

多径間アーチ断面 (2連メガネトンネル) における 耐震設計手法の適用性と構造特性に関する検討

新井雅之¹・脇田一²・森崎啓³・新田勸⁴・福澤伸彦⁵・馬渡あかね⁶

^{1~3}正会員 パシフィックコンサルタンツ株式会社大阪本社交通技術部 (〒532-0012 大阪市淀川区西中島4-3-2)

^{4~6}正会員 工修 パシフィックコンサルタンツ株式会社大阪本社交通技術部 (〒532-0012 大阪市淀川区西中島4-3-2)

近年のトンネル技術の進歩に伴い、都市部や市街地における2連や4連といった大規模なメガネトンネルの計画が増えてきている。このようなアーチ構造を持つトンネル構造物は、一般に山岳工法で施工されるため、耐震設計が実施されないことが多く、耐震設計手法の適用性や耐震設計上の構造特性について十分把握できていないのが現状である。

本研究では、未固結地盤に施工されるセンターピラー共有型2連メガネトンネルを対象として、2次元FEM系静的解析手法 (応答震度法) と2次元非線形動的解析手法 (動的解析) により、レベル1、レベル2地震動に対する耐震検討を実施し、その検討結果を比較することにより、当該構造断面の耐震設計手法として「応答震度法」を採用する場合の適用性と問題点について確認した。また、これらの検討結果に基づいて、耐震設計上の構造特性について検討した結果、今回のモデルと同様の構造を持つトンネル構造物において、レベル2地震動を対象とする場合には、適切な手法による耐震検討が必要であることを確認した。

Key Words : tunnel, earthquake resistant design, static analysis, dynamic analysis, nonlinear

1. はじめに

近年のトンネル技術の進歩に伴って、未固結地盤に施工される2連や4連といった大規模な多径間トンネルの計画が増えてきている。一般に、このようなトンネル構造物は山岳工法で施工されるため、耐震設計を実施していないことが多く、耐震設計上の構造特性について十分把握できていないのが現状である。

一般に、地下構造物の耐震解析手法には大きく分けて静的解析手法と動的解析手法がある。動的解析の場合、高度な解析技術と応答計算に要する膨大な労力が必要であるため、トンネルのような連続した地下構造物の横断方向の耐震設計法としては、設計作業の簡便さから静的解析手法の一つである応答変位法 (梁・バネモデルによる) が、各種地下構造物の耐震設計指針類に採用されてきた。

しかし、応答変位法は、地下構造物の地震時挙動のメカニズムに基づいた比較的簡便な計算手法ではあるものの、複雑なトンネル・地盤間の相互作用を地盤バネという簡易な力学モデルで表現する必要がある。対象となる地盤や構造物の形状によっては地盤バネの合理的な設定手法が未だに確立されていないという問題点がある。一方、最近のトンネル横断方向の耐震設計では、トンネル・地盤間の相互作用を、単純なバネ要素でモデル化するのではなく、構

造物・周辺地盤系を2次元FEMでモデル化し、このモデルに地震荷重を静的に作用させることによって、地下構造物に生じる地震時断面力を求めるFEM静的解析手法が注目されている。

本研究では、未固結地盤に施工されるセンターピラー共有型2連メガネトンネルを対象として、2次元FEM系静的解析手法 (以下、応答震度法) と2次元非線形動的解析手法 (以下、動的解析) を用いたレベル1、レベル2地震動に対する耐震検討を実施するとともに比較検討を行った。これにより、当該構造断面における応答震度法の適用性および耐震設計上の構造特性について確認したので報告する。

2. 検討対象断面と検討ケース

今回の検討対象とするトンネル構造物は、片側2車線程度の道路トンネルを想定し、図-1に示すようなセンターピラー共有型2連メガネトンネル断面とした。

地盤条件については都市部の未固結地盤を想定し、硬質地盤として洪積砂層 (N=60)、軟弱地盤として沖積砂層 (N=20) の2種類の地盤を設定した。トンネルの土被りは5.0mとした。地盤条件を表-1に示す。

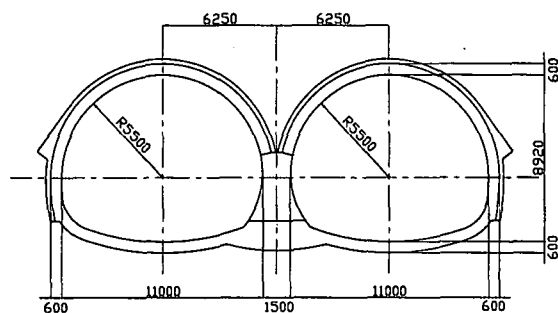


図-1 2連メガトンネル断面図

表-1 地盤条件

項目	単位	硬質地盤 (砂質土N=60)	軟弱地盤 (砂質土N=20)
単位体積重量	γ kN/m^3	19	19
内部摩擦角	ϕ $^\circ$	45	32
静止土圧係数	K_0	0.293	0.465
変形係数	E kN/m^2	165000	55000
ポアソン比	ν	0.227	0.317
せん断弾性係数	G kN/m^2	67000	21000
動的変形係数	E_d kN/m^2	341000	103400
動的ポアソン比	ν_d	0.45	0.45
せん断弾性波速度	V_s m/s	400	220
初期せん断弾性係数	G_0 kN/m^2	310000	94000

3. 応答震度法の解析条件と解析モデル

(1) 応答震度法の概要

応答震度法では、周辺地盤を等価剛性を与えた2次元平面ひずみ要素で、トンネル構造物を梁要素でモデル化する。次に、自由地盤の一次元地震応答解析から得られる地震応答（絶対加速度）を重力加速度で除すことにより換算震度を求め、各節点の受け持つ重量を掛け合わせて慣性力を算出し、これを節点力荷重として加えることにより、構造物に作用する地震時の影響を評価する。構造物には常時荷重に対する初期断面力を設定するものとし、上記の地震時荷重を荷重増分法で与え、構造部材の非線形性を考慮して耐震設計を行う。

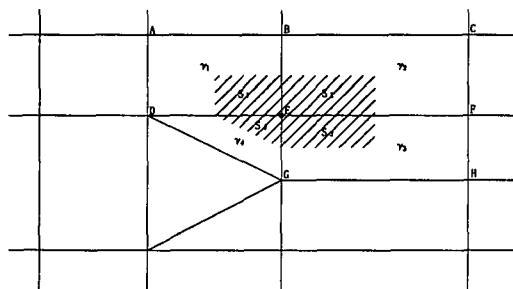


図-2 節点の分担範囲の概念

(2) 解析条件

応答震度法の解析条件は以下のとおりとした。

- ・入力地震動は次の通りとし、基盤面への入力境界波入力（E+F）とした。

レベル1地震動

「駐車場設計・施工指針 同解説」の速度応答スペクトル（ $h=0.10$ ）に既往の代表的な強震記録である開北橋記録波形を振動数領域で振幅調整した波形（図-3）。

レベル2地震動

平成7年兵庫県南部地震で実測されたJR鷹取駅での加速度強震記録を工学的基盤面に引き戻した波形（図-4）。

- ・構造部材の非線形特性は、「コンクリート標準示方書」に準拠した鉄筋コンクリートのM- ϕ 特性（軸力は常時荷重作用時の値）を与えた。
- ・応答震度法に用いる地盤の剛性は、1次元地震応答解析により得られた収束剛性とした。
- ・応答震度法で考慮する荷重は、1次元地震応答解析で求めた絶対加速度（構造物上下端の相対変位が最大となる時刻の値）を、重力加速度で除すことにより換算震度を求めて慣性力を算出し、これを節点力荷重として荷重増分法で与えるものとした。

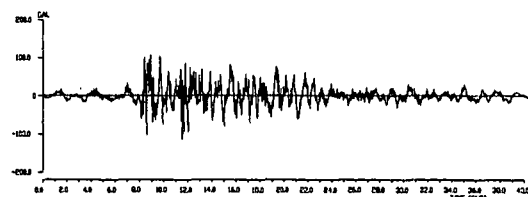


図-3 レベル1地震波形（素材波：開北橋記録波形）

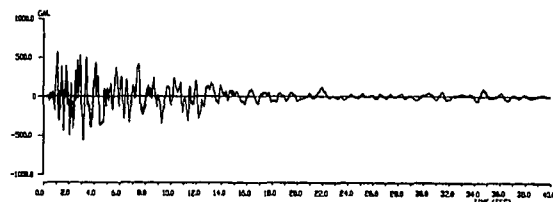


図-4 レベル2地震波形（素材波：JR鷹取駅記録波形）

(4) 解析モデル

応答震度法の解析モデルを図-5に示す。

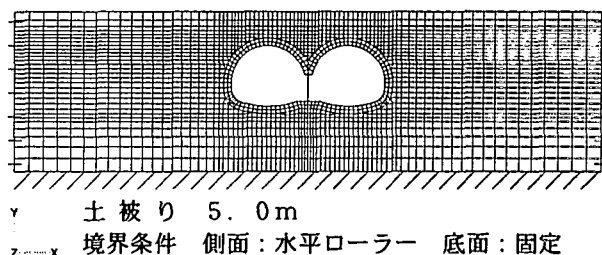


図-5 応答震度法解析モデル

4. 動的解析の解析条件と解析モデル

(1) 解析条件

- 動的解析の解析条件は次のとおりとした。
- ・動的解析は、2次元FEMモデルを用いた逐次積分法による応答解析とした。
 - ・初期断面力は、「応答震度法」と同じ値とした。
 - ・地盤は、2次元平面ひずみ要素でモデル化し、非線形特性は、各層におけるひずみ依存特性（土木研究所資料より設定）を考慮し、修正R-Oモデルで評価した。
 - ・構造部材の復元力特性には、コンクリートのひび割れ、鋼材の降伏およびコンクリートの圧壊などによる部材剛性の低下を考慮できる剛性低下型Tri-linearモデルの代表的な修正武田モデルを適用した。
 - ・境界条件については、側面を粘性境界、底面を固定とした。
 - ・入力地震動は、レベル1、レベル2とも応答震度法と同じ地震波形とし、基盤面への境界波入力（E+F）とした。

(2) 解析モデル

動的解析の解析モデルを図-6に示す。

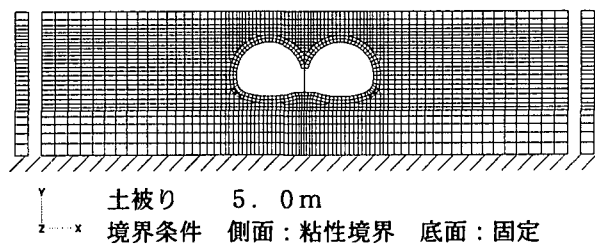


図-6 動的解析の解析モデル

5. 解析結果

(1) 応答震度法と動的解析結果の比較

a) レベル1地震動

レベル1地震動に対する解析結果によると、応答震度法では、硬質地盤、軟弱地盤ともにMy（降伏曲げモーメント）を越える地震時断面力は発生しておらず、動的解析についてもほぼ同様の結果となっている。また、発生断面力および構造物上下間の相対変位は、応答震度法と動的解析でほぼ同等の値となっており、構造物の非線形性に起因する剛性低下が比較的少ない範囲において、両者は実用上同等の結果となった。（表-2、表-3）

b) レベル2地震動

レベル2地震動に対する解析結果によると、応答震度法および動的解析の両者において、硬質地盤、軟弱地盤の両方でMu（曲げ耐力）を越える地震時断面力が発生している。断面力は全体的には同様の分布となっているが、底部とセンターピラーとの接

続部付近等で分布が異なっている。また、動的解析における構造物上下間の相対変位は、応答震度法の1.4～1.8倍程度となっており、構造物の非線形性に起因する剛性低下が進んだ場合には、両者は異なる結果を示している。（表-2、表-4、図-9～図-14）

(2) 耐震設計上の構造特性について

2連メガネトンネルの耐震設計上の構造特性としては次のことが挙げられる。

- ・地震時荷重を受けるとアーチ部の軸力が増大する。（今回は常時の2倍程度）
- ・センターピラー部に大きな断面力が発生する。
- ・レベル2規模の地震時荷重を受けた場合、底部およびアーチ部にも塑性化がおよぶ可能性がある。

表-2 構造物上下端の相対変位（単位：cm）

地震動	地盤	応答震度法	動的解析
レベル1	硬質地盤	0.26	0.22
	軟弱地盤	0.58	0.60
レベル2	硬質地盤	2.91	4.21
	軟弱地盤	5.56	10.02

表-3 発生断面力（レベル1，軟弱地盤）

断面力	単位	位 置	常時	① 応答震度法	② 動的解析	②/①
軸 力	(kN)	脚 部	878.5	1029.3	978.0	0.95
		アーチ部	952.3	1261.9	1178.0	0.93
		底部(左)	796.0	603.9	643.6	1.07
		底部(右)	796.0	1015.7	961.5	0.95
		センターピラー部	2221.5	2207.6	2204.0	1.00
曲げモーメント	(kN・m)	脚 部	374.0	378.5	363.1	0.96
		アーチ部	124.2	164.0	141.1	0.86
		底部(左)	862.5	315.1	304.0	0.96
		底部(右)	862.5	854.1	841.6	0.99
		センターピラー部	0.0	1305.7	1134.5	0.87
せん断力	(kN)	脚 部	256.5	254.6	251.2	0.99
		アーチ部	85.7	180.1	170.9	0.95
		底部(左)	481.2	325.2	340.9	1.05
		底部(右)	481.2	571.0	535.9	0.94
		センターピラー部	0.0	385.9	314.9	0.82

表-4 発生断面力（レベル2，軟弱地盤）

断面力	単位	位 置	常時	① 応答震度法	② 動的解析	②/①
軸 力	(kN)	脚 部	878.5	1215.7	1279.6	1.05
		アーチ部	952.3	1978.1	1732.9	0.88
		底部(左)	796.0	383.8	403.7	1.05
		底部(右)	796.0	1245.4	1037.6	0.83
		センターピラー部	2221.5	2184.6	2184.6	1.00
曲げモーメント	(kN・m)	脚 部	374.0	622.0	616.3	0.99
		アーチ部	124.2	332.0	229.8	0.69
		底部(左)	862.5	-53.6	-884.9	16.50
		底部(右)	862.5	1126.6	628.0	0.56
		センターピラー部	0.0	2185.3	2267.8	1.04
せん断力	(kN)	脚 部	256.5	336.7	309.2	0.92
		アーチ部	85.7	210.5	247.3	1.17
		底部(左)	481.2	296.6	455.2	1.53
		底部(右)	481.2	565.4	624.8	1.10
		センターピラー部	0.0	908.3	802.6	0.88

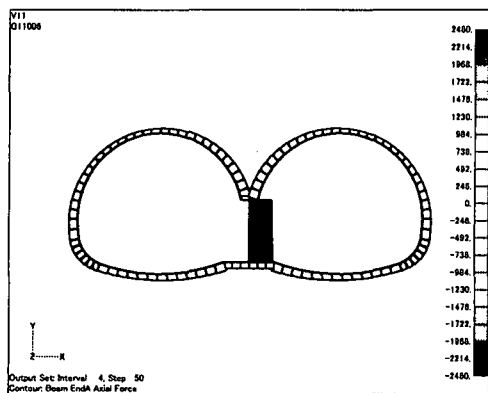


図-9 軸力(レベル2 軟弱 常時)

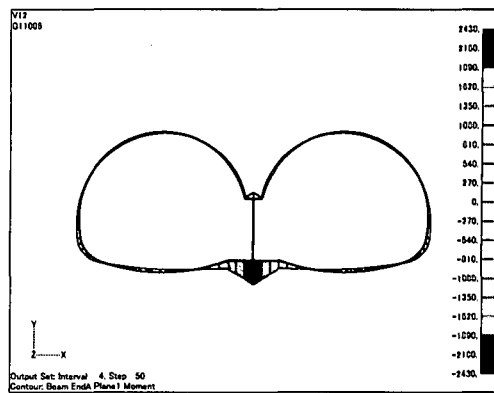


図-10 曲げモーメント(レベル2 軟弱 常時)

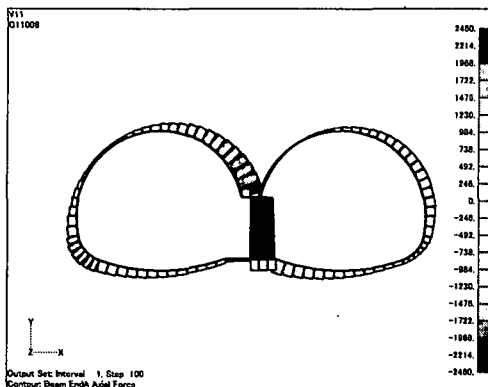


図-11 軸力(レベル2 軟弱 応答震度法)

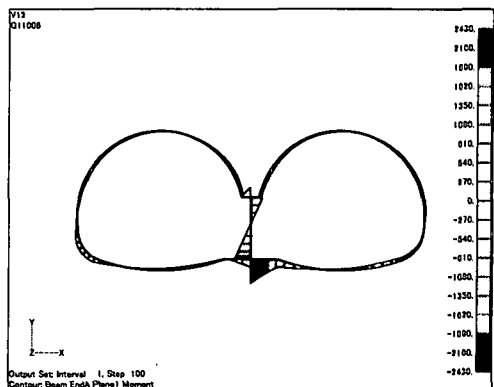


図-12 曲げモーメント(レベル2 軟弱 応答震度法)

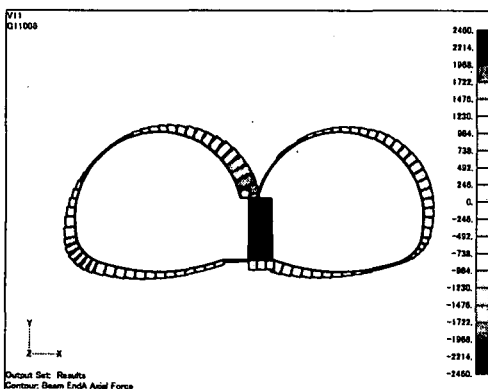


図-13 軸力(レベル2 軟弱 動的解析)

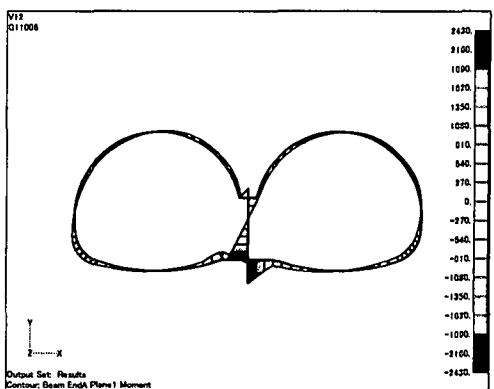


図-14 曲げモーメント(レベル2 軟弱 動的解析)

6. まとめ

今回、センターピラー共有型2連メガネトンネルを対象として耐震検討を実施した結果、次のことが確認できた。

- ・「応答震度法」をセンターピラー共有型2連メガネトンネルの耐震設計手法に採用する場合、対象とする地震動が、レベル1地震動であれば「動的解析」と同等の解析結果となるが、レベル2地震動では構造物の塑性化が進むため、異なる解析結果となる。
- ・センターピラー共有型2連メガネトンネルがレベル2地震動相当の地震時荷重を受けた場合、アーチ部に非常に大きな軸力が発生するとともに、底部およびアーチ部の塑性化が進む。

今後は、地震時荷重による構造物の塑性化が進んだ場合における「応答震度法」の適用性について検討していくこととともに、当該断面における耐震設

計上の構造特性を踏まえた合理的な構造形式を提案していきたいと考えている。

謝辞：本研究の解析部分について、ご協力をいただきました、株式会社CRC総合研究所科学システム事業部の上山誠司主任に対し感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 南荘淳，森喜仁，石橋照久，森崎啓，馬渡あかね：掘削深さの異なる上下分離掘削道路トンネルの耐震設計に関する一考察，土木学会第55回年次学術講演会講義集I-B484，2000。
- 2) 大島義隆，松井幹雄，西村和夫，岩楯敏広：超大断面扁平トンネルへの応答変位法の適用性に関する検討，土木学会第55回年次学術講演会講義集I-B488，2000。
- 3) 建設省土木研究所資料・第1778号，1982，2。
- 4) 建設省土木研究所資料・大規模地下構造物の耐震設計法・ガイドライン（案）平成4年3月