

土木学会 トンネル工学委員会
東北地方太平洋沖地震調査特別小委員会
報 告 書

2013 年 11 月

まえがき

2011年3月11日14時46分に三陸沖を震源とするマグニチュードMw9.0の東北地方太平洋沖地震が発生した。この地震では、宮城県栗原市築館で震度7を観測し、また宮城県、福島県、茨城県、栃木県の広い範囲で震度6強を観測している。気象庁によると、本地震のメカニズムは北西-南東方向に圧縮軸をもつ逆断層型地震で、震源の深さからみても太平洋プレートと北米プレートとの間で発生したプレート境界型地震であると考えられ、その余震域も長さおよそ500km、幅およそ200kmに及んでいることが報告されている。本地震では、大津波警報を発する規模の津波が発生し、その津波による被害が広範囲かつ甚大となった。また、重要構造物の被害としては福島第一原子力発電所が大きく取り上げられたが、道路・鉄道・水路・通信等の各種構造物においても大きな被害を生じた。

2004年新潟県中越地震（Mw6.8）¹⁾では、内陸部の山岳地帯が震源域であったことから、道路や鉄道、発電用水路といった多くの山岳トンネルで被害が発生した。また、中越沖を震源とする2007年新潟県中越沖地震（Mw6.8）²⁾では、海岸線に並行した地震断層と並行して位置する北陸自動車道およびJR信越本線の一部の山岳トンネルで被害が発生した。一方、東北地方太平洋沖地震では、前述のトンネル被害のような致命的なものは発生しなかったが、トンネル周辺の地盤が顕著に変位したこと、坑口部で斜面が崩壊したことなどに起因して、一部のトンネルが通行止めとなり、トンネルく体にも軽微な被害が発生した。

このように、一部のトンネル構造物に過去の地震とは異なる被害が発生したことを受け、トンネル工学委員会では今後の地震対策を検討する上で有効かつ貴重なトンネルの被害および復旧方法等の情報を調査する目的で、東北地方太平洋沖地震調査特別小委員会を設立した。本特別小委員会は、震災後の調査・復旧に直接携わった事業者を中心として委員を構成し、現地における情報を調査可能な期間内で震災地域内のトンネルの代表的な被害事例や復旧方法の整理等を行った。なお、東北地方太平洋沖地震は被害が甚大で、広範囲に及んだため、震災事例の調査や資料収集に多大な時間を要してしまった。本来であれば迅速に被害状況を把握することを念頭において活動を行ってきたが、情報を精査・集約する度に新たなデータが収集されたこともあり、取りまとめが遅くなってしまった。

本報告書は、このような小委員会の活動成果をとりまとめたものである。今後、トンネル構造物の地震に対する取り組みにおいて、本成果が資することとなれば幸いである。

トンネル工学委員会 東北地方太平洋沖地震調査特別小委員会
委員長 朝倉 俊弘

トンネル工学委員会

東北地方太平洋沖地震調査特別小委員会 委員構成

委員長

朝倉俊弘 京都大学大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻

副委員長

中田雅博 中日本高速道路(株) 企画本部 環境・技術部

委員兼幹事

岡野法之 (公財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 トンネル研究室

松長 剛* パシフィックコンサルタンツ(株) 交通基盤事業本部 トンネル部

重田佳幸* パシフィックコンサルタンツ(株) 交通基盤事業本部 トンネル部
(*途中交代)

委員 (五十音順)

小田文夫 三陸鉄道(株) 施設管理部

齋藤 貴 東日本旅客鉄道(株) 建設工事事務部 構造技術センター 地下・トンネルグループ

佐藤雅志 仙台市交通局 高速電車部 施設課

高橋 亨 国土交通省東北地方整備局 仙台港湾空港技術調査事務所

平林泰明 首都高速道路(株) 技術部長

富田敦紀 東京電力(株) 建設部 土木・建築技術センター 地下利用技術グループ 兼 原子燃料サイクル部

小笠原政文* 首都高速道路(株) 技術部長

半野久光* 首都高速道路(株) 技術部長

野呂茂樹* 国土交通省東北地方整備局 仙台港湾空港技術調査事務所
(*途中交代)

目 次

まえがき

委員構成

1. 調査の概要	1
1.1. 調査対象	1
1.2. 地震による被害の概要	1
1.3. 地震の概要	2
1.4. 津波の概要	2
2. 鉄道トンネルの被害	7
2.1. 概要	7
2.2. 東日本旅客鉄道	7
2.2.1. 新幹線トンネルの被害	7
2.2.2. 在来線トンネルの被害	12
2.3. 仙台市営地下鉄	13
2.4. 仙台空港鉄道	13
2.5. 三陸鉄道	15
3. その他のトンネルの被害	21
3.1. 概要	21
3.2. 首都高速道路	21
3.3. 東北電力	21
3.4. 東京電力	22
4. まとめ（今後に向けた提言）	23
4.1. トンネルにおける地震被害の概要	23
4.2. 被害要因に関する考察	23
4.3. 今後に向けた提言	24

謝辞

1. 調査の概要

1.1. 調査対象

2011年東北地方太平洋沖地震（Mw9.0, 3月11日14:46発生）は、広範囲にわたり大きな揺れと、津波の被害をもたらした。

土木学会トンネル工学委員会では、地震災害調査特別小委員会を設置し、まず、全委員を対象として、トンネルの地震被害情報を収集し、概略状況を把握した。被災地域が広く、特に津波の被害が甚大であったため、早期にトンネル被害の全容を把握することは難しかったが、被災域に存在するトンネルは明かり構造物に比べると被害の程度は小さく、大きな被害を受けたトンネルは限定的でありそうだということを抱

握した。

そして、関係する職域委員または職域委員から紹介された方に調査の協力を依頼し、被害の情報を収集した。その結果を表1-1に示す。

1.2. 地震による被害の概要

各種トンネルの被害状況（概要）は表1-1に示す通りであり、全体的には軽微な被害（変状）であったと言える。2004年新潟県中越地震や2007年新潟県中越沖地震の被害と比べると、覆工コンクリートの大規模な崩落や、圧ざ、せん断ひび割れの発生といった甚大な被害は発生していない。

表 1-1 調査結果の概要

業種	事業者等	被災状況
鉄道	東日本旅客鉄道	新幹線トンネルで4トンネル（うち、比較的被害が大きかったのは、路盤隆起が発生した2トンネル、在来線で13トンネルにおいて、覆工コンクリート片の剥落等が発生。
	仙台市営地下鉄（南北線：営業線）	地震直後に全線調査。トンネル区間は列車運行に支障する変状がないことを確認し、3日後に運転再開。ただし、トンネル内の漏水量が増加。
	仙台市営地下鉄（東西線：建設中）	開削駅く体の一部にクラック発生。また、開削区間のシートパイル土留・腹起しの一部に若干の変形が発生。
	仙台空港鉄道	ボックスカルバートにおいて、鉛直・水平方向ともに10cm以上の段差が発生。また、継手部がねじれによって一部破損し、漏水が発生。
	三陸鉄道	南リアス線で坑門のひび割れ発生等4カ所。
道路	国道	大きな被害なし。
	東日本高速道路	管内43本のトンネルにおいて被害なし。
	首都高速道路	開削トンネルの継目部からの漏水5カ所。
電力	東京電力	開削によって構築した地中設備（洞道、マンホール等）で、液状化地域における傾斜や段差などの損傷が認められた。
	東北電力	四時川第二発電所（福島県）の導水路が、坑口部の地山崩壊によって約30mにわたり流出。
	電源開発	被害なし（もともと東北地方に設備が少ない）
通信	東日本電信電話	被害なし
下水道	日本下水道事業団	トンネル施設の被害について調査を実施していない。

1.3. 地震の概要

地震は2011（平成23）年3月11日14:46に発生し、震源位置は38.103° N, 142.860° E, 深さ24km, マグニチュードは9.0であった（2011年3月13日気象庁発表）。

国土地理院による東北地方太平洋沖地震の震源断層モデル（水平変動）を図1-1に示す。断層面およびすべり量について、

・断層面の形状は、日本海溝に沿った2枚の長方形で近似でき、総延長約380km, 幅が約90～130kmで、西に傾き下がる断層面

・西側の地塊が東側に対して乗り上げるような逆断層運動を起こしたと考えられ、すべり量は北側が約25m, 南側が約6mと推定されている。

本震後1日間に発生した地震の震源分布およびメカニズム解を図1-2に、震度分布を図1-3に示す。また、東日本の主要交通網（新幹線および高速道路）を図1-4に示す。

図1-2より、本震後1日間で発生した地震の震源分布は、東から西に向かって深くなる傾斜であることを如実に示している。また、震源の密集度という観点からすると、宮城県や岩手県の太平洋沿岸よりも、福島県から茨城県にかけての太平洋沿岸部に集中している。

図1-3に示す震度分布をみると、本地震で、宮城県栗原市で震度7を記録し、震源断層に沿う宮城県、福島県および栃木県の県央から太平洋岸にかけてと茨城県の広い範囲にわたり、震度6強が観測されている。

今回の地震で観測された加速度波形とフーリエスペクトルのうち代表的なものと、1995年兵庫県南部地震および2004年新潟県中越地震のものを図1-5に示す。兵庫県南部地震と新潟県

中越地震は直下型地震であり、継続時間が短く卓越振動数が1Hz～2Hzであるのに対し、今回の地震は2つの断層が連動して破壊したため継続時間が非常に長く、そして、卓越振動数が3Hz～5Hzと高いのが特徴である³⁾。

本地震により、広範にわたり液状化が発生した。特に、東京湾岸では、震度は6弱または5強程度とさほど大きくなかったが、非常に広い範囲で激しいものとなった。この理由としては、上述の揺れの継続時間が非常に長かったことに加え、主要動以降に振動数が0.3Hz～0.5Hzほどのやや長周期成分が繰り返されていることによるとされている³⁾。

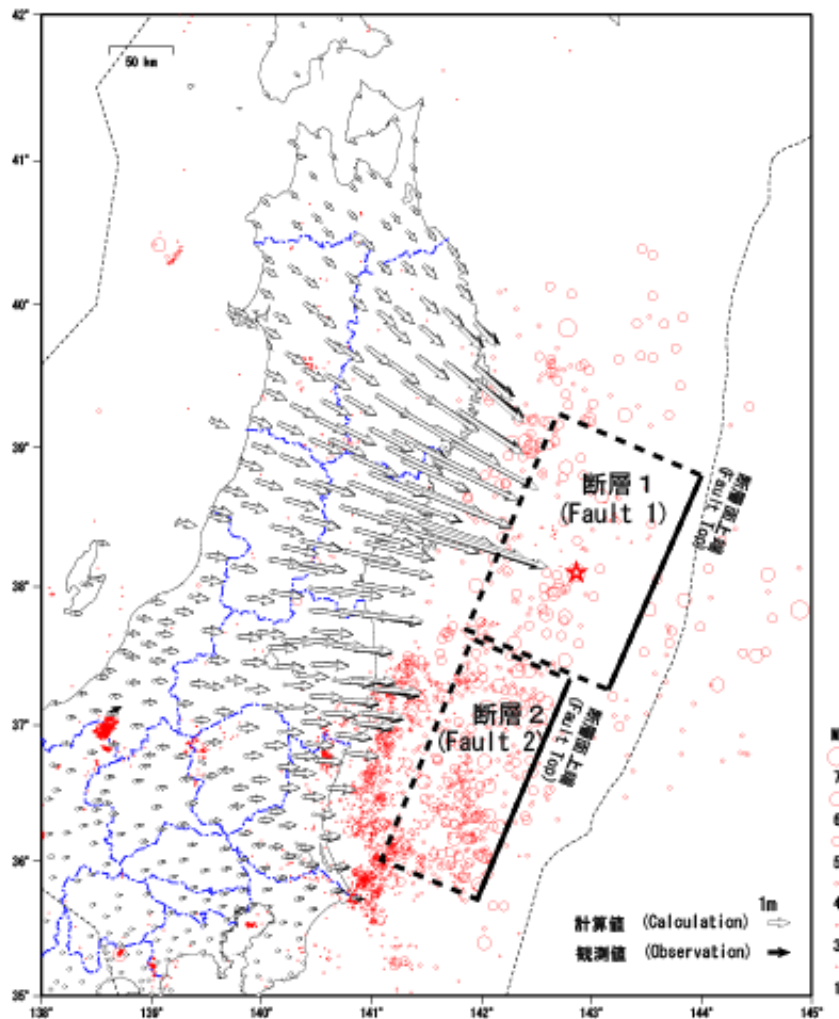
また、本地震の特徴の一つとして、非常に多くの、そして、大きな余震を伴ったことが挙げられる。本震発生から約1カ月後の4月7日には宮城県沖を震源とする大きな余震が発生し、仙台市宮城野区や栗原市で震度6強を観測している。

1.4. 津波の概要

本地震は震源断層が非常に大きいプレート間地震であったため、巨大な津波を伴ったのが特徴である。気象庁の潮位観測所で観測された津波の状況を図1-6に示す。国土地位林の調べでは、「東北地域を中心に、痕跡高が10mを超える地域が南北に約530kmに渡り、20mを超える地域も約200kmと非常に大きな痕跡高が広範囲に渡って記録されている。局所的には、最高40.1mの観測最大の遡上高が大船渡市綾里湾で記録されており、これは明治三陸津波の記録を上回る日本で記録された最大値である」とされており、沿岸部での未曾有の津波被害、浸水被害につながった。

From 2011/03/10 - 2011/03/10
To 2011/03/12 - 2011/03/12

固定局：福江 (950462)
Reference Site: 950462



星印は気象庁の震央 (142.861° , 38.104°)。

A Star indicates an epicenter released from JMA. (142.861° , 38.104°)

矩形断層二枚での推定結果。

Two rectangular faults with uniform slip are assumed.

西側に傾き下がる逆断層。モーメントマグニチュードは北側が8.8、南側が8.3。2つ合わせて8.9。

West-dipping reverse fault. Total moment magnitude: Mw8.9(Northern segment: Mw=8.8, Southern segment:Mw=8.3)

断層の長さは南北に約190kmの断層1と約190kmの断層2で合計約380km。

Total major rupture length: ~380 km. (Fault Length: Northern segment ~190 km / Southern segment ~190 km)

赤丸は気象庁一元化震源 (3/11-3/15)。

Red circles indicate epicenters determined by JMA. (3/11-3/15)

	緯度	経度	上端深さ km	長さ km	幅 km	走向	傾斜角	すべり角	すべり量 m	Mw
断層1	38.80°	144.00°	5.1	186	129	203	16	101	24.7	8.8
断層2	37.33°	142.80°	17.0	194	88	203	15	83	6.1	8.3

図 1-1 東北地方太平洋沖地震の震源断層モデル (水平変動) ¹⁾

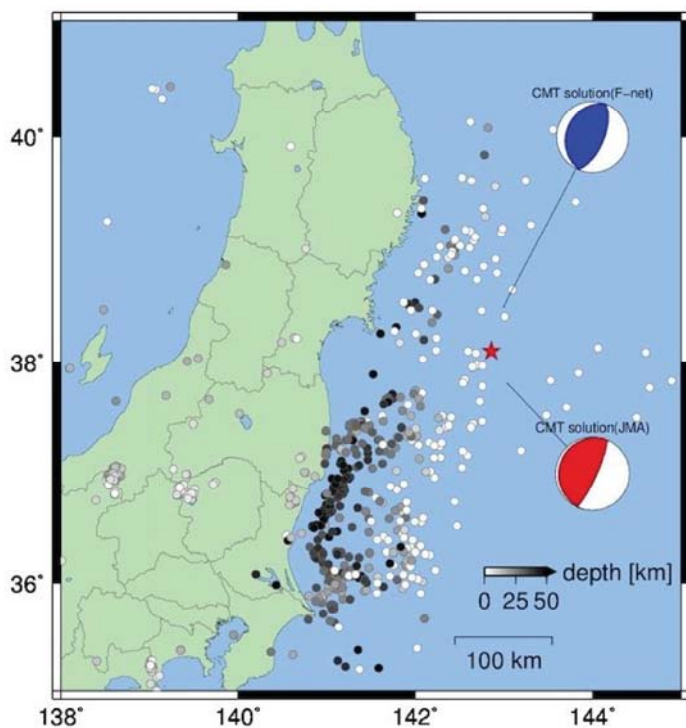


図 1-2 本震後 1 日間に発生した地震の震源分布およびメカニズム解²⁾

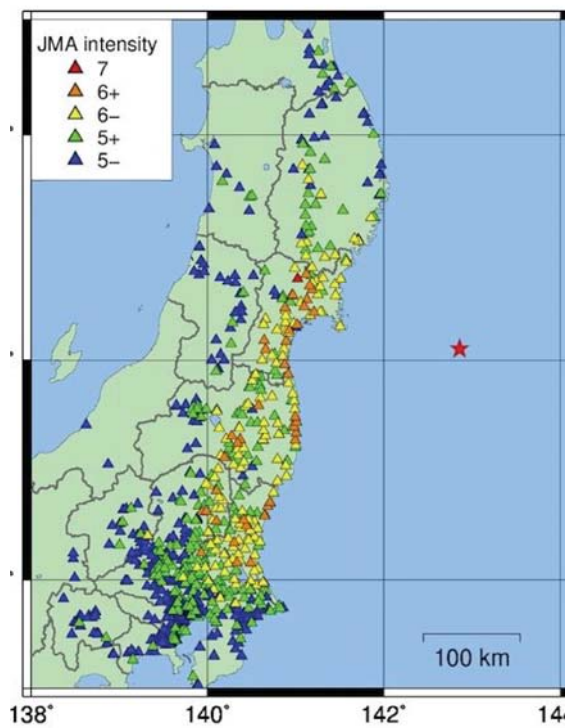


図 1-3 震度分布²⁾



青線：新幹線
 緑線：高速道路

図 1-4 東日本の新幹線および高速道路網
 (国土交通省国土政策局 国土情報ウェブマッピングシステムより)

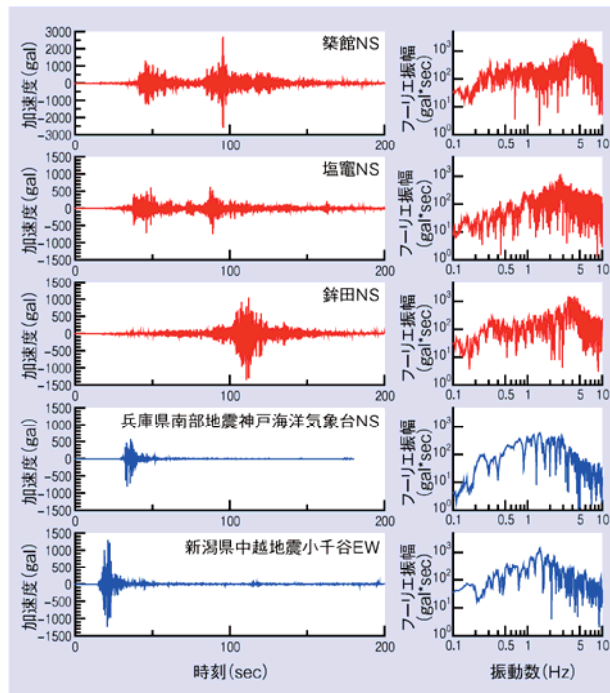


図 1-5 主な地震の加速度波形とフーリエスペクトル⁴⁾

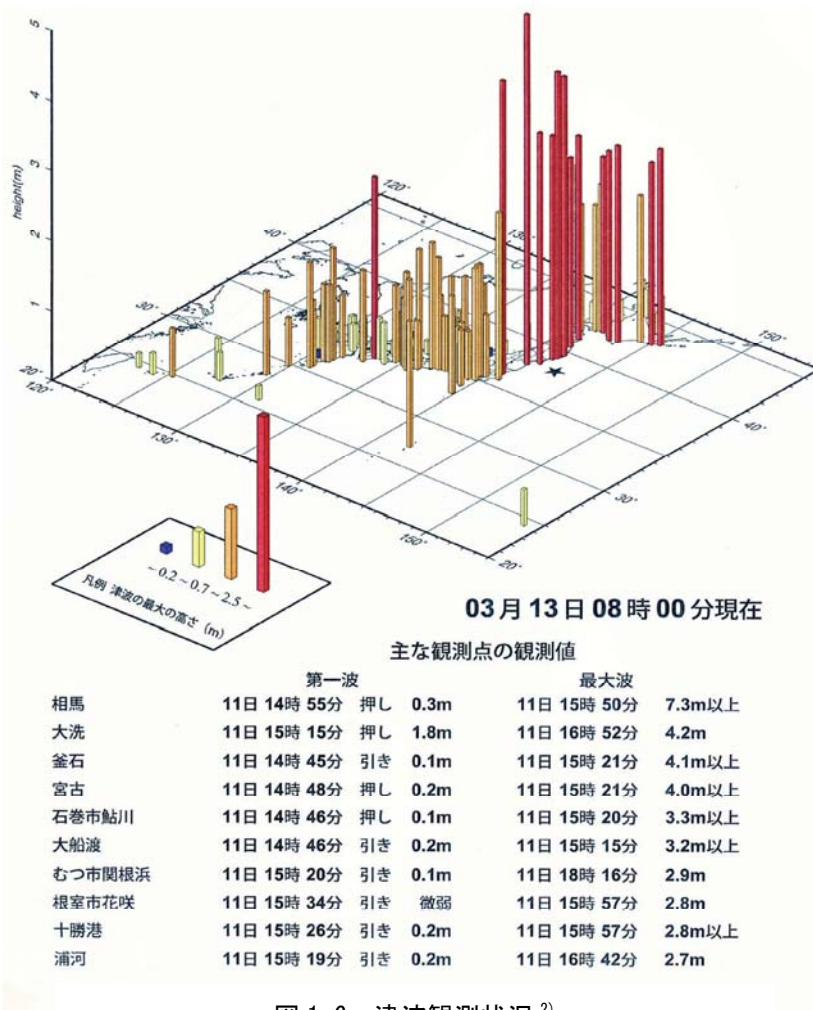


図 1-6 津波観測状況²⁾

参考文献

- 1) 国土地理院：平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震に伴う地殻変動と震源断層モデル，
<http://www.gsi.go.jp/cais/topic110422-index.html>
- 2) 土木学会地震工学委員会：土木学会東日本大震災被害調査団緊急地震被害調査報告書，2011.5.9
- 3) 室野剛隆：東北地方太平洋地震で地盤はどう揺れたか，RRR，pp.2-5，2012.3

2. 鉄道トンネルの被害

2. 1. 概要

東日本旅客鉄道の東北新幹線および在来線、仙台市営地下鉄、仙台空港鉄道、三陸鉄道のトンネルにおいて、被害が確認された。

2. 2. 東日本旅客鉄道

2. 2. 1. 新幹線トンネルの被害¹⁾

(1) 概要

新幹線トンネルの主な被害は、郡山～福島間に位置する4トンネル（東京方より、那須、福島、志賀、第一梅ノ沢）で発生した。このうち、被害が大きかったのは福島、志賀の2トンネルである（図 2.2.1-1）。今回の地震で被災したトンネルは那須塩原から仙台間の広範囲にわたることが特徴である。なお、被害を生じた箇所は、各トンネルともトンネル延長に対し、一部区間のみ限定的な被害であった（表 2.2.1-1）。

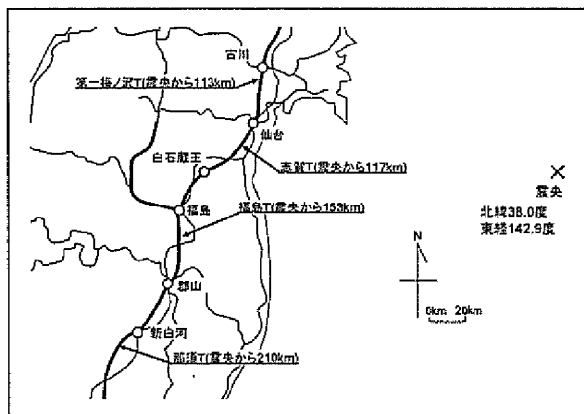


図 2.2.1-1 被災トンネル位置

表 2.2.1-1 被災トンネル基本データ

トンネル名	駅間	キロ程	変状区間	着手～しゅん工	代表地質	掘削工法	覆工巻厚
那須トンネル L=7,047m	那須塩原 新白河間	166k091m ～173k138m	166k091m ～166k606m (L=510m)	S52.2 ～S53.12	火山角礫岩	開削	75cm (ボックス)
福島トンネル L=11,705m	郡山 福島間	237k871m ～249k576m	242k351m ～242k511m (L=160m)	S47.8 ～S51.4	凝灰岩, 泥岩, 花崗閃緑岩	上部半断面先進 底設導坑先進	50cm, 70cm
志賀トンネル L=3,502m	白石蔵王 仙台間	308k476m ～311k978m	309k500m ～310k200m (L=700m)	S47.9 ～S51.3	凝灰角礫岩 但し、変状区間は 泥岩	底設導坑先進 但し、変状区間は サイロット	50cm, 70cm, 90cm
第一梅ノ沢 トンネル L=260m	仙台 古川間	345k238m ～345k498m	—	S48.2～S51.9(但 し石倉山T北工 区と同時期施工)	粗粒砂岩	サイロット	70cm

福島トンネルと志賀トンネルの主な被害は、路盤部の隆起に伴う軌道変状、中央通路部の損傷であった。その他のトンネル被害として、那須トンネルでは、開削で施工されたボックスカルバート上部の道路にトンネル延長方向に沿って陥没が生じた。また、第一梅ノ沢トンネルでは、覆エコングリート片が一部剥落したが、いずれも軽微な被害であった。

本報告書では、比較的被害の大きかった福島トンネルおよび志賀トンネルについて示す。

(2) 福島トンネル

福島トンネルは、東北新幹線郡山・福島間に位置する延長 11,705m のトンネルである。被害を生じた区間の代表地質は、凝灰岩および泥岩であり、しゅう曲構造の泥岩層と凝灰岩との互層からなる地層構造である。掘削工法は上部半断面先進工法または底設導坑先進上部半断面工法が用いられ、覆工厚は 50cm か 70cm でインバートはない。竣工は 1976 年（昭和 51 年）4 月である。なお、震央からの距離は 135km である。

a) 被害状況

福島トンネルにおける主な被害は、中央通路部の損傷、路盤部の隆起に伴う軌道変状である。なお、覆エコングレートの崩落あるいはアーチ部や側壁部にひび割れ等の発生は確認されな

った。

242k370m～242k500m 間において、上下線間の中央通路部に側壁傾斜、底盤損傷等の被害を生じた。写真 2.2.1-1 に 242k436m 付近の下り線中央通路部の被害状況を示す。当該箇所では、中央通路底面のサブドレーンの蓋やトンネル巡回車の走行路部分が損傷した。また、下り線の路盤コンクリートと中央通路との間に 120mm の開口を生じた。中央通路と路盤コンクリートとの間の開口は上り線側でも生じ、開口幅は最大 50mm であった。

242k351m～242k511m にかけての約 160m 間において、軌道の変状が顕著に現れた。軌道変状の大きかった当該区間の下り線軌道の高低データを図 2.2.1-2 に示す。図中、横軸がキロ程、縦軸が 242k297m を基準とした軌道の高低（レベル測量による相対高さ）を示す、軌道の高低データから、下り線は 242k447m 付近、上り線は 242k400m 付近を中心に前後の軌道が隆起している。

また、下り線の軌道検測の結果、水準変位量（左右レールの高低差）は最大で 67mm であった。これは、中央通路側が側壁側に比べ、相対的に高くなっていることを示している。

b) 被害原因の推定

中央通路部に損傷を生じた 242k370m～242k500m 間、路盤部の隆起に伴う軌道変状を生じた 242k351m～242k511m 間の地質は泥岩

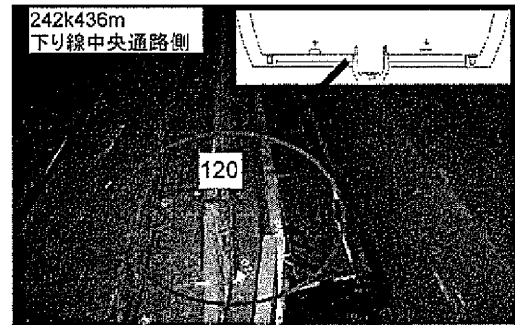


写真 2.2.1-1 中央通路部の被害状況

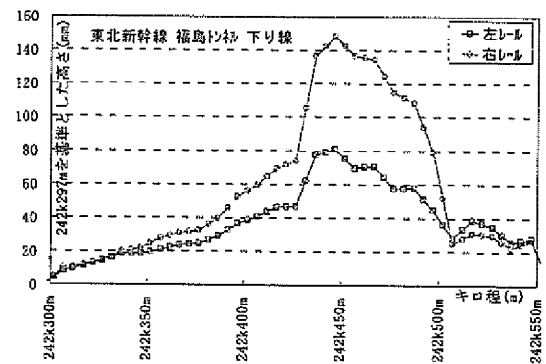


図 2.2.1-2 下り線軌道高低データ

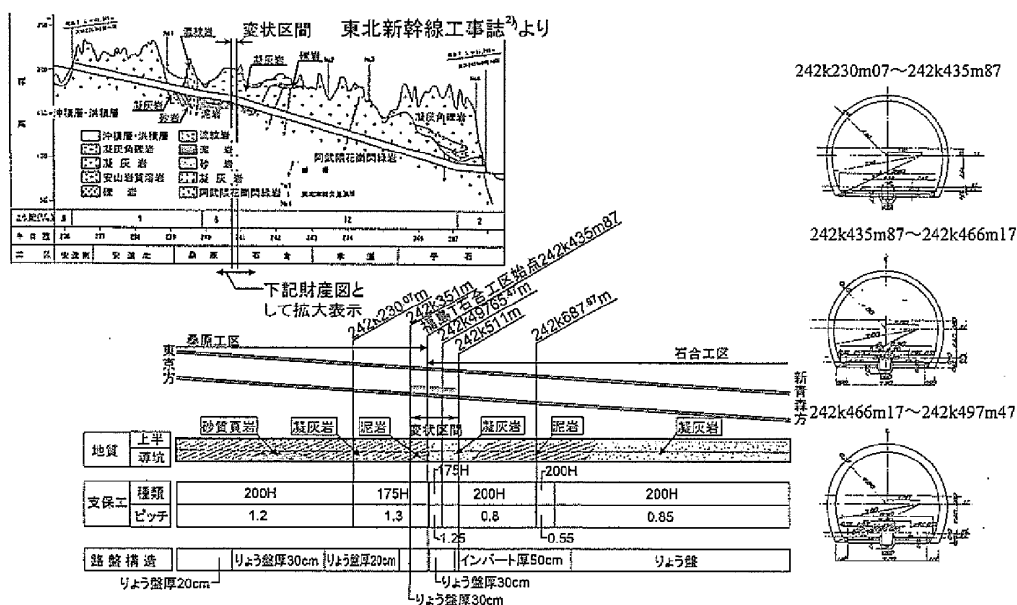


図 2.2.1-3 被害発生区間前後の地質・支保工・路盤構造

であり、しゅう曲構造の泥岩層と凝灰岩との互層からなる地質構造である（図 2.2.1-3）。

また、242k497m 付近に、りょう盤コンクリートとインバートの路盤構造の変化点がある（図 2.2.1-3）。242k497m より終点方のインバート区間においては路盤部の変状は少なく、起点方のりょう盤コンクリート区間に変状が発生した。

今回被害を生じた区間は地盤全体が動く中で、被害を生じなかった区間と比較し、弱い層にひずみがかたまり、トンネル構造上の弱部となっている路盤部に被害を生じたものと想定される。

c) 復旧方法

復旧方針として、りょう盤コンクリート下の地山等への空隙および開口部へのセメントミルクおよびモルタルの充填を主な工種とした応急復旧、営業運転再開後に路盤部および側壁部へのロックボルト打設を行う本復旧とに分けて実施することとした。

まず、応急復旧であるが、以下の 4 項目を実施した。

① 中央通路損傷部の補修

242k370m～242k500m 間の上下線間の中央通路部に発生した側壁傾斜、底盤損傷隅角部のひび割れ等については、損傷部の補修、止水および注入を実施した。

② 路盤部の空隙および開口部の充填

242k370m～242k500m 間の地山とりょう盤コンクリートあるいは路盤コンクリートとりょう盤コンクリートの打継ぎ目部の空隙、中央通路と路盤コンクリートとの開口部にセメントミルクの充填を行った（写真 2.2.1-1）。1 次充填後のコア削孔による充填状況確認より、空隙が確認された箇所については 2 次充填を行った。2 次充填後に 242k342m～242k522m 間において、再度コア削孔により充填状況の確認を行い、空隙が確認された箇所については 3 次充填を行

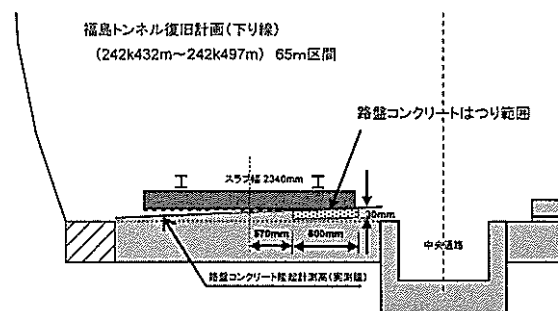


図 2.2.1-4 路盤コンクリートはつり範囲

った。

③ 路盤コンクリート面の盤下げ

開通後の作業量を低減するため、応急復旧の段階で、一部路盤コンクリート面をはつり、盤下げを行い、軌道の擦り付け範囲を削減することとした。結果として、図 2.2.1-4 に示すように、242k432m～242k497m 間の水準変位量の大きかった下り線 65m 区間について、幅 600mm、深さ 30mm（CA モルタル厚 50mm の場合）の範囲で路盤コンクリートをはつり、盤下げを行った。

④ 断面計測による計測監視

本復旧までの間、断面計測による計測監視を行うこととした。計測項目はトンネル内空変位、路盤コンクリートの水準測量である。

次に、本復旧であるが、242k352m～242k507m 間の路盤部および側壁部へのロックボルト打設を行うこととした。使用したロックボルトはφ32mm、長さ 4m の自穿孔タイプである。

路盤部へのロックボルト打設は、上下線スラブ軌道の両側にそれぞれ 2 本ずつ、1 断面当たり 4 本、延長方向には 1.67m 間隔にて打設することとした。

側壁部のロックボルト打設は支保工ピッチの倍ピッチとし、スプリングラインより下側に千鳥で 2 段配置とした。

(3) 志賀トンネル

志賀トンネルは、東北新幹線白石蔵王・仙台間に位置する延長3,502mのトンネルである。被害を生じた区間の代表地質は、泥岩や頁岩、凝灰岩、角礫凝灰岩などの堆積岩、および安山岩などの火成岩から構成され、火山活動等に伴う安山岩の介入により各々の地質が複雑に組み合わせられた地質、地層構造となっている。掘削工法は、側壁導坑先進上部半断面工法のほか、二段サイロットやスプリングサイロット工法が用いられ、覆工厚は70cm、90cm、インバート構造であり、1976年（昭和51年）3月に竣工した。なお、震央からの距離は117kmである。

a) 被害状況

志賀トンネルの主要な被害は福島トンネルと同様に路盤部の隆起に伴う軌道変状であり、軌道計測の結果、明らかとなった変状である路盤の隆起は、309k545～310k177m間において発生した。また、309k690m～309k683m間の上下線のアーチ部および310k080m～310k136m間の上下線の側壁部において軸方向のひび割れが発生した。

309k545m～310k177m間の下り線軌道の高低データを図2.2.1-5に示す。図中、横軸はキロ程(m)、縦軸は309k502mを基準とした軌道の高低（レベル測量による相対高さ）を示す。

309k545m～310k177m間の路盤部の隆起に伴う軌道変状箇所は、下記の3箇所で見られた。

- 309k545m～309k615m:A区間
- 309k775m～309k850m:B区間
- 310k080m～310k150m:C区間

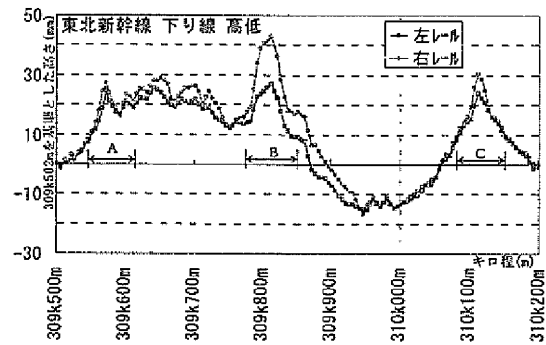
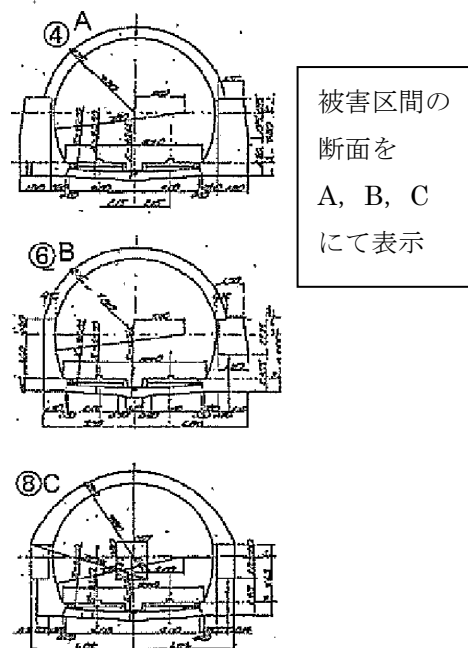


図 2.2.1-5 軌道高低データ



被害区間の断面をA, B, Cにて表示

図 2.2.1-6 志賀トンネルの覆工断面

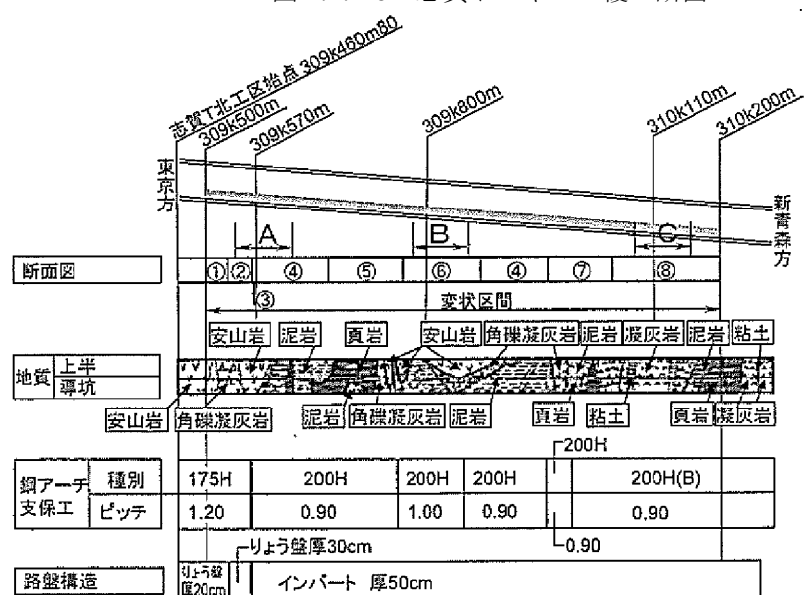


図 2.2.1-7 変状区間における地質・支保工・路盤構造

b) 被害原因の推定

工事記録によると、309k460m～310k200mの約700m間は、複雑な地質構造において、膨張性粘土鉱物を含む軟弱層であり、湧水（200～400ℓ/min）の多い箇所もあった。この区間の掘削工法は二段サイロットやスプリングサイロットなどの特殊な掘削工法により、8種類の掘削断面が用いられたものの、導坑の変状、支保工の変形、沈下など、工事が非常に難航した記録が残されている（図2.2.1-6、図2.2.1-7）。

今回、路盤部の隆起に伴う軌道変状を生じた309k545m～310k177m間は、工事が難航した区間とはほぼ合致する。また、軟弱層であったため路盤構造としては、インバートが採用されていたものの曲率が小さかった（曲線半径R=40m）。地震に伴い地盤が動いている中で、地質上の弱い層にひずみがたまり、トンネル路盤部が構造上の弱部となり変状が生じたものと推定される。

c) 復旧方法

復旧方針として、インバート部の空隙へのセメントミルクの充填を主な工種とした応急復旧、営業運転再開後に路盤部、側壁部およびアーチ部へのロックボルト打設を行う本復旧とに分けて実施することとした。

志賀トンネルにおける応急復旧の実施項目は以下の2項目である。

① インバート部の空隙へのセメントミルクの充填

309k545m～310k150m間の3区間において発生した路盤部の隆起に伴う軌道変状に対し、上下線の軌道の隆起量を勘察し、中央通路底盤部より309k545m～309k595m間（上り線側）、309k775m～309k850m間（下り線側）、310k080m～310k150m間（上り線側）のインバート部の空隙へのセメントミルクの充填を行った（写真2.2.1-2）。充填はドリル削孔による孔から、充填孔間で空隙の確認を行いながら3

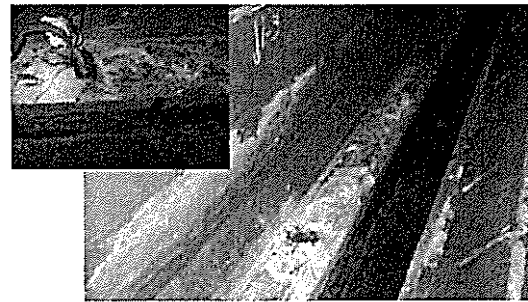


写真 2.2.1-2 セメントミルク充填状況

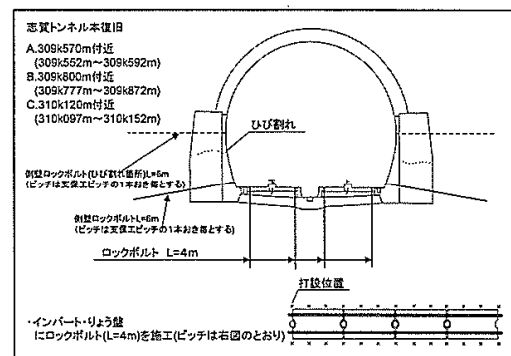


図 2.2.1-9 ロックボルト打設位置
(路盤部および側壁部)

回に分けて行った。

② 断面計測による計測監視

本復旧（路盤部、アーチ部および側壁部へのロックボルト打設終了）までの間、断面計測による計測監視を行うこととした。測定項目はトンネル内空変位、路盤コンクリート水準測量である（図2.2.1-8）。測定頻度については福島トンネル同様とし、計測データおよび変状状況を勘察し頻度を減らしていくこととした。

本復旧として、309k545m～310k177m間の路盤部の隆起に伴う軌道変状を生じた区間において、路盤部へのロックボルト打設を行うこととした。また、309k690m～309k983m間のアーチ部および310k080m～310k136m間の側壁部についてもロックボルト打設を行うこととし、打設位置は現地調査により決定した。アーチ部および側壁部のロックボルト打設範囲を図2.2.1-9、図2.2.1-10に示す。

路盤部の隆起を生じた309k570m付近（A区

表 2.2.2-1 在来線の被災状況

支社	線区	駅間		キロ程	トンネル名	延長 (m)	被災キロ程	被災状況 (但し、各支社からの報告内容)
大宮	烏山線	小橋	滝	16k587m	森田トンネル	356	16k587m	目地落下
		高萩	南中郷	165k064m	赤浜トンネル	272	165k074m	クラウン部剥落
水戸	常磐線	湯元	内郷	203k104m	第一傾城山トンネル	380	203k215m	モルタル吹付剥落
		水郡線	磐城石川	野木沢	107k313m	大内山トンネル	290	107k323m 107k330m
千葉	鹿島線	鹿島神宮	鹿島サッカー スタジアム	15k722m	宮中トンネル	170	15k724m	トンネル坑口と内部にクラック
	総武線	飯岡	倉橋	107k185m	蛇園トンネル	646	107k635m	クラウン部に穴、漏水
仙台	仙山線	奥新川	面白山高原	37k001m	仙山トンネル	5,361	39k260m	窓抜部から剥落
盛岡	花輪線	田山	兄畑	54k578m	館市トンネル	262	54k709m	覆工剥落
新潟	飯山線	森宮野原	足滝	50k590m	羽倉トンネル	530	50k590m	あと埋めモルタル落下
		越後田中	津南	55k614m	岨滝トンネル	638	56k613m	コンクリート落下
長野	飯山線	横倉	森宮野原	46k948m	第一横倉トンネル	332	46k060m	目地切れ
				48k724m	森第一トンネル	121	48k724m	アーチ部剥落
				49k267m	森第二トンネル	126	49k320m	導水工、排水パイプ破壊

間), 309k800m 付近 (B 区間), 310k120m 付近 (C 区間) について, 路盤部および側壁部へロックボルト打設を行うこととした。

路盤部で使用するロックボルトは, $\phi=32\text{mm}$, 長さ 4m の自穿孔タイプである。ロックボルトの配置は, 上下線のスラブ軌道の両側に各々 2 本ずつ, 1 断面あたり 4 本打設し, 延長方向には, 1.67m 間隔 (1 スラブ当たり 6 本) にて打設を行うこととした。なお, 側壁部の下側 1 段目のロックボルトについては, 側壁コンクリート厚を考慮し長さ 6m とし, 支保工ピッチの倍ピッチにて打設を行うこととした。

アーチ部に発生したひび割れに対しては, 既往変状 (ひび割れ) と併せた閉合ひび割れ, 湧水等の影響を考慮し, ひび割れをはさみ 1m 程度離れた位置にロックボルト打設を行うこととした。

2. 2. 2. 在来線トンネルの被害²⁾

(1) 概要

今回の地震に伴う在来線における被災トンネルは 7 支社, 8 線区, 13 トンネルに及んだ。しかしながら, 新潟県中越あるいは中越沖地震の際のような覆工コンクリートの崩落などの大規模な被害は発生しなかった。在来線トンネル被災状況を表 2.2.2-1 に示す。なお, 津波および原発事故関連で十分に調査ができていない区間

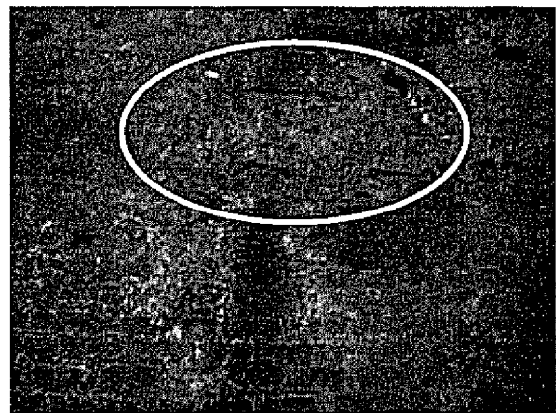


写真 2.2.2-1 岨滝トンネルにおけるアーチ部コンクリートブロック片の剥落

のトンネルについては含まれていない (2011 年 6 月 30 日現在)。

(2) 被害状況

被災トンネルの一例として, 飯山線森宮野原・足滝間羽倉トンネルでは, アーチ部の施工継ぎ目部のあと埋めモルタルが落下した。また, 飯山線越後田中・津南間岨滝トンネルでは, アーチ部のコンクリートブロック表面の一部が落下した (写真 2.2.2-1)。その他, 坑口部の損傷あるいはひび割れに伴う漏水等が発生した。

(3) 復旧方法

在来線のトンネルでは, 大規模な被害が発生しなかったため, 覆工表面について打音検査を行い, 浮いている箇所については叩き溶しを実施した。

飯山線越後田中・津南間岨滝トンネルでは,

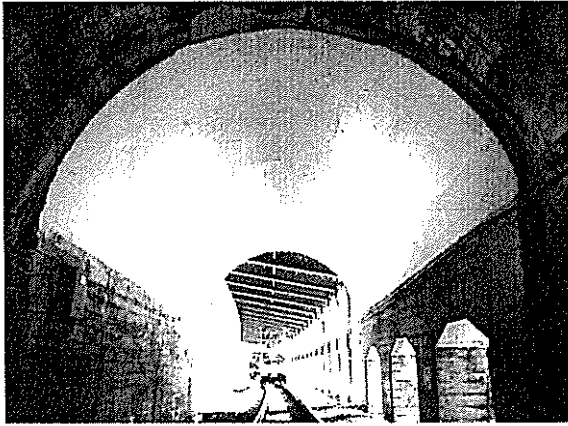


写真 2.2.2-2 飯山線岨滝トンネルの対策状況

叩き落しによる応急復旧を行い、より恒久的な対策として、アラミド繊維シート接着（AAA）工法による剥落対策工を実施した（写真 2.2.2-2）。

2. 3. 仙台市営地下鉄³⁾

(1) 概要

供用中の南北線のトンネルでは目立った被害は確認されなかった。建設中の東西線では、開削トンネルに軽微ではあるが被害が確認された。

(2) 被害状況

営業線の南北線では、地震直後に全区間を調査した結果、トンネル区間（黒松駅～富沢駅）において新たな漏水箇所が発生や既存箇所からの漏水量の増加が確認された（写真 2.3-1、写真 2.3-2）ものの、列車運行に支障するようなく体や軌道等の変状は確認されなかったことから、3日後の3月14日に列車の折返し運転が可能な台原駅から富沢駅間で運転を再開した。しかし、地震による被害が発生した北部高架区間（泉中央駅～黒松駅）を復旧しての全線運転再開は4月29日となり、地震発生から49日間を要した。

なお、トンネル内の漏水はその後全体としては減少しているものの、2年以上が経過した現在においても、地震発生以前の水量に戻っていない箇所も多く、地震による地下水脈への影響



写真 2.3-1 南北線における漏水増加箇所①



写真 2.3-2 南北線における漏水増加箇所②

があったことも考えられる。

建設中の東西線では、開削駅のく体の一部にひび割れが発生した他、開削区間のシートパイル土留め・腹起しの一部に若干の変形が確認されたが、その後の工事に影響するような被害は発生していない。

2. 4. 仙台空港鉄道⁴⁾

(1) 概要

ボックスカルバート区間において、U字擁壁部との境界2カ所およびトンネル坑内1カ所でトンネル鉛直、水平方向ともに10cm以上の段差が発生した。

(2) 被害状況

被害が発生した箇所（平面および縦断）を図 2.4-1 および図 2.4-2 に示す。

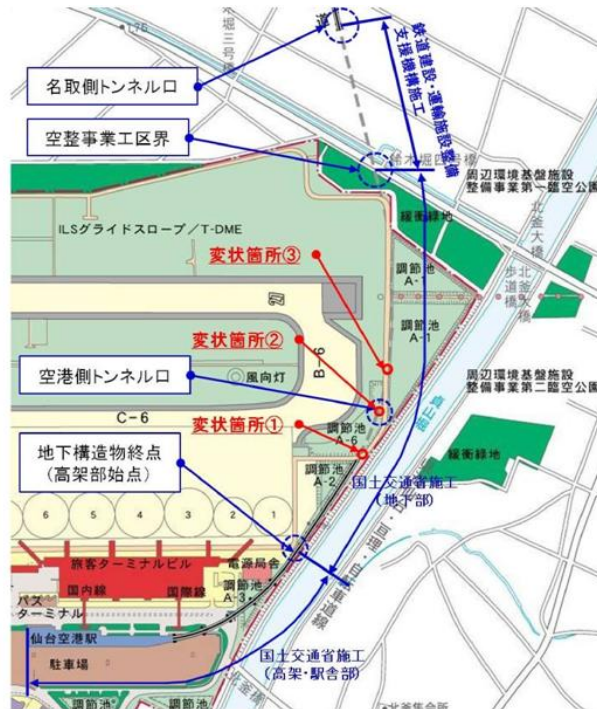


図 2.4-1 被災位置 (平面)

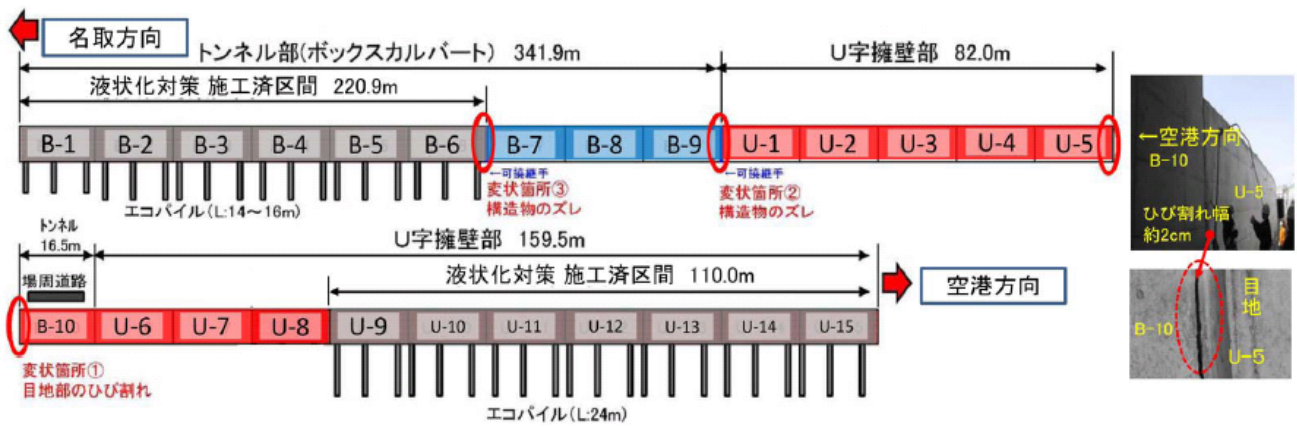


図 2.4-2 被災位置 (縦断)

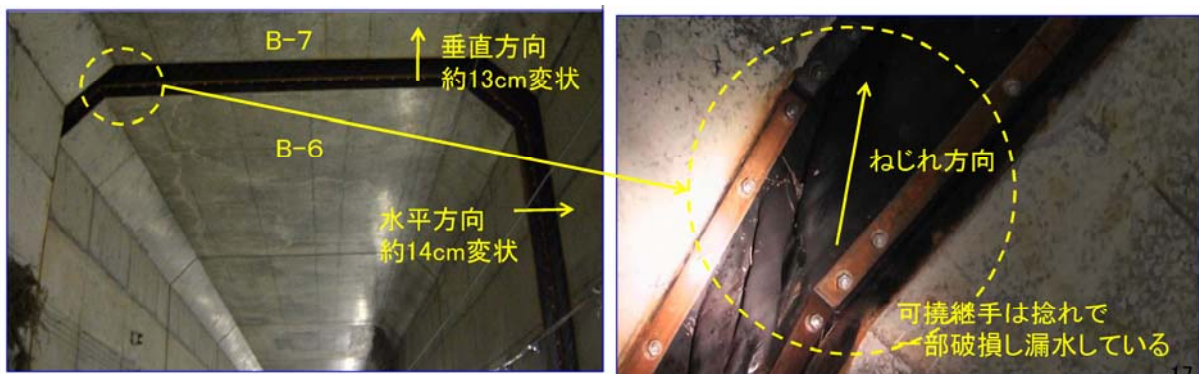


写真 2.4-1 変状箇所②における変状状況

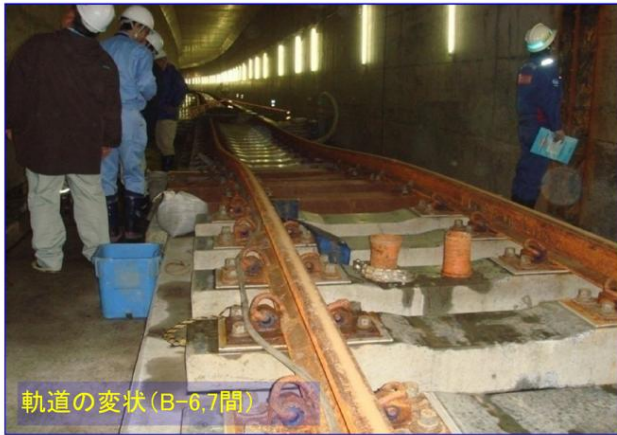


写真 2.4-2 変状箇所②における軌道の変状

代表的な変状として、変状箇所②について述べると、液状化対策区間の未実施区間との境界の継ぎ目で水平方向に約 14cm、鉛直方向に約 13cm のずれが生じた（写真 2.4-1）。そして、それに伴い軌道が変状した（写真 2.4-2）。

(3) 変状原因の推定

継続時間の長い地震波の作用によって、液状化傾向が強まり、破壊的な液状化ではないが、地盤強度を低下させた。そして、強度が低下した地盤に、現地の偏土圧状態が起因し、側方流動により構造物が変位したと、考えられる。

(4) 復旧方法

測定の結果、列車の建築限界を確保できることを確認した。そのため、く体は現状のままとし、これ以上変状が進まない対策を施し復旧させた。

すなわち、変状が進まない対策とは、以下の 2 点である。

- ・ RC 構造のカラーをく体継手上床両側面に巻付け止水機能を確保し、一体化する（図 2.4-3）。
- ・ く体下面は施工環境の制約から、薬液注入用の立坑を施工し、く体下面に薬液注入を実施した（下床部の可撓継手を撤去し、止水モルタルを注入し止水機能を確保）（図 2.4-4）。

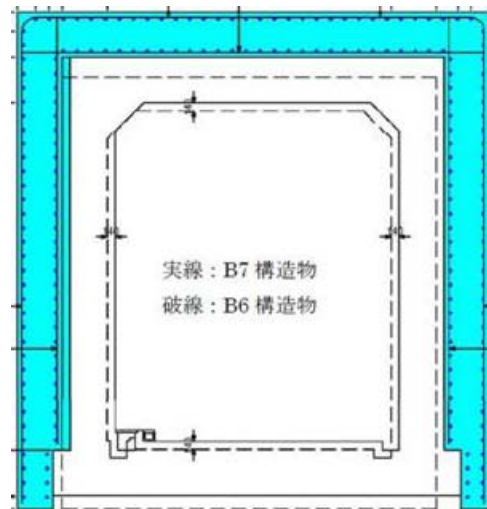


図 2.4-3 RC 構造のカラー

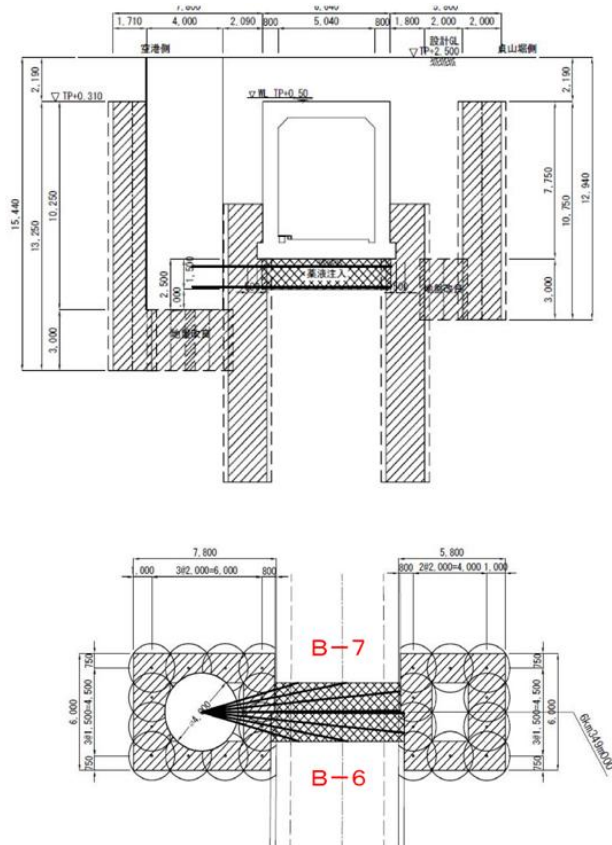


図 2.4-4 薬液注入範囲

2. 5. 三陸鉄道

(1) 概要

南リアス線で坑門のひび割れ等が 4 トンネルにおいて発生した。

(2) 被害状況

恋し浜・甬領間鬼ヶ沢トンネルにおいて、側壁せめ部のコンクリート片が、延長 900mm、幅 600mm にわたり剥離し、長さ 2,100mm のひび割れが発生した (図 2.5-1)。

三陸・吉浜間中井トンネルおよび吉浜トンネルにおいては、起点方坑門コンクリートにひび割れが発生した。さらに、中井トンネルでは、内空が 60mm 縮小し、坑門部の施工継ぎ目からトンネル奥へ 35m にわたり、S.L 部にひび割れが発生した (図 2.5-2, 図 2.5-3)。

吉浜・唐丹間扇洞トンネルにおいて、起点方坑門コンクリートにひび割れが発生した。また、入口から 45m にわたり、天端部にひび割れが発生した。(図 2.5-4)

(3) 復旧方法

鬼ヶ沢トンネルでは、側壁コンクリートの剥離・異常箇所を叩き落した後、風化防止剤を塗布した。

中井トンネルについては、以下の通り復旧した (図 2.5-5)。

- 起点方坑門コンクリート部は鉛直方向のひび割れが著しかったため、建築限界に支障しない範囲で補強することとし、トンネル入口部に鋼製支保工 (H150×150×7×10) を 0.75m 間隔で 5 基設置し、覆工コンクリートを増し打ちした。
- 内空が縮小した箇所は、地震で側壁が押し出されたものと想定されたため、側壁部をロックボルト (φ32mm, L=3m) で補強することとし、1 断面当り左右各 2 本ずつ、合計 4 本を 1.8m 間隔で打設した。

その他、坑門・覆工コンクリートのひび割れ箇所については、エポキシ樹脂系注入材でひび割れ注入を実施した。

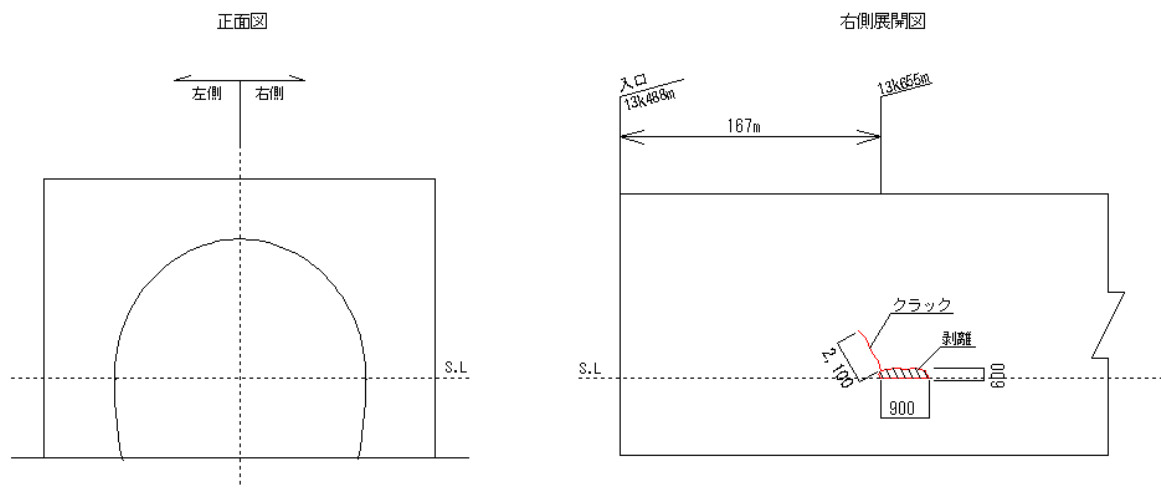


図 2.5-1 鬼ヶ沢トンネルの被害状況

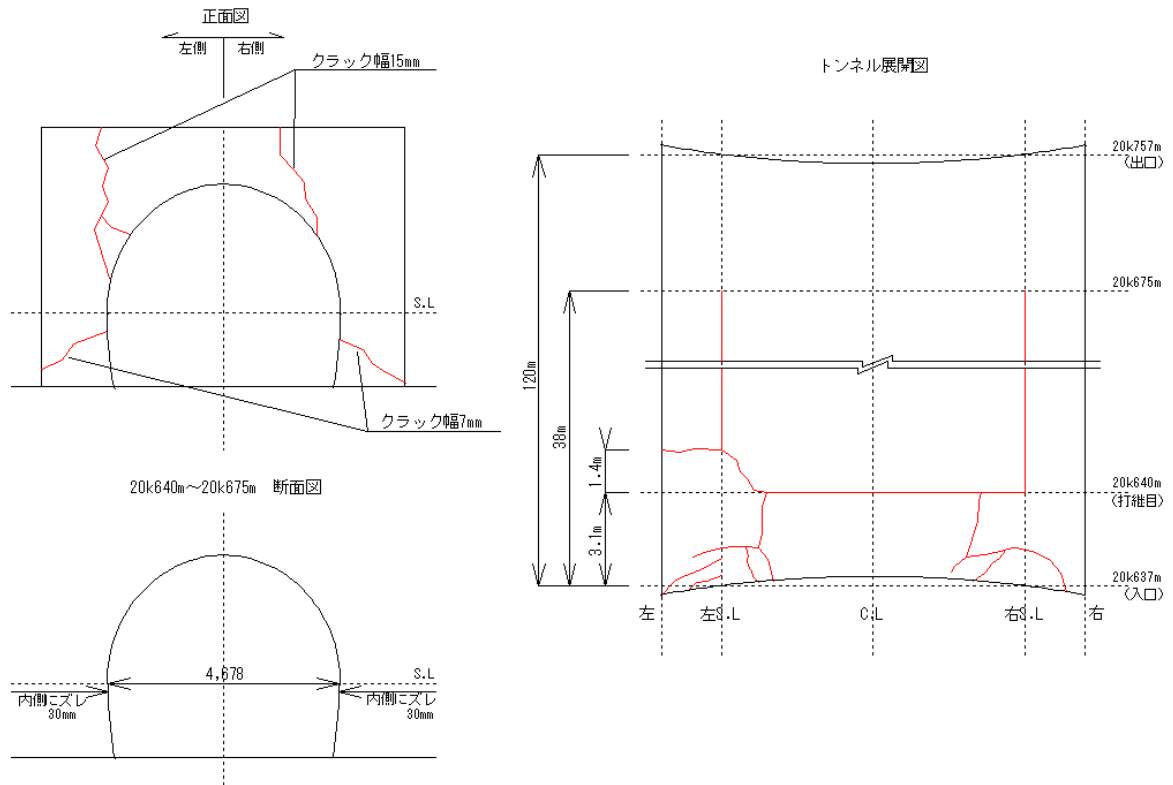


図 2.5-2 中井トンネルの被害状況

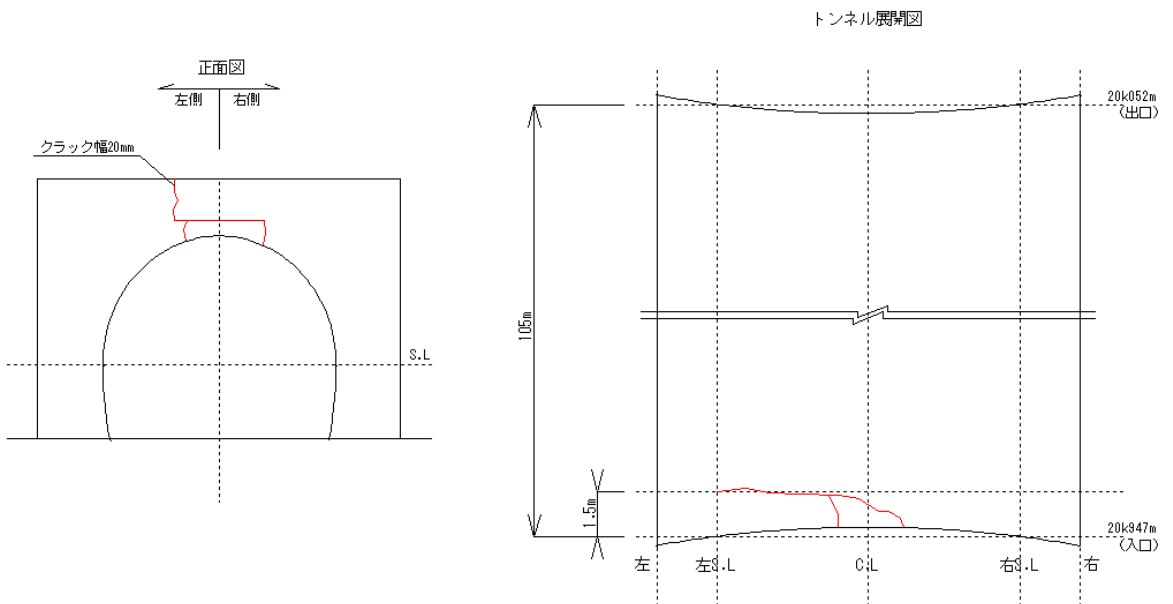


図 2.5-3 吉浜トンネルの被害状況

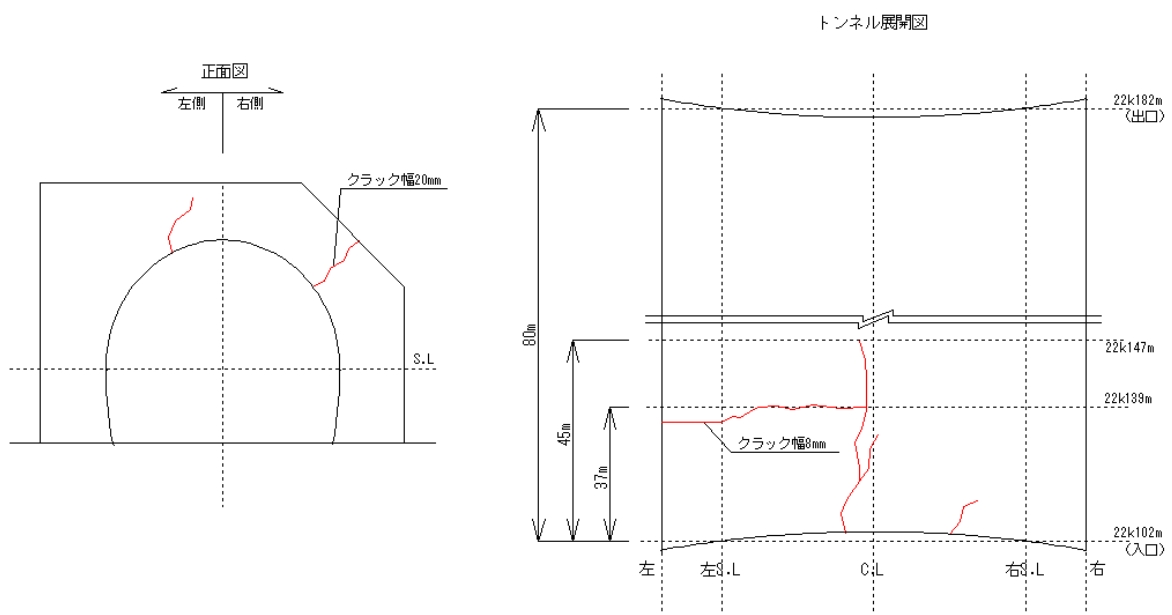
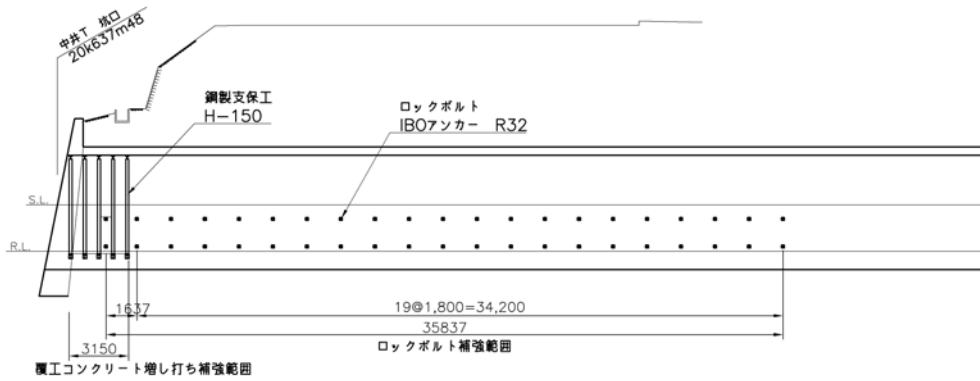
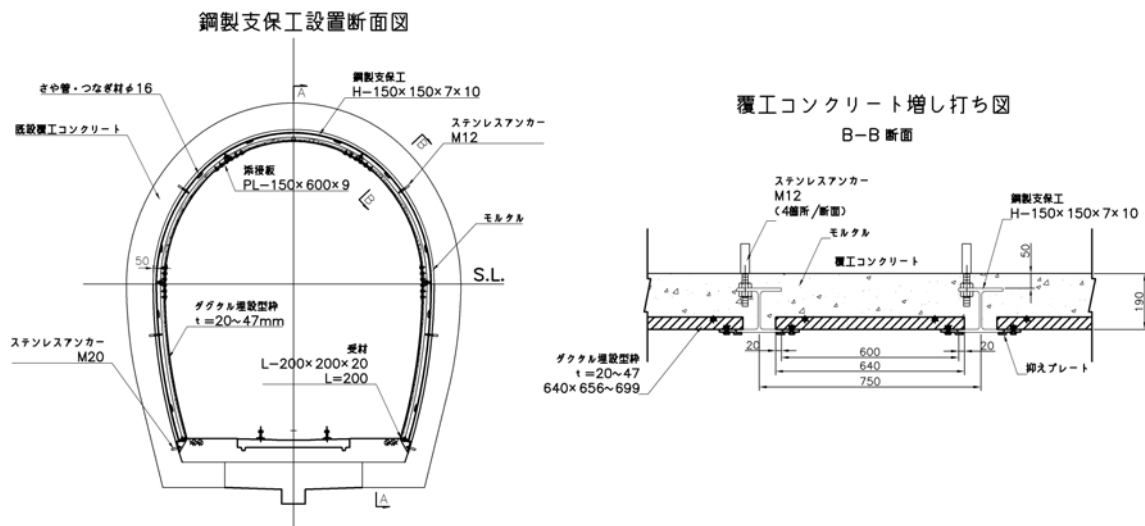


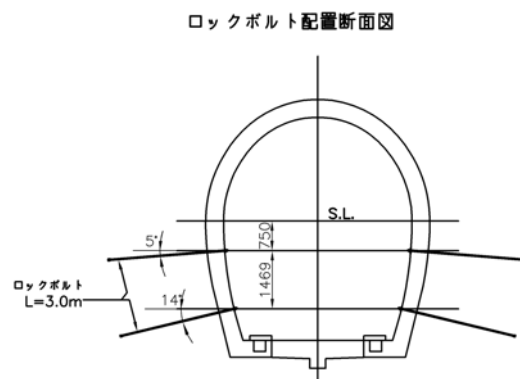
図 2.5-4 扇洞トンネルの被害状況



(a) 対策工縦断面図



(b) 鋼製支保工設置断面図および覆工コンクリート増し打ち図



(c) ロックボルト配置断面図

図 2.5-5 中井トンネルの復旧方法

参考文献

- 1) 東日本旅客鉄道：SED, No.37, pp.67-71, 125-128, 2011.11.
- 2) 東日本旅客鉄道：SED, No.37, p.95, 150, 2011.11.
- 3) 東北の鉄道震災復興誌編集委員会編／国土交通省東北運輸局監修：よみがえれ！みちのくの鉄道, p.175, 2012.9.
http://www.tb.mlit.go.jp/tohoku/td/pdf/2_5.pdf
- 4) 東北地方整備局仙台港湾空港技術調査事務所：液状化対策事業の効果およびエプロン・アクセス鉄道トンネルの被災と復旧（パワーポイント資料），2011.12.

3. その他のトンネルの被害

3. 1. 概要

首都高速道路の道路トンネル，東北電力の水路トンネル，東京電力の送電ケーブル用洞道に被害が確認された。

3. 2. 首都高速道路

(1) 被害状況

高速湾岸線開削トンネル区間の5カ所において継目から漏水が発生した。そのうちの1カ所の写真を写真3.2-1に示す。

(2) 復旧方法

漏水した継目に対し，止水注入を実施し，導水路を設置した。目地部への止水注入による補修を実施した。復旧後の写真を写真3.2-2に示す。



写真 3.2-1 開削トンネル継目からの漏水



写真 3.2-2 復旧後の状況

3. 3. 東北電力

(1) 被害状況

開削工法により建設された四時川第二発電所水路トンネルが，地山崩壊に伴い損壊した。四時川第二発電所は福島県南東部にある水力発電所である。位置を図3.3-1に示す。トンネルはコンクリート製で，形状寸法は幅1.8m，高さ2mの内空を有する馬蹄形である（図3.3-2）。



図 3.3-1 四時川第二発電所の位置

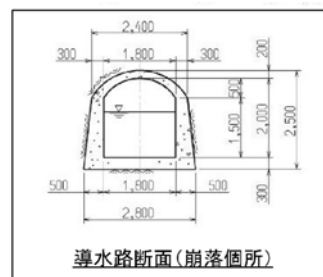


図 3.3-2 導水路断面

水槽より上流約30mの地点から約30mの間において地山が崩壊し，それに伴い，導水路トンネルも損壊，流出した（図3.3-3，図3.3-4，写真3.3-1，写真3.3-2参照）。

(2) 復旧方法

原形復旧では痩せ尾根部への施工となるため，水槽を移設，水圧管を延長し，復旧する計画とした。

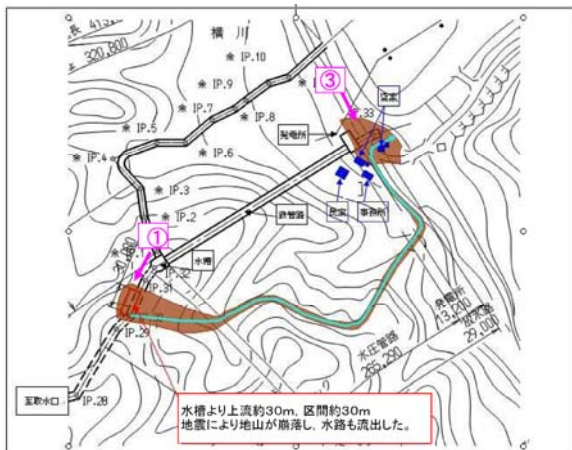


図 3.3-3 被災位置

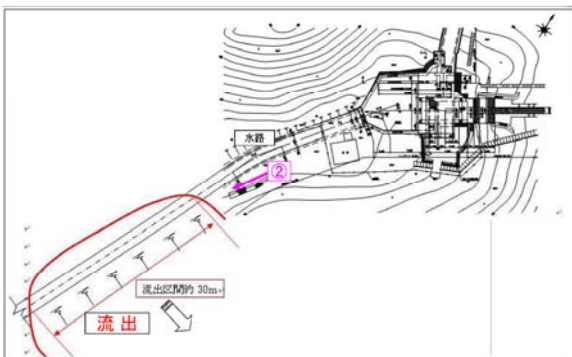


図 3.3-4 土砂の流出範囲



写真 3.3-1 被災状況 (図 3.3-3 中①より臨む)



写真 3.3-1 被災状況 (図 3.3-4 中②より臨む)

3. 4. 東京電力

(1) 被害状況

設備数 2,581 径間の洞道のうち、千葉県浦安市にある送電ケーブル用洞道 1 径間において、傾斜および段差が発生した。被害状況を写真 3.4-1 および写真 3.4-2 に示す。

傾斜および段差はともに打ち継ぎ目で発生した。傾斜の方は、最大で 6.9° の傾斜角であった。



写真 3.4-1 洞道の被害 (傾斜)



写真 3.4-2 洞道の被害 (段差)

(2) 復旧方法

震災後の点検で、当該洞道において大きなひび割れは確認されず、洞道の健全性は確保されている。したがって、復旧方法は、点検巡視の際に歩行に支障がないよう、歩床コンクリートを打設し、歩行面を水平に保つこととした。

4. まとめ

4.1. トンネルにおける地震被害の概要

2011年東北地方太平洋沖地震でトンネルが受けた被害には、次のようなものがあった。

鉄道トンネルのうち新幹線トンネルでは、東北新幹線福島トンネルと志賀トンネルにおいて、路盤部の隆起に伴う軌道変状、中央通路部の損傷が発生した。なお、過去の地震被害として代表的な覆工コンクリートの崩落やひび割れ等については確認されなかった。また、那須トンネルでは、開削ボックス上部の道路にトンネル延長方向の陥没が生じ、第一梅ヶ沢トンネルでは、覆工コンクリート片の軽微な剥落が発生した。

新幹線以外の鉄道トンネルの被害は、東日本旅客鉄道の在来線13トンネル、仙台市営地下鉄の供用中および建設中のトンネル、仙台空港アクセス鉄道1トンネル、三陸鉄道4トンネルで確認された。

東日本旅客鉄道在来線では、あと埋めモルタルやコンクリートブロック片の剥落といった軽微の被害であった。仙台市営地下鉄では、供用中のトンネルにおける漏水の増加や建設中の開削トンネルにおけるく体のひび割れの発生等がみられた。仙台空港アクセス鉄道では、ボックスカルバートにおいて、鉛直・水平方向ともに10cm以上の段差が発生し、また、継ぎ手部がねじれによって一部破損し、漏水が生じた。三陸鉄道では、坑門コンクリートのひび割れ、せめ部のコンクリート片の剥離が主な被害であった。

水路トンネルとしては、四時川第二発電所(福島県)の導水路が、坑口部の地山崩壊によって流出する事態となった。導水路の流出区間は約30mであった。

地中送電トンネルとしては、千葉県浦安市の

管路、マンホールおよび洞道において液状化に伴う被害が発生した。管路部においては段差が発生し、継ぎ手が抜け出している箇所も確認された。また、洞道においては、く体打ち継ぎ目部に傾斜や段差が発生した。しかしながら、洞道く体には顕著なひび割れは発生せず、構造く体の安全性は確保されていることが分かった。

4.2. 被害要因に関する考察

トンネルは、従来から耐震性に富む構造物といわれているが、過去の震災事例の調査結果に基づく分析結果から、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報告されている³⁾。なお、ここでの特殊条件には、坑口部での斜面災害や地震断層といった地形・地質条件が含まれている。

ここで、2011年東北地方太平洋沖地震は海底下で発生したマグニチュード9.0の巨大地震であり、余震域が長さ500km、幅200kmに及んだが、過去の地震被害で確認されたような致命的なトンネル被害は皆無であった。このような状況から、トンネルに代表される地下構造物は地震に強い特性があることが改めて確認された。

新幹線トンネルの被害は4箇所を確認されたが、那須塩原-仙台間と非常に広範囲で部分的に発生し、その被害状況も比較的軽微でそれぞれ異なるものであった。これらは地震規模が大きかったものの、震源からの距離が離れていたことに起因しており、過去のトンネル被害調査で得られた知見とは異なり、地盤の顕著な変位がトンネルおよびその周辺に間接的に影響したものと考えられる。福島県の導水路トンネルおよび千葉県の管路、洞道で発生した段差も、こ

の地盤変位に起因するものとして整理できる。

また、仙台空港アクセス鉄道のボックスカルバートでは、施工時の地盤改良の有無によって被害に差異が表れるという特徴が確認された。このように開削トンネルの周辺地盤が軟弱な場合には、新設時の地盤改良も有効であることが確認された。また、これらの調査結果から、トンネル施工時に地質上の弱部が確認された場合には、より確実に、かつ密実にトンネルく体を構築する必要があることが再確認された。

4.3. 今後に向けた提言

本特別小委員会における活動を通じ、今後のトンネルの計画・設計、施工、維持管理に向けて、以下のような提言をとりまとめた。

トンネルの計画・設計においては、地すべり地形や不良地山を回避したルート選定、掘削時だけでなく、将来的な構造安定性の観点に基づくインバートのより積極的な採用が望まれる。このインバートの設計においては、経済性の観点から掘削断面を最小とすることが重要視されがちであるが、今回のような路盤変状を踏まえると、その局率をより円形に近い形状とする配慮が望まれる。また、新幹線や高速道路等の重要幹線、路線は災害時の復旧に極めて重要な役割を果たすことを踏まえ、活断層との位置関係を評価するなど、従来の考え方にとらわれない柔軟な対応を期待したい。

トンネルの施工においては、覆工コンクリート、構造く体の施工時における欠陥(巻厚不足、空隙、コールドジョイント、鉄筋被りの確保等)の排除はもちろん、坑口部、坑門工の設計における斜面不安定化に対する配慮の徹底が必要である。また、開削トンネルの施工においては、周辺地盤の適切な評価に基づき、地盤強度が不足する場合には地盤改良の必要性について検討する必要がある。

トンネルの維持管理においては、覆工やく体

の既変状や構造欠陥が大規模地震時の被害を拡大する恐れがあることを踏まえ、継続的かつ確実な対応が望まれる。また、トンネル構造物だけでなく、トンネル前後の坑口斜面や開削トンネル上部の地盤についても、軽微な変状が地震時の地山崩壊につながることを踏まえ、必要に応じた観察・計測の実施が有効といえる。大規模地震時におけるトンネルの被害を軽減するためには、日常の維持管理を確実に遂行することが最も重要かつ合理的であることを提言したい。

以上、東北地方太平洋沖地震の被災事例を元に、計画・設計、施工、維持管理の観点で様々な提言を行ったが、その主旨はこれまでの地震被害で得られた教訓と変わるものではないことを述べ、本小委員会のまとめとしたい。

謝辞

本報告書の執筆にご協力頂いた東北電力(株)土木建築部、そして、被災地内のトンネルの被害状況について情報提供にご協力頂いた電源開発(株)有賀氏、日本電信電話(株)飯田氏、(株)高速道路総合技術研究所 大津氏、(独)土木研究所 角湯氏、日本下水道事業団 神山氏、東京電力(株)竹内氏、(独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構 深沢氏にこの場を借りて厚く御礼申し上げる次第である。

参考文献

- 1) 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：同小委員会報告書、2005年6月。
- 2) 土木学会トンネル工学委員会新潟県中越沖地震特別小委員会：同小委員会報告書、2008年1月。
- 3) 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年9月。