

## 鉄道構造物の構造種別・損傷レベルに応じた 地震後の復旧日数評価

名波 健吾<sup>1</sup>・和田 一範<sup>1</sup>・坂井 公俊<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 修士（工学）（公財）鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター  
（〒185-0034 東京都国分寺市光町2-8-38）

<sup>2</sup>正会員 博士（工学）（公財）鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター  
（〒185-0034 東京都国分寺市光町2-8-38）

### 1. はじめに

鉄道では、2018年大阪府北部地震や2021年、2022年の福島県沖の地震等において、構造物の被害状況の把握やその後の復旧作業等に時間を要し、地震後の早期運転再開の観点で課題が浮き彫りになった<sup>1)</sup>。このため、構造物の地震後の復旧性という観点での各種性能評価は、今後ますます重要になってくると考えられる。鉄道構造物の復旧性について、「鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計」（以下、耐震標準<sup>2)</sup>）においては、「妥当な経費の範囲内であることを前提に、構造物を短期間で機能回復できる状態に保つこと」と定義されている。復旧性照査の方法として、耐震標準では、復旧期間や経費等が供用期間を通じて妥当な範囲内となることを、構造物の初期建設コストと損傷時に機能回復に至るまでの費用と損失を算定し、それらの和をとったトータルコストを照査指標として照査する方法が提案され、橋脚を対象とした評価も実施されている<sup>3)</sup>。

構造物の復旧性を議論する際には、上述したコストという観点に加えて、機能回復までに要する期間も重要な指標となると考えられる。しかしながら、既往の復旧日数に関する検討<sup>4), 5)</sup>では、限られた事例に基づいて整理されているものがほとんどである。この場合、参照する事例によって復旧日数の評価結果が大きく変動する可能性があるが、複数の地震、構造形式、損傷程度を対象として、各構造物の機能回復に要する日数を統一的に整理した事例は、著者らによる調査の限り存在しなかった。構造物の機能回復に要する日数をきめ細く整理できれば、復旧日数という観点での地震時復旧性の評価も可能と

なると考えられる。それとともに、例えば構造物や鉄道の復旧日数を指標とした事業継続性の議論等にも活用できる可能性がある。

そこで本稿では、様々な鉄道構造物や損傷程度を対象として、復旧日数の統一的な評価を行う。この時には、まず過去地震の復旧事例を網羅的に調査することで、鉄道構造物の構造種別、損傷レベルに応じた地震後の復旧日数を評価する。しかしながら、被害事例だけでは整理できる情報に限りがあるため、復旧作業に必要な工種と作業日数を積算することで一般的な鉄道構造物を対象として、損傷レベルごとの復旧日数を統一的に評価する。最後に、積算に基づく復旧日数と、過去の地震被害に基づく復旧日数を比較することで、積算による復旧日数評価の妥当性を確認するとともに、これにより得られる知見について考察を行う。

### 2. 過去の復旧事例に基づく復旧日数の評価

#### (1) 評価条件

本章では、過去の地震における復旧情報を整理することで、構造種別、損傷レベルに応じた復旧日数を体系的に評価した。具体的には、学協会の定期刊行誌、論文集、各事業者の地震復旧記録誌等をはじめとする各種文献を網羅的に調査することで、復旧に要した日数を可能な限り収集した。この時には、一般的な構造物条件、復旧条件における復旧日数を整理することとし、特殊な条件下での事例は対象から除外した。また、復旧日数の考え方としては、地震発生から応急復旧が完了するまでの期間とした。この応急復旧の状態とは、構造物本体の機能はほぼ

表-1 耐震標準における損傷レベルの定義<sup>2)</sup>

損傷レベル	損傷程度
1	無損傷
2	場合によっては補修が必要な損傷
3	補修が必要な損傷
4	補修が必要な損傷で、場合によっては部材の取替えが必要な損傷

表-2 事例に基づく各構造種別の復旧日数の評価結果（単位：日）※「－」は事例なし、「\*」はせん断破壊の事例

(a) RC橋脚，ラーメン高架橋，橋台，擁壁

損傷レベル	RC橋脚			ラーメン高架橋			橋台			擁壁		
	事例数	平均	標準偏差	事例数	平均	標準偏差	事例数	平均	標準偏差	事例数	平均	標準偏差
1	1	1	－	3	2	1	－	－	－	－	－	－
2	3	10	2	36	7	4	5	13	5	－	－	－
3	4	20	8	8	23	14	1	28	－	3	43	26
4	1*	221*	－	9*	137*	40*	－	－	－	3	99	36

(b) 開削トンネル，山岳トンネル，盛土

損傷レベル	開削トンネル			山岳トンネル			盛土		
	事例数	平均	標準偏差	事例数	平均	標準偏差	事例数	平均	標準偏差
1	－	－	－	1	3	－	－	－	－
2	－	－	－	8	28	9	1	1	－
3	－	－	－	5	44	15	6	13	5
4	2*	141*	68*	3	76	57	－	－	－

回復しているものの、付帯工事や撤去といった工種が残され、徐行での運転再開が可能な状態とした。

調査対象とする構造種別は、一般的な鉄道構造物に用いられているものを想定し、RC橋脚、ラーメン高架橋、橋台、擁壁、開削トンネル、シールドトンネル、山岳トンネル、盛土とした。

損傷レベルについては、耐震標準<sup>2)</sup>では表-1のように定義されている。本検討における損傷レベルも、これに準拠して設定した。

以上の方針に従って復旧事例を調査し、それに基づいて復旧日数を評価した結果を次節に示す。

## (2) 評価結果

文献を調査した結果、復旧日数も含めた復旧事例に関する情報が得られた文献は8編あった。これを被害地震ごとに示すと、以下の通りとなる。

### ① 1995年兵庫県南部地震

- ・よみがえる鉄路<sup>6)</sup>
- ・阪神・淡路大震災 鉄道復旧記録誌<sup>7)</sup>

### ② 2003年十勝沖地震

- ・日本鉄道施設協会誌「平成15年十勝沖地震による鉄道の被害と復旧」<sup>8)</sup>

### ③ 2004年新潟県中越地震

- ・新潟県中越地震 災害復旧記録誌<sup>9)</sup>

- ・JR東日本 Structural Engineering Data 第24号<sup>10)</sup>

### ④ 2007年新潟県中越沖地震

- ・JR東日本 新潟県中越沖地震 震災対応記録誌<sup>11)</sup>

### ⑤ 2011年東北地方太平洋沖地震

- ・コンクリート工学年次論文集「東北地方太平洋沖地震におけるRCラーメン高架橋柱の損傷度と復旧性に関する分析」<sup>12)</sup>

- ・JR東日本 Structural Engineering Data 第44号<sup>13)</sup>

以上の文献に記載の復旧事例を整理した結果、構造種別に関しては、RC橋脚、ラーメン高架橋、橋台、擁壁、開削トンネル、山岳トンネル、盛土の復旧事例が得られた。ただし各構造種別に対して全ての損傷レベルに対応した復旧事例は得られておらず、例えば開削トンネル等では中柱のせん断破壊に伴う損傷レベル4の事例のみが存在した。これらの事例について、損傷レベルに応じて復旧日数を整理した結果を表-2に示す。表中では、RC橋脚、ラーメン高架橋については曲げ破壊となる事例を中心に整理している。一部にせん断破壊の事例が存在したため、表中では「\*」を付して区別している。

表-2より、当然ながら各構造種別共に損傷レベルが大きくなると復旧日数も長くなる傾向が確認でき

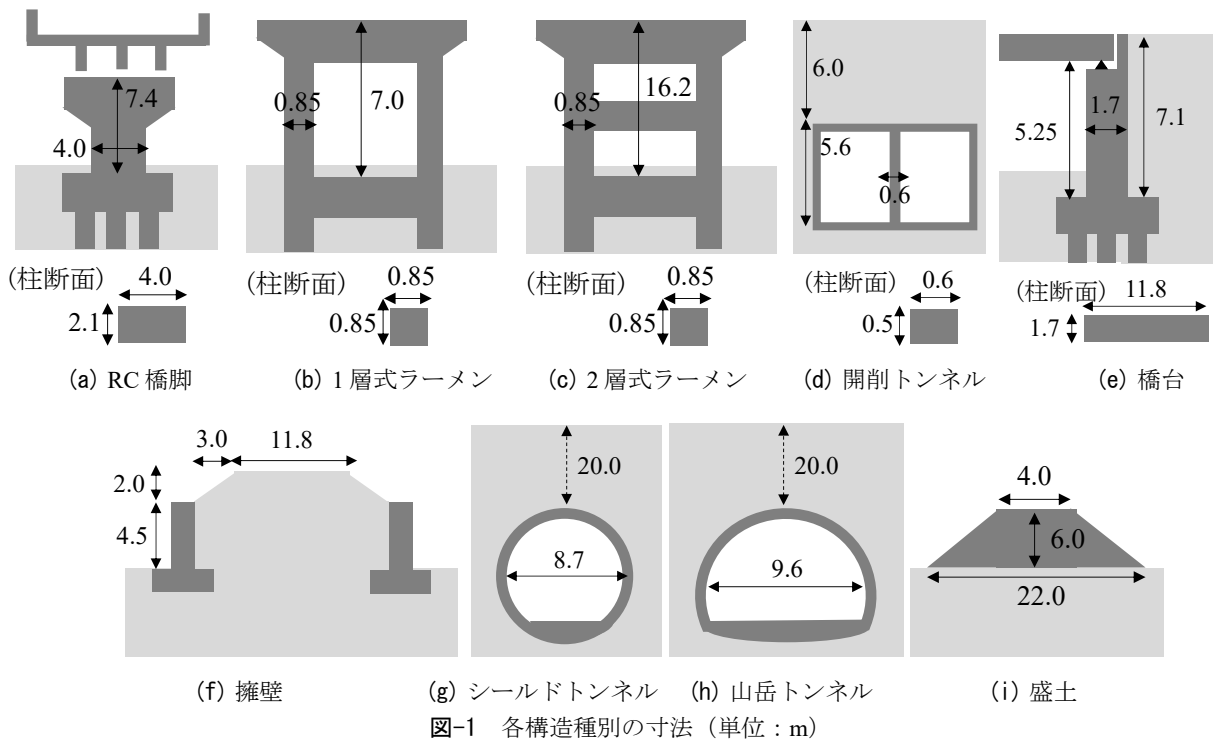


図-1 各構造種別の寸法（単位：m）

る。また、損傷レベル1～3については、RC橋脚、ラーメン高架橋と比較して、橋台、擁壁の復旧日数が長くなっている。この理由として、橋台、擁壁の復旧では構造本体と背面盛土の両方を補修しているが、RC橋脚、ラーメン高架橋は構造本体のみを補修しており、補修範囲の違いが復旧日数に影響しているものと推察される。なお、RC橋脚、ラーメン高架橋の損傷レベル4については、橋台、擁壁よりも復旧日数が長くなっている。このRC橋脚、ラーメン高架橋の損傷レベル4の事例は全てせん断破壊による損傷であり、ほぼ全面的な作り替えを行っているために復旧までに時間を要したものと考えられる。

なお前述したように、文献調査では対象とした全ての構造種別、損傷レベルの復旧日数を含む情報は得られなかった。そのため、この結果を補完するために、既往の復旧日数の評価事例<sup>14)</sup>を参考に損傷部位や損傷形態を想定するとともに、この損傷を補修するために要する人工や所要日数を積算して、復旧日数を算出することとした。これについて3章に示す。

### 3. 工種の積算に基づく復旧日数の評価

#### (1) 評価条件

工種の積算に基づく復旧日数の評価に際して、設計基準類<sup>例えば2)</sup>を参考にしながら構造種別、損傷部

表-3 想定する構造種別、損傷部位、損傷形態

構造種別	損傷部位	損傷形態
RC 橋脚	柱	曲げ破壊
	基礎	
1 層式 ラーメン高架橋	柱	
	基礎	
2 層式 ラーメン高架橋	柱, 中層梁	
橋台	< 体	
擁壁	< 体	
開削トンネル	中間柱	欠損
シールドトンネル	セグメント	
山岳トンネル	覆工	
盛土	盛土本体	残留変形

位、損傷形態ごとの損傷状態と復旧工種を設定する。このとき、復旧作業は複数人で構成される班単位で進められるものとし、各工種について作業効率や作業量を勘案して現実的かつ適切だと考えられる班数を設定した。また、各工種に必要な工事数量と、その工事数量を施工するために必要な延べ人工である所要総人工（班）を整理した。そして、所要総人工を投入班数で除すことで、各工種の所要日数を算出した。最後に、復旧工種ごとに必要な所要日数を全工種について足し合わせて全体の復旧日数を評価した。

このときの復旧日数や損傷レベルの定義は全て2章と同様とした。

表-4 各工種の積算による復旧日数の算定（ラーメン高架橋、柱損傷、損傷レベル3の場合）

必要工種	投入班数(班/日)	工事数量	所要総人工(班) <sup>※1</sup>	所要日数(日)
点検 <sup>※2</sup>	—	—	—	1.0
資材手配 <sup>※2</sup>	—	—	—	1.0
ベント設置	2	24 基	11.6	5.8
足場設置	4	800 掛 m <sup>2</sup>	5.2	1.3
はつり（かぶり部分）	4	50m <sup>3</sup>	2.4	0.6
はつり（柱コア部分）	4	17m <sup>3</sup>	8.4	2.1
ジャッキアップ <sup>※2</sup>	—	—	—	2.0
鉄筋修正	4	10.2t	10.8	2.7
型枠工	2	138m <sup>2</sup>	1.2	0.6
コンクリート打設	1	28m <sup>3</sup>	1.0	1.0
グラウト注入	1	867L	1.2	1.2
養生 <sup>※2</sup>	—	—	—	3.0
復旧日数（合計）				22.4

※1 24時間施工とした場合の1日当たりの班数 ※2 過去の復旧事例などから経験的に所要日数を推定

表-5 積算に基づく各構造種別の復旧日数の評価結果（単位：日）

損傷 レベル	RC 橋脚		1層式 ラーメン		2層式 ラーメン		橋台	擁壁	開削 トンネル	シールド トンネル	山岳 トンネル	盛土
	柱	基礎	柱	基礎	柱, 中層梁	く体						
損傷形態	曲げ破壊							欠損			残留変形	
損傷箇所	柱	基礎	柱	基礎	柱, 中層梁	く体	く体	中間 柱	セグ メント	覆工	盛土本体	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
2	8	6	8	7	11	6	7	8	7	8	4	
3	21	26	22	31	32	26	25	16	18	11	5	
4	26	26	25	32	30	29	25	12	19	15	15	

対象とする構造種別についても2章と同様とした（図-1）。ここで、詳細数量を算定するためには各構造種別の寸法等が必要になるが、今回は一般的な鉄道構造物を想定し、図-1のような形状を設定した。次に各構造種別については、各種設計基準類<sup>例えば2)</sup>に基づき表-3に示す損傷部位と損傷形態を想定した。また、構造物の周辺環境は十分な作業スペースがあり、側道から資機材の搬入が可能な条件を想定した。

以上の方針に従って、工種の積算に基づいて復旧日数を評価した結果を次節に示す。

## (2) 評価結果

対象とする構造種別、損傷部位、損傷形態、損傷レベルにおいて、復旧に必要な工種を整理して復旧日数を算定した。その例として、ラーメン高架橋（柱損傷）の損傷レベル3の場合について、復旧に必要な工種とそれに要する日数を積算した結果を表-4に示す。ここで表-4においては、明確に工事数量が確定できない一部の工種については、過去の復旧事例などから経験的に所要日数を推定した。

表-4からは、工種ごとに所要総人工や所要日数に違いがあることが確認できる。まず、地震発生後に点検を実施する必要があるが、これは過去の事例をもとに所要日数を1日とした。これは他の構造種別、損傷レベルを対象とした場合にも同様の日数を設定している。続いて、表-1を参考に損傷レベル1の場合は点検のみで復旧とするが、損傷レベル2以上の場合は資材手配に1日を要するものとした。これ以降に、各構造種別、損傷レベルの復旧に必要な工種と所要日数を整理した。

上記のような各工種の所要日数の積算を各構造種別、損傷部位、損傷形態、損傷レベルについて実施することで整理した最終的な復旧日数を表-5に示す。

本表より、2章の事例に基づいて整理した復旧日数と同様に、多くの構造種別について損傷レベルが大きくなるにつれて復旧日数が長くなる傾向が確認できる。また、同一の損傷レベルに着目した場合、構造種別によって復旧日数が異なることも確認できる。例えば、1層式ラーメン（柱損傷）と2層式ラーメン（柱、中層梁損傷）を比較すると、2層式ラー

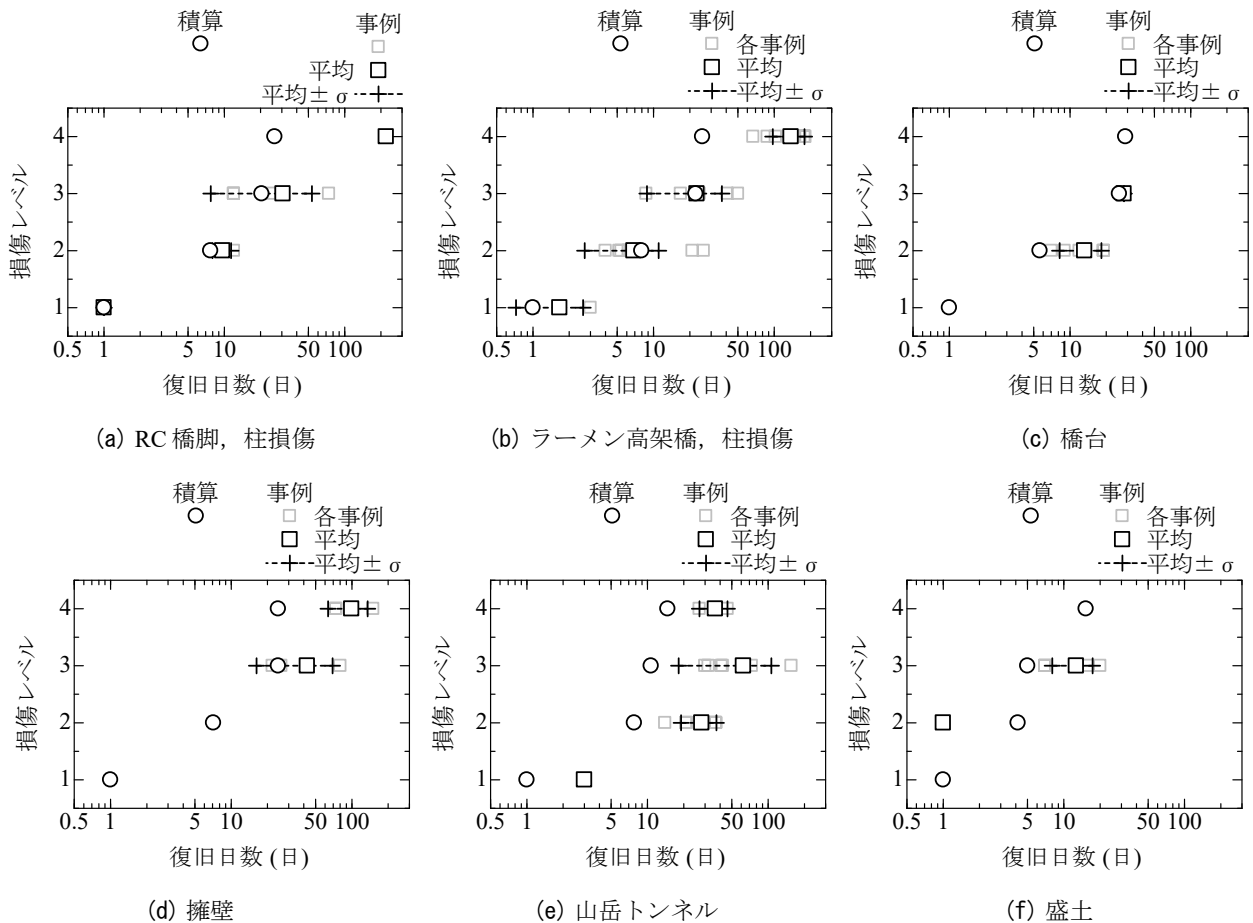


図-2 積算と事例の復旧日数の比較

メンの復旧日数の方が全体的に長くなっている。これは2層式ラーメン高架橋では中層梁の損傷を考慮していることと、全体的に柱高さが高く、施工範囲が広くなること等が理由として考えられる。

ただし、損傷レベル3と4の復旧日数は同程度か、損傷レベル4の復旧日数の方が短くなる構造種別が散見される。この理由として、損傷レベル4はほぼ全面的な作り替えとなるために作業量は多くなるものの、既設の部材に作業が阻害されないため、作業効率が高いためである。

以上のように、統一的条件で構造種別、損傷部位、損傷形態、損傷レベルにおける復旧日数が算定できた。

#### 4. 積算に基づく復旧日数評価の妥当性確認

本章では積算による復旧日数の評価結果と復旧事例を比較することにより、積算による復旧日数の評価の妥当性を検証する。

構造種別ごとの事例と積算による復旧日数の比較を図-2に示す。図中では、表-2に示した損傷レベルごとの復旧日数の平均と、平均±標準偏差( $\sigma$ )となる

日数も併せて示している。なお、一部の構造種別の損傷レベルでは事例が収集できなかったものがあるが、このようなケースではプロットを省略している。

図-2(a)のRC橋脚(柱損傷)の損傷レベル3、図-2(b)のラーメン高架橋(柱損傷)の損傷レベル1~3、図-2(d)の擁壁の損傷レベル3などは、積算による評価結果は概ね事例の平均±標準偏差( $\sigma$ )の範囲内に収まっていることがわかる。このことから、積算による評価結果は、概ね復旧作業の実態に即したものとなっていると考えられる。ただし、一部の構造物、損傷レベルで事例と積算結果に乖離が見られる部分がある。その理由について、以下で考察する。

図-2(a)、(b)のRC橋脚、ラーメン高架橋(柱損傷)について、損傷レベル4では事例と積算の間で乖離が見られ、積算が事例を過小評価している。これは、積算では曲げ破壊の場合の復旧日数を評価したのに対し、事例はせん断破壊であり、損傷形態が異なるためである。調査した事例では柱部材のせん断破壊に伴い、構造全体系が崩壊しており、柱のみならず橋梁、高架橋全体の作り替えに近い状況となったため、復旧日数が長くなっている。

図-2(d)の擁壁については、損傷レベル4の積算に

よる復旧日数が事例と比較して短くなっている。この理由として、積算では擁壁本体と擁壁周囲の盛土の再構築を想定しているのに対し、事例では擁壁本体に加えて盛土が全体的に崩壊しており、ほぼ全断面の盛土の再構築が必要となったことが挙げられる。

図-2(e)の山岳トンネルについては、全体的に積算による復旧日数が事例よりも短くなっている。これは、積算ではトンネル覆工の欠損に対する修復に要する日数を評価しているが、事例ではこれに加えて、軌道面の損傷による資機材の搬入困難や、坑口部分の損傷に対する修復等も必要となるためである。

ここで、開削トンネル、シールドトンネルについては、積算と同じ損傷形態となる事例が存在しないため、積算との比較、検証を行っていないが、山岳トンネルと同様に今回着目した損傷部位以外の工種を考慮する必要がある可能性がある。このようにトンネル構造物については、工種の見直しによって積算結果の信頼性が向上する余地があることが示唆された。

## 5. まとめ

本稿では、近年の地震を受けて重要性が増しつつある地震後の鉄道の早期運転再開の実現に資する検討として、構造種別、損傷レベルに応じた地震後の復旧日数を統一的に評価した。本稿の検討により得られた成果は以下の通りである。

- ・過去の地震における復旧事例を調査し、それらの復旧に要した日数を構造種別、損傷レベルごとに整理した。
- ・構造種別、損傷部位、損傷形態、損傷レベルごとに、復旧に必要と思われる工種を整理し、それらに要する人工や所要日数を積算することにより復旧日数を評価した。これにより、既往の地震によって被害が発生していないような構造種別、損傷レベルについても、復旧日数の評価を可能とした。
- ・事例が存在する構造種別、損傷レベルを対象に、積算による復旧日数と復旧事例の日数を比較すると、概ね近い日数となっており、本稿で評価した積算に基づく復旧日数の妥当性が検証された。

ただし、一部で事例と積算で乖離がみられるようなケースも存在しており、このようなケースでは復旧時の工種や積算数量を見直す余地が残されている。また、本稿の評価結果は一般的な構造物や周辺環境の条件を想定したものであるため、特殊な構造物や周辺環境の場合についても同様に復旧日数の評価を行う必要がある。これらについては今後の課題とし

て引き続き取り組む予定である。

## 参考文献

- 1) 国土交通省：大阪北部地震における運転再開等に係る対応に関する連絡会議の開催について、2018.
- 2) 公益財団法人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，2012.
- 3) 坂井公俊，室野剛隆，佐藤勉，澤田純男：トータルコストを照査指標とした土木構造物の合理的な耐震設計法の提案，土木学会論文集A1（構造・地震工学），Vol.68，No.2，pp.248-264，2012.
- 4) 他谷周一，翠川三郎：地震による鉄道の運休期間の推計方法，日本地震工学会論文集，第16巻，第9号，pp.67-85，2016.
- 5) 上原康平，丸山喜久：既往地震データに基づく高速道路の復旧予測に関する統計分析，土木学会論文集A1（構造・地震工学），Vol.72，No.4，pp.I\_110-I\_116，2016.
- 6) 阪神・淡路大震災鉄道復興記録編纂委員会：よみがえる鉄路，山海堂，1996.
- 7) 西日本旅客鉄道株式会社：阪神・淡路大震災鉄道復旧記録誌，交通新聞社，1996.
- 8) 吉田徹：平成15年十勝沖地震による鉄道の被害と復旧，日本鉄道施設協会誌，Vol.6，No.42，2004.
- 9) 東日本旅客鉄道株式会社：新潟県中越地震震災復旧記録誌，2005.
- 10) 東日本旅客鉄道株式会社構造技術センター：Structural Engineering Data，Vol.24，2005.
- 11) 東日本旅客鉄道株式会社：二度の震災から学んだ記録 平成19年新潟県中越沖地震震災対応記録誌，2005.
- 12) 小林将志，倉岡希樹，今井勉，菱田雅樹：東北地方太平洋沖地震におけるRCラーメン高架橋柱の損傷度と復旧性に関する分析，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.2，pp.1141-1146，2012.
- 13) 東日本旅客鉄道株式会社構造技術センター：Structural Engineering Data，Vol.44，pp.47-112，2011.
- 14) 神澤拓，田中浩平，西村隆義，西村昭彦：復旧性評価データベースを活用した鉄道構造物の復旧性評価法の提案，第22回橋梁等の耐震設計シンポジウム講演論文集，pp.73-80，2019.