

山岳トンネルの地震被害に関する解析的検討

Analytical Study on Earthquake Damage to Mountain Tunnels

松長 剛¹・服部修一²・野々村政一³・朝倉俊弘⁴

Takeshi Matsunaga, Syuuichi Hattori, Masaichi Nonomura and Toshihiro Asakura

¹正会員 パシフィックコンサルタンツ株式会社 トンネル部 マネージメントチームリーダー (〒163-0730 東京都新宿区西新宿2-7-1)

E-mail: takeshi.matsunaga@tk.pacific.co.jp

²正会員 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 工務部 課長 (〒231-8315 神奈川県横浜市中区本町6-50-1)

³正会員 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 設計技術部 課長 (〒231-8315 神奈川県横浜市中区本町6-50-1)

⁴正会員 工博 京都大学大学院 工学研究科 教授 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

The authors categorized earthquake damage on mountain tunnels into several patterns. Then, among them, the damages found in earthquake-prone shallow ground with low stiffness were reproduced and analyzed. Here, the structural defects in lining were evaluated as one of the structural factors that caused those damages, and a quantitative study was conducted on reinforcement work required for damage mitigation. The results confirmed that the voids behind the lining and construction joints, which had been created during the tunneling work, were closely related to the resultant earthquake damage. Furthermore, it was confirmed that when dealing with a structurally defective lining, it would be effective to provide reinforcement by means of backfilling and rock bolts to mitigate the earthquake damage.

Key Words : mountain tunnel, earthquake damage, structural defect, reinforcement

1. はじめに

地中構造物であるトンネルは、地震時にも周辺地山が安定していれば、顕著な被害を受けないことが多い。このため、良好な地盤条件にあるトンネルでは、設計や施工において地震時の影響を考慮する必要はないと考えられてきた。しかしながら、1995年兵庫県南部地震や2004年新潟県中越地震では、いくつかの条件が重なったトンネルにおいて補強・補修を要する被害が発生した¹⁾²⁾。過去の地震被害については、事例分析を主体とした研究³⁾が行われてきたが、山岳トンネルの被害メカニズムに関する研究事例は少ないのが実態といえる。一方、近年山岳トンネルの適用範囲は拡大し、土被りや地盤剛性の小さい条件下でトンネルが建設される事例が増え、地震の影響を考慮した設計法の確立が求められている。

そこで、筆者らは山岳トンネルの地震被害を数パターンに分類し、その中から地震の影響を受けやすいと考えられる低土被り、低剛性の地山において発生する地震被害を想定して解析的な検討を行った。

2. 過去の山岳トンネルの地震被害

他の構造物と同様、山岳トンネルもしばしば大地震を経験してきた。1923年関東大地震から2004年新潟県中越地震までの日本の山岳トンネルの地震被害事例をまとめると表-1のようになる。

これらの地震のうち、大きい被害を含めて広範囲に被害が発生した地震は、1923年関東大地震、1964年新潟地震、1978年伊豆大島近海地震、1995年兵庫県南部地震および2004年新潟県中越地震である。これら5地震のうち、関東大震災、兵庫県南部地震、新潟県中越地震の被害状況を以下に示す。

1923年関東大地震⁴⁾⁵⁾は、日本の山岳トンネルの震災史上、最大の被害をもたらした地震である。当時、この地震の震央から120km程度の範囲内に、国有鉄道のトンネルだけで建設中のものを含めて149トンネルがあったが、その62%に当たる93トンネルが補修を要する被害を受け、そのうち25トンネルについてはトンネルの崩壊、坑門の崩壊等の対策工や改築を要する大きな被害を受けた。この地震では坑

表-1 日本における山岳トンネルの地震被害 ⁶⁾に加筆・修正

地震名	M	震源地	トンネルの被害状況
1923年 関東大地震	7.9	相模湾 (深さ不明)	南関東の広範囲で100本以上のトンネルに被害。甚大な被害も多数
1927年 北丹後地震	7.3	宮津の西北西7km (深さ0km)	震央域で2本の鉄道トンネルに極軽微な被害
1930年 北伊豆地震	7.3	熱海の西7km (深さ0km)	地震断層の横切りにより1本の鉄道トンネルに激甚な被害
1948年 福井地震	7.1	福井市の北12km (深さ0km)	地震断層から8km以内の2本の鉄道トンネルに大きな被害
1952年 十勝沖地震	8.2	襟裳岬の東南東沖 73km (深さ0km)	北海道内の広範囲にわたり鉄道トンネル10本に軽微な被害
1961年 北美濃地震	7.0	福井・岐阜県境付近 (深さ0km)	震央域周辺の数本の水力発電所導水路トンネルに大きな被害
1964年 新潟地震	7.5	新潟市の北北東沖 50km (深さ40km)	日本海沿岸を中心に鉄道トンネル約20本と道路トンネル1本に被害
1968年 十勝沖地震	7.9	襟裳岬の南南東沖 140km (深さ0km)	北海道内の広範囲にわたり鉄道トンネル23本に軽微な被害
1978年 伊豆大島近海地震	7.0	伊豆大島・稲取間の 海域 (深さ0km)	被災中心地で鉄道トンネル9本と道路トンネル4本に甚大な被害
1978年 宮城県沖地震	7.4	仙台の東方沖112km (深さ40km)	宮城県を中心に鉄道トンネル6本に軽微な被害
1982年 浦河沖地震	7.1	浦河の南西沖18km (深さ40km)	浦河周辺で6本の鉄道トンネルに軽微な被害
1983年 日本海中部地震	7.7	能代市の西方沖90km (深さ14km)	秋田県を中心に鉄道トンネル8本に軽微な被害
1984年 長野県西部地震	6.8	御岳山の南東9km (深さ2km)	震央域の導水路トンネル1本に地震断層横断によると思われる被害
1987年 千葉県東方沖地震	6.7	一宮町の東方沖8km (深さ58km)	中央本線相模湖駅付近で1本の鉄道トンネルの側壁に軽微な被害
1993年 能登半島沖地震	6.6	珠洲市の北方沖24km (深さ25km)	珠洲市内の道路トンネル1本に甚大な被害
1993年 北海道南西沖地震	7.8	寿都の西方沖86km (深さ35km)	島牧村で落石の直撃により道路トンネル1本に甚大な被害
1995年 兵庫県南部地震	7.2	淡路町沖の明石海峡 (深さ18km)	20余本のトンネルに被害。うち補強・補修を要するもの10本前後
2004年 新潟県中越地震	6.8	小千谷市、川口町 (深さ13km)	約50本のトンネルに被害。うち補強・補修を要するもの25本前後

口付近が破壊し、埋没したトンネルが多かったが、これらは大規模な地すべりや斜面崩壊によって発生したものである。

1995年兵庫県南部地震¹⁾では、被災地域内にあった100本を超える山岳トンネルのうち、軽微なものを含めて20本余のトンネルに影響が出た。このうちの約10本は、補強または補修を要する被害を受けた。この地震では、不良地山部や断層のずれによって覆工が崩壊するトンネルが数例確認された。

2005年新潟県中越地震²⁾では、100を超える山岳トンネルのうち、軽微なものを含めて約50本のトンネルに影響を受け、そのうち約25本のトンネルが補強・補修を要する被害を受けた。新潟県中越地震は直下型地震(M6.8)であるが、地震断層面からある一定距離内にあるすべてのトンネルで被害が発生しているわけではなく、地震断層面上ですべり量が大き

きいと推定される範囲(すべり量1.0m以上)で顕著な被害が発生していることが特徴である。

表-1に過去の地震被害を示したが、吉川による鉄道トンネルの震災事例調査³⁾によると、図-1に示すように①地震規模が大きく、②地震断層面からの距離が近く、③特殊条件が介在すれば、トンネルも地震の被害を受けることが確認されている。なお、ここでの特殊条件は、図-2に示すように、坑口部での斜面災害や地震断層といった地形・地質条件とトンネルおよび周辺地山の欠陥といった構造条件に大別される。このように、地震被害の規模の大小には、トンネルの構造的要因と地質的要因が影響していることが分かる。

そこで、本研究では構造的要因として覆工の構造欠陥、地質的要因として低土被り、低剛性を考慮して解析条件を設定することとした。

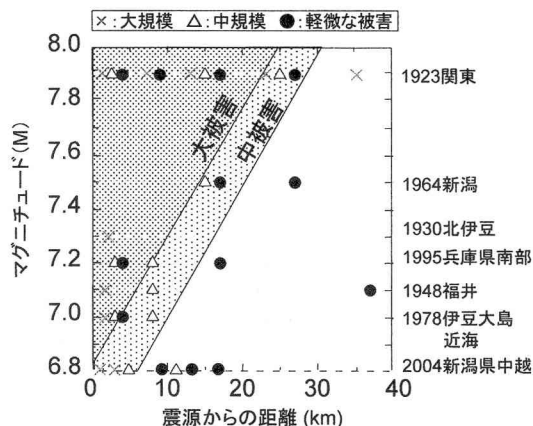


図-1 震源からの離れ・地震規模と被害状況 ³⁾に加筆・修正

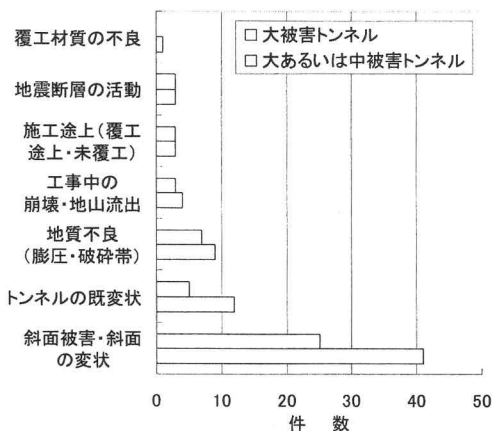


図-2 特殊条件の介在度数 ³⁾

3. 地震被害のパターンとそのメカニズム

(1) 被害パターンと発生メカニズムに関する研究

山岳トンネルの地震による被害事例の検証を通じ、地震時の被害状況やその発生原因を把握することができた。その結果、①地震規模、②地震断層面からの距離といった地震による直接的な原因以外に、構造的要因や地質的要因に代表される③特殊条件による被害の事例が多いことが確認された。しかしながら、地震被害のメカニズムに関する研究事例は少ないのが現状である。この要因としては、山岳トンネルでは覆工に常時作用する荷重に関して不明な点が多く、静的荷重作用時の覆工の力学的挙動やその破壊形態が詳細に把握されていないことがあげられる。

このような実情を踏まえ、朝倉らは地震被害の発生メカニズムに関して、数値解析や模型実験による研究⁹⁾を行っている。朝倉らの研究では、地震被害の代表的なパターンを以下のように取り上げている、

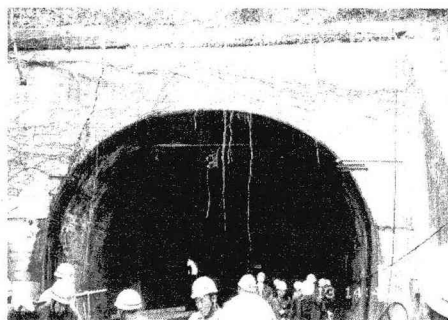


写真-1 東山トンネルの坑門部のひび割れ ⁹⁾

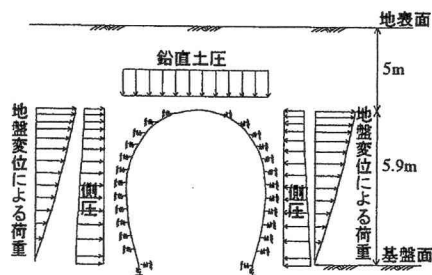


図-3 地震時解析モデル ⁹⁾

- ・ 低土被り部における被害
- ・ 不良地山部における被害
- ・ 断層部のずれによる被害

研究においては、過去の事例検証で確認された特殊条件に着目し、構造的要因や地質的要因が重なった場合には、山岳トンネルにおいても地震時に被害が発生することを定量的に説明している。以下、朝倉らの研究を元に、各被害パターンの発生メカニズムについて概説する。

(2) 低土被り部における被害のメカニズム

都市部における直下型の兵庫県南部地震では、土被りの低い神戸電鉄東山トンネルの坑門、坑口部において、写真-1に示すようにアーチ肩部に開口ひび割れが発生した¹⁾。同トンネルはコンクリートブロック造であるが、低土被り区間の典型的な地震被害として捉えることができる。

低土被り部におけるアーチ肩部の開口ひび割れの発生メカニズムについては、図-3に示すように従来から地震時の検討で適用されてきた応答変位法を用いて評価することができ、地震時におけるひび割れの発生箇所やその規模を把握することが可能である。しかしながら、応答変位法による検討は、ひび割れの発生メカニズムを検証することを目的としているため、覆工アーチ部の剥落、ブロック塊の落下等の大規模な被害については、別途対応が必要となる。

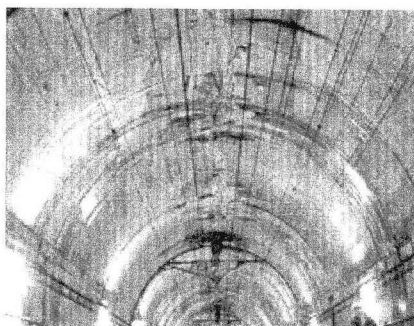


写真-2 妙見トンネル被害状況 2)

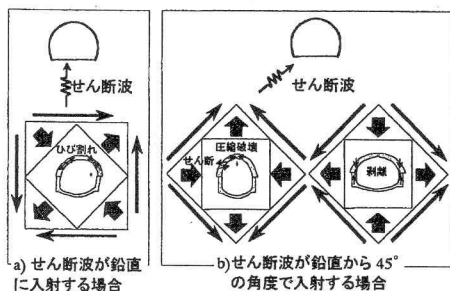


図-4 不良地山区間の被害と地震波の入射方向、地震時増分荷重の作用方向の関係 6)

(3) 不良地山部における被害のメカニズム

新潟県中越地震では、上越新幹線妙見トンネルの一部区間において、写真-2に示すように天端で大規模な圧ざとコンクリートの剥落が発生し、同区間でトンネル軸方向および斜め方向のひび割れが多数確認された²⁾。同トンネルについては現在詳細な検討が進められているが、周辺地山がシルト岩を主体としており、施工時に導坑先進工法が採用していることから、周辺地山が不良であったことが被害原因の一つと考えられている。

天端、側壁でのせん断挙動に伴う圧ざやせん断ひび割れもしくは剥落等の比較的規模の大きな変状を評価するには、従来の解析手法では評価が難しい。そこで、朝倉らは兵庫県南部地震後に、山陽新幹線六甲トンネルにおいて発生した天端や側壁の剥落を想定した数値解析による検討⁶⁾を行っている。この解析では、図-4に示すようにせん断波の入射角を変化させることで天端や側壁での応力集中を再現し、ひび割れの進展を考慮したFEM解析によって被害発生メカニズムを検証している。ここでは、覆工のせん断力と圧縮応力でせん断ひび割れと圧ざの発生メカニズムを評価している。解析による検証の結果、六甲トンネルでは断層破砕帯等の不良な地質条件に加えて、背面空洞等の構造欠陥が被害に大きく影響していることが確認された。この研究から、不良地

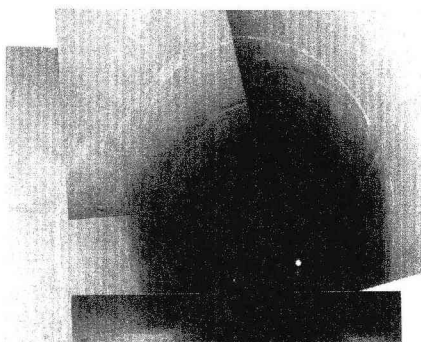


写真-3 塩屋谷川放水路トンネルの被害 7)

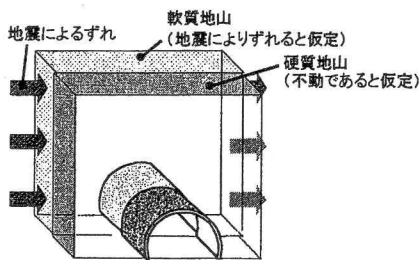


図-5 覆工模型実験モデル 6)

山部で背面空洞が存在すると、大規模地震時に空洞部において圧ざが発生し、ブロック塊の落下につながる可能性があることが確認された。

(4) 断層のずれによる被害のメカニズム

兵庫県南部地震では、塩屋谷川放水路トンネルの断層部において、写真-3に示すように断層のずれに伴う輪切りひび割れや打継目の剥落が確認された。断層のずれについては、対象となる地盤ごとに以下に示す3パターンに区分することができる。

- ・ 硬岩と硬岩： 北伊豆地震丹那トンネルで確認された^{3),8)}。トンネルの補強では防ぎようがないパターンである。
- ・ 硬岩と軟岩： 兵庫県南部地震塩屋谷川放水路トンネルで確認された¹⁾。
- ・ 軟岩と軟岩： 上記2パターンよりは被害が軽微である。

断層のずれは三次元的な挙動であるため、解析による検討が困難である。そこで、朝倉らは図-5に示す模型実験⁶⁾によってそのメカニズムを検証している。模型実験では、地盤剛性が小さいほど被害が軽微であることが確認され、軟岩と軟岩の不整合面を想定したパターンではひび割れが発生しない結果となっている。

以上の研究成果を参考に、地震時にトンネルが影響を受けやすい低土被り部および不良地山部（本研究では低剛性部として位置付け）で発生する被害状況を想定して解析的検討を行うこととした。

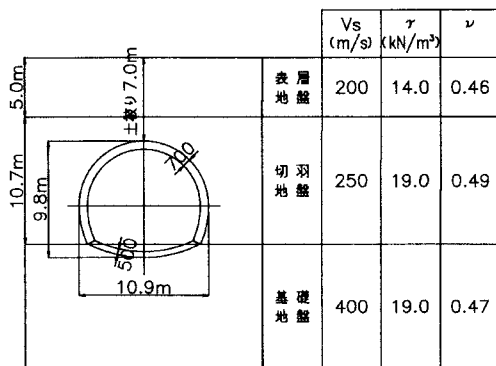


図-6 地層構成および地盤物性値

4. 地震被害に関する解析的検討

(1) 検討の目的

吉川らによる地震被害の分析³⁾、朝倉らによる被害メカニズムの検討⁶⁾の結果から、山岳トンネルの地震被害には地震規模や震源からの距離等の基本条件以外に、構造的要因や地質的要因といった特殊条件が大きく影響することが確認された。そこで、山岳トンネルが大規模地震時に受ける影響を特殊条件をパラメータとした数値解析で検討し、地震被害の再現性について検討を行った。さらに、現実的な補強工として実績も多い裏込注入工+ロックボルト補強工について、その補強効果を検討することとした。

地震被害のメカニズムに関する研究が比較的少ない原因は、山岳トンネルが周辺地山の支保機能に期待していること、覆工が無筋コンクリート構造であることといった他の構造物との相違点にある。特に無筋コンクリート構造物の耐震性能に関しては、明確な性能規定がなく、その破壊の進行を解析的に取り扱うことは非常に困難である。このため、山岳トンネルを解析的に検討を行った事例は少ない。また、近年都市トンネルの分野で採用実績が増えてきている動的解析を実施しても、無筋コンクリートでは解析結果が不安定となることが予想される。このような技術的背景を踏まえ、無筋コンクリート構造のトンネル覆工に着目し、地震時の破壊の進行を再現することを目的として数値解析による検討を行った。

(2) 解析条件の設定

a) 解析手法の概要

従来の地震解析を元に応答変位法に準じた手法で地震時の荷重を算定し、覆工におけるひび割れの進展を考慮したFEM解析によって地震時の発生変位やその応力状態について検討を行った。

b) 地盤モデル

解析で想定したモデル地盤の地層構成および地盤

表-2 覆工コンクリートの物性値

設計基準強度 f_{ck}	18 N/mm ²
単位体積重量 γ_c	23.0 kN/m ³
弾性係数 E_c	22.0 kN/mm ²
引張時弾性係数 E_t	15.3 kN/mm ² (ひび割れ後 $E_t/1000$)
引張強度 f_{tk}	1.6 N/mm ²

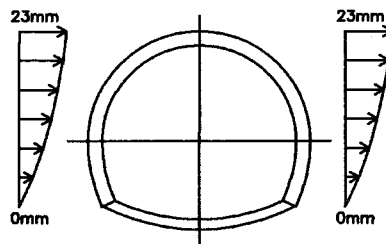


図-7 一次元地盤応答解析結果（地盤変位）

物性値を図-6に示す。

解析では、地震時の被害発生の地質的要因として土被り1D（D：トンネル径）以下の低土被りトンネルを想定し、地盤剛性についても未固結地山に相当する小さな値に設定した。地層構成は表層地盤、切羽地盤、基礎地盤の3層とし、トンネルが地震時に影響を受けやすい条件⁷⁾として、基盤層の直上にトンネルが位置するようにトンネルとの位置関係を設定した。なお、基礎地盤のせん断弾性波速度については、各設計標準^{9),10)}を参考に比較的小さな値として $V_s=400\text{m/s}$ と設定した。

解析モデルにおいては、「鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計」（以下、耐震標準）に準じた手法で変形係数および地盤反力係数を算定し、地盤ばねを設定した。

c) トンネル覆工モデル

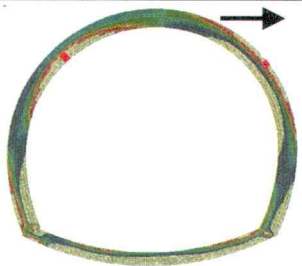
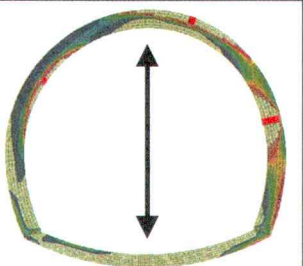
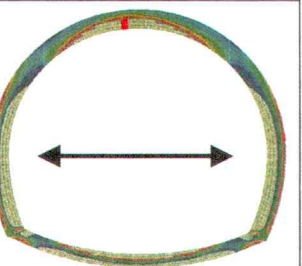
トンネル断面は新幹線標準断面とし、覆工は矢板工法で施工された無筋コンクリート構造を想定した。覆工コンクリートの物性値は表-2に示す値とした。

解析においては覆工に発生するひび割れの進展を評価するため、巻厚をFEMメッシュで表現し、発生応力が引張強度に達した時点で引張剛性を極端に低下（ひび割れ前の1/1000）するモデル化を行った。また、覆工とインパートの接続部については、施工目地に影響を考慮し、すべりや開口をモデル化した。

(3) 地震時荷重の算定

解析においては、典型的な地震被害として「低土被り部におけるアーチ肩部の開口ひび割れ」と「不良地山部における天端・側壁の剥落」の再現を試みた。そこで、過去の被害事例を参考に、大規模な地震時の影響を評価する目的で、L2地震動を想定した荷重の算定を行った。

表-3 覆工コンクリートの物性値

せん断波 入射角	ケース①：鉛直 (トンネルせん断変形)	ケース②：+45° (トンネル鉛直変形)	ケース③：-45° (トンネル水平変形)
ひび割れ 発生部位*	左側肩部内側(深さ： $t/2$) 右側肩部外側(深さ： $t/6$)	天端外側(深さ： $t/3$) 右側側壁内側(深さ： t)	天端内側(深さ： $t/2$) 左側側壁外側(深さ： $t/6$)
覆工変位	せん断変形 21.8mm	鉛直変形 11.5mm 拡大	水平変形 17.4mm 拡大
変形図 ・ 引張応力 分布図			

矢印は変形モード，■はひび割れ部位を示す。

※：() 内はひび割れ深さを示す。tは覆工巻厚 700mm。

地震時の荷重条件としては、慣性力・地盤変位・周面せん断力を考慮し、それぞれ、耐震標準に準じた手法で荷重を算定した。

a) 慣性力

表層地盤の地盤種別を普通地盤G3としたところ、設計水平震度は0.84となった。なお、インバートが基盤に位置していることから、慣性力は覆工にのみ作用させた。

a) 地盤変位

地盤変位は、一次元地盤応答解析によって算定した。地盤モデルには等価線形化法と逐次積分法（双曲線モデル）を採用したが、解析でせん断ひずみが 10^{-2} 以上となったことから、大ひずみ領域に対応できる非線形モデルの逐次積分法で算定した地盤変位を採用することとした。地震時荷重の算定に用いた地盤変位を図-7に示す。

c) 周面せん断力

周面せん断力については、覆工周面を切羽地盤、インバート周面を基礎地盤のせん断弾性係数によって算定した。

d) 載荷ステップ

覆工におけるひび割れの進展を引張剛性の低下でモデル化する非線形解析を行うため、地震時荷重については100ステップに分割して載荷を行った。

(4) 解析結果

解析においては、「ひび割れの発生部位」、「構造欠陥の影響」、「補強工の効果」を検討パラメータとして解析ケースを設定した。それぞれの検討結果を以下に示す。

a) ひび割れ発生部位の検討結果

山岳トンネルにおける典型的な地震被害として「低土被り部におけるアーチ肩部の開口ひび割れ」、「不良地山部における天端・側壁の剥落」を再現す

るため、既往の研究⁶⁾を参考にせん断波の入射角をパラメータとして比較解析を行った。解析結果を表-3に示す。

従来の地震時解析に準じてせん断波を鉛直に入射したケース①では、アーチ肩部とインバート隅角部に応力が集中し、トンネルが地盤変位に追従してせん断変形する結果となった。これにより、アーチ肩部にひび割れが発生し、低土被り部における典型的な被害状況が再現された。なお、隅角部についても応力集中が発生したが、施工目地をモデル化したことで、ひび割れは発生しない結果となった。

次に不良地山部において発生する天端や側壁の剥落を再現するために、せん断波の入射角を $\pm 45^\circ$ に傾斜させてトンネルを鉛直方向（ケース②）および水平方向（ケース③）に変形させる解析を行った。

その結果、トンネルが鉛直方向に拡大し、水平方向に縮小するケース②では、不良地山部における被害と同様に天端外側および側壁内側でひび割れが発生した。特に右側の側壁内側で発生したひび割れは巻厚相当の深さに達する（計算上貫通はしていない）結果となった。しかしながら、圧縮発生を目安となる圧縮応力については、天端内側で応力集中が生じたものの、その応力値は7 N/mm²程度であり、圧縮強度に対しては余裕のある結果となった。

また、水平方向に拡大し、鉛直方向に縮小するケース③では、ケース②と反対に天端内側および側壁外側にひび割れが発生した。本ケースにおいても、圧縮応力の集中が左側の側壁内側で確認されたが、その応力値は5 N/mm²程度であった。

b) 構造欠陥による影響の検討結果

せん断波の入射角を $\pm 45^\circ$ に変化させること（ケース②、ケース③）で、天端や側壁での応力集中、ひび割れの発生については再現することができた。

表-4 構造欠陥モデルによる解析結果

(a) せん断波入射角+45° の場合 (ケース②)

		健全覆工	構造欠陥*
覆工変位	鉛直	11.5mm 拡大	354.6mm 拡大
	水平	14.3mm 縮小	25.2mm 縮小
圧縮応力	天端	内側 7.3 N/mm ²	内側 7.7 N/mm ²
	側壁	外側 5.3 N/mm ²	外側 7.6 N/mm ²

※構造欠陥ケースではアーチ部が不安定化しているため、変位・応力は参考値

(b) せん断波入射角-45° の場合 (ケース③)

		健全覆工	構造欠陥
覆工変位	鉛直	20.1mm 縮小	67.1mm 縮小
	水平	17.4mm 拡大	63.7mm 拡大
圧縮応力	天端	外側 3.2 N/mm ²	外側 15.2 N/mm ²
	側壁	内側 5.2 N/mm ²	内側 14.5 N/mm ²

しがしながら、健全な覆工を想定したこれらの解析ケースでは、貫通ひび割れや圧縮破壊が発生せず、天端や側壁で見られる剥落を再現することができなかった。そこで、地震時における被害発生の一因として、「天端背面の空洞」と「逆巻覆工側壁の目地開き」を考慮し、構造欠陥が地震被害に与える影響について検討した。

背面空洞については、天端90° 範囲を想定し、地盤ばねを省略し、地盤反力が期待できないことで表現した。また、目地開きについては、すべりや開口を評価するためにジョイント要素を設置してモデル化を行った。解析で得られた発生変位、応力を表-4に示す。

トンネルが鉛直方向に拡大し、水平方向に縮小するケース②では、天端の鉛直変位に対して地盤反力が発揮されず、変形が増大してアーチ部が不安定な挙動となった。応力値が健全覆工と比較して顕著に増大していないのは、背面空洞端部（アーチ肩部）においてひび割れが貫通してアーチ部が不安定になったためである。解析が不安定となったため、応力値を直接評価はできないが、アーチ肩部の両側でひび割れが貫通したため、地震後に周辺地盤が不安定化を呈すると、コンクリートの剥落が懸念される状況となった。

また、トンネルが水平方向に拡大し、鉛直方向が縮小するケース③においても、覆工の変形量は健全覆工の3倍以上と増大する結果となった。さらに、圧縮発生を目安とする圧縮応力については、天端外側で5倍、側壁内側で3倍程度に増大し、圧縮強度に近い値となった。ひび割れについては天端、側壁ともに貫通はしていないが、側壁目地部におけるずれは18.5mm発生しており、側壁内側におけるコンクリートのせん断ひび割れや剥落の発生が懸念される結果となった。

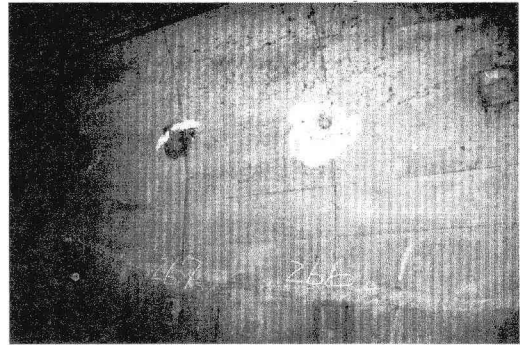


写真-4 地震後のロックボルトの定着状況

c) 補強工による効果の検討結果

不良地山部の地震被害を想定した解析の結果、地盤剛性が未固結地山相当に小さくても覆工が健全であれば、大規模地震時の被害は天端や側壁のひび割れ程度に収まることが確認された。しかしながら、天端の背面空洞や逆巻覆工側壁の目地開きといった構造欠陥を有する覆工では、空洞部のコンクリートが不安定化し、ひび割れが貫通することから、圧縮や剥落の発生が懸念される解析結果となった。そこで、次に構造欠陥を有するトンネルに対して、地震被害を軽減するための補強工について検討を行うこととした。

写真-4は、筆者らが新潟県中越地震直後にトンネルの被害調査を行った際に撮影したものである。本トンネルは矢板工法で施工され、覆工は無筋コンクリート構造である。震央からの距離が20km程度と離れていたため、同路線のトンネルでは覆工コンクリートが落下するといった顕著な被害は確認されなかったが、本トンネルの隣接トンネルでは天端において圧縮や軽微な剥落が発生した。しかしながら、本トンネルでは地震前に常時の補強として側壁をロックボルト（D25、L=3.0m@1.5m）で対策したこともあり、覆工に顕著な被害は現れなかった。写真に示すように、ロックボルトが地震時にも地山に定着していたことから、頭部のコンクリートがトンネル軸方向に連続して剥落（200×300mm）している。また、この剥落は震源側のみで発生しているという特徴があった。

ロックボルトによる地震時の補強効果については、上記の事例だけでなく、既往の研究¹¹⁾においても模型実験や数値解析によって確認されていることを踏まえ、ロックボルト補強工による効果を解析で検討することとした。

解析においては、背面空洞と側壁の目地開きという構造欠陥に対して、裏込注入工とロックボルト補強工を組み合わせるモデルを作成した。補強工モデ

表-5 補強工のモデル化

裏込注入工	モデル化	空洞部地盤反力の復元
ロックボルト 補強工	モデル化	先端固定の棒要素
	材質	STD510
	長さ	4.0m
	呼び径	TD24
	本数	片側4本
	降伏応力	180kN
	プレストレス	100kN

ルの解析条件については、常時の対策工設計の標準パターン¹²⁾に準じて表-5のように設定した。

健全覆工、構造欠陥、補強工の各解析結果から、天端、側壁における圧さおよび剥落を評価するため、圧縮応力を図-8のように比較した。トンネルが鉛直方向に拡大し、天端内側の圧縮応力が卓越するケース②では、裏込注入工によって天端における変形挙動が抑制され、圧縮応力が天端、側壁ともに軽減した。また、トンネルが水平方向に拡大し、側壁内側の圧縮応力が卓越するケース③においては、ケース②以上に効果が現れ、構造欠陥の場合に圧縮強度に近かった天端、側壁の応力値は健全な覆工相当に軽減される結果となった。なお、ロックボルトの発生応力については、ケース②では片側の3本が降伏応力相当となったが、ケース③では降伏応力に対して余裕のある値であった。

5. まとめ

地震被害の分析、被害メカニズムの検討といった既往の研究成果^{3),6)}を踏襲し、低土被り・低剛性地山を対象として地震被害の再現を目的とした解析的検討を行った。本研究で得られた検討成果や知見を以下に示す。

- 地震被害を受けやすい低土被り・低剛性の地盤条件の元でL2地震動を想定した解析を行ったが、健全な覆工であればアーチ肩部や天端、側壁にひび割れが発生するものの、覆工コンクリートの剥落や落下という大規模な被害は発生しづらいことが確認された。
- 天端の背面空洞や逆巻覆工側壁の目地開きといった構造欠陥を有する覆工が大規模な地震を受けると、貫通ひび割れが発生し、圧縮強度に近い応力が発生する結果となり、構造欠陥が地震被害を拡大する要因であることが確認された。
- 構造欠陥に対する補強工として、裏込注入工とロックボルト補強工を想定した解析を行ったところ、覆工変位や発生応力が健全覆工に近いレベルまで抑制されることが確認された。

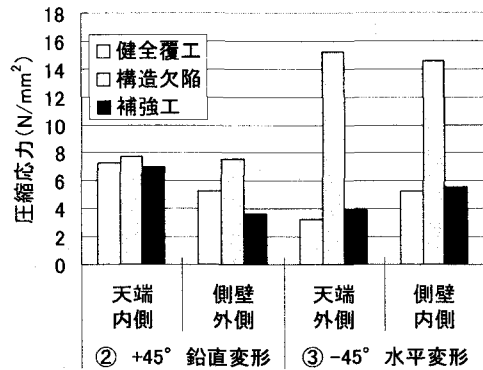


図-8 補強工モデルによる解析結果

本研究では、地震時におけるトンネルの被害発生を前提として検討を行ったが、1995年兵庫県南部地震や2004年新潟県中越地震においては震源近傍でも被害が発生していないトンネルが多数確認されている^{1),2)}。今後の地震防災に関する研究では、これら無損傷の事例こそが重要なデータと位置づけて、検討を深度化させていきたいと考えている。

参考文献

- 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会：阪神・淡路大震災調査報告 土木構造物の被害原因の分析、1996。
- 土木学会 トンネル工学委員会 新潟県中越地震特別小委員会：新潟県中越地震特別小委員会 報告書、2005。
- 吉川恵也：鉄道トンネルの震災事例調査、鉄道技術研究報告No.1123、1979。
- 土木学会：復刻版 大正十二年関東大地震震害調査報告（第二巻）鉄道及び軌道部、1984。
- 土木学会：復刻版 大正十二年関東大地震震害調査報告（第三巻）道路部、1984。
- 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
- 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 都市部山岳工法トンネル、丸善、2003。
- 吉川恵也：地震断層による鉄道トンネルの被害、土と基礎、Vol.30, No.3, pp.27-32、1982。
- 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計、丸善、2001。
- 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編、丸善、2004。
- 吉川恵也、朝倉俊弘、川上義輝、馬場富雄：トンネルの耐震補強に関する研究、鉄道技術研究報告No.1322、1986。
- 鉄道総合技術研究所：変状トンネル対策工設計マニュアル、1998。