

護岸近傍の埋設トンネル横断面の耐震性評価

河野博通¹・清宮理²

¹ 学生会員 早稲田大学大学院理工学研究科 (〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1 51 号館 16 階)

² フェロー会員 工博 早稲田大学理工学部教授 (〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1 51 号館 16 階)

埋設トンネルの横断面の耐震性評価は通常応答変位法により行われるが、沖合人工島の護岸部に埋設トンネルが建設される場合、応答変位法で想定している水平地盤と異なり地形と土質条件が変化する。この変化が埋設トンネルの横断面の断面力にどのような影響を及ぼすか、鉄筋コンクリート部材と周囲地盤の材料非線形性の履歴特性を考慮した FEM 動的応答解析及び応答変位法を実施し、護岸からどの程度離れれば、応答変位法で耐震性評価をしても良いか検討した。護岸近傍では、動的応答解析は水平地盤の約 2 倍の断面力がトンネル部材に算定された。また、動的応答解析に比べて応答変位法は大きな断面力が算定され、応答変位法を護岸部に適用する際には周辺地盤の構成に注意が必要である。

Key Words : embedded tunnel, revetment, cross section, response analysis

1.はじめに

海上空港等の人工島護岸近傍に埋設トンネルを建設する場合がある。水平地盤における埋設トンネルの横断面の耐震設計は、通常応答変位法で行われているが、本研究で解析対象とする護岸近傍の地盤は複雑な地盤構成をなしており応答変位法が適用できないと考えられる。そこで地盤及び埋設トンネルの材料非線形性を考慮した FEM 動的応答解析、応答変位法を行いレベル 2 クラスの地震に対する埋設トンネルの耐震性を検討し、応答変位法が適用できるか考察する。

2.埋設トンネルと表層地盤のモデル化

解析対象とする埋設トンネルの横断面図を図 1 に示す。埋設トンネルは幅 29.5m、高さ 10m の左右対称 2 連ボックスガレバート形式の RC 形式であり、

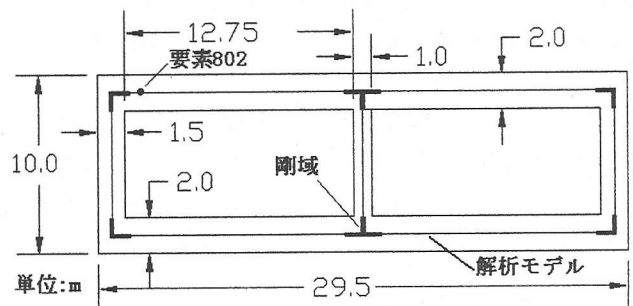


図 1 埋設トンネルの横断面図

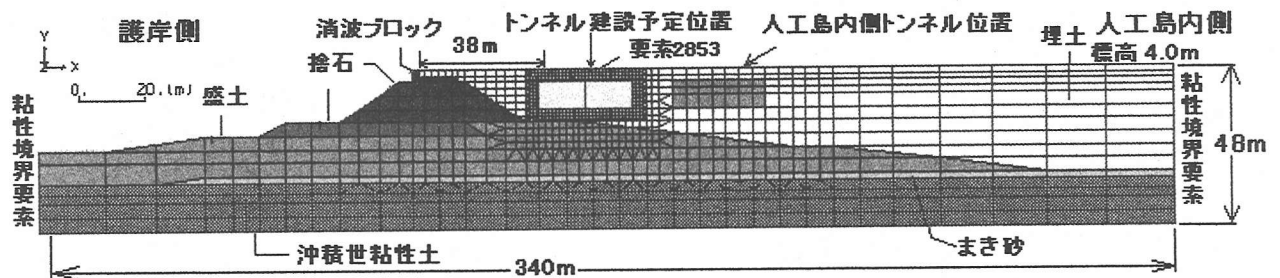


図 2 トンネル周辺地盤

3.入力地震動

入力地震動として、港湾区域のレベル 2 地震動を想定した波形を用いる。1995 年兵庫県南部地震でポートアイランドの地下 - 83m で観測された加速度波形（以下神戸波）と 1968 年十勝沖地震で八戸港で観測された加速度波形（以下八戸波）を 2E として解析モデルの基盤面に入射する。今回は人工島から断層面までの距離は特に特定しておらず、観測波を振幅調整せずに使用した。ステップ間隔は 0.01 秒、神戸波のステップ数は 2000、八戸波のステップ数は 1900 である。図 5 及び 6 に神戸波、八戸波の加速度時刻歴を示す。

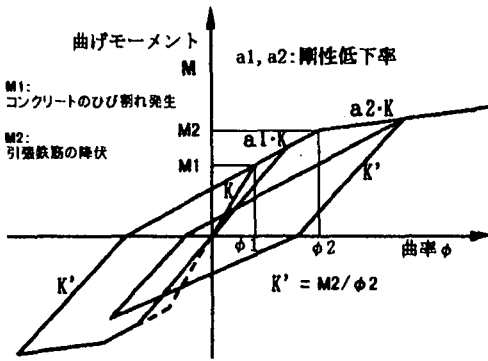


図 3 武藤モデル

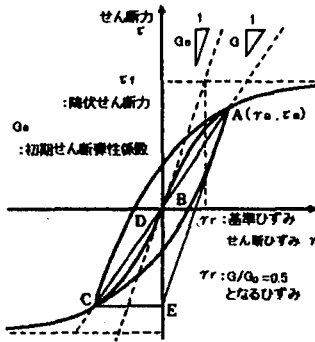


図 4 Hardin - Drnevich 曲線

土かぶり厚は 4m である。この埋設トンネルを 80 個の梁要素にモデル化し、曲げに関して図 3 に示すデグレイトングトリリニア型の武藤モデル、せん断に関しバイリニア型の材料非線形性を考慮する。また、図 2 に示すトンネル周辺地盤を平面ひずみ要素でモデル化し、図 4 に示す Masing の法則に従う Hardin - Drnevich 曲線により材料非線形性の履歴特性考慮する。平面ひずみ要素数は 1113 個とする。人工島内側は水平地盤をなしているが、護岸側には消波ブロック、捨石、盛土が設けられ、地盤が階段状に斜めに切れ落ちている。地盤モデル側面は粘性境界要素を設け水平ローラーで固定し、底面は剛結合とする。また、- 44m 以下の洪積世砂層を工学的基盤とした。表 1 に表層地盤の物性値を示す。

表 1 表層地盤の物性値

土質	深さ (m)	G ₀		ν	γ _t	
		(m)	(kN/m ²)		(kN/m ²)	× 10 ⁻⁴
人工島内側地盤	盛土	4 ~ 2	82784	0.49	19.42	1.69
	盛土	2 ~ 0	49599	0.49	19.23	1.97
	盛土	0 ~ -2	49599	0.49	19.23	1.97
	盛土	-2 ~ -8	49599	0.49	19.23	1.97
	盛土	-4 ~ -8	43988	0.49	20.50	2.66
	盛土	-8 ~ -12	50090	0.49	20.70	2.72
	盛土	-12 ~ -18	58752	0.49	20.90	2.94
	盛土	-18 ~ -20	88189	0.49	21.09	4.44
	盛土	-20 ~ -24	80079	0.49	21.29	3.40
	盛土	-24 ~ -28	82549	0.49	21.58	5.40
	粘土	-28 ~ -30	102887	0.49	19.23	8.93
	粘土	-30 ~ -33	158726	0.49	19.19	22.0
	粘土	-33 ~ -36	110431	0.49	16.78	22.0
	粘土	-36 ~ -40	105487	0.49	17.96	22.0
	粘土	-40 ~ -44	121418	0.49	18.74	22.0
	基盤	-44 ~	298753	-	19.62	7.49
護岸側地盤	捨石	0 ~ -4	201809	0.45	17.66	3.87
	捨石	-4 ~ -8	201809	0.45	17.66	3.87
	捨石	-8 ~ -12	201909	0.45	17.66	3.87
	捨石	-12 ~ -18	149053	0.45	17.66	3.87
	盛土	-18 ~ -20	91233	0.49	21.48	5.40
	盛土	-20 ~ -24	112892	0.49	21.88	5.40

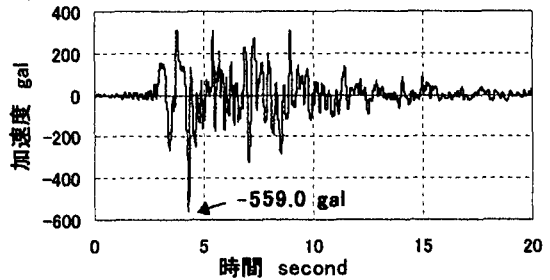


図 5 神戸波の加速度時刻歴

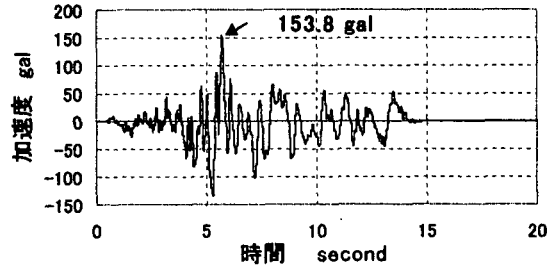


図 6 八戸波の加速度時刻歴

4.解析の方法

(1) 動的応答解析

解析を行う際には時刻歴で積分を行い、積分方法は Newmark-β法 (β = 1/4) とする。解析は FEM 汎用プログラム TDAPⅢを用いる。地盤要素の節点と梁の要素節点を共有させる。地盤及びトンネルの減衰は Rayleigh 減衰で系の 1 次固有振動数約 1.1Hz と 2 次固有振動数とで減衰比が 0.05 となるように設定する。尚、地盤の液状化や不等沈下及び地盤とトンネルの剥離・すべりについては考慮しない。

(2) 応答変位法

応答変位法を行う場合は、図 7 に示す手順に従って解析モデルを作成する。埋設トンネルを考慮しない表層地盤から地盤バネ算定モデルを作成し、図 8

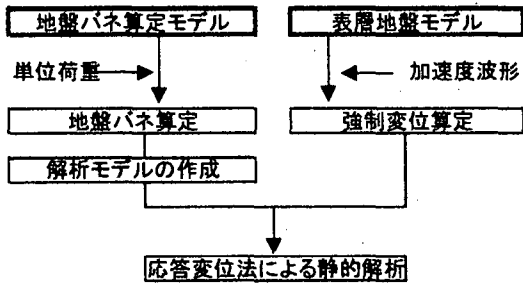


図7 応答変位法モデルの作成手順

に示すように求めたい地盤バネの方向に単位荷重を加え、変位と荷重の関係から地盤バネを算定する。梁要素と地盤要素を地盤バネ要素を用いて連結させる。地盤バネは、水平方向76個、鉛直方向76個である。そして、表層地盤モデル下端に加速度波形を入力し、護岸側の側壁の上部と下部の相対変位が最大となる時刻の変位から相対変位を算定し、バネ端部に入力する強制変位とする。相対変位基準節点は護岸側の側壁下部とする。応答変位法による解析モデルを図9示す。また、護岸近傍の水平方向地盤バネ定数分布を図10に示す。

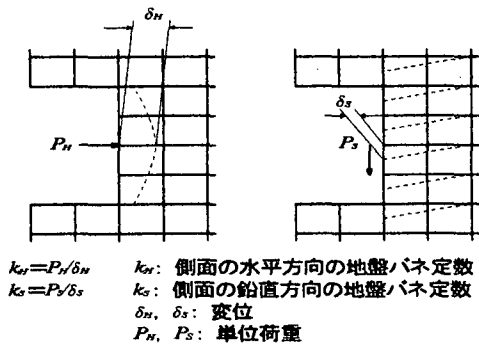


図8 地盤バネの求め方

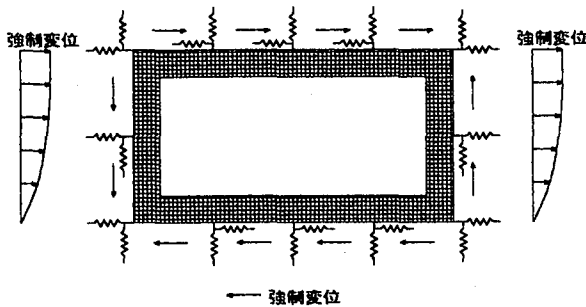


図9 応答変位法モデル

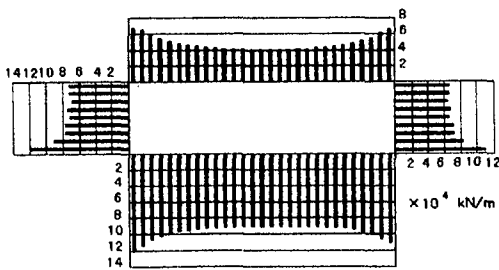


図10 護岸近傍の水平方向地盤バネ定数分布

5.解析ケース

護岸から埋設トンネル間までの距離の違いと地震波の違いによる動的応答解析と応答変位法の結果の相違を調べるため、表3に示す12ケースの解析を行う。埋設トンネルは護岸からは38m離れた(護岸側の側壁まで)位置に建設すると想定する。

表2 解析ケース

地震波	ケース	条件	解析方法
KD-2	護岸より82m(人工島内側)		
KD-3	護岸なし(水平地盤)		
八戸波	KS-1	護岸より38m(護岸近傍)	応答変位法
	KS-2	護岸より82m(人工島内側)	
	KS-3	護岸なし(水平地盤)	
	HD-1	護岸より38m(護岸近傍)	動的応答解析
	HD-2	護岸より82m(人工島内側)	
	HD-3	護岸なし(水平地盤)	
八戸波	HS-1	護岸より38m(護岸近傍)	応答変位法
	HS-2	護岸より82m(人工島内側)	
	HS-3	護岸なし(水平地盤)	

6.解析結果

図11に表層地盤モデルにおけるトンネル中央位置における水平方向最大変位を示す。埋設トンネル建設標高は+1~-9mである。

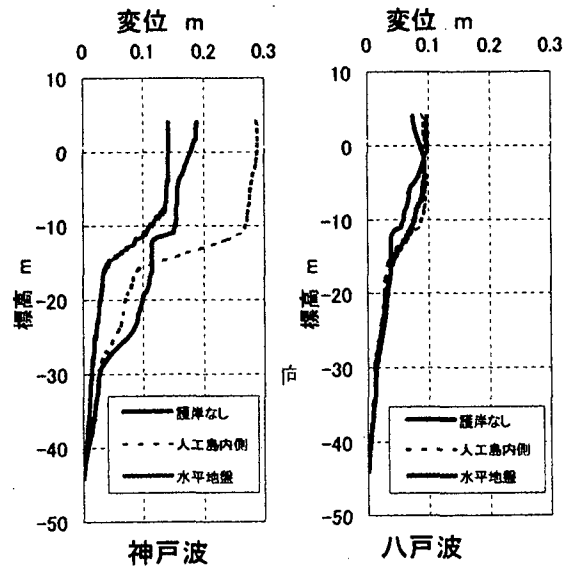


図11 水平方向最大変位

表3に曲げモーメントに関する解析結果を示す。曲げモーメントに関して、動的応答解析は神戸波と八戸波を比べると神戸波の方が最大値が大きくなり、護岸から離れる程値が小さくなった。護岸がある場合(護岸より38m)とない場合を比べた場合、護岸があると約2倍の断面力が計算された。応答変位法は動的応答解析に比べて大きな値を計算したが、

表3 解析結果 (曲げモーメント)

解析ケース		KD-1	KD-2	KD-3	HD-1	HD-2	HD-3	KS-1	KS-2	KS-3	HS-1	HS-2	HS-3	
最大相対変位時刻 (sec)		動的解析のため算定せず							8.31	7.85	11.35	5.64	6.49	5.72
上床版	護岸側	側壁側	1881	1495	862	1437	885	450	1639	2644	1103	2413	1917	1500
		中央	871	759	500	659	524	224	2506	1993	347	1215	871	874
		中柱側	1218	1112	219	936	468	173	2652	3927	296	2765	1173	147
	島側	中柱側	985	975	185	838	601	159	2391	3593	121	2157	609	135
		中央	795	649	504	466	333	224	915	1404	780	1426	553	855
		側壁側	983	1329	841	962	854	447	2400	2524	1497	2324	574	1486
下床版	護岸側	側壁側	985	1145	1074	771	814	519	2742	2989	2835	1762	1464	2826
		中央	858	778	695	828	702	280	1828	909	709	1453	166	482
		中柱側	660	606	201	604	337	168	1802	1639	554	1752	669	324
	島側	中柱側	668	513	186	665	474	158	2018	1708	265	2499	1351	359
		中央	1218	1027	685	782	404	280	2038	1575	969	108	720	479
		側壁側	1740	1306	1056	1103	711	512	2483	2872	2669	2951	2832	2827
側壁	護岸側	上部	986	731	704	831	497	379	1251	1960	1469	1253	1203	1463
		下部	1293	970	649	1020	663	379	1159	1917	1474	1939	1899	1678
		中柱側	899	766	680	768	440	372	1742	1810	1468	1769	1281	1464
	島側	上部	841	756	630	622	420	374	2788	155	1523	1801	1012	1677
		下部	381	355	352	348	339	311	433	183	426	397	415	427
		中柱側	380	357	353	352	340	320	431	106	427	397	417	427

M1:コンクリートのひび割れ発生 M2:鋼材の降伏 単位 : kN・m

応答変位法は距離の影響が動的応答解析とは異なっていた。これは護岸から 38m 離れたケース KS - 1 の最大相対変位の発生時刻は、8.31sec、82m 離れたケース KS - 2 は 7.85 秒とずれており、かつ局所的にケース KS - 2 の方が大きな相対変位を計算し曲げモーメントの最大値が大きくなったと考えられる。最大相対変位時刻が異なるのは、トンネル中央断面の固有 1 次周期は護岸から 38m の場合で 0.960Hz、護岸から 82m で 0.982Hz と異なるからであると思われる。また、動的応答解析は埋設トンネル各部位にはコンクリートのひび割れ発生する値が、応答変

位法は鋼材が降伏する値が計算された。両解析方法でもコンクリートの圧壊に至る値は計算されなかった。

一方、せん断力に関しても、曲げモーメントと同様な傾向がみられた。しかし、埋設トンネル各部位がせん断破壊するような値は計算されなかった。

図 12 にケース KD - 1 の上床版(要素 802)の曲げモーメント時刻歴、図 13 にケース KD - 1 のトンネル中央部より 1.5m 上部の地盤要素 2853 の $\tau - \gamma$ 履歴曲線を示す。図 14 にケース KD - 1 の 5.26sec の埋設トンネルの曲げモーメント分布を示す。

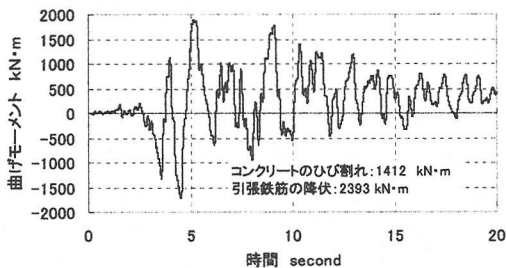


図 12 KD - 1 上床版(要素 802)の曲げモーメント時刻歴図

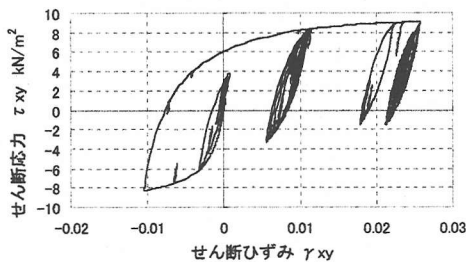


図 13 ケース KD - 1 地盤要素の 2853 の $\tau - \gamma$ 履歴曲線

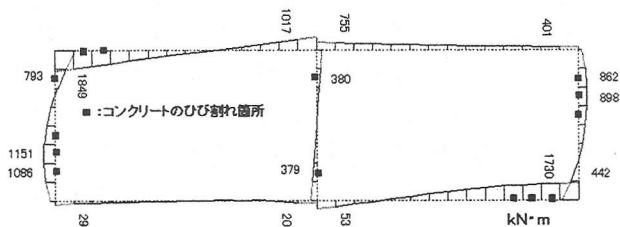


図 14 ケース KD - 1 5.26sec 曲げモーメント分布

7.まとめ

(1) 護岸からの距離が埋設トンネルに発生する断面力に影響することが分かり、動的応答解析で護岸がある場合(護岸より 38m)とない場合を比べた場合、護岸があると約 2 倍の断面力が計算された。

(2) 応答変位法で動的応答解析より大きな断面力を計算した。しかし、応答変位法で護岸近傍での埋設トンネルの断面力は人工島内側より小さく計算された。埋設トンネルへの護岸部での応答変位法の適用は、さらに検討が必要である。

参考文献:

- 1) 土木学会:実務者のための耐震設計入門, 1997.9, PP6-1~6-18,
- 2) 土木学会:動的解析と耐震設計 [第 1 巻] 地震動・動的物性, 1995, pp83 - 113,
- 3) 大塚浩司:鉄筋コンクリート工学, 技報出版, 1997