

地震動強さと高架橋被害の関係の統計分析

—耐震補強の有無を考慮して—

Statistical analysis of relationship between earthquake intensity and damage generation of viaduct with and without seismic reinforcement



宮腰 寛之*



林 聖一郎**



植村 昌一*



鈴木 博人*

East Japan Railway Company has reinforced viaducts based on experience derived from the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake. If a train operation control value for earthquakes can be raised corresponding to the improvement of the aseismic performance of the viaducts, the train operation could be more stable. We statistically analyzed the relationship between the earthquake intensity and the damage generation of the viaducts with and without the reinforcement. We confirmed there are some damages at the viaducts whose pillars were reinforced or judged to be unnecessary to reinforce; however, the earthquake intensity estimated at those viaducts were larger than the earthquake intensity which caused the damages to the viaducts without the reinforcement.

●キーワード：地震、運転規制、耐震補強、高架橋、SI値

1. はじめに

東日本旅客鉄道株式会社（以下、JR東日本）では、1995年の兵庫県南部地震以降、ハード対策のひとつとして、鉄筋コンクリート造の高架橋柱や橋脚を対象に耐震補強を進めてきた。新幹線や首都圏の在来線では、数万本オーダーの数量の柱や橋脚に対して耐震補強が完了するとともに、現在も工事を進めている¹⁾。耐震補強工法には、施工条件に応じていくつかの種類があるが²⁾、図1の鋼板巻き耐震補強が多くの現場で採用されてきた。

一方、ソフト対策として、一定レベル以上の地震動が観測された場合に運転中止や速度規制といった運転規制を行っている。地震動の指標には、被害との相関性が高いスペクトル強度³⁾（以下、SI値）を用いている⁴⁾。在来線における地震時の運転規制区分と運転規制基準値を表1に示す。耐震設計区間とは、1978年の宮城県沖地震による被害を受けて1979年9月に国鉄がまとめた「耐震設計指針（案）」以降の基準で構造物が設計・施工された区間であり、構造物全体が高い耐震性能を有している。落石区間とは、地震時に落石のおそれのある山間部の区間である。一般区間とは、落石区間と耐震設計区間のいずれにも該当しない区間で、「耐震設計指針（案）」より前の基準で設計・施工された高架橋からなる区間は一般区間に区分される。

高架橋の耐震補強の目的は、柱や橋脚の耐震性能を高めて、スラブ版や橋げたの落下などといった甚大な被害の発生を防ぎ、地震に対する鉄道の安全を向上することである。耐震

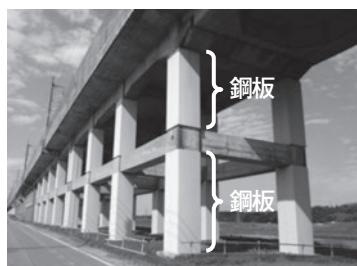


図1 鋼板巻き耐震補強

表1 在来線における地震時の運転規制区分と運転規制基準値

運転規制区分	落石区間	一般区間	耐震設計区間
速度規制(kine)	3以上6未満	6以上12未満	9以上18未満
運転中止(kine)	6以上	12以上	18以上

補強はこのような目的で行われているが、高架橋全体の耐震性能が向上しているのであれば、地震時の運転規制基準値を向上できる可能性がある。

耐震設計は高架橋全体の耐震性能を高めるのに対して、耐震補強により直接的に耐震性能が向上するのは柱や橋脚のみである。そのため、運転規制基準値を向上できる可能性を評価するためには、柱や橋脚の耐震補強により高架橋全体の耐震性能が底上げされているか否かについて分析する必要がある。耐震性能の評価として、高架橋被害と地震動強さの関係の統計分析と、数値モデルを用いた構造解析の両面から行うこととした。統計分析では、柱や橋脚の耐震補強の有無に分けて、過去の地震における地震動強さと高架橋被害の関係を分析した。そして、高架橋全数に対する被害箇所数の割合（以下、被害発生率）と地震動強さの関係や、被害が発生し始める地震動強さ（以下、被害下限値）を比較した。また、構造解析は、高架橋の数値モデルを用いて解析的に耐震性能を評価するものである。本報告では、このうち前者の統計分析の結果について述べる。

2. 地震動強さと高架橋被害の関係の統計分析

地震動強さと高架橋被害の関係の統計分析では、高架橋の柱や橋脚の耐震補強の有無に分けて、過去の地震における地震動強さと高架橋被害の関係を分析することで、被害発生率や被害下限値を比較した。検討には、2004年

表2 検討を行った地震

地震名	モーメント マグニチュード	発生年月日
新潟県中越地震	6.6	2004.10.23
新潟県中越沖地震	6.6	2007.07.16
岩手・宮城内陸地震	6.8	2008.06.14
東北地方太平洋沖地震(本震)	9.0	2011.03.11
東北地方太平洋沖地震(余震)	7.1	2011.04.07

の新潟県中越地震以降にJR東日本の鉄道施設が被害を受けた表2に示す5地震を用いた。

2.1 高架橋の耐震補強と被害のデータ整理

分析の対象とする構造物は、前述の「耐震設計指針(案)」より前の基準で設計・施工された、JR東日本が保有する在来線と新幹線のラーメン式およびけた式の鉄筋コンクリート造の高架橋とした。

高架橋被害の有無と柱や橋脚の耐震補強の実施状況を照合するために設定した高架橋の区分の考え方を図2に示す。ラーメン式高架橋は、柱やはり、スラブなどからなる一体構造(以下、ブロック)と調整桁から構成されるため、本研究では、ブロックと調整桁をそれぞれひとつの区分とした。けた式高架橋では、1スパンをひとつの区分とした。このとき、橋脚は起点側のけたに関連付けることとし、被害を重複して計上しないようにした。

柱や橋脚の耐震補強の有無は、図2の高架橋の区分ごとに、各地震が発生した時点の状況を整理した。耐震補強に先立って過去に行われた耐震診断⁵⁾において、一定の耐震性能が確認されて耐震補強が不要と判断された箇所を「補強不要」、一定の耐震性能を満たさないため耐震補強が必要と判断された箇所を「補強要」に分類した。そして、補強要の箇所のうち、各地震発生時点において、ひとつの区分内の柱や橋脚のすべてで耐震補強が施工されていた箇所を「補強済」、ひとつの区分内の柱や橋脚について1本も耐震補強が施工されていない箇所を「未補強」とした。なお、各地震発生時点において、ひとつの区分内の一部の柱や橋脚しか耐震補強が施工されていない箇所および耐震補強の施工の有無が不明であった箇所は、統計分析の対象から除外した。

高架橋の被害有無は、図2の高架橋の区分ごとに、災害記録誌などの資料に基づいて調査した。柱や橋脚が未補強、補強済、補強不要であった高架橋での被害箇所数は163箇所であり、新潟県中越地震および東北地方太平洋沖地震の本震と余震で発生していた。高架橋の被害形態には、柱やはりにひび割れが発生した程度の軽微なもの、柱やはりのコンクリートが広範囲に剥落して鉄筋が露出するなど高

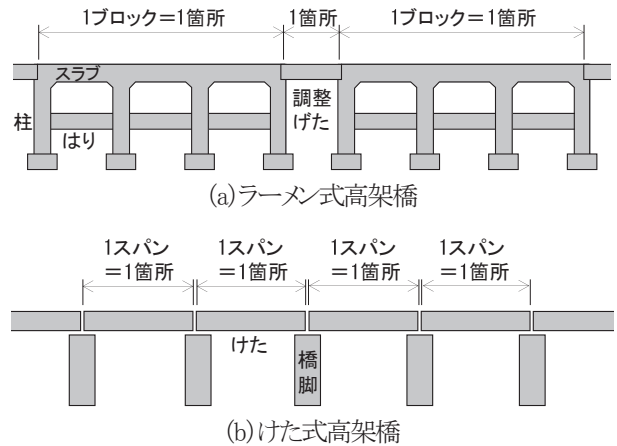


図2 統計分析における高架橋の区分の考え方

架橋の主機能に影響を及ぼして運転に支障するものがあった。そこで本研究では、災害記録誌などの資料に記載された各被害の規模や運転支障の有無に関する項目を参照して、運転支障ありの被害と運転支障なしの被害に区分した。運転支障ありの被害は、図3に示すように、全体の約8割にあたる128箇所であった。本研究では、最終的に運転規制基準値向上の可能性の評価を目的としているため、運転支障ありの被害128箇所を対象として、過去の地震における高架橋の被害発生率と被害下限値を評価することとした。運転支障ありの被害を部材別に見ると、図3に示すように、柱の被害が53箇所と最も多く、次いで、はりの被害が30箇所、けたのずれ止め用のコンクリートブロック(サイドブロック)の被害が26箇所の順であった。

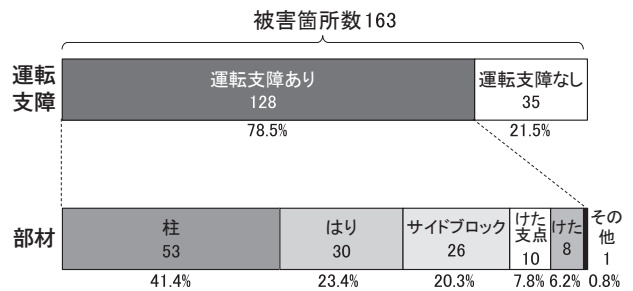


図3 柱が未補強、補強済、補強不要の高架橋における被害箇所数

2.2 地震動強さの推定と高架橋被害との照合

地震動強さと高架橋被害の関係を分析するためには、鉄道沿線での地震動強さを評価する必要がある。しかし、鉄道沿線の地震計の配置間隔は概ね数十キロオーダーであるため、地震計が設置されていない地点の地震動強さを推定する必要がある。そこで、地震計の観測値と地盤増幅率を用いた面的分布推定方法⁶⁾により、地震動強さを推定した。

地震動強さの面的分布の推定イメージを図4に示す。初めに、各地震計で観測された地震動強さを地盤増幅率で除すことで、工学的基盤での地震動強さを算出した。次に、工学的基盤において、地震動強さの値を空間補間して面的

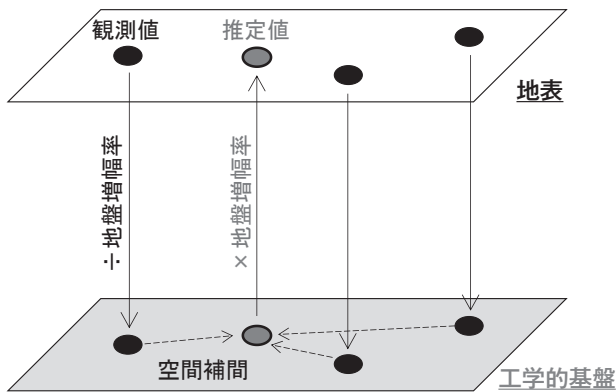


図4 地震動強さの面的分布の推定イメージ

分布を求めた。空間補間は、震源からの距離に応じて地震動が減衰する傾向を考慮可能なSimple Kriging法⁷⁾により行った。最後に、工学的基盤での地震動強さの面的分布に地盤増幅率を乗じて、地表での地震動強さの面的分布を推定した。

地震動強さは、JR東日本が運転規制に用いているSI値とした。地震計の観測値は、国立研究開発法人防災科学技術研究所の強震観測網K-NETの地震計と基盤強震観測網KiK-netの地表地震計、およびJR東日本の運転規制用地震計のものを使用した。また、地盤増幅率は、地形分類⁸⁾から推定された日本全国250mメッシュごとの表層地盤の地盤増幅率⁹⁾を使用した。

推定した地震動強さと高架橋被害を、図2の高架橋の区分ごとに照合した。このとき、地震動の推定値がSI値で10kine未満であった区分内の高架橋では、軽微なものを含めて被害が発生していなかったため、統計分析の対象から除外した。図5に統計分析の対象箇所数と被害箇所数を示す。対象箇所数は延べ23,847箇所であり、そのうち補強要の高架橋は延べ17,844箇所、補強不要の高架橋は延べ6,003箇所であった。また、要補強の高架橋のうち未補強の高架橋は延べ13,385箇所、補強済の高架橋は延べ4,469箇所であった。被害箇所数は未補強の高架橋で81箇所、補強済の高架橋で7箇所、補強不要の高架橋で40箇所であり、統計分析の対象箇所数の1%未満であった。

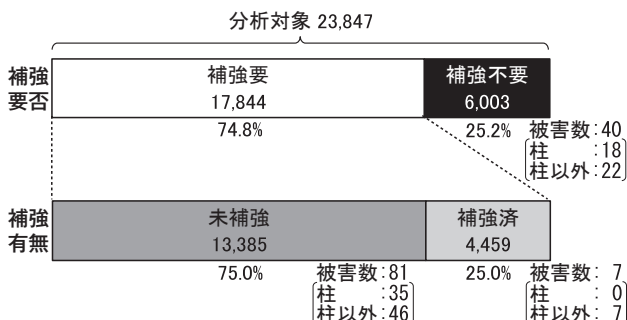


図5 統計分析の対象箇所数と被害箇所数

3. 統計分析結果

柱や橋脚が未補強、補強済、補強不要の高架橋ごとに、被害発生率と被害下限値を比較した。被害発生率は次式で定義した。

$$\text{被害発生率 (\%)} = \frac{\text{あるSI値までの被害箇所数の累積}}{\text{あるSI値までの箇所数の累積}} \times 100 \quad (1)$$

高架橋全部材の被害発生率とSI値の関係を図6に示す。被害発生率は、SI値が大きくなるにつれて高くなる傾向にある。被害発生率は補強済の高架橋が最も低く、補強不要の高架橋、未補強の高架橋の順に高くなる。被害下限値は、未補強の高架橋で26.7kine、補強済の高架橋で36.6kine、補強不要の高架橋で28.8kineであり、未補強の高架橋の被害下限値よりも補強不要や補強済の高架橋の被害下限値が高かった。また、上記の被害下限値は、表1で示した現行の運転規制基準値を設定する時に調査した主要構造物(橋りょう、高架橋、盛土、切取、自然斜面、土留壁)の被害下限値である21.8kine⁴⁾よりも高かった。以上から、柱や橋脚の耐震補強により、高架橋全体の耐震性能が向上している可能性がある。なお、図6において、被害発生率が減少している範囲がある。これは、SI値のある範囲において被害の発生がないと、式(1)の分母にあたる箇所数の累積のみが増加するためである。

次に、柱や橋脚とそれ以外の部材の被害に分けて、被害発生率と被害下限値を調べた。図7(a)に柱や橋脚の被害発生率とSI値の関係を示す。未補強と補強不要の高架橋については、柱や橋脚の被害発生率、被害下限値ともに明確な違いがみられなかった。補強済の高架橋は、今回検討を行った地震では柱や橋脚に被害が発生していないため、被害発生率が0%である。これは、耐震補強により柱や橋脚の耐震性能が向上したためと考えられる。続いて、図7(b)に柱や橋脚以外の部材の被害発生率とSI値の関係を示す。被害発生率は、未補強の高架橋が最も高く、補強済、補強不要の高架橋の順で低くなる。被害下限値は、未補強の高架橋が26.7kine(サイドブロックの被害)、補強済の高架

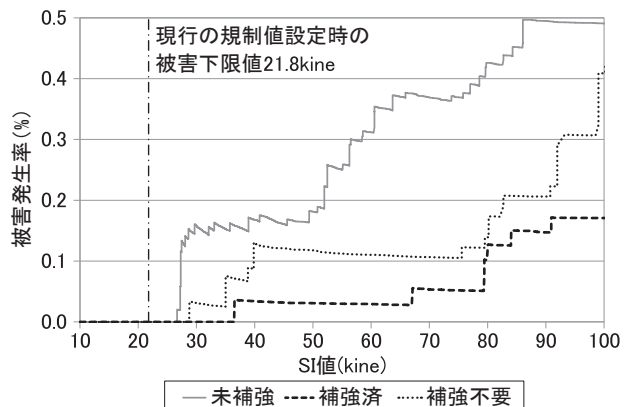


図6 SI値と被害発生率の関係(全部材)

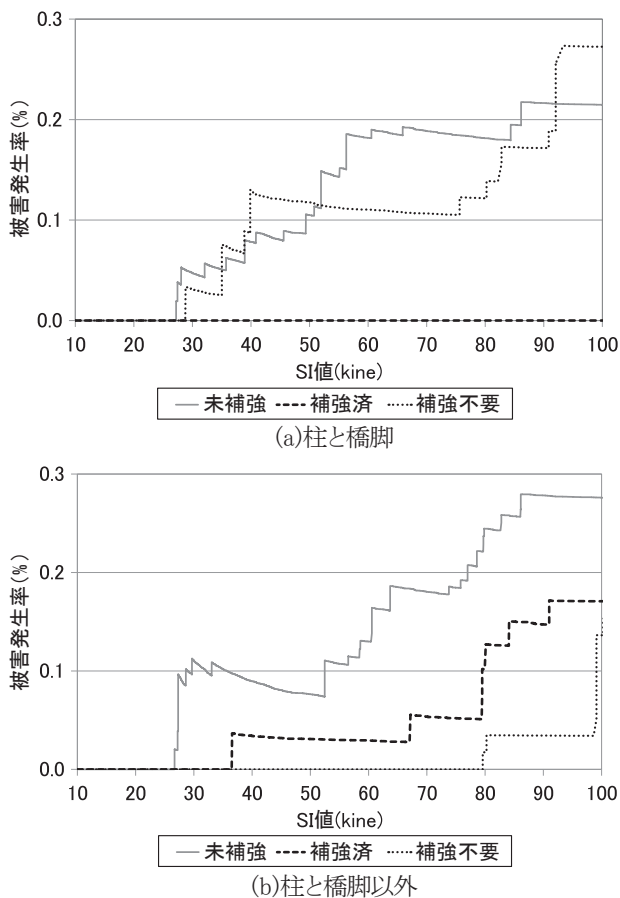


図7 SI値と被害発生率の関係(部材別)

橋が36.6kine(けたの被害)、補強不要の高架橋が79.6kine(けたの被害)である。これから、未補強の高架橋と比較して補強済または補強不要の高架橋では、柱や橋脚以外の部材の被害が発生しにくくなっているように見える。ただし、部材別の統計分析では、図5に示したように被害箇所数が少ないために、被害発生率や被害下限値がその影響を受けている可能性がある。

4. おわりに

耐震補強が完了した高架橋区間において、運転規制基準値を向上できる可能性を評価するために、柱や橋脚の耐震補強の有無に分けて、地震動強さと高架橋被害の関係を統計的に分析した。JR東日本の鉄道施設が過去に被害を受けた5地震を対象に分析した結果、以下の知見が得られた。

- ・高架橋全部材の被害発生率は、耐震補強済の高架橋が最も低く、耐震補強不要、未補強の高架橋の順に高くなる。
- ・高架橋全部材の被害下限値は、未補強の高架橋で26.7kine、耐震補強済の高架橋で36.6kine、耐震補強不要の高架橋で28.8kineであり、未補強の高架橋より耐震補強済や耐震補強不要の高架橋の方が高く、また、現行の運転規制基準値設定時の被害下限値である21.8kineより高かった。

以上より、地震動強さと高架橋被害の関係の統計分析の面からは、柱や橋脚の耐震補強により高架橋全体の耐震性能が底上げされている可能性が示された。しかし、部材別の統計分析については、被害箇所数が少ない影響を受けている可能性があるため、今後、検討する必要がある。また、東北地方太平洋沖地震では、高架橋区間において電化柱の傾斜や折損による運転支障が多数発生したことから¹⁰⁾、今後、高架橋区間における電化柱や軌道の被害について、地震動強さとの関係を統計的に分析したいと考えている。さらに、高架橋の数値モデルを用いた構造解析の面から耐震性能を評価して、統計分析と構造解析の両面から運転規制基準値の向上の可能性を総合的に評価していきたいと考えている。

謝辞

本研究では、国立研究開発法人防災科学技術研究所が公開している強震観測網K-NETおよび基盤強震観測網KiK-netの地震計の観測値、および地震ハザードステーションJ-SHISの表層地盤増幅率を使用しました。記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 安田武道、川喜淳：JR東日本の耐震補強の取組み状況、土木施工、Vol.55、No.9、pp.45～48、2014。
- 2) 菅野貴浩、松本浩一：高架下利用箇所等の厳しい施工環境下における有効な各種耐震補強工法、日本鉄道施設協会誌、Vol.44、No.10、pp.810～812、2006。
- 3) Housner,G.W. ; Spectrum Intensity of Strong Motion Earthquakes, Proceedings of 1952 Symposium on Earthquake and last Effects on Structures, Earthquake Engineering Research Institute, pp.72～88, 1952.
- 4) 島村誠、鈴木博人：地震観測にもとづく列車運転規制基準の検討、第11回鉄道工学シンポジウム、pp.2289～2292、2004。
- 5) 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、pp.95～103、1997。
- 6) 山崎文雄、大西淳一、田山聡、高野辰雄：高速道路構造物に対する地震被害推定式の提案、第10回日本地震工学シンポジウム、pp.3491～3496、1998。
- 7) Hans Wackernagel 原著(地球統計学研究会 訳編/青木謙治 監訳)：地球統計学、森北出版、2003。
- 8) Wakamatsu, K. and Matsuoka, M. ; Nationwide 7.5-Arc-Second Japan Engineering Geomorphologic Classification Map and Vs30 Zoning, Journal of Disaster Research, Vol.8, No.5, pp.904～911, 2013.
- 9) 藤本一雄、翠川三郎：近接観測点ペアの強震記録に基づく地盤増幅度と地盤の平均S波速度の関係、日本地震工学会論文集、第6巻、第1号、pp.11～22、2006。
- 10) 渡辺一功、岩田道敏、野澤伸一郎、鷹野秀明：PC電化柱の損傷状況と補修方法に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.34、No.2、pp.1123～1128、2012。