980.8.15 | N 34°51' E139°46' | 5.0 | 90 | 73 |
| KWSK-8 | 1980.9.24 | N 35°58' E139°48' | 5.4 | 80 | 51 |
| KWSK-9 | 1980.9.25 | N 35°31' E140°13' | 6.1 | 80 | 37 |
| KWSK-10 | 1981.1.19 | N 38°36' E142°58' | 7.0 | 0 | 450 |
| KWSK-11* | 1981.4.14 | N 35°30' E138°54' | 4.7 | 40 | 78 |

*----- 暫定値

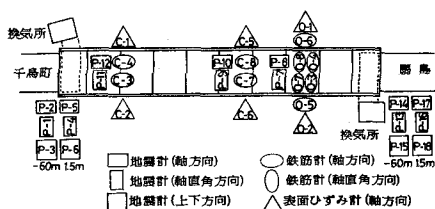


図-3 観測計器配置図

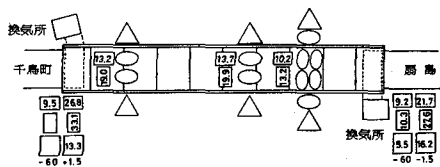


図-4 KWSK-6での最大値

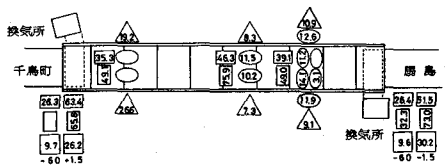


図-5 KWSK-9での最大値

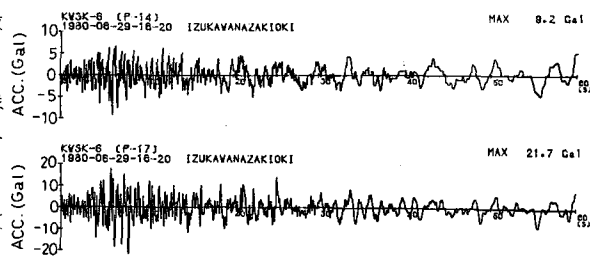


図-6 加速度記録, KWSK-6

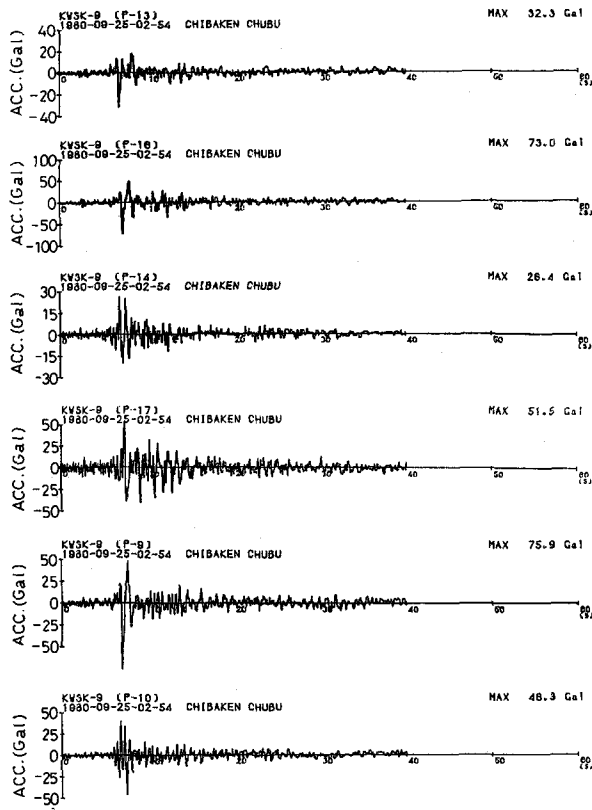


図-8 加速度記録, KWSK-9

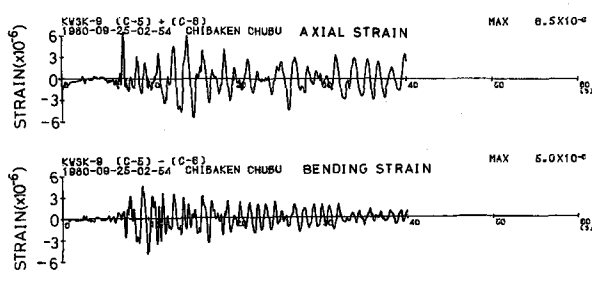


図-10 軸及び曲げひずみ波形, KWSK-9

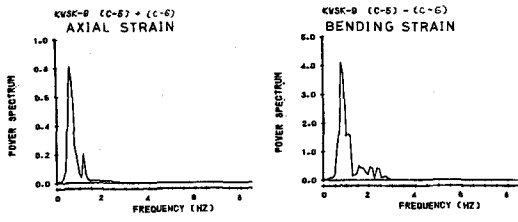


図-11 軸及び曲げひずみパワースペクトル

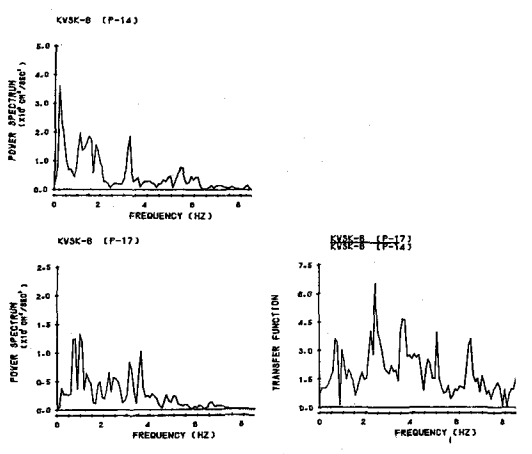


図-7 パワースペクトル及び周波数伝達関数, KWSK-6

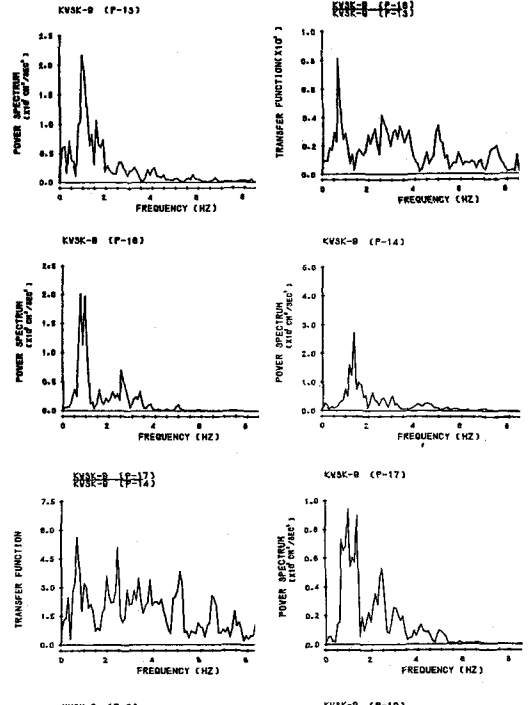


図-9 パワースペクトル及び周波数伝達関数, KWSK-9

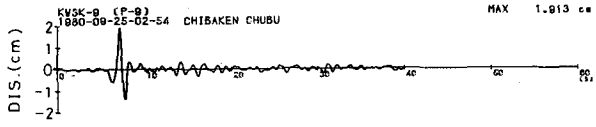


図-12 変位波形 (横分値), KWSK-9 (P-9)

埋函軸直角方向の加速度記録)を積分して求めた変位波形を図-12に示す。変位振幅の最大値は1.9cmであった。

KWSK-9について、沈埋トンネルの周辺地盤をトンネル軸方向に分割し、各々を1質点に置換した質点系モデルによる動的応答計算を実施した。計算に用いた地盤の諸定数としては、トンネル建設前に実施された常時微動測定、PS検層及びボーリングによる土質調査により求められたせん断弾性定数等をそのまま用いた。入力地震波としては、地中(-60m)で取得された波(軸方向については千島町側の記録; P-2, 軸直角方向については扇島側側の記録; P-13)の記録開始後6秒から10秒間の部分を用いた。質点系にモデル化する際、周辺地盤のトンネル軸方向の分割数は46とした。ダンパーの減衰定数は0.1とした。計算の結果求められた地盤の固有振動数は、千島町側護岸部で0.93Hz、扇島側護岸部で1.09Hz、航路部で1.75Hzと先に地震記録から求められた地盤の卓越振動数より高めであった。質点系モデルによる動的応答計算結果と実測値から計算した曲げモーメント、軸力を図-13, 14に示す。動的応答計算結果では、軸力、曲げモーメントとも両岸付近で大きくなり、航路部では顕著に小さい。

千島町側護岸部、扇島側護岸部では、実測値から計算した曲げモーメント、軸力は、計算値より小さかった。しかし、航路部では、実測値から計算した曲げモーメント、軸力は計算値より大きく、扇島側護岸部実測値から計算したものに近かった。但し、本トンネルでは、航路部の沈埋函の耐力は、護岸部のそれの約7割であるので、この程度の差は、通常の設計上の許容範囲にあると考えられる。

5 まとめ

これまで得られた地震記録の解析から、以下のことが言えよう。KWSK-9で実測された曲げひずみは、軸ひずみと同程度であった。地震波のスペクトル及び伝達関数から求めた地盤の卓越振動数は、常時微動、PS検層、ボーリングによる土質調査により求められたせん断弾性定数等をそのまま用いて計算した地盤の固有振動数より低かった。質点系モデルによる動的応答計算結果と、実測値を比較すると、護岸部では、計算値は、曲げモーメント、軸力とも実測値より大きいか、航路部では、実測値の方が大きかった。但し、本トンネルでは、航路部の断面耐力を護岸部の約7割としているので、この程度の差は十分カバーされていると考えられる。これまで日本で建設された沈埋トンネルでは、換気所がトンネルの軸線上に設置される例が大多数を占めており、本トンネルのように、換気所がトンネル軸線と分離されている例は、ほとんどない。しかし、このようなタイプのトンネルでも、他の大多数の例と同じ動的応答計算の手法を適用できることがわかった。

6 あとがき

川崎港海底トンネル地震観測体制の概要とこれまでに取得された記録の解析について述べた。筆者らは既に、衣浦港海底トンネルにおいて、昭和48年8月より地震観測を行っているが、川崎港でも観測を継続し、沈埋トンネルの地震時挙動についての資料を集積して行いたいと考えている。なお、本地震観測システムの保守管理に多大な尽力を尽くし、かつ貴重なデータを提供して下さいました川崎市の関係各位に深く感謝の意をあらわします。

1) 井倉進, 倉田栄一, 土田 肇: 地震記録のデジタル化と補正, 港研資料 No. 286, 1978年
 参考文献) 2) 田村重四郎, 岡本隆三, 渡田政則: Dynamic Behaviour of Submerged Tunnel During Earthquake, 東大生研報告, Vol. 24, No. 5

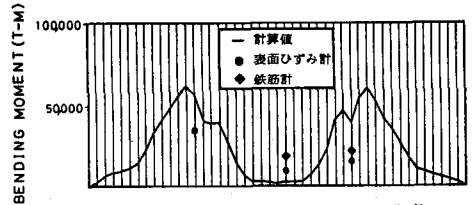
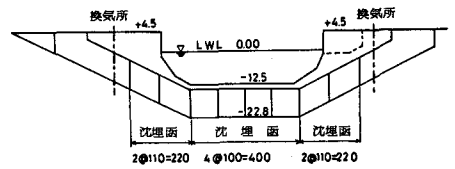


図-13 最大曲げモーメントの分布

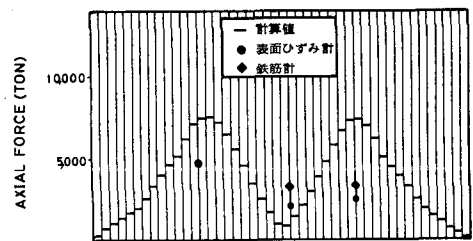


図-14 最大軸力の分布