

地下構造物の応答震度法を用いた耐震設計と動的非線形解析の比較

福島幸司¹・中野 聡¹・金 忠¹

¹正会員 (株)福山コンサルタント 東日本事業部 設計部 (〒136-0071 東京都 江東区 亀戸 2-25-14 立花アネックスビル 3F)

1. まえがき

現行の道路橋示方書では、1質点の簡易モデルによる地震時保有水平耐力法（以下保耐法と記す）あるいは2質点の簡易モデルを用いた等価線形化法等によって、橋脚の設計計算における耐震照査が行われている。

これに対して、大規模地下構造物の場合では、比較的簡易な解析手法として、応答震度法¹⁾が存在する。

この応答震度法では、地盤と部材に対して、地盤の地震時慣性力を静的に作用させ、地盤を地震時と同様にせん断変形させることにより、構造部材の断面力を把握し、これと部材耐力を比較することで保耐法と同様の耐震照査が行われている。ただし、地下構造物の場合、地震時の地盤および構造部材の挙動を精度良く評価する必要があり、これらの部材を FEM でモデル化して解析を行う点で、通常の橋梁下部工と異なる。また、地下構造物の耐震設計では、地盤と構造部材の連成解析となることから、これら両者の非線形性状の考慮方法においては、複雑かつ困難であり、妥当性のある設定を行う必要がある。

そこで、本稿は、大規模地震に対して、地下構造物の耐震計算の1手法である応答震度法を用いて、部材の断面力を把握するとともに、トンネル部材および地盤の非線形性を考慮した動的解析を行い、地震時における構造物および地盤の応答性状を把握し、これら両者を比較して、本手法の精度の検証を行ったものである。

2. 解析対象構造物および地盤の一般条件

本解析対象の一般条件を図-1に、解析に用いた地盤定数を表-1に示す。対象構造物は、内空幅が9.45m、内空高さが7.3m、土被り4.2mの開削工法で施工する道路トンネルとし、当該位置の表層地盤は、沖積粘性土および沖積砂質土から形成する複雑な互層成層地盤を仮定した。また、基盤は地表面より約53m以深のシルト岩を想定した。なお、本解析における検討方向は、トンネル横断方向を対象とした。

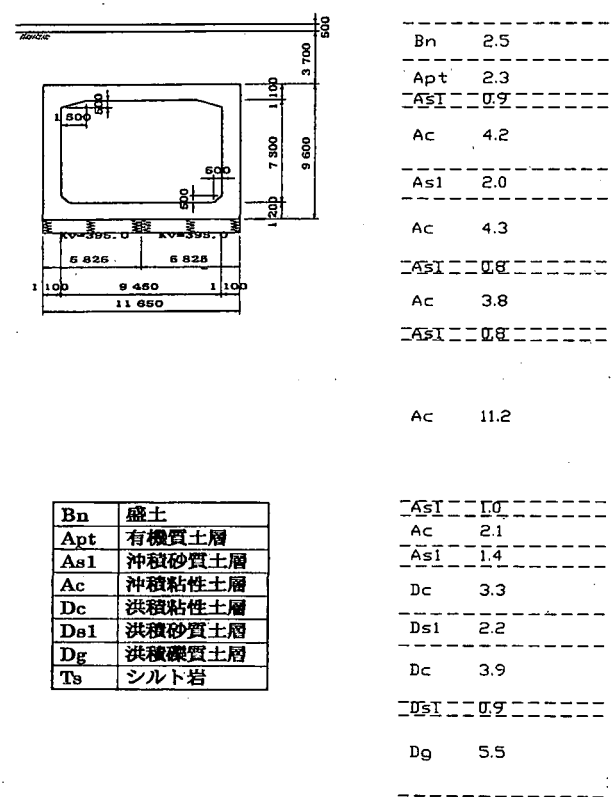


図-1 解析対象の一般条件

表-1 解析に用いた地盤定数

土層 No	記号	層厚 (m)	上面深度 (m)	単位体積重量 γ (kN/m ³)	初期せん断弾性係数 G_0 (kN/m ²)
1	Bn	2.5	0.0	17.6	14582
2	Apt	2.3	2.5	10.8	5390
3	As1	0.9	4.8	16.7	30978
4	Ac	4.2	5.6	14.7	5400
5	As1	2.0	9.8	16.7	30978
6	Ac	4.3	11.8	14.7	18150
7	As1	0.8	16.1	17.6	32801
8	Ac	3.8	16.9	14.7	18150
9	As1	0.8	20.6	17.6	79380
10	Ac	11.2	21.4	16.2	53459
11	As1	1.0	32.6	17.6	162004
12	Ac	2.1	33.6	16.2	53459
13	As1	1.4	35.7	17.6	162004
14	Dc	3.3	37.1	17.6	103684
15	Ds1	2.2	40.4	18.6	68590
16	Dc	3.9	42.5	17.6	103684
17	Ds1	0.9	46.4	18.6	68590
18	Dg	5.5	47.2	20.6	303241
19	Ts	—	52.7	17.2	323576

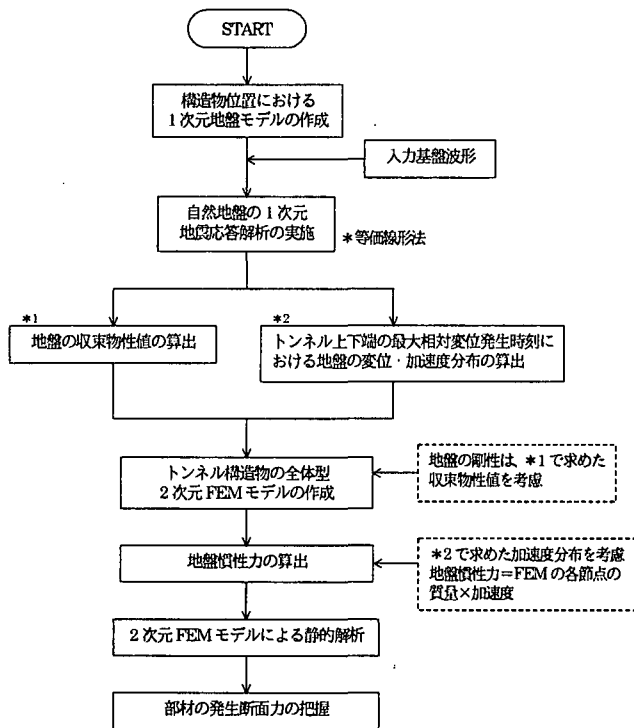


図-2 応答震度法による部材断面力算出の流れ

3. 応答震度法による耐震計算の流れ

応答震度法による耐震計算は、図-2に示すように、まず自然地盤の応答解析を実施して、地盤深さ方向の地盤変位、加速度分布等を把握する。そして、地盤と構造物の全体型 FEM モデルに対して、応答解析の結果から得られる地盤内加速度を地盤慣性力に置換して静的に作用させて部材断面力等を算出するものである。なお、地盤については、地盤応答解析結果の収束物性値を用いるため等価線形モデルとした。

4. 解析手法および解析モデル

(1) 解析ケース

本検討の解析ケースを表-2に示す。大規模地震対応のトンネル耐震設計において、設計実務レベルでは、表-2のうち、地盤等価線形および部材非線形のケース2が、良く用いられる。これに対して、ケース5は、構造物、地盤の非線形性を考慮し、忠実にモデル各部の減衰を再現できる最も厳密解と考えられ、これを含めた5ケースの解析を行い、それぞれの場合の部材断面力の対応を把握することによって応答震度法の妥当性を検証した。

(2) 解析モデル要素および境界条件について

本検討に用いた2次元 FEM モデル各部位の要素と境界条件を表-3に示す。

表-3 解析モデルに用いた要素と境界条件

解析手法	要素	境界条件および節点の自由度
応答震度法	トンネル部材: 梁要素 地盤: 平面歪み要素	地盤側面: 水平ローラー 地盤底面: 固定 地盤内部: 自由
動的解析法		地盤側面、底面: 粘性境界 地盤内部: 自由

表-2 本検討における解析ケース

解析手法	地震時外力の作用方法	地盤の非線形特性	部材の非線形特性	解析ケース
応答震度法	静的	等価線形	等価線形	ケース1
			非線形	ケース2
動的解析法	動的	等価線形	等価線形	ケース3 (複素応答法)
			等価線形	ケース4 (逐次積分法)
			非線形	ケース5 (逐次積分法)

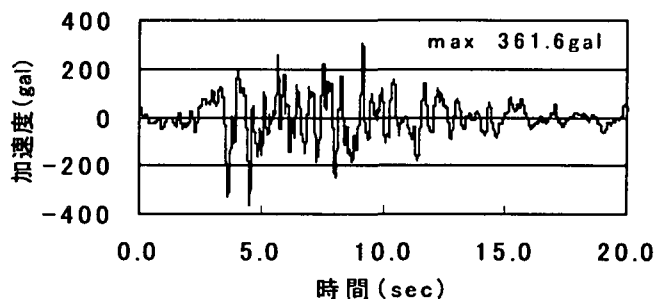


図-3 入力地震動 (PI波)

(3) 入力地震動について

入力地震動は、図-3に示すポートアイランド地盤内で観測された加速度波形を建設省土木研究所スペクトルに振幅調整したL2タイプII地震波 (以下 PI 波と記す) を用いた。

(4) 部材の非線形特性について

部材の非線形特性は、部材外側と内側で配筋が異なるため、図-4に示す非対称トリリニア型とし、等価線形モデルについては、降伏剛性を考慮した。

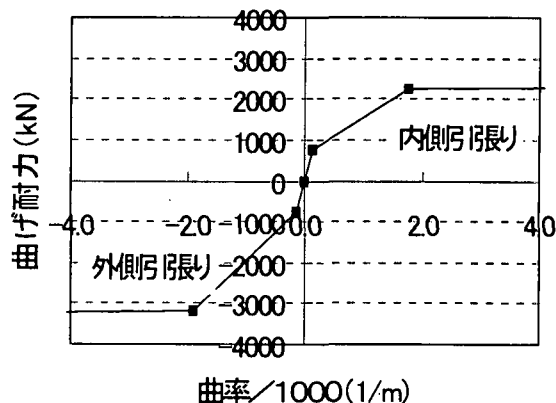


図-4 部材の非線形特性

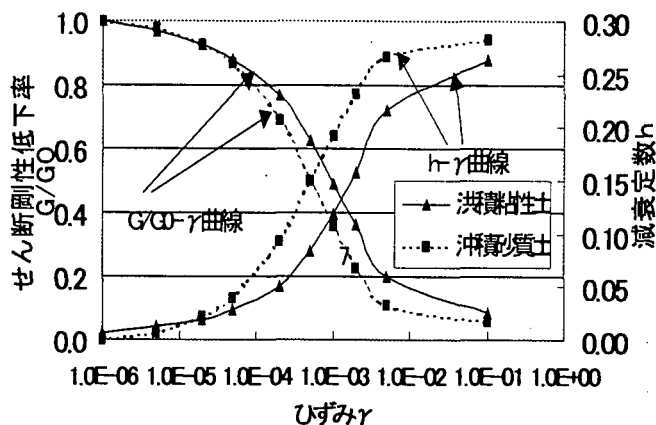


図-5 地盤のひずみ依存性(等価線形モデル)

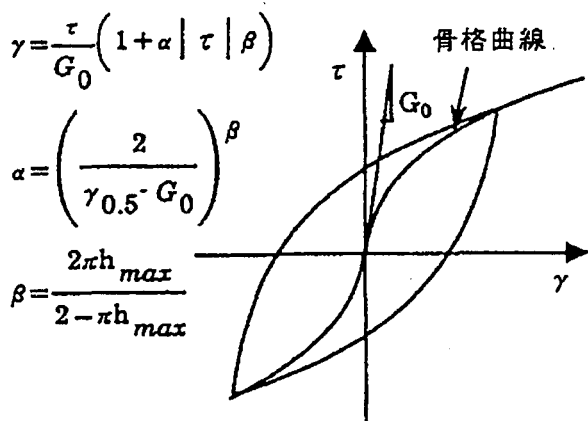


図-6 修正R-Oモデルの骨格曲線
(非線形モデル)

(5) 地盤の非線形特性について

地盤の等価線形モデルの非線形性は、図-5に示すような土質区分に応じた歪み依存性²⁾を考慮した。

また、逐次積分法による動的解析で用いる地盤の非線形性は、図-6の修正R-Oモデルとした。

なお、修正R-Oモデルのパラメータ (h_{max} 、 $\gamma_{0.5}$) は、各土層ごとに剛性が異なり、図-4に示した地盤の歪み依存性より設定することとした。

5. 地盤の1次元地震応答解析結果

トンネル部材に対し、最も不利となる地震外力が作用するのは、地盤ひずみが最大となる瞬間であり、トンネル上下部の変位差が最大となる時刻である。そこで、地盤の1次元応答解析を行い、トンネルの相対変位発生時刻における地盤の応答性状と収束剛性を評価した。

(1) 地盤の変位および加速度分布

解析結果として、トンネル上下の相対変位波形を図-7に、相対変位最大時における地盤変位分布と加速度分

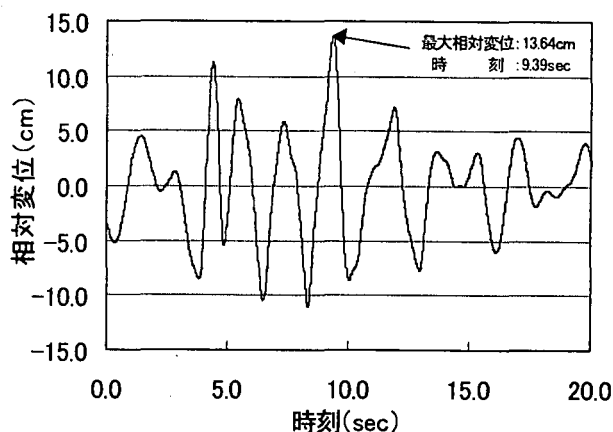
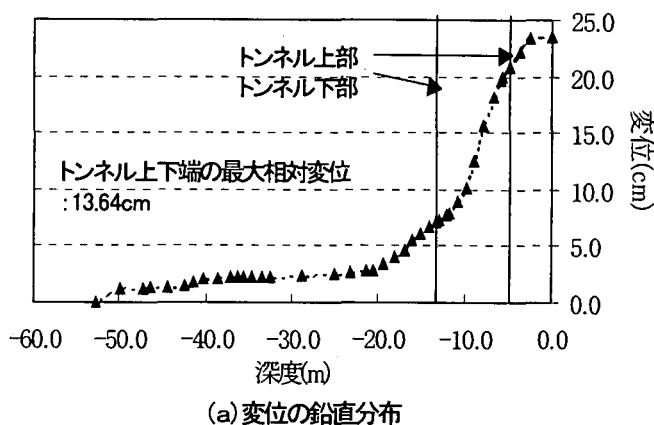
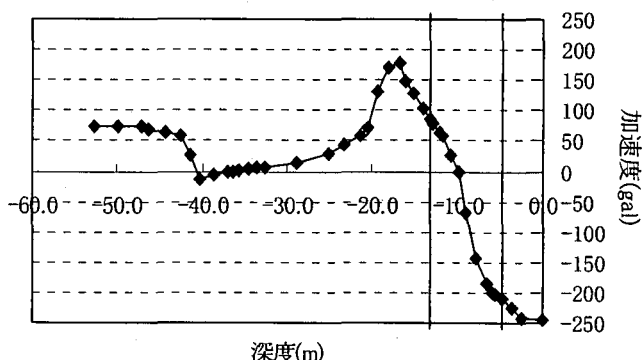


図-7 トンネル部材の相対変位波形



(a) 変位の鉛直分布



(b) 加速度の鉛直分布

図-8 トンネル上下部の最大相対変位発生時刻における地盤の応答性状

布を図-8に示す。

このように、地盤のせん断ひずみが最も大きくなる時刻は9.39secとなり、上床版位置と下床版位置の変位差は13.64cmとなる。また、この時の地盤深さ方向の変位の分布状況は、地表面になるに従い増加する傾向が認められた。

これに対して、地盤深さ方向の加速度分布は、高周波の影響が表れており、トンネルの上下で、加速度の振幅が逆転しており、上下軸線位置における加速度値の差が、最も大きかったために、トンネルの相対変位が最大となったと考えられる。

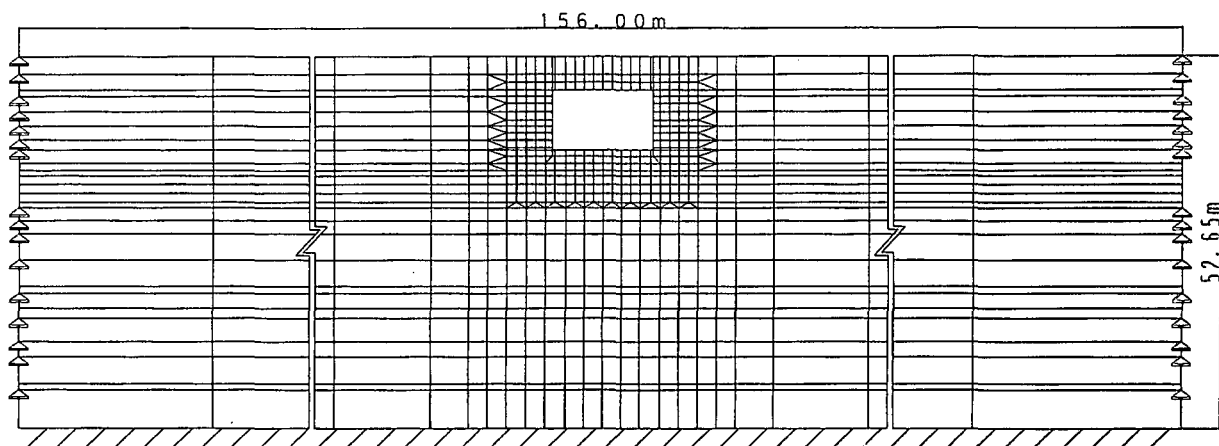


図-9 静的解析に用いた2次元FEMモデル

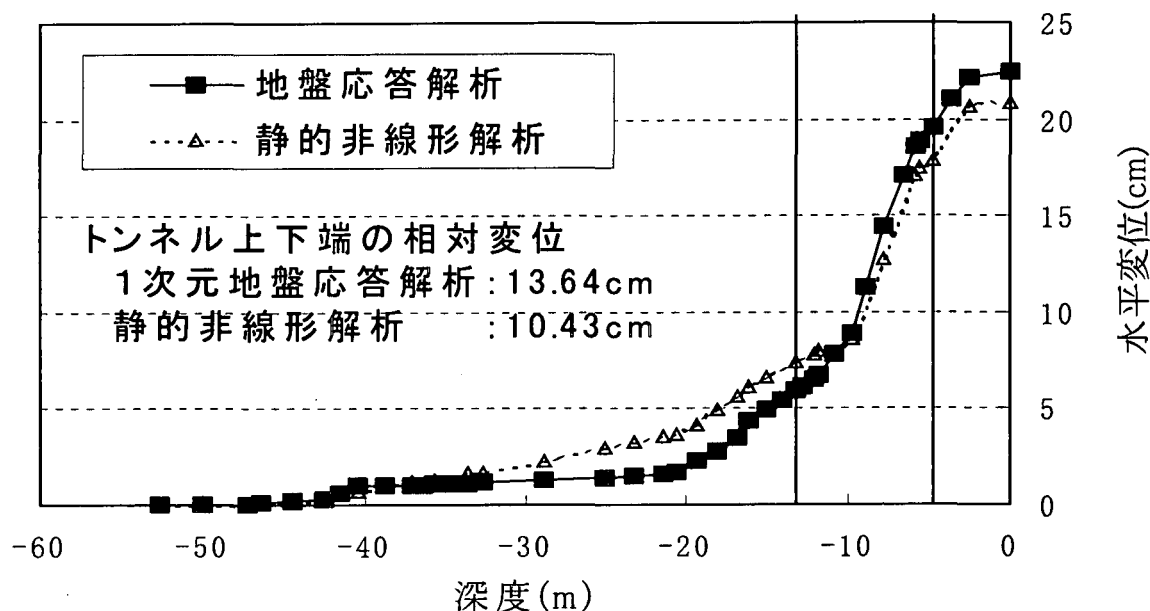


図-10 1次元応答解析と静的非線形解析による表層地盤の変位分布比較

6. 静的解析による地盤挙動の把握

地盤応答解析の結果を反映させて、地盤とトンネルを含めた2次元FEMモデルを用いて、静的解析を行い、地盤応答解析により得られた地盤の変位状況と静的解析の結果を比較検証した。

(1) 2次元FEMモデルについて

解析に用いた2次元FEMモデルを図-9に示す。

モデルの範囲は、深さ方向が、基盤面(約-53m)までとし、水平方向の幅は、側方境界条件が、トンネルの挙動に影響しないよう、深さ方向の3倍程度(約150m)としている。

なお、地盤の剛性は、地盤応答解析で得られた収束物性値を与えた。また、地盤変位による地震時慣性力は、図-8で示したように、トンネル上部軸線位置における相対変位が最大となる時刻の地盤加速度分布をモデルの各節点の質量に乗じて、土層上面に水平载荷させた。

(2) 静的解析と地盤応答解析による地盤変位分布の比較

応答震度法では、FEMモデルの地盤剛性を、地盤応答解析の収束剛性として与えており、これが正しく評価されたかについて、応答解析と静的解析の両者における表層地盤の変位分布を比較した。

地盤応答解析と静的解析における地盤変位分布の比較を図-10に示す。なお、この図に示した静的解析による地盤変位は、トンネルの挙動の影響が表れないように、モデル中心から、水平方向に50m程度離れた自然地盤の値を示す。

このように、両者の地盤変位の状況は、地表面より12~-30m程度までは、2~3cmの変位差が現れるとともに、相対変位の差は、地盤応答解析の結果の方が、3割程度大きくなり、若干誤差が大きい。

ただし、両者の地盤変位状況は、概ね同傾向にあるが、動的解析の結果と十分比較検証する必要がある。

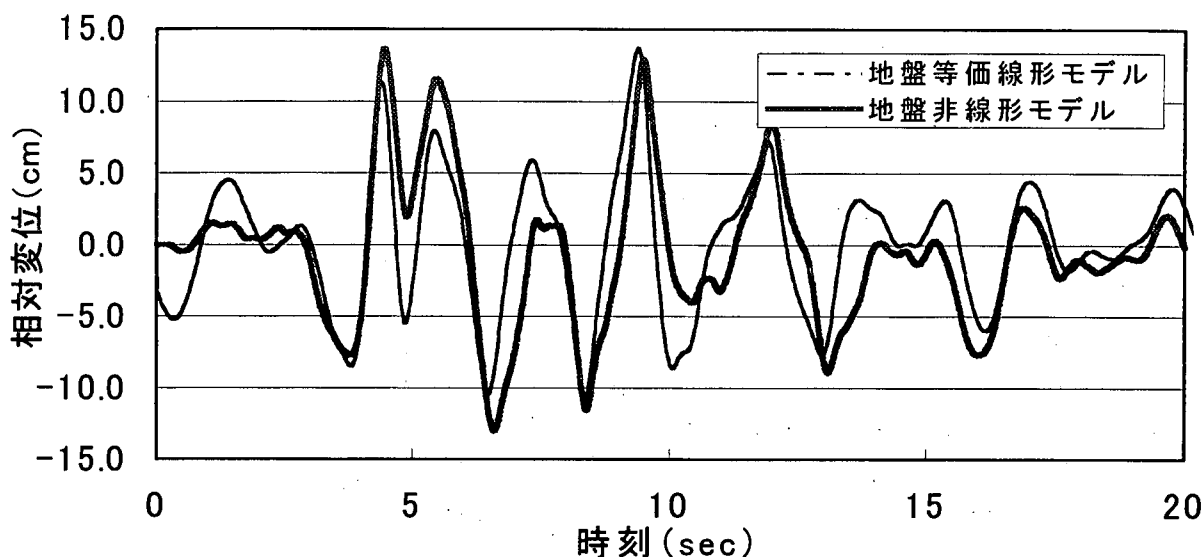


図-11 1次元地盤応答解析と動的解析によるトンネル上下の相対変位波形の比較

7. 2次元FEMモデルによる動的解析結果

ここでは、図-9に示した2次元FEMモデルの地盤側面および底面を粘性境界にして、下記のケースについて、動的解析を行った結果について述べる。

- ①：部材および地盤等価線形（ケース3）
- ②：部材等価線形、地盤非線形（ケース4）
- ③：部材および地盤非線形（ケース5）

(1) 等価線形モデルと非線形モデルのトンネル上下部の相対変位比較

応答震度法では、等価線形法による地盤応答解析を行っている。この場合、地盤を等価線形とするので、L2地震時のように歪み領域が大きな場合、地盤の実挙動が合わなくなることもあるので、ここでは、トンネル上下部の相対変位波形を逐次積分法と比較した。

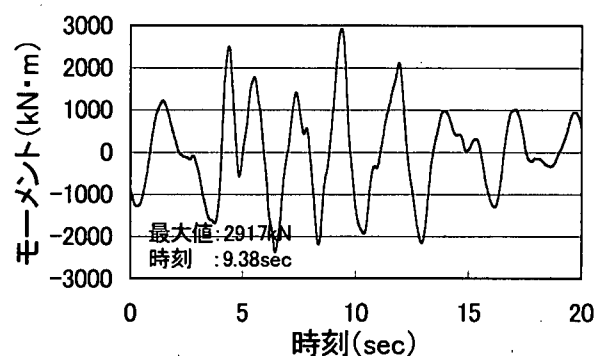
その比較結果を図-11に示す。このように、逐次積分法と等価線形法による最大相対変位は、ほぼ一致しており、地盤は等価線形モデルで、対応が取れている。

(2) 部材の発生モーメントの比較

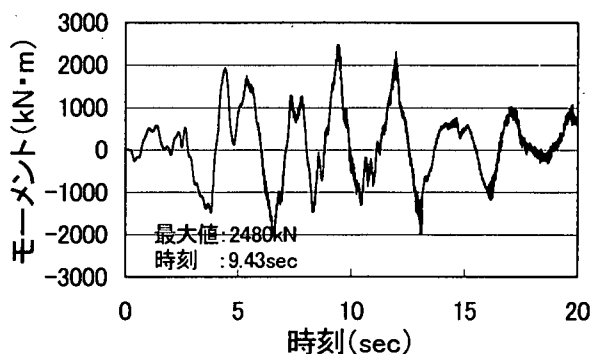
上床版隅角部の応答モーメント波形の比較結果を図-12に示す。

これらを見ると、地盤、部材を等価線形モデルとしたケース3では、地盤を非線形としたケースと比較すると、発生モーメントが約1.2倍程度増加している。

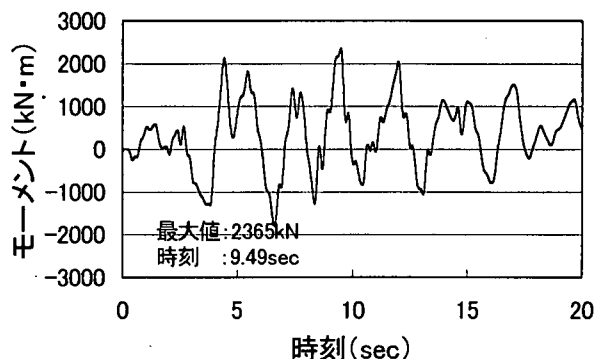
また、最大モーメントの発生時刻は、9.38~9.49secといずれのケースにおいても、同一の時刻に現れており、先に示した地盤応答解析で求めたトンネルの最大相対変位発生時刻(9.39sec)と同様の時刻に部材が最も不利となる地震時外力を受けていることがわかる。



(a) 複素応答解析(ケース3)

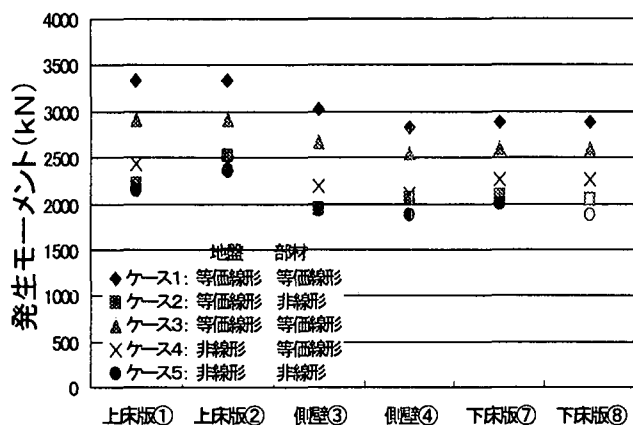


(b) 逐次積分法: 部材等価線形(ケース4)



(c) 逐次積分法: 部材非線形(ケース5)

図-12 各ケースの応答モーメント波形の比較(上床版隅角部:断面②)



部位名(断面番号)
図-13 動的解析と応答震度法による
各部材の発生モーメントの比較

8. 応答震度法と動的解析による部材断面力の比較

応答震度法と動的解析によるトンネル部材の発生モーメントの比較を図-13に示し、モーメント図を比較した結果を図-14に示す。

これらの図に示す○付き数字は断面番号であり、断面①、③、⑦は、部材の内側が引張りで、その他は外側引張りを示した。

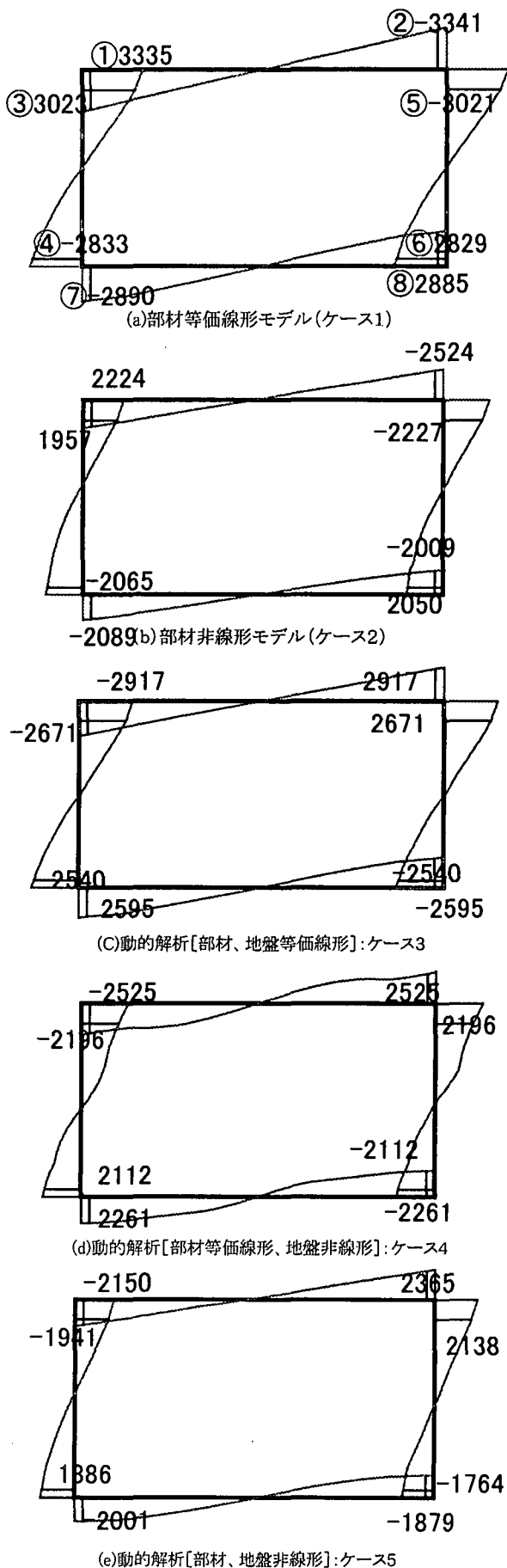
応答震度法において、部材を等価線形とした場合には、複素応答法（地盤、部材等価線形）の結果と良い対応を示すが、より厳密なケース5と比較すると、約1.3~1.5倍超過するため、不経済な断面となると考えられる。これに対して、部材を非線形モデルとすると、等価線形モデルと比べ、断面力が約3割小さくなり、図-14に示すように、モーメント形状および各断面の断面力は、詳細な動的解析の厳密解と良い対応であるとともに、安全側の評価となることがわかった。

9. まとめ

本検討では、トンネルと地盤を含めた2次元 FEM モデルによる動的解析を行い、地下構造物の耐震計算の1手法である応答震度法との比較検証を行った。その結果、部材を等価線形とすると動的解析を行った結果より断面力が、かなり大きくなる。しかし、本手法において、部材を非線形とすることで、各部材の非線形を考慮した動的解析の厳密解とほぼ同レベルとなり、精度の良い解を得られることを確認できた。

参考文献

- 1) 地下構造物の免震設計法マニュアル (案) 1998.9
- 2) 建設省土木研究所資料 (第1778号「地盤の地震時応答特性の数値解析法」)



単位: kN・m

図-14 モーメント図の比較