

# 丸埋トンネルの地震時の歪について

東京大学生産技術研究所 ○田村 重四郎  
 埼玉大学 田本 舜三  
 東京大学生産技術研究所 加藤 勝行

## 1. まえがき

筆者等は丸埋トンネルの地震時に発生する歪について検討し、幾つかの報告を行つて来た。羽田丸埋トンネル（日本国有鉄道）に於いて昭和45年より地震観測を継続して行つてゐるが、更にいくつかの地震の記録が蓄積されて、当該トンネルに発生する地震時の動歪の性質について、かなりはつきりした資料を得ることができた。これについて報告する。

## 2. 地震観測

本トンネルは羽田空港入口付近より幾分上流によつた多摩川左岸より、上流側にわずかに凸に弯曲して多摩川を横断して川崎側に達してゐて、高さ約8m巾約13mの卵形断面の長さ80mのエレメント6基よりなる全長480mのRCのトンネルである。外側は鋼板で、各エレメントは剛接合されている。図-1に示すように、河心部で約40m、川崎部で約10mの厚みの沖積層が、よく締つた所謂東京砂礫層を覆つてゐる。川崎より数えてNo.2、No.4の2つのエレメントに夫々水平2方向の加速度計と4つの歪計（トンネル軸方向、左右壁上）が設置されている。

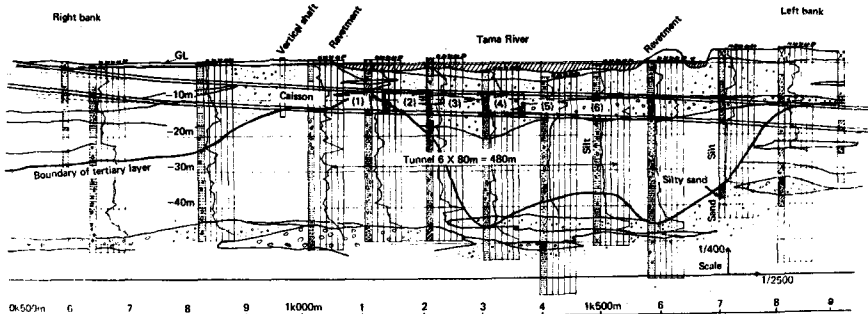


Fig.1 Geological map of the site of the Tama River tunnel

## 3. 地震記録

今までに記録した主な地震37ヶを表-1に示す。地震に関する資料は気象庁の速報と月報より得た。これらの地震の内、地震番号⑩は1972年12月4日八丈島東方海底に発生した地震で、今までに最も大きな歪( $20.9 \times 10^6$ )が記録された。⑬は1972年5月9日の伊豆半島沖の地震であり、 $M=7$ 級で最も震央距離が小さい(180km)ものである。又⑫は $M=6.9$ の紀伊半島沖の地震であるが、震源の深さが400kmとされており、他の地震とは異つてゐる。

## 4. 最大加速度と最大歪

トンネル壁に設置された8ヶの歪計で得た記録の夫々で最大値を求めると、殆んどの場合、沖積層の厚い折にあるNo.6のエレメントで大きい歪が得られた。表-1の最大歪で( )書きは、No.4エレメントの記録が得られなかったため、No.2エレメントで記録された最大歪を示したものである。

図-2は地震毎に、記録より最大加速度と最大歪を求めて示したもので、さきに報告したものとその後得た資料を追加したり、又は一部訂正を加へたりしてある。○印中の数字は地震番号に対応してゐる。この図で、時々

平行に引いた2本の直線の間に殆んどの測定値が含まれることが分り当該トンネルに対し、2本の直線は最大加速度に対応した上限及び下限の歪をあらわしているものとみられる。又一定の最大加速度に対し、発生する最大歪の最大値は最小値の15~20倍にもなっていることが分かる。この様な違いは既報のように基盤における地震のスペクトルと表層地盤の卓越振動数との相対的關係に関連があるものと考えられる。

2本の線の間の領域の下半部分に①④、②、④、⑦、⑨、⑬、⑭、⑰、⑲の地震が含まれるが、之等の地震の内⑦の他は何れもM=5.1以下の地震である。又④、②、⑩の地震の加速度記録の主要部分は何れも数ハルツの振動であって、これに対応した歪記録では、加速度の大きさの割に歪の値が小さく、地震の終部で約1ハルツの歪波形があらわれるのが認められている。

一方、上半部分にある地震については、殆んどがM=5.5以上の地震であって、一般に加速度波形でも歪波形でも1ハルツ前後又はそれより低い振動数の振動成分が卓越していることが認められ、最大歪は加速度の大きさの割に大きい値を示している。

この図は加速度に対するトンネルの歪の周波数応答の性質を表わしていることとができる。上限の線で1ガル当り $1.5 \sim 2.0 \times 10^{-6}$ の歪となり、下限の線と同様に、 $0.1 \sim 0.15 \times 10^{-6}$ 程度の歪を示している。

5. マグニチュード、震央距離と最大歪

図-3はマグニチュードをパラメーターとして震央距離と最大歪の関係を示したものである。

M=5の線が震央距離100km附近で折れ曲っているのは、歪波形がこのより遠くなると1ハルツ程度の振動が卓越するようになり、歪波形の性質が変るからである。M=6の線については、震央距離の増加による最大値

Table 1

Earthquake No.	Location of Origin Date	Location of Origin N	Location of Origin E	Depth (Km)	Magnitude	Epicentral Distance (Km)	Max. Acc. (gal)	Max. Strain ( $\times 10^{-6}$ )
1	Sept. 14, 1970	38°41'	142°20'	40	6.2	420	2.6	1.7
2	Sept. 30, 1970	35°29'	139°38'	40	4.8	12	12.1	1.2
3	Jan. 4, 1972	35°52'	140°32'	40	5.0	80	1.8	1.0
4	Jan. 27, 1972	35°41'	139°7'	40	4.8	60	6.8	0.8
5	Aug. 31, 1972	35°53'	136°46'	10	6.0	270	2.3	2.6
6	Sept. 25, 1972	38°21'	142°4'	50	5.5	380	1.6	1.7
7	Oct. 6, 1972	34°24'	138°31'	30	5.5	160	10.9	3.5
8	Dec. 4, 1972	33°12'	141°5'	50	7.3	280	14.7	20.9
9	Dec. 8, 1972	35°35'	140°0'	90	4.8	20	15.0	1.2
10	Mar. 27, 1973	35°31'	139°56'	60	4.9	17	13.6	2.0
11	Sept. 30, 1973	35°39'	140°40'	50	5.9	80	4.5	4.0
12	Oct. 1, 1973	35°37'	140°48'	60	5.8	100	4.5	(2.4)
13	Nov. 19, 1973	38°53'	142°9'	50	6.4	430	1.8	2.0
14	Dec. 22, 1973	35°13'	140°17'	70	5.0	60	6.9	4.2
15	Mar. 3, 1974	35°5'	140°9'	40	6.0	135	5.1	4.2
16	May. 9, 1974	34°34'	138°48'	10	6.9	180	9.3	11.6
17	Jan. 21, 1973	36°3'	139°52'	50	4.8	55	2.7	1.6
18	Feb. 10, 1973	33°21'	140°43'	30	5.1	260	0.9	0.5
19	Mar. 17, 1973	36°57'	141°41'	50	5.3	240	0.6	1.2
20	Apr. 25, 1973	33°32'	140°52'	50	5.5	250	1.2	1.6
21	Aug. 24, 1973	36°31'	139°45'	110	5.0	110	1.9	1.1
22	Feb. 22, 1974	33°8'	137°7'	400	6.9	360	3.8	1.8
23	May. 5, 1974	37°45'	141°51'	40	5.5	310	0.9	1.3
24	Jun. 27, 1974	33°45'	139°12'	10	6.1	200	2.9	5.2
25	Jul. 8, 1974	36°25'	141°12'	40	6.3	160	3.8	6.1
26	Aug. 4, 1974	36°1'	139°55'	50	5.8	55	11.0	5.0
27	Sept. 27, 1974	33°43'	141°33'	60	6.4	270	7.8	4.8
28	Oct. 9, 1974	36°3'	139°55'	60	4.8	60	2.0	0.9
29	Oct. 29, 1974	35°36'	140°20'	70	4.9	50	2.4	1.0
30	Nov. 1, 1974	35°36'	140°20'	60	4.3	50	2.1	0.6
31	Nov. 16, 1974	35°42'	141°15'	40	6.1	140	9.0	6.1
32	Nov. 21, 1974	35°37'	140°20'	60	4.7	50	2.0	0.9
33	Jan. 14, 1975	35°15'	141°13'	30	5.1	135	1.0	0.9
34	Jan. 21, 1975	34°59'	141°21'	30	5.9	160	2.8	2.4
35	Feb. 8, 1975	35°49'	140°7'	60	5.4	60	8.8	2.7
36	Mar. 11, 1975	36°31'	139°43'	130	5.1	110	2.0	0.8
37	Mar. 14, 1975	35°18'	136°50'	50	5.3	260	0.4	0.6

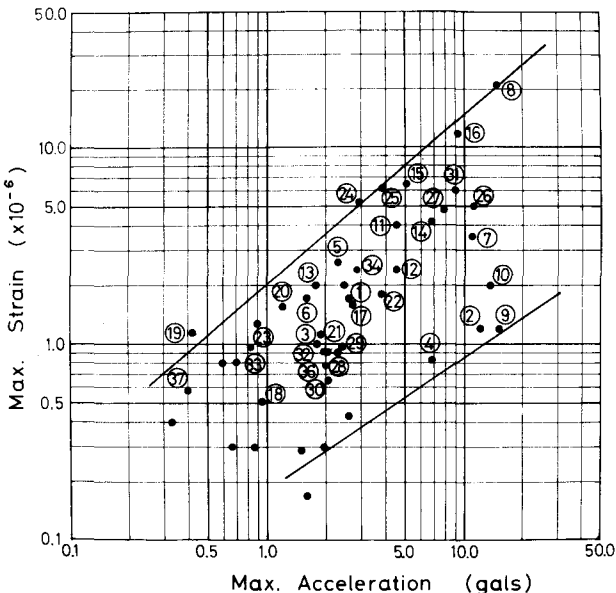


Fig.2

の減少の程度が、一般の地震動の最大加速度のそれに比して小さく、影響が遠くまで及ぶこと、又震央距離が数10kmに近づいた場合でも歪は急激には増加しないことが注目される。

このことは図-2で述べたように、主に歪と関係する低次の卓越振動数が当該地奥で主に0.3~1.0ヘルツ程度の範囲にあることに関連している、2ヘルツ程度以上の振動に対しては歪が殆んど発生しないこと、及び、周期の比較的に長い振動成分が震央距離によってそれ程急激に低減しないことによるのであろう。

M=6の線の上側でMの分布をみると、(22)の地震を除けば同値の又はM=6の線に略々平行に並んでおり、之によってM=6以上でMがそう大きく変らない範囲で最大歪の値を推測することができる。

本トンネルでは次式で示される。

$$\log_{10} \sigma_m = 0.7M - \frac{\Delta}{450} - 3.2$$

$\sigma_m$ ; 最大歪(10<sup>-6</sup>),  
M; マグニチュード,  
 $\Delta$ ; 震央距離(km)

### 6. 表層地盤の振動特性

歪波形が表層地盤の振動特性に密接に關係していることが明らかになっているので、本地奥の振動特性を検討する。本地奥のボーリング結果及び常時微動観測から得られた卓越振動数ならびに誘導公園における地震観測資料(建設省土木研究所)を参考して地盤の構成を推定した。図-4の右上方にある2つの地盤図は夫々左側は川崎側、右側は多摩川河口部に対応している。基盤(土丹尺)より正弦波形で入射し、又基盤に散逸して行くS波を対象として、表層でのエネルギーの損失を無視して、地表面の周波数応答を次式により計算した結果を図-4を示す。

$$A = 2\sqrt{\alpha_n^2 + \beta_n^2}$$

$$\begin{aligned} \text{但し、} \quad \alpha_i &= \alpha_{i-1} \cos pat_{i-1} + \beta_{i-1} \sin pat_{i-1} \\ \beta_i &= -k_{i-1,i} (\alpha_{i-1} \sin pat_{i-1} - \beta_{i-1} \cos pat_{i-1}) \\ \alpha_2 &= \cos pat_1 \\ \beta_2 &= -k_{1,2} \sin pat_1 \end{aligned}$$

ここに、A; 単位振巾の入力に対する地表面の振巾

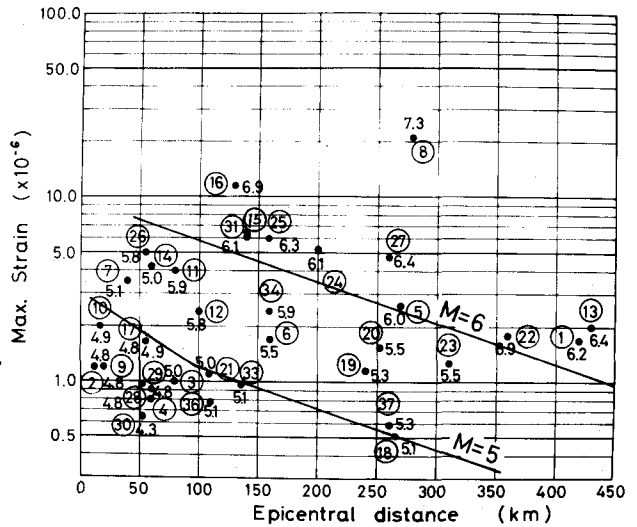


Fig.3

- $n$ ; (表層を構成する層の数) + 1
- $i$ ; 地表面から数えE層の番号
- $p$ ; 入力波の円振動数
- $\Delta t_i$ ; 波動がE層を通過するに要する時間
- $K_{i,i+1}$ ; (i+1)層の波動インピーダンスと対するE層のそれの比

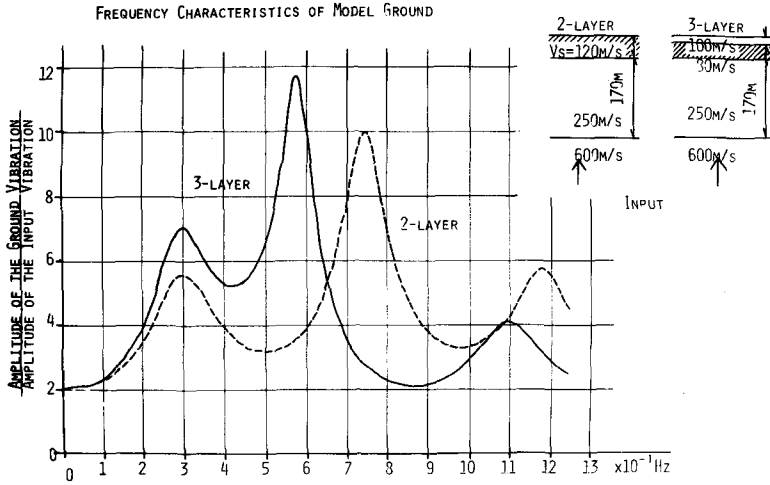
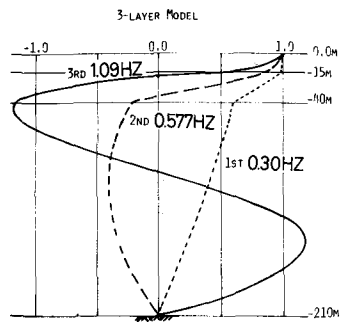


Fig.4

Aの値より、地表面で剪断力を0とおいて、順次各層のモードを算定することができる。図-5は夫々の地盤に対して3次までの卓越振動モードを示したものである。歪記録で卓越してあらわれる0.28~0.3Hzの振動は各地盤の基本振動に相当し、同様に0.5~0.8Hzの卓越振動は東京砂礫層より上の部分の振動が主にあらわれていることが推測される。因に波動の地下への伝達もとづく減衰の程度は基本振動に対し、川崎側で約18%、多摩川河心部で約13%の減衰係数を夫々相当している。

PREDOMINANT MODE OF THE GROUND MODEL



7. まとめ

地震観測結果をもとにして、どの様な歪がトンネル軸方向に発生するかを示した。この資料は、地盤が地震時に安定であることを前提として、トンネル断面、トンネル周辺の土質、地盤条件等を勘案することにより、発生する歪の算定を行う上で役立つものと考ええる。

参考文献

"DYNAMIC BEHAVIOR OF A SUBMERGED TUNNEL DURING EARTHQUAKES",

CHOSHIRO, TAMURA, SHUNZO OKAMOTO AND HISANORI HAHARA,

Report of the Institute of Industrial Science The University of Tokyo, vol.24 NO.5 MARCH, 1975

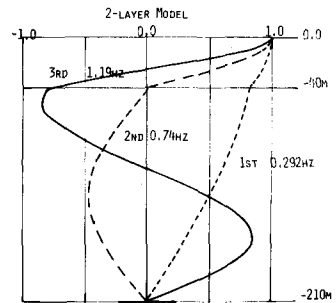


Fig.5