

# 報告 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

小林 將志\*1・倉岡 希樹\*2・今井 勉\*3・菱田 雅樹\*4

**要旨**：2011年に発生した東北地方太平洋沖地震において複数の高架橋が被災した。そこで、構造物の復旧性に及ぼす損傷度の影響を確認することを目的に、被災した高架橋を損傷度ごとに分類し、復旧工事に関わる期間を整理した。その結果、損傷度と着工から復旧工事完了までの期間は、損傷度が大きいほど長くなる傾向があるが、柱部材が崩壊に至らない程度の損傷度であれば施工期間は6日～9日程度と大きくばらつかない結果を示すとともに、復旧工事を昼夜施工で、養生条件を良好にした場合には、損傷度が比較的大きくても2日程度、軽微な損傷であれば1日程度で復旧工事を完了できる可能性を示した。

**キーワード**：東北地方太平洋沖地震、鉄筋コンクリート柱、損傷度、復旧期間

## 1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震(以下、「本震」と記載)は、M9.0、震源の深さ24kmとされ<sup>1)</sup>、本震の断層破壊領域で発生した地震の震源断層が岩手県から茨城県の沖合に広がる、長さ約500km、幅約200kmに及んだ。そのため、東北地方から関東地方に及ぶ広い範囲で大きな地震動が計測され、観測された震度は、宮城県栗原市築館の震度7を最大とし、震度6強を宮城県、福島県、茨城県、栃木県で観測し、震度6弱を、岩手県、群馬県、埼玉県、千葉県で観測されている。これらの震源域に沿うように位置する東北新幹線では、広範囲にわたって被害を生じ、鉄筋コンクリート(以下、RCと記載)ビームスラブ式ラーメン高架橋においても被災を受けた。一方で、ビームスラブ形式のRCラーメン高架橋は、鉄道構造物の高架構造として一般に用いられることの多い構造であり、耐震設計の際に耐震性能を設定する際には、地震時の損傷程度と復旧性の関係を明確にする必要がある<sup>2), 3)</sup>。

そこで、本震と2011年4月7日に発生したM7.4の地震(以下、「余震」と記載)で被災した複数の高架橋を損傷度ごとに整理して、部材の損傷度と復旧性について整理したので、ここに報告する。

## 2. 被害の概要

### 2.1 東北新幹線の被害状況

3月11日の本震では、大宮からいわて沼宮内までの約500kmに渡り、地上設備で約1,200箇所の被害を受けた。そのうち、土木構造物の主な被害としては、高架橋柱等の損傷約100箇所、橋桁のずれ2箇所、橋桁の支点部損

傷約30箇所であった。これらの被害箇所は、4月7日の余震発生までに、約90箇所を残して応急復旧が終了していたものの、余震により新たに約550箇所の被害を受けた。そのうち、土木構造物の主な被害としては、高架橋柱等の損傷約20箇所、橋桁のずれ7箇所、橋桁の支点部損傷約10箇所であった。なお、被害の範囲は本震に比べせまいものの、仙台～一ノ関間など場所により本震より厳しい被害を受けた箇所もあった。

表-1は、東北新幹線の運転再開日と復旧までの期間を示したものである。運転再開には、最短の区間で1日、最長の区間で49日を要した。経過日数は、地震発生～調査～復旧工事～試運転(速度向上試験)を経て運転再開となる全ての日数を示しているため、工事期間よりも長い日数となるが、運転再開までの経過日数が長い区間ほど、地震被害の数量も変状レベルも大きかったことがうかがえる。また、今回の地震では、本震後の約1ヶ月後に余震による被災を受けたため、復旧期間が長くなったことが分かる。

表-1 東北新幹線の不通区間と復旧期間

区間	開業日	3/11から	4/7から
東京～大宮	3月12日	1日	-
大宮～那須塩原	3月15日	4日	-
那須塩原～福島	4月12日	32日	5日
福島～仙台	4月25日	45日	18日
仙台～一ノ関	4月29日	49日	22日
一ノ関～盛岡	4月7日	27日	-
再開通(4/7余震後)	4月23日	-	16日
盛岡～新青森	3月22日	11日	-
再開通(4/7余震後)	4月13日	-	6日

\*1 東日本旅客鉄道株式会社 建設工事部構造技術センター課長 工修 (正会員)

\*2 東日本旅客鉄道株式会社 建設工事部構造技術センター課員 工修 (正会員)

\*3 東日本旅客鉄道株式会社 設備部課長

\*4 東日本旅客鉄道株式会社 設備部主席

## 2.2 調査対象構造物と被害の概要

### (1) 対象構造物の概要

東北新幹線では、経済性、利便性、工期などの観点からビームスラブ式の RC ラーメン高架橋が多く用いられており（図-1 参照）、区間によっては延長の半数超を RC ラーメン高架橋とした区間もある。当時の設計では、駅部を除くと 3、4 径間の 1、2 層の構造が多数であり、ブロックの両端には、隣接するブロックと接続するための単純桁（調整桁）を支持するいわゆるゲルバー形式の高架橋が多く用いられている。基礎形式は、一般にフーチングを有する直接基礎か、打ち込み杭による群杭基礎であり、隣り合う基礎どうしを地中梁で連結する構造が採用されている。

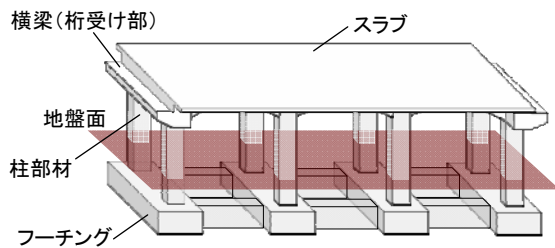


図-1 ビームスラブ式ラーメン高架橋のイメージ

### (2) 被害分類と調査数量

図-2 は、RC ラーメン高架橋柱部材の損傷度の分類と主な変状状況について示したものである。

損傷度の区分については、A が「柱の倒壊、桁・スラブの落下、軌道沈下有り」、BB が「軸方向鉄筋の外方への変形、かぶりコンクリートの広範囲な剥落、軌道沈下有り」、

図-2 損傷度の分類



表-2 損傷度の区分と主な損傷状況（RC ラーメン高架橋の柱部材）

損傷度の区分	BB	B	C
損傷状況の例	<p>① 曲げによるかぶりコンクリートの広範囲な剥落とコアコンクリートの損傷が認められる。</p> <p>② 軸方向鉄筋の外方への変形、帯鉄筋の変形が認められる。</p>	<p>① 曲げによるかぶりコンクリートの広範囲な剥落が認められる。</p> <p>② 軸方向鉄筋の外方への変形、帯鉄筋の変形が認められる。</p>	<p>① 曲げひび割れ（水平ひび割れ）が認められる。</p> <p>② 曲げによるかぶりコンクリートの浮き・剥落が認められる。</p>
	<p>③ 斜めひび割れ（貫通ひび割れ）があり、斜めひび割れによるかぶりコンクリートの浮き、剥落が広範囲に認められる。</p>	<p>② 斜めひび割れ（貫通ひび割れ）があるが、斜めひび割れによるかぶりコンクリートの浮き、剥落が部分的に認められる。</p>	<p>③ 斜めひび割れ（貫通していない）が認められる。</p>

の変形、かぶりコンクリートの広範囲な剥落、軌道沈下有り」、Bが「軸方向鉄筋の外方への変形、かぶりコンクリートの広範囲な剥落、軌道沈下無し」、Cが「残留ひび割れ、かぶりコンクリートの一部の浮き・剥落、軌道沈下無し」としている。

表-2は、RC ラーメン高架橋柱部材の損傷度の区分と主な損傷状況を示したものである。今回の被災では、損傷度 A が無かったので、BB 以下の損傷度について記載した。

損傷度 BB と B は、比較的損傷が大きく、曲げによる損傷としては、主にかぶりコンクリートの広範囲な剥落、軸方向鉄筋の外方への変形（鉄筋が降伏して部材の外側に曲がりながら変形している状態）、軸方向鉄筋の変形により押し出されることによる帯鉄筋の変形などがみられる。せん断による損傷としては、主に断面を貫通するような斜めひび割れの発生、かぶりの浮きや剥落の発生が見られる。なお、BB は軌道沈下が発生している状態であり、B は軌道沈下がみられない場合である。

損傷度 C は、比較的損傷が軽微であり、曲げによる損傷としては、主に曲げひび割れ（水平ひび割れ）、曲げによるかぶりコンクリートの浮き・剥落などがみられる。せん断による損傷としては、主に斜めひび割れ（貫通していないもの）がみられる。

今回の復旧性の調査では、本震、余震で被災した損傷度 BB から C までの全 38 箇所 of ラーメン高架橋について分析することとした。

### 3. RC 高架橋の損傷度と復旧方法

被災後の復旧は、応急復旧工事により対象とする構造物の性能を地震による損傷を受ける前の状態に回復し、運行を再開させ、本復旧工事で順次耐震補強を行うこととしている。以下に、RC ラーメン高架橋柱部材の損傷度別の応急復旧工事の基本的な進め方について述べる。

#### (1) 損傷度 BB の場合

損傷度 BB の場合、梁スラブを軌道面の所要の高さ・位置まで移動させる必要がある。主に、曲げによる損傷が著しい場合の応急復旧の概要を、表-3 に示す。まず、柱にかかる軸力を仮受け可能な梁に、角型支柱等を設置しジャッキを介して仮受けを行い、軸方向鉄筋を切断して所定の位置に扛上する。この際、支柱は柱が受持つ軸力（一般に最大で  $2.0\text{N}/\text{mm}^2$  程度）を保持できるものを用意し、地盤条件が悪い場合には、地中のフーチング上に支持させることとし、地中の掘削を行った場合には、地中部の健全性についても確認する。

損傷箇所のコンクリートのハツリは、鉄筋の継手の位置が一断面に集中しないように配慮し、変形した帯鉄筋については、鉄筋の継手を設ける際に邪魔にならないよ

う撤去する。スラブの位置が定まったら、軸方向鉄筋を熱処理しながら所定の位置に曲げ戻し（熱処理温度は温度チョークにて管理）、添え筋を所定の位置に配置して、上下端をフレア溶接継手にてつなぎ合わせ、帯鉄筋を所定量（D16ctc100）配置して、型枠を設置し速硬性の無収縮モルタルを打設することで断面修復を行う。

#### (2) 損傷度 B の場合

主に曲げにより損傷度 B の損傷を受けた場合の応急復旧方法を表-3 に示す。損傷区間のかぶりコンクリートを全周に渡り撤去し（軸方向鉄筋内部のコアコンクリートについては撤去しない）、コアコンクリート注入口及び空気抜きは各ひび割れに 1 組以上配置し、シーリング及び空気抜きの施工を確実に行った上でコアコンクリートへの注入を行い、断面からはみ出す鉄筋については軸方向鉄筋を熱処理しながら所定の位置に曲げ戻し、帯鉄筋を所定量（D16ctc100）配置して、型枠を設置し速硬性の無収縮モルタルを打設することで断面修復を行う。

#### (3) 損傷度 C の場合

損傷度 C 程度の損傷を受けても柱部材の耐震性は低下していないと考えられるため、そのままの状態で列車運行を継続しても問題ないが、同一区間に損傷度 B 以上の損傷を受けていると、列車の運行が停止している場合には、当該柱に対しても応急復旧を行うこととなる。

表-3 に復旧方法の例を示す。コンクリート表面（かぶり部分）に断面欠損がある場合には、断面修復材により表面の補修を行う。断面修復材には、復旧期間を考慮して速硬性モルタルを用いるか、通常の断面修復材を用いるかを決定する（設計基準強度  $27\text{N}/\text{mm}^2$  以上）。表面のみの補修の場合、再び剥落しないように、アンカー、メッシュを入れるなど剥離剥落対策に対応した補修を行うこととなる。

また、曲げ及びせん断により残留ひび割れが発生した際の部材の復旧方法を示す。一般に、コンクリート表面に残留ひび割れのみが見られる場合には、ひび割れ箇所にシーリングを行った上で樹脂注入を行う。柱入可能なひび割れ幅は通常  $0.1\text{mm}$  程度までであり、シーリングを行った上で、ひび割れの状況（幅、深さ、湿潤状態など）に合った適切な材料を選定する。

### 4. 構造物の復旧性に関する分析

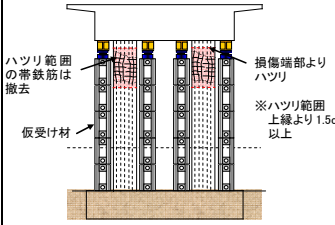
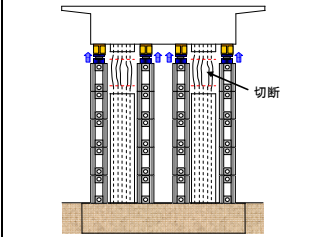
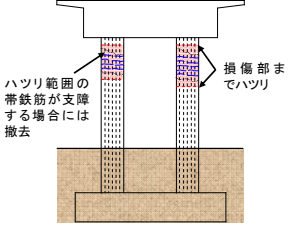
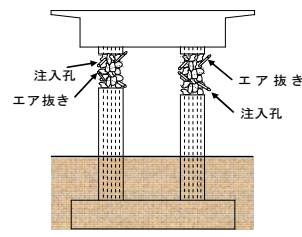
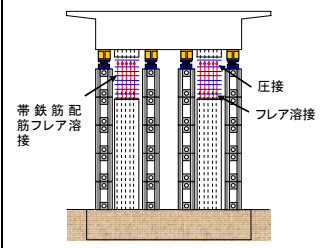
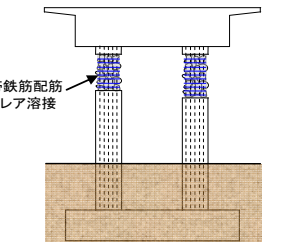
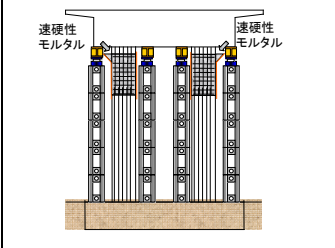
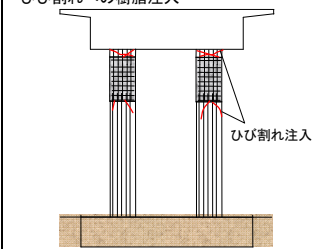
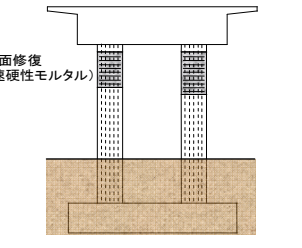
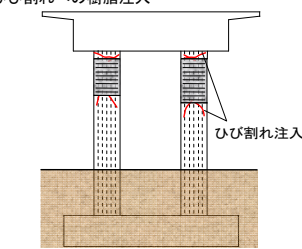
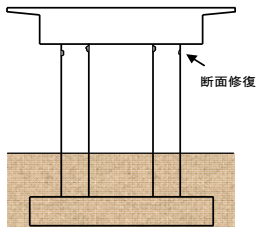
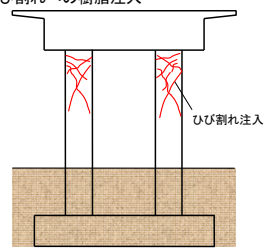
本報告では、損傷度 BB、B、C の被災を受けた高架橋の復旧工事期間の実績をもとに、部材の損傷度が復旧性に及ぼす影響について検証する。

#### 4.1 復旧期間の実績分析

##### (1) 損傷度と実績復旧期間

表-4 は、本震、余震の際の復旧期間の実績期間を損傷度毎に整理したものである。実績期間のうち、「地震発

表-3 損傷度と被災直後の主な復旧作業

損傷度の区分	BB	B	C
復旧工事の施工ステップ	<p><b>Step 1</b> (仮受け→ハツリ→ジャッキアップ or ハツリ→樹脂注入)</p> <p>[1] 柱下端の掘削、はり仮受け、損傷区間のかぶりコンクリートの全周撤去</p>  <p>[2] 軸方向鉄筋切断・ジャッキアップ</p> 	<p>[1] 損傷区間のかぶりコンクリートの全周撤去 (コアコンクリートは存置)</p>  <p>[2] コアコンクリートへの樹脂注入</p> 	
	<p><b>Step 2</b> (鉄筋の再配置)</p> <p>[3] 軸方向鉄筋の再配置 (塑性ヒンジ区間は熱間押抜き法による圧接継手、その他の区間はフレアV形溶接継手) 帯鉄筋配筋の再配置 (フレアV形溶接継手)</p> 	<p>[3] 帯鉄筋配筋の整正or再配置 (フレアV形溶接継手)</p> 	
	<p><b>Step 3</b> (断面の回復)</p> <p>[4] 断面修復 (速硬性モルタル) 仮受け撤去</p>  <p>[5] ひび割れへの樹脂注入</p> 	<p>[4] 断面修復 (速硬性モルタル)</p>  <p>[5] ひび割れへの樹脂注入</p> 	<p>[1] 断面修復 (速硬性モルタル)</p>  <p>[2] ひび割れへの樹脂注入</p> 

生～着工」は、調査、施工指示、資材・労務調達のための期間とし、「復旧工事」は、準備工（整地・足場組立な

ど）から表-3 に示す応急復旧の工程を示し、「施工完了」は、「地震発生～着工」と「復旧工事」の合計とし、「復

旧完了」は、施工完了に養生期間を加えたものとした。

表より、本震時の復旧完了期間が、損傷度によらずほぼ同程度となっている。これは、損傷度 BB の柱を再補強不要とするために、広範囲にハツリ取って帯鉄筋量を密に再配置したにもかかわらず、復旧方針の検討及び施工が最優先で実施されたので、「地震発生～着工」までの期間が極めて短期間で処理されたためである。なお、工期短縮のために、損傷度 BB の高架橋の復旧工事は、昼夜施工にて行われた。一方、余震の際の復旧完了期間は、損傷度 B、C は 8 日～9 日程度であったが、損傷度 BB では、約 12 日と 1.5 倍程度かかっている。これは、余震の際には電柱の復旧工事が工程上のクリティカルであり、構造物の復旧工事をその期間内に実施すればよいために、昼夜施工を実施しなかったことが影響したものと考えられる。

表-4 損傷度と復旧完了期間

	損傷度	箇所数	実績期間 (平均)			
			地震発生～着工	復旧工事	施工完了	復旧完了
本震時 (2011.3.11)	BB	3	2.7	4.6	7.3	10.3
	B	10	4.3	4.2	8.5	11.5
	C	12	6.4	2.4	8.8	11.8
余震時 (2011.4.7)	BB	2	3.4	5.7	9.1	12.1
	B	2	1.4	3.3	4.6	7.6
	C	9	3.9	2.2	6.1	9.1

注)本震時の損傷度BBの復旧工事は昼夜施工

このように、復旧期間は、損傷度、復旧工事着工の優先度、並行して実施される復旧工事(送電、信号、軌道等)などの複数の要因の影響を受けるため、損傷度のみにより推定することは困難である。以下では、構造物の復旧性を施工期間に着目して分析する。

表-5 損傷度と復旧工事の施工期間(実績)

	損傷度	箇所数	step0	step1	step2	step3	step0~3
			準備工	※1	鉄筋再配置	断面回復+養生	
本震時 (2011.3.11)	BB	3	1.5	1.8	1.3	3.5	8.2
	B	10	1.7	1.8	0.6	3.7	7.8
	C	12	1.5	—	—	4.6	6.1
余震時 (2011.4.7)	BB	2	2.5	2.0	1.1	3.6	9.2
	B	2	0.6	1.1	1.2	3.8	6.8
	C	9	0.7	—	—	5.0	5.7

注1)本震時の損傷度BBの工事期間の施工は昼夜施工(養生期間を除く)

※1 損傷度BBは仮受け、ハツリ及びジャッキアップ、損傷度Bはハツリ及びひび割れ注入。

## (2) 損傷度と復旧工事の施工期間

表-5 は、損傷度と着工から復旧工事完了までの期間の関係を示したものである。Step 0 は、着工から整地、足場組立までの準備工、Step 1~3 までは表-3 に示す応急復旧の工程を示したものである。なお、Step 3 には養生期間を含んでいる。

表より、復旧工事完了までの施工期間は、損傷度 BB、B、C の順で長い傾向があるが、損傷度がこの範囲で変わっても施工期間は 6 日～9 日程度と大きくばらつかない結果であった。

## 4.2 損傷度と換算復旧工事期間

表-6 は、本震の際に被災した高架橋の早期復旧の事例である。この構造物は、損傷度が B であったものの、被災が集中した地域から離れていたため、復旧工事を集中して行えたことから復旧工事期間が 0.7 日であった。この復旧工事期間は、表-5 に示した東北新幹線の実績に比べて大幅に短いことがわかる。これは、東北新幹線の実績が、一部に昼夜施工のデータがあるものの、並行して実施される他構造物の復旧工事が復旧工程上のクリティカルであり、構造物の復旧工事がクリティカルでなかったためと考えられる。

表-6 復旧工事の早期復旧の事例

	損傷度	箇所数	step0	step1	step2	step3	step0~3
			準備工	はつり+注入	鉄筋再配置	断面回復+養生	
早期復旧事例	B	1	0.1	0.2	0.1	0.3	0.7

※1 損傷度BBは仮受け、ハツリ及びジャッキアップ、損傷度Bはハツリ及びひび割れ注入。

そこで、以下の分析では、復旧工事が上記事例の高架橋と同様に 24 時間昼夜施工で施工されたと仮定し、式(1)により再計算した「換算復旧工事期間」を用いて分析を行なった。なお、養生期間は、所定強度を確保するための最短の期間とし、温度 20℃以上を保持したと仮定して 3 時間とした(実施工は温度 5℃以上を 3 日間とした)。

$$\begin{aligned} \text{換算復旧工事期間} &= (24 \text{ 時間施工に換算した施工期間}) \quad (1) \\ &+ (\text{所定強度を確保できる最短養生期間}) \end{aligned}$$

表-7 損傷度と復旧工事の換算復旧工事期間

	損傷度	箇所数	step0	step1	step2	step3	step0~3
			準備工	※1	鉄筋再配置	断面回復+養生	
本震時 (2011.3.11)	BB	3	1.5	1.8	1.3	0.6	※2 5.3
	B	10	0.6	0.6	0.2	0.3	1.7
	C	12	0.5	—	—	0.7	1.1
余震時 (2011.4.7)	BB	2	0.8	0.7	0.4	0.3	2.2
	B	2	0.2	0.4	0.4	0.4	1.4
	C	9	0.2	—	—	0.8	1.0

※1 損傷度BBは仮受け、ハツリ及びジャッキアップ、損傷度Bはハツリ及びひび割れ注入。

※2 復旧工事に、耐震補強工事を含む。

表-7 は、本震と余震の実績を換算復旧工事期間で再整理した結果である。表より、本震時の損傷度 BB では、Step 0~2 で施工時間を要したために平均 5.3 日の施工期間となっている。これは、当初、損傷度 BB の柱を再補強不要とするために帯鉄筋量を耐震補強並みに配置する

工事を行ったことが影響していると考えられる。余震時の損傷度 BB の復旧では、復旧後に引続き耐震補強を行うこととしたために、B、C 同様に復旧することに変更したことから、平均 2.2 日であった。損傷度 B の換算復旧工事期間は本震で平均 1.7 日、余震で平均 1.4 日であり、損傷度 C の換算復旧工事期間は本震で平均 1.1 日、余震で平均 1.0 日であった。

これらの結果より、復旧工事期間は、施工内容の異なる本震時の BB のデータを除外した場合、損傷度 BB および損傷度 B が 2 日程度、損傷度 C が 1 日程度で完了できたものと推定された。

## 5. まとめ

本報告では、東北地方太平洋沖地震の本震及び余震で被災した複数の高架橋を損傷度ごとに整理し、部材の損傷状況と復旧性について検討した。以下に、今回の実績をもとに復旧性について整理した結果を示す。

(1) 地震発生から復旧工事完了までの復旧期間は、損傷度、復旧工事着工の優先度、並行して実施される復旧工事（送電、信号、軌道等）などの複数の要因の影響を受けるため、損傷度のみにより推定することは困難である。

(2) 着工から復旧工事完了までの復旧工事期間は、損傷度が大きいほど長くなる傾向にあるが、損傷度が BB から C の範囲であれば 6 日～9 日程度と大きくばらつかない結果であった。

(3) 建造物の復旧工事期間を、24 時間の昼夜施工、断面修復や樹脂注入の養生時間を 20℃以上で 3 時間として算定した換算復旧工事期間は、損傷度 BB では余震時で平均 2.2 日であり、損傷度 B では本震時で平均 1.7 日、余震で平均 1.4 日、損傷度 C の換算復旧工事期間は本震で平均 1.1 日、余震で平均 1.0 日であった。よって、復旧工事を昼夜施工で、養生条件を良好にした場合には、損傷度 BB、B が 2 日程度、C が 1 日程度で復旧工事を完了できる可能性が示された。

## 参考文献

- 1) 気象庁：「平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震」について（第 15 報），2011.3
- 2) (社)土木学会：コンクリート標準示方書 [設計編]，2007.3
- 3) (財)鉄道総合技術研究所：鉄道建造物等設計標準・同解説（耐震設計），2009.10