



○ 特集 / 論説 ○

は液状化の発生に関係したと考えられ、また、電化柱の傾斜や折損も長い地震動が影響した可能性がある。

さらに、津波により海岸線区の構造物に大きな被害が発生した。

### 3. 橋脚と高架橋柱の損傷と着実な耐震補強の推進

#### 3.1 橋脚と高架橋柱の損傷状況

##### (1) 橋脚

写真 - 1 に 4 月 7 日の余震で被災した東北新幹線一ノ関～水沢江刺間第一北上川橋梁の橋脚の損傷状況を示す。スパン約 50 m の PC 桁を支える固定端側の橋脚（直径 4.8 m、高さ約 16 m）において鉄筋の段落し部からひび割れが生じたものである。第一北上川橋梁の PC 桁部では 100 基の橋脚がある。このうちスパン約 31～33 m の桁を支える橋脚で耐力比<sup>1)</sup>（せん断耐力 / 曲げ破壊時のせん断力）が低いものについては耐震補強が完了しており被災していない。スパン約 50 m の桁を支える 7 基の橋脚は今後の補強対象となっていた。

##### (2) 高架橋柱

写真 - 2 に 3 月 11 日の本震で被災した東北新幹線北上～新花巻間第一中曽根高架橋の柱の損傷状況を示す。本高架橋は、スパン約 8 m で 3 径間の RC ラーメン構造である。高架橋の端部柱に被害が大きく、軸方向鉄筋のはらみ出し、内部コンクリートのはく落が発生した。この損傷状況は、軸方向鉄筋が曲げ降伏した後地震動の繰返しにより断面内のコンクリートが損傷したものと推定される。

JR 東日本においては、文献 1) に示す耐力比をパラメーターにせん断破壊しやすいかどうかを判定している。なお、耐力比の小さなせん断破壊先行型の柱については補強が完了し、続いて曲げ破壊先行型のうち耐震性の低い柱の補強を開始していた。写真 - 2 は今後の補強対象の柱であった。高架橋の端部は、隣接高架橋を接続する単純桁を載せる桁受け部を有するために、中央部の柱に比べて柱の長さが短い。長さの短い柱では、耐力比が相対的に小さく



写真 - 1 橋脚の損傷（一ノ関～水沢江刺間 4/7）



写真 - 2 高架橋柱の損傷（北上～新花巻間 3/11）

なり、変形性能が小さく耐震性能が低くなる傾向を示す。

#### 3.2 損傷状況の分析と今後の耐震補強

東北新幹線の高架橋柱を例に損傷度の区分を図 - 3 に示す。A に分類されるような落橋は今回は無かった。写真 - 2 に関しては今回の地震で被害がもっとも大きかった分類に入り、ランクは BB であった。今回の地震における東北新幹線の柱の耐震性能と損傷度の割合を図 - 4 に示す。図中の数字 (gal) は、ニューマークのエネルギー一定則を用いて弾性体の加速度として示した柱の耐震性能であ

<p>【A】 柱の倒壊・ 桁の落下</p> 	<p>【BB】 軸方向鉄筋の変形・ かぶりコンクリートの 広範囲なはく落・ 軌道沈下有</p> 
<p>【B】 軸方向鉄筋の変形・ かぶりコンクリートの 広範囲なはく落・ 軌道沈下無</p> 	<p>【C】 残留ひび割れ・かぶり コンクリートの一部はく落</p> 

図 - 3 高架橋柱の損傷度の区分

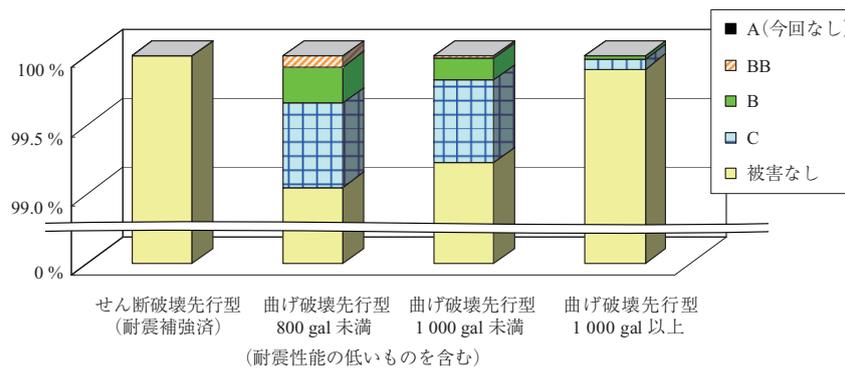


図 - 4 高架橋柱の地震による被害の分析

る。せん断破壊先行型の柱は耐震補強対策済みであり、柱に損傷は無かった。耐震性能の低いものを含む曲げ破壊先行型の柱では、BB、B ランクの損傷が見られた。耐震性能 1000 gal 以上の曲げ破壊先行型の範囲では BB ランクの損傷は見られなかった。

これらから、耐震補強の効果は十分あったといえる。またこれまで実施してきた耐震診断の方法も正しかったと考えている。東北新幹線においては、PC 桁をはじめとする橋梁、高架橋に落橋がなかったことが復旧工程を早めることができた要因である。

一方で、図 - 5 に本震の K-NET 築館、塩竈と兵庫県南部地震 (JR 鷹取)、新潟県中越地震 (JMA 小千谷) の加速度応答スペクトルを示す。今回の地震動は短周期側では大変大きいですが、一方、鉄道の高架橋・橋梁の一般的な周期である 0.5 ~ 1 秒程度では兵庫県南部地震、新潟県中越地震の加速度応答スペクトルの方が大きかった。今回の地震では強い地震動が広い範囲に及んだが、部分的には直下型地震で今回以上に構造物に損傷を与える地震がこれからも発生しうることを示していると考えられる。今後も着実な耐震補強が必要である。

#### 4. 支承部付近の損傷と耐震性向上

##### 4.1 支承部付近の損傷状況

橋梁の支承部付近の損傷は、支承部の損傷に加え、桁端

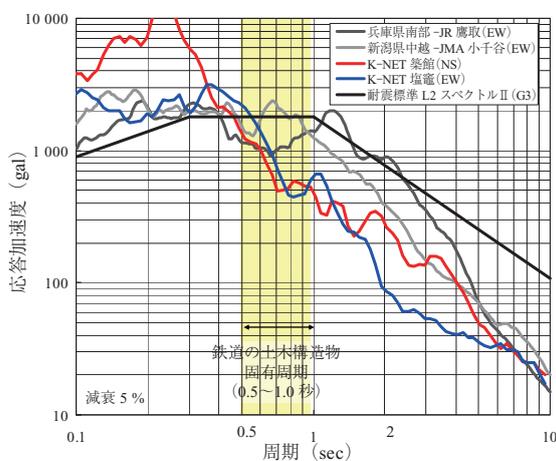


図 - 5 地震動の応答加速度スペクトル

部の被害があった。

##### (1) 桁端部

写真 - 3 に東北新幹線福島～白石蔵王間斎川橋梁の桁端部の被害状況を示す。これは、スパン 30 m の PCI 桁の終点固定端の端部である。この桁の支承は BP 沓であり、1978 年に発生した宮城県沖地震後に水平力に対して支承が十分機能できるように支承を取り囲んで補強した補強枠が施工されている<sup>2)</sup>。また、I 桁の主桁間には橋脚に直結した、線路直角方向の移動を制限する RC ストッパーが配置されている。今回、地震により橋軸方向に大きな水平力を受けたため、上沓のアンカー鉄筋から桁に大きなせん断力が発生して桁の端部が粉砕化したと考えられる。ただし、支承本体およびストッパーには変状は見られなかった。支承本体は補強枠により補強されていたため損傷せず、桁の端部が粉砕化したものと考えられる。

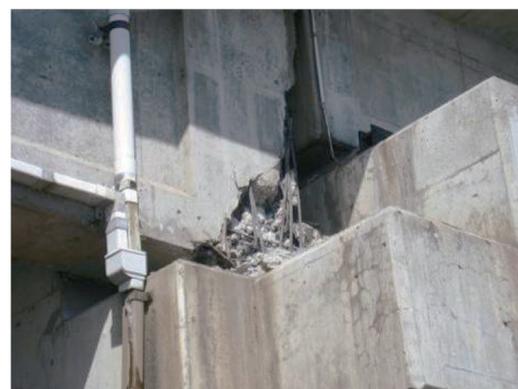


写真 - 3 斎川橋梁 (桁端部) の被害状況

##### (2) 支 承

写真 - 4 に同じく斎川橋梁の 4.1 (1) で示した桁の隣にある桁の支承部損傷状況を示す。スパン 55 m の PC 箱桁の起点方可動端である。支承形式はローラー沓であり、ダンパーストッパーが配置されている。今回の地震で、ローラーの逸脱、ピニオンおよびラックの損傷、取付けボルト破断等が生じた。

##### (3) ストッパー

写真 - 5 に東北新幹線新白河～郡山間西山架道橋の銅角ストッパーによる損傷状況を示す。スパン 24.2 m の



写真 - 4 齋川橋梁（支承部）ローラー沓の損傷状況



写真 - 5 西山架道橋 鋼角ストッパーによる桁座損傷状況

PCI 桁部分である。BP 沓に鋼角ストッパーと RC サイドストッパーを組合せたもので、鋼角ストッパー前面および背面のコンクリートが大きくはく離した。

#### 4.2 支承部付近の耐震性能向上

4.1 (1)~(3)のように、支承部付近では支承、ストッパー、桁端部がそれぞれの強度との関係でもっとも弱いと考えられる部位が影響して損傷していた。耐震性能を向上するためには、すべての部位の性能を同レベルにすることが効果的である。また、支承部だけでなく、橋脚あるいはその基礎とのバランスも必要である。

支承部は通常高所で狭い空間に位置していて、地震後の点検にも労力を要した。普段から検査の手間がかかる場所でもある。支承に有利な点も有るが、剛結してラーメン構造とすることで、耐震性向上と点検の省力化を図ることも一方策である。

### 5. 電化柱の折損と耐震性向上

#### 5.1 電化柱の折損状況

今回の地震では、高架橋や橋梁上の電化柱が多く折れたり傾いたことが被害の特徴であった。新幹線の電化柱は高さ 12 m 程度の PC 製が大半であるが、1978 年宮城県沖地震で建設中の東北新幹線の電化柱が折れたことを契機に研究が進み、その後高架橋や橋梁上の電化柱は、砂基礎と呼ばれる投げ込み式の基礎となり電化柱の周りに砂を詰めている。高架橋や橋梁上で電柱の揺れが増幅されることに対して、電化柱基礎部に配置された砂による大きな減衰効

果を期待しているものである。写真 - 6, 7 にその電化柱の損傷の一例を示す。電化柱の折損・傾斜・ひび割れは約 810 箇所にあつた。これらは損傷状況に応じて鋼管柱への取替えや基礎の砂撤去して柱を起こして再度砂を充てんするなどの補修がなされた。これまでの大地震時の鉄道の復旧と異なり、電化柱の復旧に長期の時間を要した。



写真 - 6 電化柱の損傷



写真 - 7 電化柱の損傷（拡大）

#### 5.2 電化柱の耐震性能向上

橋梁・高架橋上の電化柱が多く損傷したメカニズムと原因の推定、補強方法などを検討する必要がある。これまで砂基礎での電化柱損傷は通常地震では少なかったが、3月11日の本震で多く発生した。地震動の継続時間と損傷の関係を解明することも課題である。また、過去に実施した電化柱の水平交番荷重試験の供試体形状を図 - 6 に、荷重～変位関係の一例を図 - 7 に示す。現在の PC 電化柱は変形性能が大変低いことがわかる。鋼板巻き補強をしてその境から折損する事象も発生しており、変形性能をよ

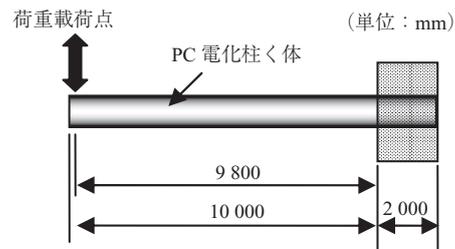


図 - 6 電化柱の供試体形状

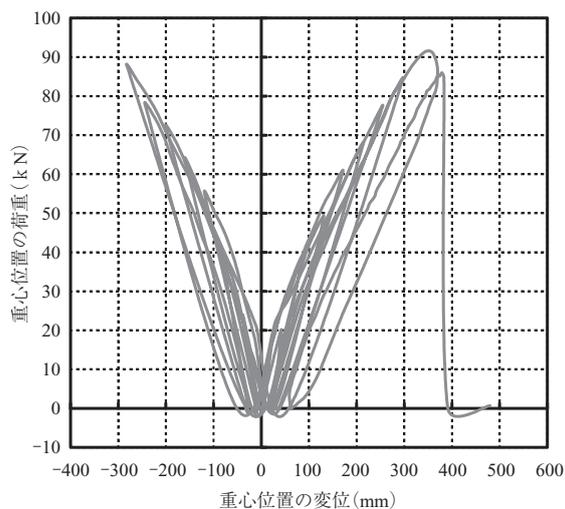


図 - 7 電化柱の荷重～変位関係の例

り備えた PC 電化柱としたり、上部を連結するなどの構造変更が必要である。

## 6. 津波被害と今後の鉄道施設

### 6.1 津波被害の状況

東北地方の海岸線を走る鉄道は津波被害を受けた。JR 東日本でも常磐線、仙石線、石巻線、気仙沼線、大船渡線、山田線、八戸線の 7 線区では海岸近くの低い場所では甚大な被害となった。写真 - 8 は気仙沼線津谷川橋梁の桁が上流側に流されたものである。長さ 40 m の PC 桁が上流に流され落下して折損した。写真 - 9 は同じ津谷川橋梁の橋脚である。鉄筋コンクリート製の橋脚が上流側に傾斜し、鉄筋の破断も確認された。

### 6.2 津波に対する鉄道施設

今回の地震被害の分析から、津波荷重を設定しようとする試みがあり、実現すれば津波に耐えられる橋梁も実現する可能性がある。ただし、津波の破壊力は大きく、また浮遊物の影響も考えられるため、基本は津波の影響のない場所に橋梁を建設することが好ましい。津波災害が考えられる場合は、鉄道施設そのものの強度だけでなく、鉄道車両の安全性や、避難・誘導のソフト対策もあわせて考慮する必要がある。また、ハード面でも桁、橋脚、基礎など構造全体の検討が重要となる。

## 7. 鉄道施設の復旧

東日本大震災における被害の特徴の一つは広範囲に及んだことだった。しかし、復旧にあたっては、各場所で並行して復旧工事が可能であるため、一箇所でも落橋や崩壊等の甚大な被害を発生させないことが、早期復旧に役立つ。その点、弱点箇所の耐震補強工事が重要となる。東北新幹線では、4 月 7 日の余震で被害は増えたにもかかわらず、49 日間で全線で運転を再開できた<sup>3)</sup>。今回の地震では、大量折損した電化柱も JR 東海、JR 西日本グループなどの応援をいただき、同時に多くの場所で復旧工事を実施して早期開通にこぎつけた。



写真 - 8 津波被害 (気仙沼線津谷川橋梁・桁)



写真 - 9 津波被害 (気仙沼線津谷川橋梁・橋脚)

東北新幹線の早期復旧に関しては、全線に原則として側道があることも大きな要因であった。落橋や崩壊等の甚大な被害さえなければ、復旧に要する時間に対して被害の大小はあまり関係なく、土木構造物に関しては 2 週間程度で応急復旧は終了できた。地震後の調査、資材搬入等に側道の役割は大きく、側道の無い鉄道施設はこの代替を考慮しておく必要がある。

津波被害を受けた太平洋沿岸地区の復旧に関しては、地域全体の復興や「まちづくり」の計画策定と一体となつて、国・地方自治体と協議しながら進める予定である。

## 8. おわりに

鉄道施設は 1923 年関東地震以来、大きな地震での被害を教訓として耐震性を向上させてきた。東日本大震災においても、橋梁・高架橋上の PC 電化柱の大量折損や津波被害など、新たな事象を経験した。これらを分析してより安全な鉄道施設を構築すべきと考えている。

### 参考文献

- 1) 石橋忠良, 池田靖忠, 菅野貴浩, 岡村甫: 鉄筋コンクリート高架橋の地震被害程度と設計上の耐震性能に関する検討, 土木学会論文集 No.563/I-39, 1997.4
- 2) 日本国有鉄道仙台新幹線工事局「1978 年宮城県沖地震特集号」1979.12
- 3) 野澤伸一郎, 松尾伸二: 東北地方太平洋沖地震を受けた鉄道橋の被害と復旧, 橋梁と基礎, Vol.45-7, 2011.7

【2011 年 9 月 2 日受付】