

沈埋トンネルの地震時応力に対する地盤条件の影響について

東京大学生産技術研究所 田村 重四郎
埼 玉 大 学 岡本 舜三
大 成 建 設 茨田 政則

1 緒 言

沈埋トンネルは地震時には、トンネル自体の慣性力に基いた振動は起りにくく、地盤の変位、変形に応じて挙動することが今後の研究によって明らかになっている。その故、沈埋トンネルの耐震設計には、地盤の変位に基いた新しい方法が必要である。

本報告は通常の地盤に建設される沈埋トンネルの耐震設計に対する基礎資料を得るため、著者等がまきに提案した沈埋トンネルの振動モデルを用いて行った動的解析の結果の一部をまとめたものである。まとめるに当り、対象とした因子は地盤の形状、地盤の基本振動周期、地盤のバネ係数、トンネル断面の形状であり、此等の因子が地震時にトンネル側壁のトンネル軸方向の応力に及ぼす影響を検討した。地盤への入力地震波はHachinohe EW (1969), El Centro NS (1940) 及び Taft EW (1952) の3種類であって、水平にトンネル軸方向及びトンネル軸直交方向に加えられた。これ等の入力地震波と上述の因子とを組合せて約260ケースの解析計算が実施された。

2 計算条件

(1) 地盤の形状 解析対象地盤は、基盤上の層厚の異なる2種の表層地盤を斜面部を設けて接続した図-1に示すような形状の均質等方性の弾性地盤である。斜面部の形状は一樣な勾配の場合(一点鎖線) 斜面中腹で勾配が変る場合(実線)及び2般差がある場合(点線)の3種類である。斜面部の長さには既設トンネルの例を参考にして30m~450mとした。また沈埋トンネル上面は地表面より略々2mの深さにあるものとした。

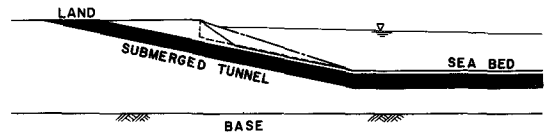


図-1 地盤の形状

(2) 地盤の基本振動周期 地盤の基本振動周期は、表層地盤でのS波の伝播速度を140mとして、表層地盤の厚みを設定して算定したものであり、厚い表層地盤(以下地盤Iと云う)に対し0.8秒~2.0秒、薄い表層地盤(以下地盤IIと云う)に対し0.05秒~1.0秒を採用した。両者の周期の組合せは、水深、斜面部の形状を考慮して、19ケースを選んだ。

(3) 地盤のバネ係数及びトンネル断面の形状 トンネルの変形に対してはトンネルの剛性とトンネルに作用する地盤のバネ係数の比が重要である。そこで次式で示す、弾性床土上の棒状体の変位の式で使用されている係数 β_x , β_y を用いて、この比を表現した。

$$\beta_x = \sqrt{\frac{k_x}{E \cdot A}} \quad (\text{トンネル軸方向}),$$

$$\beta_y = \sqrt{\frac{k_y}{E \cdot I}} \quad (\text{トンネル軸直交方向}),$$

但し、 f_x :トンネル軸方向に作用する地盤のトンネルに対するバネ係数(t/m/m), f_y :トンネル軸直交方向に作用する地盤のトンネルに対するバネ係数(t/m/m), E :トンネルのコンクリートのヤング係数で $3.0 \times 10^6 \text{ t/m}^2$ とする, I :トンネル断面の断面二次モーメント(m^4), A :トンネル断面のコンクリートの断面積(m^2).

	AREA	MOMENT OF INERTIA	SECTION MODULUS
RAILWAY TUNNEL	40	550	90.0
ROAD TUNNEL I	90	7,000	500.0
ROAD TUNNEL II	130	17,000	1,006.0

表-1 トンネルの断面

沈埋トンネルの I , A 及び断面係数はトンネルの使用目的及び断面の大きさを考慮して3種類に分類し表-1の値とした。

以上の例及び既に実施された解析事例を参考にして β_x, β_y の値を次の範囲にとることとした。

$$0.3 \times 10^{-2} < \beta_x < 0.8 \times 10^{-2} \text{ (1/m)}, \quad 0.15 \times 10^{-1} < \beta_y < 0.4 \times 10^{-1} \text{ (1/m)}$$

3 計算結果及び考察

地震に対するトンネルの変位応答の時間的変化をみた場合、トンネル軸線上の変位の分布は特に斜面部で複雑な曲線になる。地盤I, IIでは固有振動が卓越して、しかも安定して発生するのに対し、斜面部の地盤では基本振動周期が一定でないため、複雑な曲線があらわれ非定常的に変動するからである。しかし、地盤I, IIの固有振動周期を T_1, T_2 として地震動の応答変位スペクトルが T_1 と T_2 の周で大きな変化がない場合、斜面部地盤の応答変位は地盤I, IIの応答変位と関連があるものとみることが出来る。

そこで地盤I, IIが夫々の基本振動周期に対応した応答変位スペクトル D_1, D_2 で互に逆位相に変位した場合を想定し($D_1 + D_2$)を地盤I, IIの周の最大相対変位とみなして、単位相対変位当りのトンネルの軸応力 $\bar{\sigma}_t$ 及び縦応力 $\bar{\sigma}_B$ を次式によって算定した。

$$\bar{\sigma}_t = \frac{\sigma_t}{D_1 + D_2} \text{ (kg/cm}^2\text{/cm)}, \quad \bar{\sigma}_B = \frac{\sigma_B}{D_1 + D_2} \text{ (kg/cm}^2\text{/cm)}$$

但し、 σ_t, σ_B は応答計算で得られたトンネル断面での最大軸力及び最大曲げモーメントから計算されたトンネルの最大軸力及び最大縦力である。

次の(1)で示されるように $\bar{\sigma}_t$ 並びに $\bar{\sigma}_B$ は何れも入力地震波形の違いによって値がそうちらばらない。このことは地震時にトンネルに発生する σ_t, σ_B の値は、地盤I, IIの応答変位よりきまる最大相対変位量から推定出来る事を示している。

次に $\bar{\sigma}_t, \bar{\sigma}_B$ に対する前述の因子の影響について考察する。

(1) 地盤の基本振動周期の影響 トンネルの断面積 90 m^2 , 断面二次モーメント 7000 m^4 , 斜面部地盤の長さ 150 m , 斜面の配一様 $\beta_x = 0.55 \times 10^{-2} \text{ (1/m)}$, $\beta_y = 0.275 \times 10^{-1} \text{ (1/m)}$ の条件のもとで19通りの地盤について軸応力 $\bar{\sigma}_t$ を算定し、その結果を図-4に示す。図-4の横軸は地盤Iの周期を縦軸は地盤IIの周期を示し、図中に黒点印に付せられた数値は、この黒点の座標より決まる周

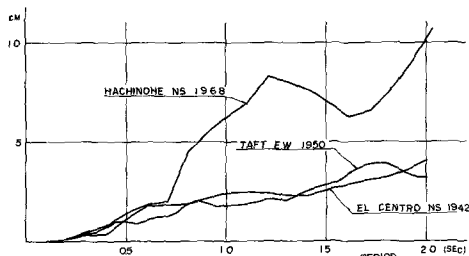


図-2 入力型変位スペクトル

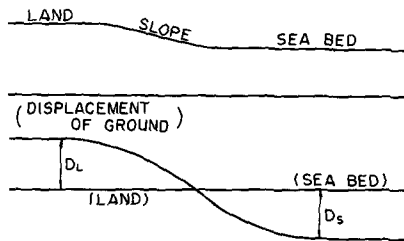
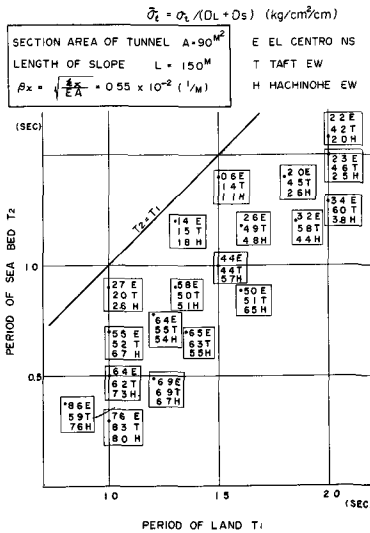
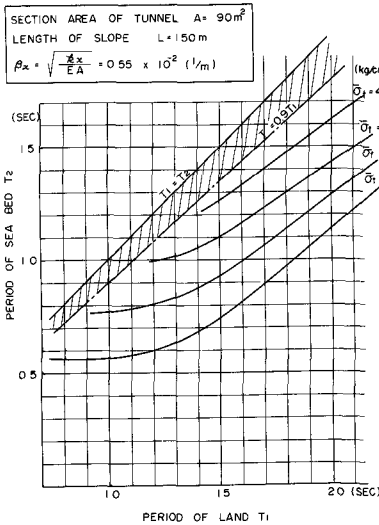


図-3



四-4 最大軸応力 $\bar{\sigma}_t$



四-5 最大軸応力 $\bar{\sigma}_t$

四-5 最大軸応力 $\bar{\sigma}_t$ に対する斜面部地盤の長さの影響を検討した結果である。図の横軸は斜面部地盤の水平距離、縦軸は軸応力 $\bar{\sigma}_t$ と示している。例として地盤Iの周期 1.2秒、地盤IIの周期 0.771秒 (Case 4) の場合、斜面部地盤の水平距離が 30m で 5.63 kg/cm²/cm, 90m で 5.55 kg/cm²/cm, 150m で 5.40 kg/cm²/cm, 210m で 5.29 kg/cm²/cm, 300m で 5.16 kg/cm²/cm, 450m で 4.75 kg/cm²/cm となり、軸応力 $\bar{\sigma}_t$ は斜面部地盤の長さの増加に伴いほぼ直線的に減少している。

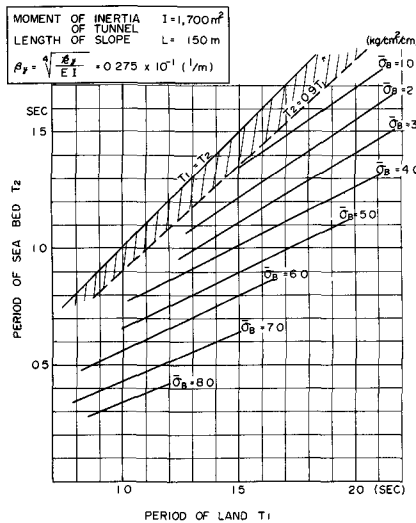
四-7の各Caseの軸応力値と斜面部地盤の長さか 150m の場合の応力値に対する比で示したのが四-8である。この結果によると斜面部の長さか 300m の場合の軸応力 $\bar{\sigma}_t$ は、斜面部の長さか 150m の場合の軸応力の 85% ~ 95% となり斜面部の長さか 450m では 70% ~ 90% になる。同様に、 $\beta_x = 0.3 \times 10^{-2} \text{ (1/m)}$ の場合について検討した結果は $\beta_x = 0.55 \times 10^{-2} \text{ (1/m)}$ の場合とほぼ同様であった。軸応力 $\bar{\sigma}_t$ に対する斜面部地盤の長さの影響を検討した結果を四-9に示す。入力地震波: El Centro

期を地盤I, IIの基本振動周期としたとき、トンネルに発生する $\bar{\sigma}_t, \bar{\sigma}_b$ の値である。E, T, Hの略記号は、各々入力地震波が El Centro, Taft, Hachinohe であることを表している。

本図は入力波の種類によらず、直接算定される $\bar{\sigma}_t$ の値に着しい差異があるに拘らず、これに対応して求めた $\bar{\sigma}_t$ の値は必ずしもまとまっていることを示している。

地盤Iの周期が1.5秒以上の区間で、反り地震波に対する $\bar{\sigma}_t$ の値が他の地震波に対する $\bar{\sigma}_t$ の約2倍になっているのは、図-2に示してある変位スペクトルの形状に関連があるものとみられる。

そこで夫々の基本振動周期に対し、入力地震波の種類に無関係に $\bar{\sigma}_t, \bar{\sigma}_b$ の最大値と対応させこれにもとづいて、等応力線図を描いたものが四-5, 6である。



四-6 最大曲げ応力 $\bar{\sigma}_b$

四-5, 6によれば地盤周期が短かいほど $\bar{\sigma}_t, \bar{\sigma}_b$ は大きく、又地盤Iと地盤IIの周期の差が増大すると応力値は増加すること分かる。

(2) 斜面部地盤の長さの影響 図-7は $\beta_x = 0.55 \times 10^{-2} \text{ (1/m)}$ 斜面勾配を同様入力波を Hachinohe

EWとした場合の軸

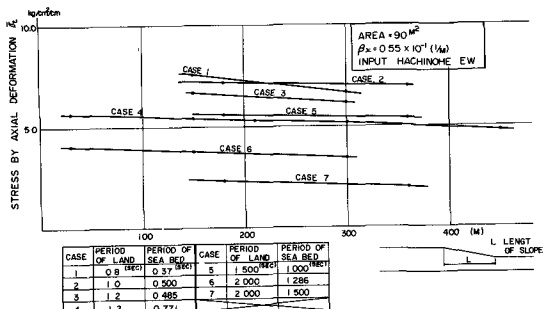


図-7 斜面部地盤の長さの影響

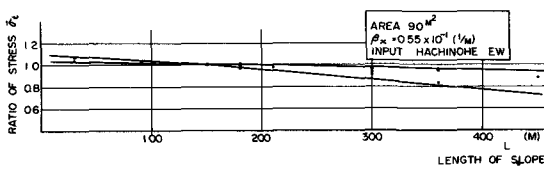
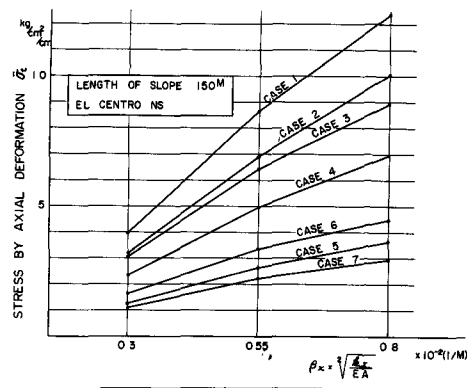


図-8 斜面部地盤の長さの影響

結果によれば、軸応力 $\bar{\sigma}_z$ は β_x の増加に対して直線的には増大せず、その増加率は β_x の増大に伴い減少する傾向がある。これは β_x が無限大になったときに、トンネルの変形が地盤の変形に一致しこの変形による軸応力に漸近することを示している。図-10に示した各Caseの軸応力度を各々 $\beta_x = 0.55 \times 10^{-1}$ (1/m)の場合の応力度の比で表わしたのが図-11である。これによると $\beta_x = 0.8 \times 10^{-2}$ (1/m)の場合の軸応力は $\beta_x = 0.55 \times 10^{-2}$ (1/m)の場合の軸応力の1.3~1.4倍である。図-11の計算値を直線に近似すると、



CASE	PERIOD OF LAND (SEC)	PERIOD OF SEA BED (SEC)	CASE	PERIOD OF LAND (SEC)	PERIOD OF SEA BED (SEC)
1	0.80	0.371	5	1.60	1.171
2	1.20	0.485	6	2.00	1.286
3	1.20	0.771	7	2.00	1.571
4	1.60	0.886			

図-10 β_x の影響

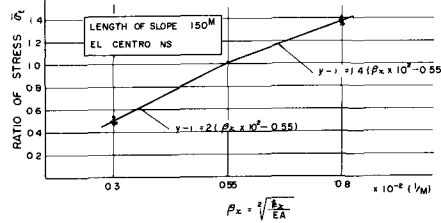


図-11 β_x の影響

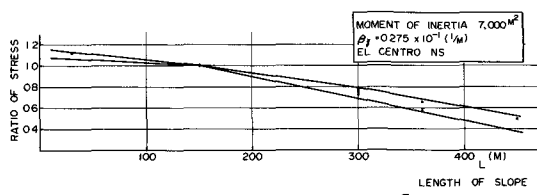
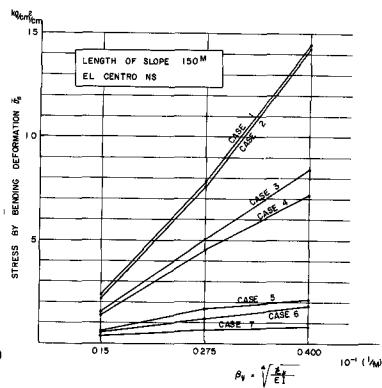


図-9 斜面部地盤の長さの影響

・NS, $\beta_y = 0.275 \times 10^{-1}$ (1/m)の場合である。縁応力の場合も、軸応力の場合と同様に斜面部地盤の長さを増加するとほぼ直線的に減少するものの傾向は著しい。

(3) 地盤のパネ係数及びトンネルの剛度影響
 β_x, β_y を変数にとり、このなトンネルの応力に与える影響を検討した。斜面部地盤の長さは150m、入力地震波はEl Centro NSである。図-10の結果によれば、

縁応力 $\bar{\sigma}_y$ は β_x の増加に対して直線的には増大せず、その増加率は β_x の増大に伴い減少する傾向がある。これは β_x が無限大になったときに、トンネルの変形が地盤の変形に一致しこの変形による縁応力に漸近することを示している。図-10に示した各Caseの縁応力度を各々 $\beta_x = 0.55 \times 10^{-1}$ (1/m)の場合の縁応力度の比で表わしたのが図-11である。これによると $\beta_x = 0.8 \times 10^{-2}$ (1/m)の場合の縁応力は $\beta_x = 0.55 \times 10^{-2}$ (1/m)の場合の縁応力の1.3~1.4倍である。図-11の計算値を直線に近似すると、



CASE	PERIOD OF LAND (SEC)	PERIOD OF SEA BED (SEC)	CASE	PERIOD OF LAND (SEC)	PERIOD OF SEA BED (SEC)
1	0.80	0.371	5	1.60	1.171
2	1.20	0.485	6	2.00	1.286
3	1.20	0.771	7	2.00	1.571
4	1.60	0.886			

図-12 β_y の影響

の増加に対して $\bar{\sigma}_y$ の増加率は増大する傾向にある。Case 1では $\beta_y = 0.44 \times 10^{-1}$ (1/m)の場合の縁応力度は $\beta_y = 0.15 \times 10^{-1}$ (1/m)の場合の応力度の6.5倍にも達している。縁応力が小さい場合(図でCase 5, 7)では β_y の増加に伴い $\bar{\sigma}_y$ の増加率は減少している。