

沈埋トンネルの応答解析について

東京大学生産技術研究所 田村重四郎
首都高速道路公団 岡田郁生
大成建設K.K. ○ 浜田政則

1. まえがき 沈埋トンネルの耐震性を調査するために、地震観測や実験的研究が行われ、これに基いて作られた解析モデルを用いて検討が進められている。今までに、軟弱地盤内に埋設されたトンネルは地盤と略々同様に振動し、トンネル自体の振動はほとんど発生しないこと、従って地盤の動特性の変化がトンネルの挙動に大きな影響を与えることなどが明らかにされている。

ここでは東京港海底トンネルの耐震性に関して行われた検討の結果の一部を報告する。

2. 応答計算モデル

トンネル構造及び埋設地盤の概要

東京港海底トンネルは東京港一航路に建設される長さ

約1kmのトンネルで、図-1に示すように巾37.4m、高さ8.8mの長方形断面のR.C構造である。トンネルの両端部は地上48m、地下25mの立坑に接続している。立坑の水平断面の形状は、ほぼ40mの正形状である。建設地元の地盤の縦断面を図-2に示す。基盤層の深さは大井側AP-30m、海底部AP-40m、13号地側AP-43mであって、若干13号地側へ傾斜している。表面層の厚さは大井側陸上部で43m、海底部で28m、13号地側陸上部では49mとなっている。又、常時微動観測とP・S検層の結果から推定された地盤の卓越周期は大井側陸上部で1.6秒、航路海底部で1.0秒、13号地側陸上部で1.8秒である。表面層は大部分がN値0~5程度の非常に軟い層で構成されている。

(1) 応答計算モデルの作成

トンネル軸に沿った各地元の地盤の卓越周期及び表面層を構成する

各層の弾性係数、ポアソン比を用いて応答計算モデルを作成した。大地震におけるトンネルの安全性を検討するには、歪の大きい領域での地盤の動特性を知らねばならないが、本報告では前述の常時微動及びP・S検層の結果をそのまま使用した。図-3に示すような応答計算モデルの作成は次のように行った。各地盤のせん断1次振動周期及び振動モードは二次元有限要素法を用いてもとめ、この振動周期より各要素の質量 M 及びバネ K を求めた。又、要素相互を連結するバネ K は隣接する二断面のせん断振動より算定した。地盤とトンネルを結ぶバネ K_1 は

図-1 沈埋トンネル横断面図

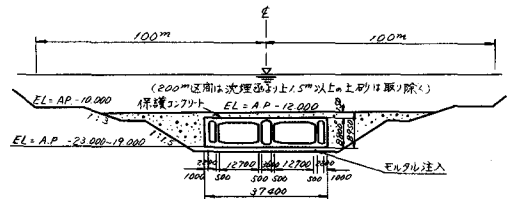
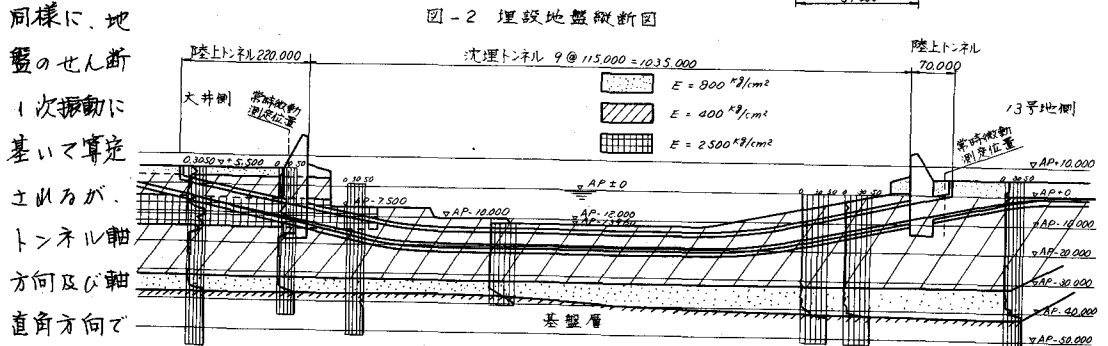
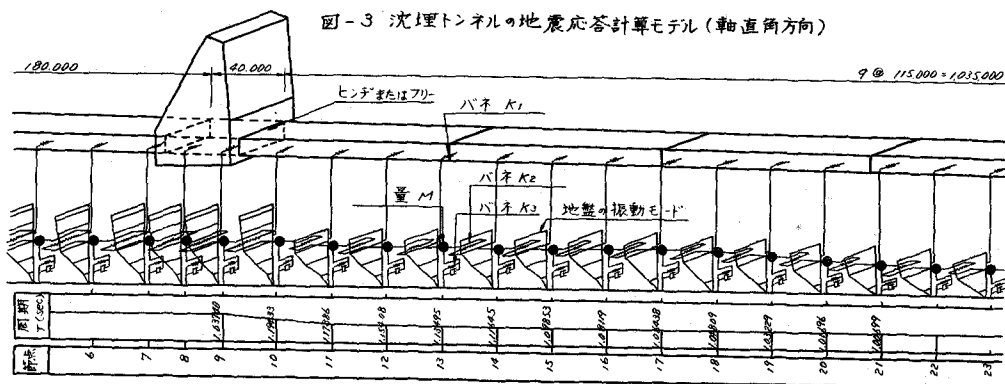


図-2 埋設地盤縦断面図





は各々三次元及び二次元の有限要素法を用いて計算した。地盤の質気間隔はほぼ30mで大井副陸上部より13号地副陸上部まで全体を16の質気に分割している。立坑と埋設トンネルは軸直角方向の振動の場合にヒンジ結合、軸方向の振動の場合は、相互に自由に動きうるものとして解析した。

3. 応答計算

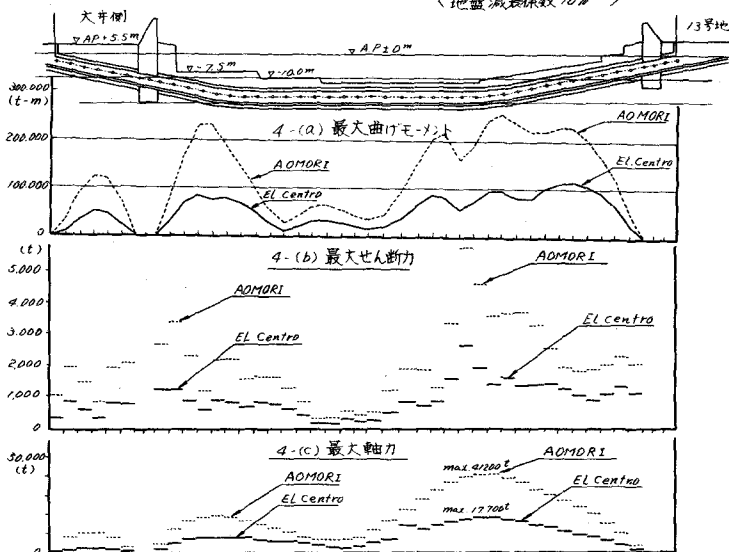
図-3に示すような応答計算モデルに地震波を入力し応答解析を行い、出来るだけトンネルの振動的特性を検討するにため、入力波としては異なった特徴をもつ①E.l centro NS 1940 ②Aomori NS 1968の2波を採用した。E.l centro NS 1940の記録は0.25秒〜0.6秒程度の比較的短周期成分が多く、Aomori NS 1968の記録は、1.0秒前後の比較的長周期の成分を多く含んでいる。入力波の最大加速度は100galとし、各地盤の減衰定数は一律に10%とした。

断面力について

(1) 曲げモーメント

トンネル軸に沿って、その最大曲げモーメントの分布を図-4(a)に示す。

図-4 EL CENTRO, AOMORIによる断面力 (入力波最大加速度100gal 地盤減衰係数10%)



E.l centro NS 1940 と Aomori

NS 1968 では曲げモーメントの大きさに差があるが、曲げモーメントのトンネル軸に沿った分布は非常によく似て型を呈している。せん断力や軸力の分布についても同じことが言える。このことは地盤の基本振動周期が1.0秒〜1.8秒の間にあることもひとつの原因と考えられる。またトンネル軸に沿って、地盤の動特性が地震時に発生する前面力に大きな影響を与えているものと

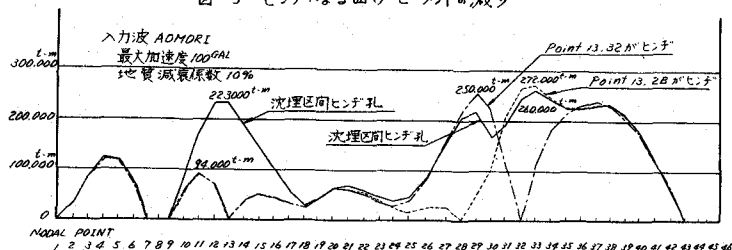
考えられる。曲げモーメントの大きくなる位置は大井副海底部及び、13号地副斜面下部付近にあり、この部分において地盤の動特性が変化しているためであると考えられる。これに対し、地盤の動特性が一様な航路海底部では曲げモーメントは小さい。

(2) セン断力 トンネル軸に沿っての最大せん断力の分布を図-4 (b)に示す。大きなせん断力が発生するのは曲げモーメントの場合と同様に13号地剛の斜面下端部より13号地剛陸上部にわたる部分と大井剛海底部分である。又、せん断力の最大値は13号地剛斜面の下端付近において発生しており、これは曲げモーメントの場合と同様にこの付近において地盤の動特性が変化するに因りである。

(3) 軸力 最大軸力の分布を図-4 (c)に示す。大きな軸力は曲げモーメント、せん断力と同様に地盤の動特性の変化する大井剛海底部、13号地剛海底部において発生する。又、地盤の動特性の一致となる航路海底部では小さい。

(4) ヒンジの効果 前述したように入力地盤波に比較的影響されず、一定の建設地点に対し、

図-5 ヒンジによる曲げモーメントの減少



一定の分布を有する断面力が応答値として得られるならば、これ等に対して耐震性を増す構造が考えられる。この目的のために曲げモーメント、せん断力が比較的大きな値を示す大井剛海底部及び13号地剛海底部にヒンジを設ける場合について試算してみた。

図-3に示す振動モデルの内、Point 13, 32にヒンジを設置した場合とPoint 13, 28にヒンジを設置した場合について検討した。図-5はこの時の最大曲げモーメントを示している。これによると沈埋空間にヒンジを設けることの効果として次のことがあげられる。

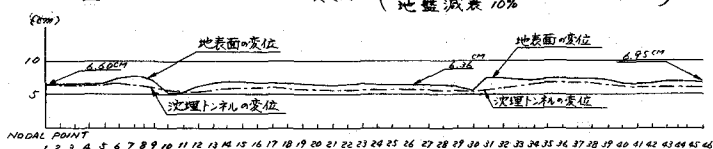
(i) ヒンジはトンネルに発生する曲げモーメント、せん断力を低下させる効果をもつが、その影響範囲は限定されており、本トンネルではヒンジより100 m程度の範囲である。

(ii) ヒンジの存在によりトンネルの変形に対する拘束条件が緩和されるので変形しやすくなり、そのためにヒンジより離れた部分に大きな断面力が発生することがある。

変位について

(1) 最大変位 トンネル軸直角方向に Aomori NS 1968 を入力した時のトンネル軸に沿った

図-6 沈埋トンネル及び地表面の最大変位 (入力波 AOMORI 最大加速度 100 GAL)



地表面及び沈埋トンネルの最大変位の分布を図-6に示す。

これによると地盤の動特性の一致する航路海底部ではほぼ一定値を示し、動特性の変化する13号地剛斜面下端部及び、大井剛海底部では変位分布は変動している。同様な傾向は E.l centro NS 1940 を入力した時にも見られる。

号地剛斜面下端部及び、大井剛海底部では変位分布は変動している。同様な傾向は E.l centro NS 1940 を入力した時にも見られる。

(2) 地盤と沈埋トンネルの相対変位 図-7はトンネル軸直角方向に E.l centro NS 1940 を入力した時の Point 10, Point 22, Point 31 の沈埋トンネルと地表面位置における地盤の変位応答曲線を示す。これによると沈埋トンネルは振動においても周波数特性においても地盤とはほぼ同様な振動をしていることが判るが、Point 10 及び Point 31 のような地盤の動特性が変化する部分

図-7 沈埋トンネル及び地盤の応答曲線 (入力波 EL CENTRO
最大加速度 100 GAL
減衰係数 10%)

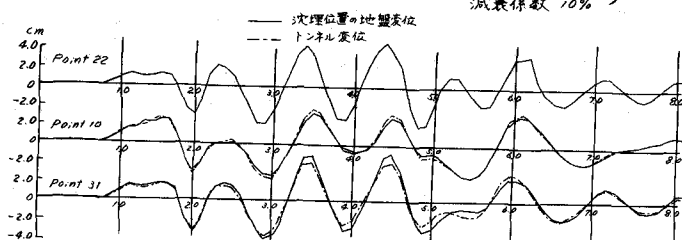
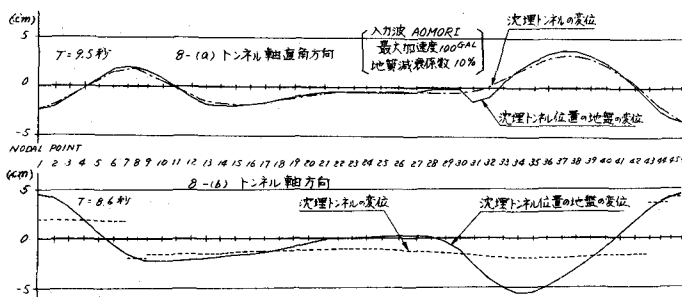


図-8 沈埋トンネル及び地盤の変形曲線



では多少ではあるが振中に差が生じ
たり、又若干の位相のずれが認めら
れる。これに対し、動特性がほぼ一
様な範路海底部の Point 22において
は、地盤とトンネルの相対変位はほ
とんど生じていない。

図-8 (a)に軸直角方向において、
Aomori NS 1968を入力した時の一
定時刻における沈埋トンネルと沈埋
トンネル位置における地盤の変位を
示す。地盤の変位は全体的になめら
かな曲線を描いている。13号地割
海底部の斜面中腹の Point 39~41
は正の方向に大きく変位し、大井側
海底部より13号地割斜面下端に至

る Point 11~30は反対に負の方向に変位している。図-6に示すように各地盤の最大変位はほぼ同
じ程度であるが、地盤の動特性の違いにより一定時刻ではトンネル軸に沿って相対変位が生じており
これが沈埋トンネルに大きな断面力を生じさせる原因と思われる。13号地割斜面下端部(Point
30)においては地盤が局部的に波をうつように変位しているが、沈埋トンネル自体はその曲げ剛性の
のためになめらかに変位している。その他の地盤ではトンネルと地盤とはほぼ同じような変形状態を
示している。このことはトンネル軸直角方向振動においてトンネルの剛性の影響が小さいことを示
している。図-8 (b)はトンネル軸方向の振動における一定時刻のトンネルと地盤の変位である。
地盤の変位曲線とトンネルのそれとは大きな差がみとめられ、このことはトンネル軸方向の剛性の
影響が大きいことを示している。

4 結 論

- (1) 図-1に示すような比較的大型断面を有する沈埋トンネルにおいては、トンネル軸方向に働く
引張-圧縮力による応力と軸直角方向の変位による曲げ応力とはほぼ同程度である。
- (2) ヒンジの影響範囲は限定されており又、近接して他の部分に大きな断面力を生じすることもある
ので、設置に関しては位置や間隔について慎重な配慮が必要である。

5 あとがき

本報告は首都高速道路公団東京湾海底トンネル耐震分科会が行った研究成果の一部である。これに
協力された委員各位並びに幹事各位に謝意を表して筆を擱きたい。

参考文献

- (1) 田村重四郎、岡本壽三他「沈埋トンネルの地震観測」オ11回地震工学研究発表会 1971
- (2) 田村重四郎、他「沈埋トンネルの模型振動実験」オ11回地震工学研究発表会 1971
- (3) 浜田政則他「沈埋トンネルの地震応答計算法」オ26回土木学会全国大会オ工部門