

# 解析解を用いた山岳トンネルの耐震性評価に関する一考察

亀村 勝美

正会員 深田地質研究所 (〒113-0021 東京都文京区本駒込 2-13-12)

E-mail: kame@fgi.or.jp

兵庫県南部地震における山岳トンネルの地震被害を機に、それまで地震に対して強いとされていた山岳トンネルについてもその耐震性の評価が求められるようになった。地震被害について様々な調査研究がなされるとともに、具体的な耐震性評価を目的とした室内実験や数値解析が多数行われ、多くの有用な知見が得られている。しかし実験や数値解析における条件設定は、考慮すべきパラメータが多岐にわたるためそのすべてを網羅することはできず、一般性のある耐震性の評価には至っていない現状がある。ここではトンネルの耐震性を一般性のある解析解を用いて検討した数少ない研究事例についてその概要を示し、ここでの様々な知見から今後の山岳トンネルの耐震性評価において考慮すべき事項を示す。

**Key Words:** *mountain tunnel, seismic behavior, seismic performance, analytical solution*

## 1. はじめに

これまで岩盤内に建設される山岳トンネルは地震に対して安全であるとされ、その耐震性に関する検討は、明らかに地震の影響を受けることが想定される特殊条件のトンネルや、地下発電所などの大規模地下空洞においてのみ行われてきた。しかし近年の被害地震では、岩盤中のトンネルにおいても地震動や地震時の断層変位に起因する顕著な被害が報告されている。

1995年の兵庫県南部地震では様々な地中構造物においても被害が発生し、地中構造物についてもその耐震性を評価する必要性が叫ばれた。そして開削トンネル、シールドトンネルについては地震時挙動とそれに伴う崩壊のメカニズムが明らかにされ、耐震設計法の基準化がなされるとともに耐震補強が広く実施された。しかし山岳トンネルについては、トンネル周辺岩盤の地震時挙動やトンネルの力学特性に不明な点が多く、被害事例に基づく実験や解析による多くの研究によっても未だ十分に解明されていない。その結果、現時点においても山岳トンネルの耐震性評価については基準化には至っていない。

これはひとえに山岳トンネルの地震時挙動に関わる地震動、地質条件、力学特性、初期値となる静的条件下での力学的挙動などに関する情報が少ないことによる。したがって、これまでに様々な関係機関によって行われてきた山岳トンネルの耐震性に関する実験や数値解析による検討においても設定された実験や解析条件は限られた

範囲のものであり、覆工背面空洞は弱点となること、インバートによる断面併合は耐震性向上になる、トンネル周辺地山における不均質性は大きな影響を与えることなどの基本的な事項は明らかにされてきたものの一般性を持った検討結果を示すには至っていない。

一方、波動論に基づく解析解を用いる方法によれば一般性を持った定性的な議論が可能となるが、山岳トンネルの地震時挙動という問題の複雑さ故、試みられた例は少ない。本報告では解析解を用いた既存研究例を調査し、示されている内容を概括し、その結果について考察を加えた。具体的な耐震性評価を対象とした今後の実験や数値解析における条件設定に参考となれば幸いである。

## 2. 解析解を用いた耐震性の研究事例

これまでに山岳トンネルの耐震性を解析解により検討した事例は非常に限られている。これは山岳トンネルの動的挙動解析という複雑な問題をモデル化し、解析的に解くことの困難さによる。

そうした中、幾つかの研究が行われており基本的ではあるが、今後の耐震性評価手法の具体的な検討に有用な知見が示されている。ここでは、その研究内容を紹介するとともに、その結果の意味するところ、適用性などについて検討を加える。

(1) 2次元無限弾性体中の円形トンネル

岡本ら<sup>1)</sup>は、地中構造物に働く地震力に関する研究の中でそれまで土圧論で議論されていたトンネル覆工の地震時安定性について、弾性論で議論する方が適当であるとし、1923年の関東地震と1961年の北美濃地震におけるトンネル被害について分析し、山岳トンネルの地震時被害の特徴を示すとともに弾性波動論を用いてトンネル覆工に作用する地震力を検討している。

被害データの分析結果は、地質によらず覆工厚の厚い区間で被害率が高いこと、被害率だけを見ると土砂、軟岩、硬岩の順に率は減少しているということを示している。その上で山岳トンネルを無限弾性体中の円孔としてモデル化し、解析的検討を行っている。図-1に解析の概要を表-1に解析条件を後述の他の研究事例とともに示す。

岡本らの示す解析解を用いて(変位振幅 a) × (円振動数 p) = 10cm/sec, 波動伝播速度 Cs = 50~1000m/sec, ト

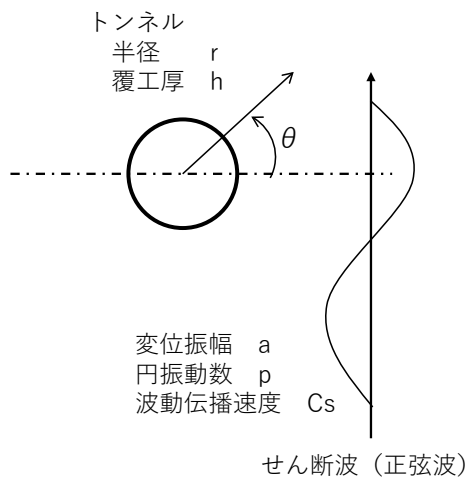


図-1 無限2次元弾性体中のトンネルと地震波

ンネル半径 r=5m, 覆工コンクリート弾性係数 Ec=20GPa, 密度 ρ = 2.3tf/m<sup>3</sup>などを設定し、覆工に生じる曲げ応力 σ を計算すると図-2が得られる。

この図から Cs が小さいほど、すなわち  $C_s = \sqrt{\mu g / \rho}$  (μはラメの定数) であるから地山の剛性が小さくなるに従い曲げ応力 σ が大きくなるのが判る。また、曲げ応力に対して覆工厚を厚くすることによって対抗しようとしても Cs=50m/secのように非常に地山の剛性が小さい場合を除いては、覆工厚の増大に伴い曲げ応力も増大するので覆工の補強にはならないことが判る。このような結果を基に岡本らは以下を結論として示している。

- 波動伝播速度が小なるほど地震力も地震応力も増大する。
- 波動伝播速度がはなはだしく小なる場合を除いては覆工厚が大となると地震力も地震応力も増大する。

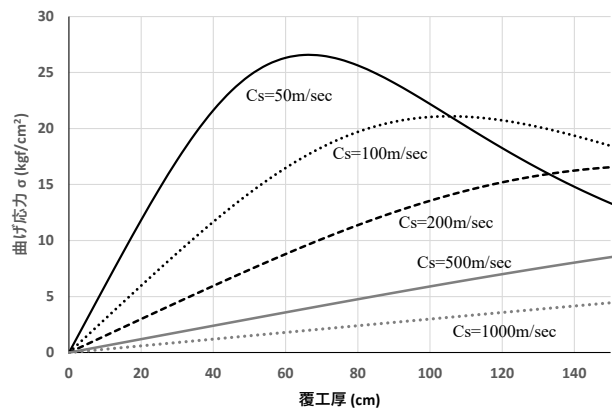


図-2 覆工厚と曲げ応力の関係

表-1 弾性体中のトンネルの解析的検討における設定条件

項目	設定条件	岡本ら(1963)	浜田ら(1984)	保田ら(2014)
媒体	無限2次元弾性体	○	○	
	半無限2次元弾性体		○	
	無限3次元弾性体			○
基礎式	2次元弾性波動方程式	○	○	
	3次元弾性波動方程式			○
地山	一様な弾性体	○	○	○
	地表面(水平)を考慮		○	
	2次元平面ひずみ	○	○	
トンネル	円形断面	○	○	
	中空円筒			○
	覆工は弾性体	○	○	○
	覆工と地山の境界面における変位は同一	○	○	○
地震波	せん断平面波、正弦波	○		
	鉛直下方からのせん断平面波、正弦波		○	
	斜め入射のP波、S1波、S2波			○
	覆工による反射波考慮	○	○	○
	覆工外面より発生する散乱波は地表面で反射せず、地表面では入射波のみ反射		○	

- 波動伝播速度がはなはだしく小なる場合には地震応力は、覆工厚がある値より大なる範囲では厚を増すことによって減少する。しかし厚が増した割には地震応力はそれほど減らない。これは覆工の増厚によって地震力が増すためである。

こうした解析解による結果と関東地震や北米濃地震によるトンネル被害の傾向が定性的に一致していることを受け、岡本らは覆工の耐震性の向上策として、

- ① 覆工裏込めを十分に行い偏圧の作用を防ぐ
- ② 損傷地山にはグラウトを行い補強する
- ③ 覆工に鉄筋または鉄骨によって靱性を与える

などを提案している。

## (2) 2次元半無限弾性体中の円形トンネル

浜田ら<sup>2)</sup>は、岩盤中のトンネルにおいて地震観測を行い、いくつかの地震について有意な岩盤加速度とトンネル覆工ひずみのデータを取得した。

そしてこれらのデータの分析の結果、次のような結論を得ている。「トンネル覆工のひずみ波形は、岩盤の地震時ひずみ波形とほぼ相似形である。覆工コンクリートのひずみの岩盤のひずみに対する割合は、岩盤の硬軟、覆工コンクリートの剛性などによって決定されると考えられる。」

浜田らは、こうした知見を基に岩盤中のトンネルの地震時挙動を具体的に評価すべく図-3と表-1に示すような条件を設定し、解析的手法により検討を行った<sup>3)</sup>。浜田らの解析解によるトンネルの耐震性に関する議論は、ひずみの伝達率 = (トンネル覆工のひずみ) / (地山のひずみ) によって行われていることに特徴がある。これは上述の地震観測データによるトンネル挙動評価が、ひずみに基づいて行われていることによると考えられる。

図-4は浜田らが示す解析結果の一例である。図において上述のひずみ伝達率と覆工厚との関係が、 $\alpha_4 = 2r_0/L = (\text{トンネル径}) / (\text{波長})$  が0.1と0.05の場合の結果と静的有限要素法による解析結果、すなわち $\alpha_4$ が無量大の3本の線が $\alpha_1 = E_L/E_R = (\text{覆工のヤング率}) / (\text{地山のヤング率})$  が0.1, 1.0, 10.0の3ケースについて示されている。

得られた結論は以下のとおりである。

- 波長が空洞径の10倍以上、かつ空洞中心が定常振動の腹に位置する場合を除いては、波長の影響は小さい。
- この領域では動的に求めたひずみ伝達率は、静的に地盤ひずみを与えた場合のひずみ伝達率とほぼ一致する。

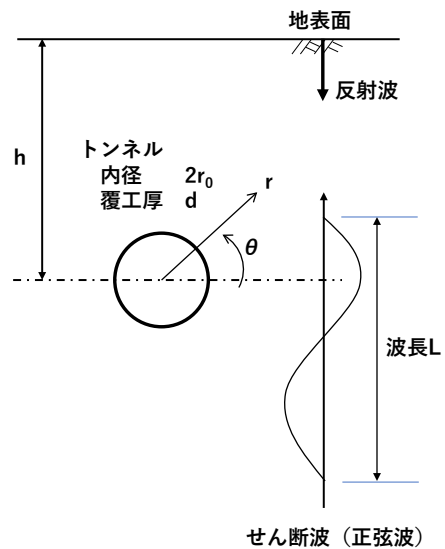


図-3 半無限2次元弾性体中のトンネルと地震波

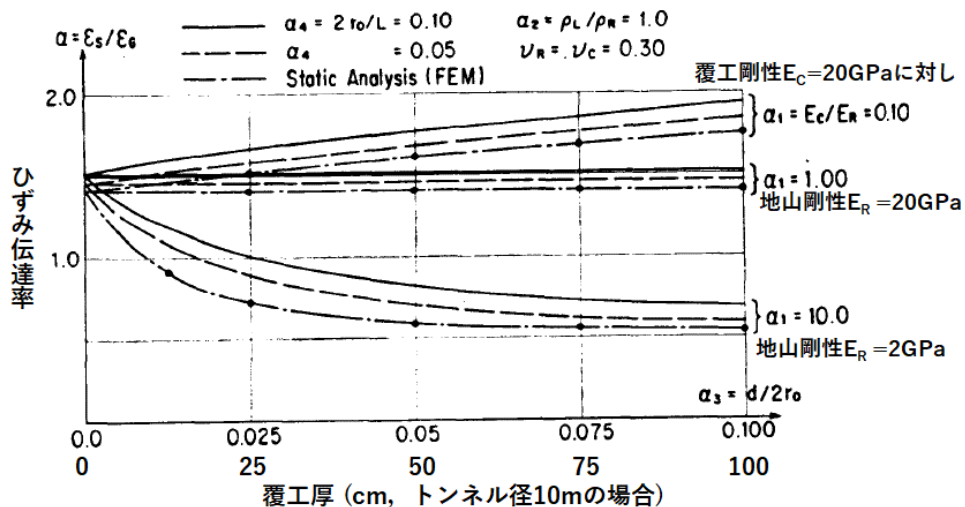


図-4 覆工内壁におけるひずみの伝達率 (浜田ら<sup>3)</sup>が示す解析結果に一部加筆)

また、解析解による検討と同時に有限要素法による有限領域の解析を行い、両者の比較から以下の結論を得ている。

- ひずみ伝達率は周辺岩盤と覆工材料のヤング率の比、および覆工厚と内径との比に強く支配され、内径と波長の比の影響は小さい。
- 波長が空洞径の 10 倍以上と十分に大きい場合には、地盤のひずみを静的に作用させた結果とほぼ一致する。

この結果を受けて、トンネル横断方向については静的有限要素法によりひずみ伝達率を推定し、これを計測により得られた岩盤ひずみに乗じ覆工のひずみ履歴を求めている。そしてこれを実測覆工ひずみと比較し、おおむね一致していることを示している。

ちなみにトンネル軸方向については、トンネルを弾性床上の棒でモデル化し、岩盤ばねを介して地震時岩盤ひずみ相当の強制変位を加えることで解析し検討している。その結果を実測値と比較し、この手法により実測値をほぼ説明できるとしている。

浜田らの研究で留意すべき点は、半無限弾性体での検討であるということである。すなわち入射波と地表面による反射波が合成された定常振動状態では、地山のひずみは無限領域内にある場合の倍となる。したがってトンネルが地表面に近い場合や、周辺に弾性係数が大きく異なる地層や断層が存在する場合には、それらが地震動の伝播に与える影響を考慮する必要がある。

浜田らは結論として、トンネルおよびその周辺岩盤の力学特性から静的解析により求められるひずみ伝達率を地震時の岩盤ひずみに乗じることで地下空洞の地震時ひずみを求めることができるとしているが、同時に地震時岩盤ひずみの設定方法の確立、初期値としての掘削時に生じている覆工応力の評価法の確立が必要としている。

### (3) 3次元無限弾性体中の円筒形トンネル

保田ら<sup>4)</sup>は、2004年の新潟県中越地震における多くの山岳トンネル被害に着目し、地震被害に関する既往研究の詳細な分析を行った。その結果、断層や坑口部などの影響によると考えられる被害を除いたトンネル覆工の被害状況は、それまで行われてきたトンネル横断面の2次元平面での検討では十分説明できないとし、3次元弾性波動論に基づく解析解により山岳トンネルの地震被害メカニズムの検討を行った。

図-5と表-1に解析モデルの概要と主たる解析条件を示す。3次元であるので地震波についてはP波（粗密波）、S1波（トンネル断面内に変位成分を持つせん断波）、S2波（トンネル軸を含む断面内に変位成分を持つせん断波）の3種類を考慮し、トンネル軸に対する地震波の入射角を変化させて検討している。そして解析結果から

以下の考察を行った。

#### a) P波による影響

トンネル軸に対し浅い角度で入射する場合、トンネル軸方向応力が卓越する。反対に深い角度で入射した場合、円周方向応力が卓越する。

#### b) S1波による影響

トンネル軸に対し浅い角度で入射する場合、トンネル軸方向応力が卓越する。反対に深い角度で入射した場合、円周方向応力が卓越する。

横断面方向の応力はトンネル軸に対して鉛直に入射する場合に最大となる。つまりS1波については、トンネル横断面に対する2次元解析は妥当である。

#### c) S2波による影響

トンネル軸に対し浅い角度で入射する場合、天端ではトンネル軸曲げによる軸方向応力が卓越し、側壁では面内せん断が卓越する。反対に深い角度で入射した場合、天端、側壁とも軸方向応力が卓越する。

こうした解析結果を受け、山岳トンネルの耐震性の検討における以下の留意点を示している。

- トンネル径に対して地震波の波長が短い場合、非常に剛性の小さい軟岩中のトンネルにおいては、トンネル横断面のみでなく縦断方向の検討も必要である。
- 地震波がトンネル軸に対して浅い角度で入射する場合、P、S1、S2などの波の種類によらずトンネル周方向にひび割れが生じる可能性がある。
- 地震波がトンネル軸に対して深い角度で入射する場合、P波、S1波では軸方向に、S2波では周方向にひび割れが生じる可能性がある。

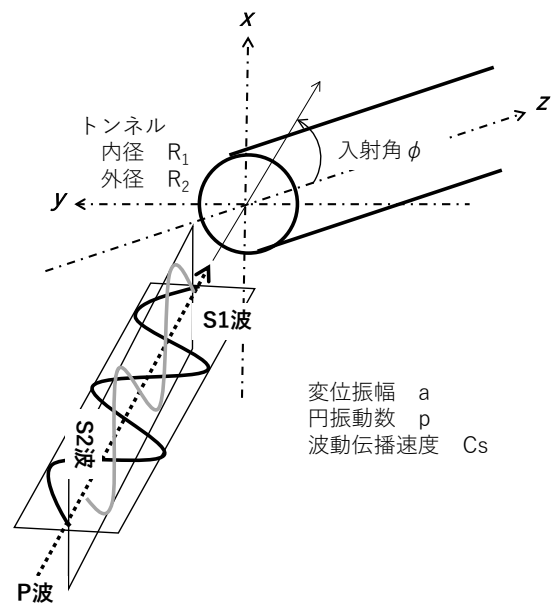


図-5 無限3次元弾性体中のトンネルと地震波

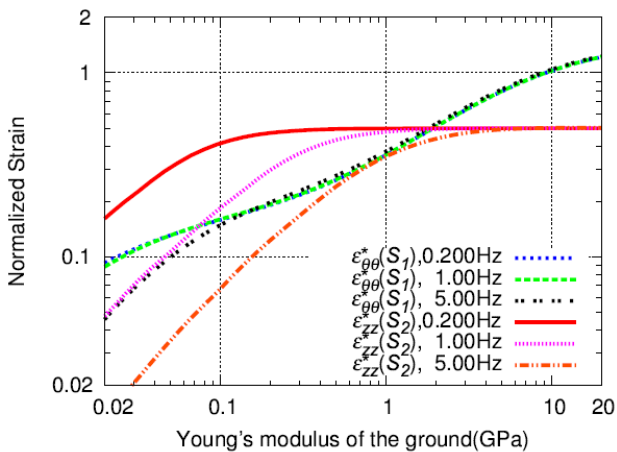


図-6 覆工内壁の周方向ひずみ  $\varepsilon_{\theta\theta}$ 、トンネル軸方向ひずみ  $\varepsilon_{zz}$  と地山のヤング率の関係<sup>4)</sup>

また保田らは議論を一般化させるため地山のヤング率とトンネル覆工内壁の周方向ひずみの関係（これは浜田らの示すひずみ伝達率に他ならない）を入射波の周波数を変化させて解析し、図-6を示している。図における解析条件は表-2の通りである。

表-2 解析条件

覆工	ヤング率	20 GPa
	ポアソン比	0.2
	密度	2300 kg/m <sup>3</sup>
	内径	10 m
	厚さ	50 cm
地山	ポアソン比	0.4
	密度	2000 kg/m <sup>3</sup>

この結果から以下が指摘されている。

- トンネル周方向ひずみ（覆工壁面のひずみを地盤のせん断ひずみで正規化したもの）は、地震の周波数の影響は小さく、地山と覆工の剛性比が大きくなるほど減少する。
- トンネル軸方向ひずみは、覆工と地山の剛性比が1/20程度以下では剛性比と周波数に影響を受け、地山の剛性が小さく周波数が高いほど小さくなる。反対に剛性比 1/20 程度以上では覆工は地震動による地盤の変形に追従し、覆工と地山のひずみは一致する。
- 地山の剛性が覆工のそれの 1/10 より大きい場合、周方向ひずみの方が軸方向ひずみより大きく、1/10 より小さい場合には反対に軸方向ひずみの方が大きくなる。すなわち軟弱な地山では横断面の S 波だけではなく、トンネル軸方向断面内の S 波成分によっても被害が生じる可能性がある。

以上のような解析解に基づく検討結果から保田らは、

山岳トンネルの動的応答の評価における留意点として「従来行われてきた横断面での検討だけでなく、軟岩地山内のトンネルではトンネル軸方向の検討も必要である」と述べている。

### 3. 耐震性の検討における留意点

2.で示した解析解による山岳トンネルの耐震性に関する検討は表-1 に示すように様々な条件の下に行われており、多くの有用な指摘が成されている。ここではそれらに基づき、今後の実験や数値解析による耐震性評価における留意点について考察を加える。

#### (1) 耐震補強としての覆工厚増

岡本ら<sup>1)</sup>は波動伝播速度がはなはだしく小なる場合をのぞいて覆工厚を増すと作用する地震力も大きくなり、覆工厚増大による補強効果はないとしている。この場合の「はなはだしく小なる」というのは波動伝播速度が100m/sec以下を指しており、これは波動伝播速度の定義から地山の弾性係数が0.244GPa以下に対応する。この弾性係数は岩盤のものとしてはかなり小さいもので、そのオーダーは例えば北海道開発局道路設計要領第4集トンネルに示された地山分類表では、地山区分 DII の第三紀堆積岩類の変形係数500~150MPaに対応するものである。

一方、浜田ら<sup>3)</sup>の示す解析解からは、地山の弾性係数が覆工の弾性係数の1/10以下となると、覆工厚を増していくことで覆工内壁面でのひずみ伝達率を減少させることが出来ることが判る。ただしトンネル径10mの場合、覆工厚を50cm以上に厚くしてもひずみ低減効果は期待できない。

この両者の結論は一見矛盾しているように見える。しかし岡本らの議論は覆工に生じる曲げ応力に関してであり、浜田らの覆工内壁面でのひずみとは異なる点に留意する必要がある。ただ、いずれにせよ覆工厚をやみくもに増大させても覆工の耐震性向上の効果は期待できない。したがって岡本らが指摘するように増厚ではなく、覆工に靱性を与える対策を採る必要がある。

#### (2) 応答変位法による耐震解析

山岳トンネルにおいても、開削トンネルやシールドトンネルと同様その地震時挙動は地震動による地山の応答に支配されることが3編の論文でも示されている。したがってその耐震性は、開削トンネルやシールドトンネルの耐震性評価で用いられている応答変位法を適用することによってできると考えられる。ただし、ここに大きな課題がある。それは応答変位法の基本となる地山の地震時応答をどう求めるかである。

開削トンネルやシールドトンネルの場合、地表面との位置関係、構造物周辺の地質状況などに関する多くの情報を得ることが出来、トンネル周辺地盤の地震時挙動を動的に解析するための条件設定は容易である。また入力地震動についても地震基盤面における様々な情報が与えられており、動的解析モデルを構築することが出来る。

一方、山岳トンネルでは地表面の位置は特定できるものの、どのような位置関係にある時に地表面を考慮する必要があるについて別途検討が必要となる。また、動的解析で設定する必要のあるトンネルを含む広域の地質条件を明確にすることは難しい。特に硬質岩盤と軟質岩盤の境界や断層など、波動の反射を生じトンネル周辺地山の地震時挙動に影響を与えると考えられる地質構造条件を特定しモデル化することは困難であり、この点についても様々な条件を考慮した検討が必要であろう。

また一般に山岳トンネルは地震基盤面以深の岩盤に構築されており、どのような境界条件を設定し、どのような地震動をその境界に入力しトンネル周辺岩盤における地震動を求めるのかについても議論が必要である。

### (3) 初期条件としての覆工応力

浜田ら<sup>3)</sup>も指摘しているように、トンネル覆工や支保工には掘削時の地山変位や供用後の経時的な地山挙動による応力が生じている。その大きさは様々であると考えられるが、掘削前に想定した地山条件と実際に遭遇した地山条件が大きく異なり難工事を強いられたトンネルや、供用後に微小な地山挙動が継続し長い時間を経てトンネルに変状をきたした場合にはかなり大きな応力が生じている。それは地震時に覆工に生じる増分応力を上回ることも考えられる。したがって地震時の増分応力の評価は勿論、その初期条件となる静的に覆工に生じている応力の評価は不可欠である。

しかし建設から長い時を経て変状が生じているトンネルにおける覆工応力の推定は簡単ではない。地震時増分応力の検討と同時に初期値としての覆工応力の推定法についても議論が必要である。

### (4) ゆるみ領域の評価

上述の覆工に作用している応力の評価においても問題となるのが、トンネル周辺地山に生じているゆるみ領域の評価である。

ゆるみ領域は、トンネル掘削時の地山応力解放により地山物性が変化する領域で、トンネル変状の一因である。2.で示されたように地震時にトンネルに生じる増分応力(ひずみ)は、トンネル周辺地山の剛性に依存する。したがってトンネルの動的挙動を検討するに当たっては、

このゆるみ領域を評価する必要がある。しかし評価しなければならぬとして、その範囲や物性をどこまで把握することができるのか、また把握しなければならないのか。評価することは結果を安全側に導くのかなどについての議論が必要である。

## 4. おわりに

兵庫県南部地震以降これまでに行われてきた様々な実験や数値解析により、山岳トンネルの耐震性に関する多くの知見が得られてきた。しかし山岳トンネルの地震時挙動を支配する因子は数多く、これまでの検討でもそれらを網羅できていない。このため特定の条件での定量的な議論はできても、あるパラメータに関する定性的な影響や一般性のある結果を示すことはできていない。実際、数値解析による検討で、ある被害事例について解析条件を設定して行ったにもかかわらず静的解析では動的挙動を説明できないことを指摘している研究事例もある。

今後、より詳細な検討を行い山岳トンネルの耐震性評価手法を確立するためには、地震時挙動を支配する多くの因子の評価手法を確定させ、その影響度を評価する必要がある。そのためには数多くの数値解析や実験を系統立てて行う必要があるが、この際、解析解で得られている情報を最大限活用し、一連の検討をシステムティックに行うことが重要であると考えられる。

## 参考文献

- 1) 岡本舜三, 加藤勝行, 伯野元彦: 地中構造物に働く地震力に関する研究, 土木学会論文集, 第 92 号, pp.37-53, 1963.
- 2) 浜田政則, 杉原豊, 志波由紀夫, 岩野政浩: 岩盤空洞の地震時挙動観測と考察, 土木学会論文報告集, No.341, pp.187-196, 1984.
- 3) 浜田政則, 泉博允, 岩野政浩, 志波由紀夫: 岩盤空洞の地震時ひずみの解析と耐震設計, 土木学会論文報告集, No.341, pp.197-205, 1984.
- 4) 保田尚俊, 塚田和彦, 朝倉俊彦: 3 次元弾性波動論に基づいた山岳トンネルの地震被害メカニズムに関する考察, 土木学会論文集 F1 (トンネル工学), Vol. 70, No. 1, 1-14, 2014.

(2022. 8. 26 受付)

# A STUDY ON THE EVALUATION OF SEISMIC PERFORMANCE USING ANALYTICAL SOLUTIONS

Katsumi KAMEMURA

Many seismic damages to mountain tunnels caused by the Hyogo-ken Nanbu Earthquake have prompted the need to evaluate the seismic performance of mountain tunnels, which had been considered resistant to earthquakes. Various studies have been conducted along with many laboratory experiments and numerical analyses to evaluate the seismic performance of tunnels. However, the conditions set in these experiments and numerical analyses cannot cover all of them because of the wide variety and range of parameters to be considered, and generalized evaluation of seismic resistance has not yet been achieved. This paper introduces a few papers that have examined the seismic performance of tunnels using analytical solutions with generality, and provides some considerations that might be useful information for the future studies on the seismic performance of mountain tunnels.