

動的解析による山岳トンネルの 耐震評価における静的解析妥当性の検討

池永幸司¹・保田尚俊²・嶋本敬介³・朝倉俊弘⁴・小林俊彦⁵

¹正会員 京都大学大学院 工学研究科社会基盤専攻(〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

E-mail: ikenaga.koji.24x@st.kyoto-u.ac.jp

²正会員 京都大学大学院 工学研究科社会基盤専攻(〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

E-mail: yasuda.naotoshi.35m@st.kyoto-u.ac.jp

³正会員 京都大学大学院助教 工学研究科社会基盤専攻(〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

E-mail: shimamoto.keisuke.4u@kyoto-u.ac.jp

⁴正会員 京都大学大学院教授 工学研究科社会基盤専攻(〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

E-mail: asakura@kumst.kyoto-u.ac.jp

⁵正会員 西日本旅客鉄道株式会社 構造技術室(〒532-0011 大阪市淀川区西中島5-4-20)

E-mail: toshihiko-kobayashi@westjr.co.jp

山岳トンネルの耐震評価には静的解析がよく用いられているが、その静的解析の適用範囲については十分には知られていない。そこで、本研究では、地震外力としてせん断応力を解析領域の境界に作用させる静的解析手法を考え、この静的解析で得られる結果と動的解析で得られる結果の比較を行うことで、この静的解析手法の適用範囲に関しての考察を行った。その結果、トンネル直径に対して地震波の波長が5倍程度よりも大きい場合では、両解析手法による解析結果の差異はほとんど生じないこと、また、トンネル直径に対して地震波の波長が5倍程度よりも小さい場合では、両解析手法による解析結果に差異が生じるものの、静的解析で評価を行うと安全側の評価となることが明らかとなった。

Key Words : tunnel, dynamic analysis, static analysis, seismic

1. はじめに

山岳トンネルは構造物全体が地山に囲まれており、地震時の挙動は周辺地山の挙動に支配されるため、周辺地山が地震時も安定していれば、耐震性に富む構造物であるといえる。そのため、山岳トンネルについては一般には地震の影響を設計上、考慮する必要がないと考えられていた。

しかし、近年の研究¹⁾により、地震規模、地震断層面からの距離、地山の不良やトンネルの欠陥といった特殊条件の介在、といった条件が存在する場合、山岳トンネルも覆工コンクリートのはく落、ひびわれといった地震被害を受けることが分かっている。山岳トンネルの地震被害を抑えるためには、被害メカニズムとトンネルの耐震性能とを正しく評価し、設計、施工、維持管理に適切に反映させることが重要である。

開削トンネル、シールドトンネル、都市部山岳工法トンネルについては、耐震設計法として地盤の変位を地盤ばね端部から入力する応答変位法や、地盤を平面ひずみ要素でモデル化し地盤の地震時慣性力を静的に作用させる応答震度法、動的応答解析により地震時の影響を定量的に算定して耐震検討を行う方法、が提案されている²⁾³⁾⁴⁾。一方、山岳トンネルの場合、周りの地盤の地質条件が複雑なこと、動的な挙動に対する構成則が不明であることから、動的解析はあまり行われず、静的地震応答解析を行うことが多い⁵⁾⁶⁾。しかしながら、これらの静的地震応答解析の適用範囲については十分知られないまま使われているのが現状である。

そこで、本研究では山岳トンネルの地震被害を有限差分法ソフトFLAC3Dを用いて動的・静的両解析手法で再現し、その結果の比較より、山岳トンネルのための静的地震応答解析の適用範囲を明らかにする。

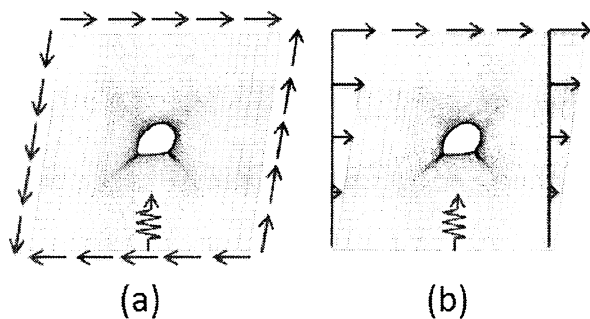


図-1 本解析で用いた地震外力の表現方法

表-1 各解析手法の特徴

解析手法	地震外力の表現方法	地盤と構造物の相互作用
A: 動的FEM	動的(1)	動的
B: 地盤ばね型応答変位法	動的(2)	静的
C: 応答震度法	動的(3)	静的
D: 本解析	静的	静的

なお、表中の動的(1)～(3)は以下を表している。

動的(1)：入力地震波を地震波形として入力。

動的(2)：入力地震波を地震波形(強制変位)として入力。

動的(3)：入力地震波を慣性力として入力。

2. 静的地盤応答解析

まず、本研究で用いる地震外力の表現方法を図-1に示す。本研究での静的解析とは(a)のように地震外力としてせん断応力を解析領域の境界に作用させる方法である。また、(a)は(b)のように解析領域の境界に強制変位を作用させたものとみなすこともできる。次に、本研究で行った静的解析と一般的な地中構造物の耐震計算に用いられている既存の解析手法との差異について述べる。表-1に各解析手法の特徴を示す。解析手法B、Cは地震外力の表現方法は異なるものの、地震による入力応答としてある波長をもった地震波形を再現している。つまり、慣性力を考慮した動的解析により得られる解を用いている。一方、地盤と構造物の相互作用に関しては、ともに慣性力の影響を無視し、静的に表現されていることが分かる。本研究で用いる解析手法Dは地震外力の表現方法、地盤と構造物の相互作用ともに慣性力を無視した静的解析で行う手法である。この方法は、解析手法B、Cで地盤と構造物の相互作用を静的に扱うことを認めるならば、地震外力を静的に表現することも認められる、という考えに基づくものである。地震外力を静的に扱うことで、他の解析手法に比べ、解析手法Dは地震外力の表現が非常に簡便になるという利点を有する。

なお、本解析手法Dで境界に加える強制変位を曲線と

表-2 解析ケース

	解析方法	層数	構成則	周波数 (Hz)
Case1	静的	1	弾性	-
Case2	静的	1	弾塑性	-
Case3	静的	2	弾性	-
Case4	静的	2	弾塑性	-
Case5-1	動的	1	弾性	1.0
Case5-2	動的	1	弾性	2.5
Case5-3	動的	1	弾性	5.0
Case5-4	動的	1	弾性	10
Case6-1	動的	1	弾塑性	1.0
Case6-2	動的	1	弾塑性	2.5
Case6-3	動的	1	弾塑性	5.0
Case6-4	動的	1	弾塑性	10
Case7-1	動的	2	弾性	1.0
Case7-2	動的	2	弾性	2.5
Case7-3	動的	2	弾性	5.0
Case7-4	動的	2	弾性	10
Case8-1	動的	2	弾塑性	1.0
Case8-2	動的	2	弾塑性	2.5
Case8-3	動的	2	弾塑性	5.0
Case8-4	動的	2	弾塑性	10

表-3 各種物性値

	軟岩	硬岩	コンクリート
単位体積重量 (kN/m ³)	21	23	23
弾性係数 (MPa)	200	1 000	22 000
ポアソン比	0.30	0.30	0.20
せん断強度 (MPa)	0.30	1.0	4.8
内部摩擦角 (°)	35	45	30
引張強度 (MPa)	0.060	0.20	0.96

した場合では、境界部の変形は慣性力の影響を考慮した表現とすることは可能であるが、解析領域内では慣性力の影響は考慮できないため、意図した解析にはならない。

本研究では以上のような特徴をもった解析手法を用いて動的解析、静的解析の比較検討を実施した。

3. 条件設定

(1) 解析ケース

表-2 に本研究で実施した解析ケースを示す。本研究では地盤・覆工の構成則、地盤の層数をパラメータとして動的・静的解析を実施した。動的解析の場合では、周波数の影響を検討するために、各ケースにおいて入力地震波の周波数を 1.0(Hz)を基本とし、他に 2.5(Hz)、5.0(Hz)、10(Hz)の計 4 通り実施した。この周波数は、地震波の速度スペクトルの卓越周波数が 1.0(Hz)～3.0(Hz)程度であると考えられること⁷⁾、また、一般に高周波で

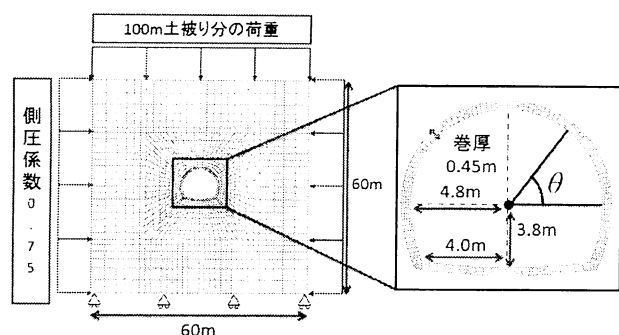


図-2 解析領域と初期応力状態の設定

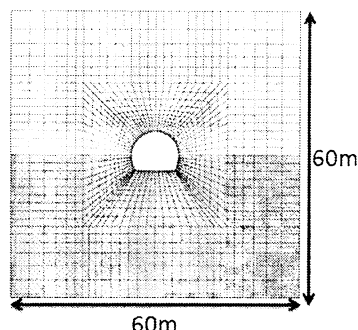


図-3 2層構造地山のモデル

あるほど動的解析と静的解析の解析結果に差異が生じることから設定した。

(2) 解析に用いる物性値

地山とコンクリートの入力物性値を表-3に示す。地山は1層構造の場合、軟岩のみで構成されていると想定して、鉄道運輸機構の設計施工標準⁹⁾のR3地山を参考を設定した。これは、山岳トンネルの地震被害は不良地質区間でよく見られているためである。2層構造の場合は地盤条件の急変を再現するために、下層部がR3地山の5倍の弾性係数を持つ硬岩で構成されているとした。また、覆工の圧縮強度は21(kN/mm²)とする。地山、覆工ともに変形挙動が弾塑性体の場合、Mohr-Coulomb則に基づく弾完全塑性体としてモデル化している。

(3) 解析モデル

解析は平面ひずみ状態を仮定して行う。動的、静的両解析で用いた解析領域と初期応力状態の設定を図-2に示す。図のように60m四方の領域をモデル化し、トンネル断面は新幹線複線トンネルの標準断面を用いた。

また、2層構造地山はトンネルが地盤境界部に存在する場合を想定し、図-3のようにトンネルのスプリングライン(以下SLと略記)が層境界に一致するようモデル化した。

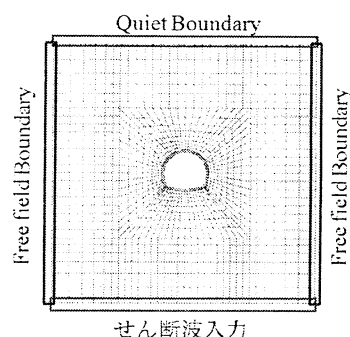


図-4 動的解析における境界条件

(4) 地震波の設定

本研究では一般にS波の方がP波よりも振幅が大きいと考えられること、地震波はスネルの法則により基本的に直下から入射するものと考えられることから用いる地震波は鉛直入射のS波として解析を実施した。以下に各解析手法における地震外力の取り扱いについて示す。

a) 動的解析の場合

動的解析を行う際は、解析領域底面に正弦波を1周期分入力する。その際、入力波の振幅は、1層地盤の場合、弾性体の自然地盤（掘削前の地盤）に生じるせん断ひずみが0.20%となるような大きさとする。また、2層地盤の場合、同様に弾性体自然地盤における層境界の上面に生じるせん断ひずみが0.20%になるような大きさに振幅を設定した。なお動的解析を行う際は、図-4に示すように、解析領域側方の影響を無視できるFree field Boundaryおよび、地表面からの反射を無視できるQuiet Boundaryを取り付ける。

b) 静的解析の場合

地震のせん断変形に相当する力を境界に図-1のように作用させる。その際作用させる静的な荷重の大きさは、動的解析の場合と同様に、弾性体の自然地盤に生じるせん断ひずみの大きさが0.20%となるような大きさとする。また、地盤が2層構造の場合、上部の軟岩のせん断ひずみが0.20%になるように作用力を設定した。なお、この際、下部の硬岩のせん断ひずみは0.040%となる。

(5) 解析手順

弾性解析の場合では、初期状態応力状態の設定を行わず、地震波による影響のみを考慮した解析のみを行う。一方、弾塑性解析の場合では、初期応力状態を考慮する必要があるため、掘削解析から実施した。弾塑性体解析を行う際の解析ステップは以下の①～④のとおりである。

① 未掘削状態で、土被り 100m を想定し、自重解析を行う。この際、不足分の土被りは図-2 のように解析領域境界に線圧として作用させる、また、側圧係数 0.75 で側方にも荷重を作用させている。

② トンネル内の要素および覆工位置の要素を取り除

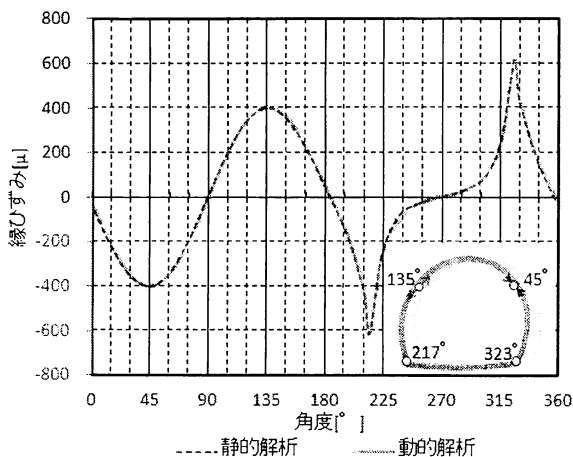


図-5 動的解析($f=1.0$ [Hz])と静的解析の比較(弾性)

き、応力解放率 100%として、変位が収束するまで計算を行う。

③ 応力状態を保存した状態で変位をリセットし、覆工要素をモデル化する。

④ 地震時外力を作用させる。

(6) 解析結果の評価

本解析ではトンネル覆工内空側の縁ひずみを用いて評価した。その際の角度は、図-2のようにトンネル右側側壁部を0°とし、反時計方向回りに角度を定義した。以下の解析結果では引張を正とする。

次に、動的解析において周波数を変更した際は、弾波動論で得られる結果を参考に、無次元値 λ/D の関係を用いて評価を行う⁹⁾。ここで D とはトンネル直径を示し、 λ は入力波の波長を示す。 λ/D で評価する理由としては、空洞での波の散乱問題を考えた場合、慣性力の影響の大きさは、空洞の大きさに対する地震波の相対的な波長の大きさに支配されるためである。本研究では、波長 λ は弾性体地盤でのS波の伝達速度 V_s と周波数 f との関係

$$V_s = f \cdot \lambda$$

より求めた。なおトンネル直径 $D=9.6$ (m)を用いてこの λ/D の値を具体的に計算すると、 $f=1.0$ (Hz)のとき $\lambda/D=19.7$ 、 $f=2.5$ (Hz)のとき $\lambda/D=7.9$ 、 $f=5.0$ (Hz)のとき $\lambda/D=3.9$ 、 $f=10$ (Hz)のとき $\lambda/D=2.0$ となる。

3. 解析結果

(1) 弾性体・1層構造の場合の比較(Case1, Case5-1～Case5-4)

a) 1.0(Hz) との比較(Case1, Case5-1)

動的解析と静的解析の比較を図-5に示す。地震波が

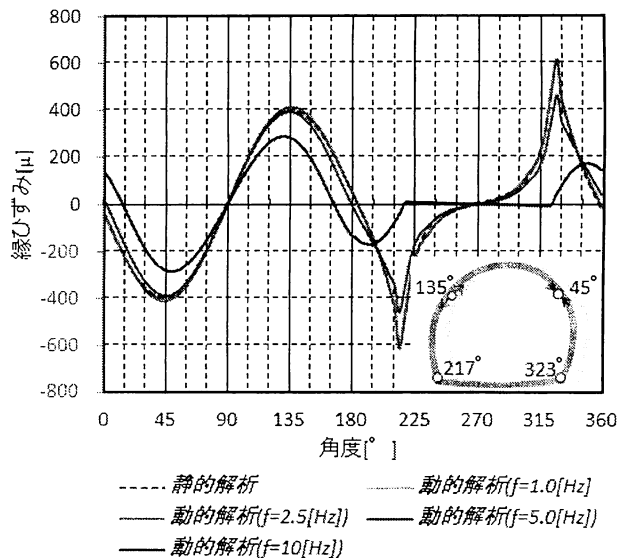


図-6 動的解析(周波数変更)と静的解析の比較(弾性)

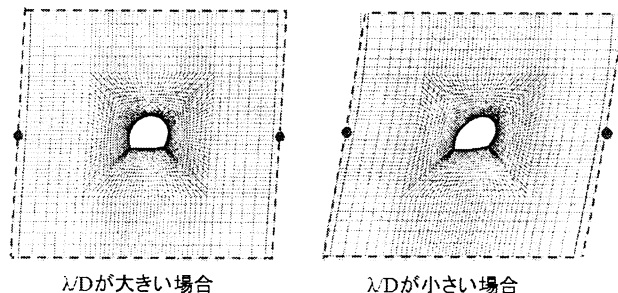


図-7 静的解析の幾何学的解釈

鉛直から入射する場合はトンネルの左右肩部に大きな変形が生じるモードとなるため、比較する動的解析の結果は鉛直入射の変形モードで変形が1回目に最大となった際の結果とする。なお以降、動的解析と静的解析を比較する場合、この変形での縁ひずみとする。図より明らかなように、覆工内空側右肩部では圧縮力が、そして左肩部では引張力が作用していることが分かる。解析結果より、この場合の解析条件では動的解析、静的解析で違いはほとんど見られない。

b) 周波数変更時の結果(Case1, Case5-1～Case5-4)

次に周波数を変更した際の解析結果を図-6に示す。図より周波数が高くなり 5.0(Hz)を上回ると(λ/D の値が4より小さくなるほど)、解析間の差が広がっていくことが分かる。この理由について考察を行う。

図-7に静的解析の幾何学的解釈を示す。図より地震波の波長がトンネルの大きさに比べて十分に大きい場合、トンネル周辺の地盤変形は直線近似することができ、ほぼ直線とみなせる地盤変形は静的な荷重を境界に作用させることで表現することができる。つまり静的解析は波長 ∞ の地震波の動的解析であるとみなすことが可能といえる。また逆に、地震波の波長がトンネルの大きさに比べてそれほど小さくなるにつれて、静

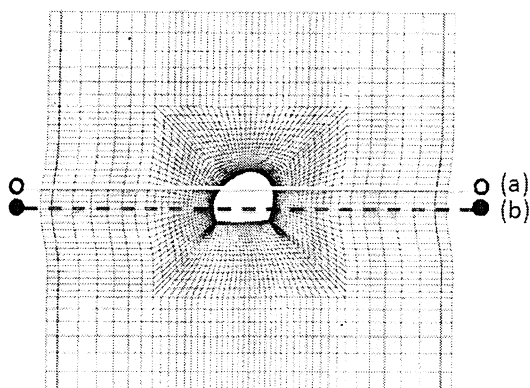
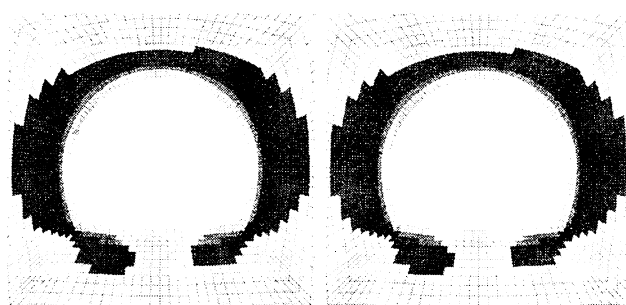


図-8 $f=10$ (Hz) の最大変形時の全体変形図 (100 倍に拡大)



静的解析 動的解析 ($f=1.0$ [Hz])

■ せん断破壊

□ 引張破壊

図-9 塑性領域の比較

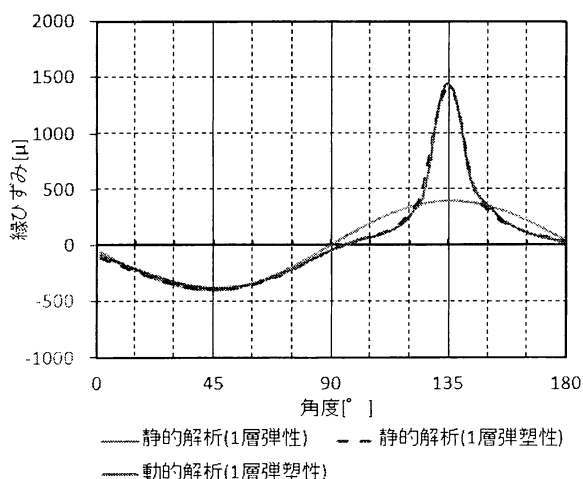


図-10 動的解析 ($f=1.0$ [Hz]) と静的解析の比較 (弾塑性)

的荷重を作用させて変形させた場合と動的な変形に差異が生じるようになることが分かる。つまり、周波数が高くなり λ/D が 5 程度を下回り始めると解析間に差が生じるといえる。なお、周波数が 10 (Hz) の場合、SL より下の覆工の変形がほとんど生じていないが、これは図-8 に示すように、トンネル肩部 (a) で変形が最大となる時は SL より下の覆工 (b) は地震波の節に当たるためである。

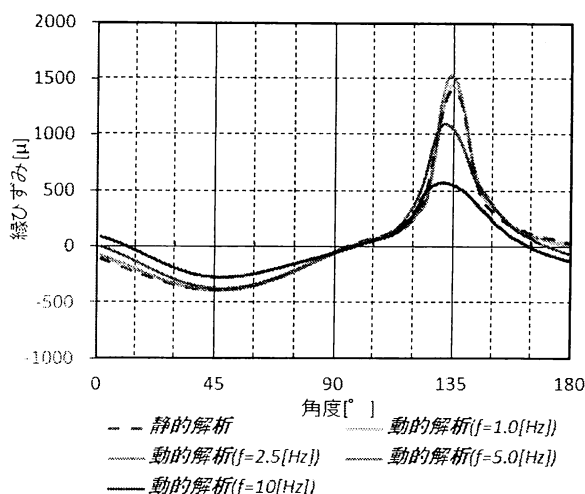


図-11 動的解析 (周波数変更) と静的解析の比較 (弾塑性)

(2) 弾塑性体・1層構造の場合の比較 (Case2, Case6-1 ~ Case6-4)

a) 1.0 (Hz) との比較 (Case2, Case6-1)

図-9 に静的解析、動的解析によって得られた塑性領域図を示す。静的解析は解析終了時の、動的解析は両肩部での変形が最大となった時刻における塑性域を示している。図より解析による塑性域の広がり方の違いは見られなかった。なお、覆工内空側 135° と覆工外側 45° に引張破壊が生じている。次に、動的解析と静的解析の縁ひずみの比較を図-10 に示す。なお、弾塑性解析時にはインバートの接合部で発生する塑性ひずみがかなり大きな値となり、図の表示が困難となる。そのため、以降、弾塑性体解析の場合では、周波数が覆工アーチ部に与える影響の考察を目的とし、図に表示する角度の範囲は 0° から 180° までとする。改めて図-10 を見ると、塑性化していない右肩部 (45°) は弾性モデルの結果と一致しているが、塑性化が起きている左肩部 (135°) では、弾性モデルの結果から大きく外れた大きなひずみが発生していることが分かる。また、塑性変形を考慮した場合の動的解析と静的解析の違いは、弾性変形の場合に比べて若干違いが大きくなるものの、それほど違いは見られない。

b) 周波数変更時の結果 (Case2, Case5-1 ~ Case5-4)

周波数変更時の解析結果を図-11 示す。弾性体のケースと同様に λ/D の値が 5 程度より小さくなるにつれて解析間の差が大きくなることが分かる。ただし、塑性化の影響により、その差は弾性体のケースよりも大きくなる。塑性化が進行するほど、地盤は変形しやすくなり、ヤング率が低下したような挙動を示す。このため、塑性化が進むと、塑性域中を進むせん断波の速度は遅くなり、結果、塑性域中の見かけのせん断波波長は小さくなると考えることができる。そのため、塑性域が存在すると弾性モデルよりも解析手法による差が大きくなったと解釈で

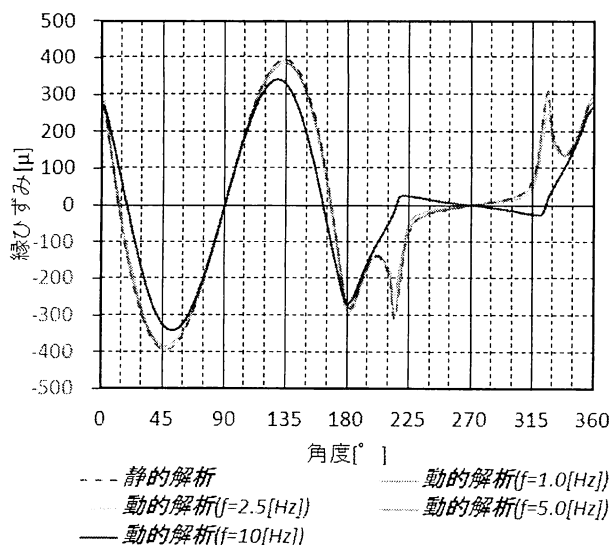


図-12 動的解析(周波数変更)と静的解析の比較(弾性)

きる。なお、周波数 $f=1.0(\text{Hz})$ と周波数 $f=2.5(\text{Hz})$ を比較したとき、周波数 $f=2.5(\text{Hz})$ の方が若干縁ひずみが大きくなっているが、弾性波動論を用いて解いた場合、波長が短くなると自然地盤では応力が波長を ∞ とした場合(静的の場合)と比べて、覆工に生じるひずみや応力は一度増加した後減少するという結果⁹⁾があるため、これと同じ現象が現れたものと考えられる。なお、図-6でも分かりにくい $f=2.5(\text{Hz})$ の方が大きくなっている。

(3) 弾性体・2層構造の場合の比較(Case3, Case7-1～Case7-4)

2層弾性体の場合の動的解析、静的解析の解析結果を図-12に示す。この場合でも今までと同様に λD の値が5程度より小さくなるにつれて解析間の差が大きくなるといえる。しかし、1層弾性構造のケースよりも周波数が及ばず影響が小さいことがわかる。これは、2層地盤の場合では、下部に、上部の軟岩地盤よりも地震波の波長が長くなる硬岩地盤があるためと考えられる。

なお1層弾性体と比較して、地盤の層境界で1層地盤では見られない大きな変形が生じていることが分かる。既往の文献¹⁰⁾に地盤剛性の急変個所にトンネルが位置する場合は、ひび割れや圧ざ等の変状の生じやすい、との記述があるが、その記述を確認することができた。

(4) 弾塑性体・2層構造の場合の比較(Case4, Case8-1～Case8-4)

図-13に2層弾塑性体の場合の動的解析と静的解析の解析結果を示す。図-13より、今までと同様に λD の値が5程度より小さくなるにつれて解析間の差が大きくなることが分かる。また、解析間の差は弾性モデルの

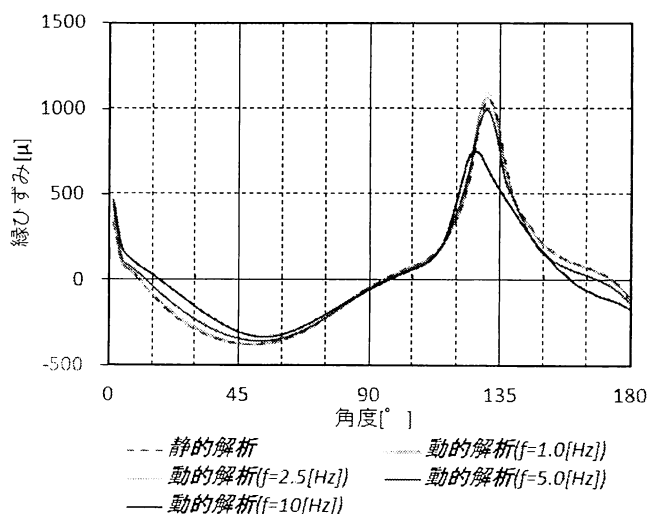


図-13 動的解析(周波数変更)と静的解析の比較(弾塑性)

表-4 周波数による影響

λD	>5	<5
周波数	低周波	高周波
結果	$\epsilon_{dynamic} \doteq \epsilon_{static}$	$\epsilon_{dynamic} < \epsilon_{static}$

Case3, Case7-1～Case7-4と比べ、塑性域の影響により大きくなる。なお、1層弾塑性のケースと同様に周波数 $f=2.5(\text{Hz})$ の方が周波数 $f=1.0(\text{Hz})$ よりも若干大きな縁ひずみが生じている。また、塑性域の解析間の変化も周波数変更時の変化も同様に見て取ることができなかった。

以上より地表面の影響を考慮しない場合、動的解析と静的解析の関係は表-4のようにまとめることができる。ただし動的解析によって得られるひずみを $\epsilon_{dynamic}$ とし、静的解析によって得られるひずみを ϵ_{static} とした。

現実の地震波の卓越周波数は $1(\text{Hz})\sim 3(\text{Hz})$ 、($\lambda D > 5$)程度であると考えられる⁷⁾。そのため、静的解析を行っても、動的に解析した場合と大きな差は生じない。また、仮に高周波の地震波を静的解析したとしても得られる結果は $\epsilon_{dynamic} < \epsilon_{static}$ となり静的解析を行うと、安全側の評価となる。そのため、山岳トンネルの地震応答解析は静的解析で問題がないと考えられる。

4. まとめ

山岳トンネルの耐震評価における静的解析の妥当性と適用範囲を評価するために、地震応答解析を実施した。なお、ここでの静的解析とは、地震外力としてせん断応力を解析領域の境界に作用させる静的耐震計算法である。今回の研究によって得られた知見を以下にまとめる。

- トンネル直径に対して地震波の波長が5倍程度よりも大きい場合では、動的解析、静的解析の解析手法による違いはほとんど見られない。
- トンネル直径に対して地震波の波長が5倍程度よりも小さい場合では、動的解析、静的解析の解析手法による違いは、地震波の周波数が高くなるほど現れる。その際得られる結果は静的解析の方が安全側の値となる。
- 塑性化を考慮した場合、塑性域の影響により動的解析、静的解析の解析手法による違いがさらに広がる。
- 多層系地盤の場合でも、1層地盤と同様の考え方で静的解析が行える。

本研究は山岳トンネルの地震応答解析は、複雑な動的解析を実施しなくても、簡便な静的解析で問題がないという結論が得られた。今後は動的解析でのみモデル化できる地表面からの反射波の影響を無視できないトンネルや、地層境界が斜めに存在する場合に対して、本研究で用いた静的耐震計算が適用可能かどうかの検討を行いたい。

参考文献

- 1) 朝倉俊弘, 志波由紀夫, 松岡茂, 大矢敏雄, 野城一栄: 山岳トンネルの地震被害とそのメカニズム, 土木学会論文集, No.659/III-52, pp.27-38, 2000.
- 2) 開削トンネルの耐震設計: 土木学会, 1998.
- 3) シールドトンネルの耐震検討: 土木学会, 2006.
- 4) 都市部山岳工法トンネルの覆工設計: 土木学会, 2006.
- 5) 朝倉俊弘, 小島芳之, 野々村政一, 宮林秀次, 磯谷篤実: 小土被りトンネルにおける地震時挙動に関する研究, トンネル工学報告集 Vol.17, pp.209-213, 2007.
- 6) 野城一栄, 嶋本敬介, 小島芳之, 宮林秀次, 西藤潤: 小土被りトンネルの地震時挙動と対策工に関する基礎的研究, トンネル工学報告集 Vol.18, pp.119-126, 2008,
- 7) 伊藤清治, 甲斐誠, 西川宏之, 石本麗: 兵庫県南部地震における岩盤上の観測記録, 日本建築学会近畿支部研究報告集, pp.173-176, 1995.
- 8) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構: 山岳トンネル設計施工・同解説, pp.310, 2008
- 9) Y.H. Pao & C.C. Mow : Diffraction of Elastic Wave and Dynamic Stress Concentrations, Crane Russak & Company Inc., New York, pp.626-632, 1973
- 10) 土木学会: トンネル標準示方書 山岳工法・同解説, 2006.

(2012.9.3 受付)

STUDY ON THE VALIDITY OF QUASI-STATIC ANALYSIS FOR SEISMIC DESIGN OF THE MOUNTAIN TUNNEL USING DYNAMIC ANALYSIS

Koji IKENAGA, Naotoshi YASUDA, Keisuke SHIMAMOTO,
Toshihiro ASAKURA and Toshihiko KOBAYASHI

The quasi-static analysis is often used to evaluate the seismic of the mountain tunnel. But the scope of quasi-static analysis is not well known. Therefore, the authors comparing the results obtained by the quasi-static analysis and the dynamic analysis, and considering the validity of quasi-static analysis. As a result, if the wavelength of the seismic wave is five times greater than the diameter of tunnel, there is no difference between the analysis results. On the other hand, if the wavelength of the seismic wave is shorter, although there is a difference between the analysis results, the quasi-static analysis gives a safe side value.