

鉄道沿線における液状化の発生と 構造物被害に関する考察

川中島 寛幸¹・藤原 寅士良²

¹正会員 東日本旅客鉄道株式会社 構造技術センター (〒151-8512 東京都渋谷区代々木二丁目2番6号)
E-mail:h-kawanakajima@jreast.co.jp

²正会員 東日本旅客鉄道株式会社 構造技術センター (〒151-8512 東京都渋谷区代々木二丁目2番6号)
E-mail:t-fujiwara@jreast.co.jp

近年、各種施設の耐震設計における設計地震動が大きくなり、液状化に対する配慮が必要な地盤が増加する傾向にある。液状化判定手法と液状化発生の相関については研究がなされているが、液状化判定手法で算出される指数と構造物被害の関係については、構造物設計のパラメータが入るため、詳細な検討例は多くない。本論では、新潟県中越地震、東北地方太平洋沖地震の例を用い、液状化指数と構造物被害の相関を調査した。液状化指数と液状化発生の関係は既往の研究と調和的な結果が得られたが、液状化指数が大きく、建設当時液状化を考慮した設計となっていないと推定される高架橋に基礎部の被害がなかった事例が多くあることを確認した。

Key Words : *liquefaction index, railroad structure damage, Mid Niigata Prefecture Earthquake in 2004, The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake*

1. はじめに

液状化被害と液状化指数（以下、 P_L 値）の関係は、過去の地震における事例から P_L 値が高いほど地盤の液状化が発生する可能性が高く、 P_L 値が低いほど地盤の液状化が発生する可能性が低くなる点が実際のデータからも確認されている。但し、 P_L 値が高い値であっても、地盤の液状化が発生していない箇所が存在していることも報告¹⁾されている。また、実際に液状化が発生していても、構造物に被害が生じていないという事象も見られる。例えば、浦安地区では東北地方太平洋沖地震において地盤の液状化が発生したが、液状化の影響を考慮せずに設計した高架橋が無被害であったという事例²⁾が確認されている。液状化判定法による判定結果と実際の液状化状況を用いた判定手法の確度を比較した研究は多くあるが、液状化判定法による判定結果と構造物の被害を比較した研究例は少ない。

本稿では、新潟県中越地震と東北地方太平洋沖地震の事例を用いて、液状化判定の結果と地盤の液状化の発生の有無、構造物被害との相関関係を確認した。

2. 分析方法

新潟県中越地震および東北地方太平洋沖地震により大きな地震動を観測した地域において、土質柱状図が残っている新幹線沿線を対象として分析を実施した。液状化判定手法は鉄道技術基準³⁾に準拠し、地盤の液状化および構造物被害の発生状況は被災後の現地調査、ヒアリングおよび文献調査により判別した。

分析対象地域、液状化判定手法および各調査について以下に詳述する。

(1) 分析対象地域

表-1、図-1 に分析対象とした地域、主な微地形区分、図-2 に分析に用いた地表面の観測地震波形を示す。分析対象は地表面から 20m 以内に緩い沖積砂層が堆積している範囲のうち、地震計により観測された地表面最大加速度が、鉄道技術基準³⁾に定める LI 地震動の最大加速度を超えた新幹線構造物沿線地域（上越新幹線浦佐駅～燕三条駅間および東北新幹線仙台駅～くりこま高原駅間）とした。これら分析対象地域において、地震計近傍の 40 地点を約 500m 間隔で抽出し分析を行った。抽出した 40 地点の微地形区分は、土地条件図⁴⁾から判別すると、谷底平野および盛土等による人工改変地形が主となっており、一般的に液状化現象が生じやすい地形

表-1 分析範囲内訳

分析範囲No.	分析地点数	地震計		主たる微地形区分
		名称	分析地点までの平均距離	
N1	2	(a) 新川口 SS(JR)	0.4km	谷底平野, 台地
N2	6	(b) 新長岡 SSP(JR)	1.4km	谷底平野, 自然堤防, 扇状地
N3	9	(c) 長岡駅(JR)	1.2km	盛土地, 谷底平野
N4	9	(d) 新押切 SP(JR)	1.2km	谷底平野, 自然堤防, 盛土地
T1	5	(e) 仙台基地 SSP(JR)	2.1km	谷底平野, 海岸平野, 三角州
T2	4	(f) 新大和 SSP(JR)	0.3km	谷底平野
T3	5	(g) 新三本木 SSP(JR)	2.9km	谷底平野, 盛土地, 高水敷

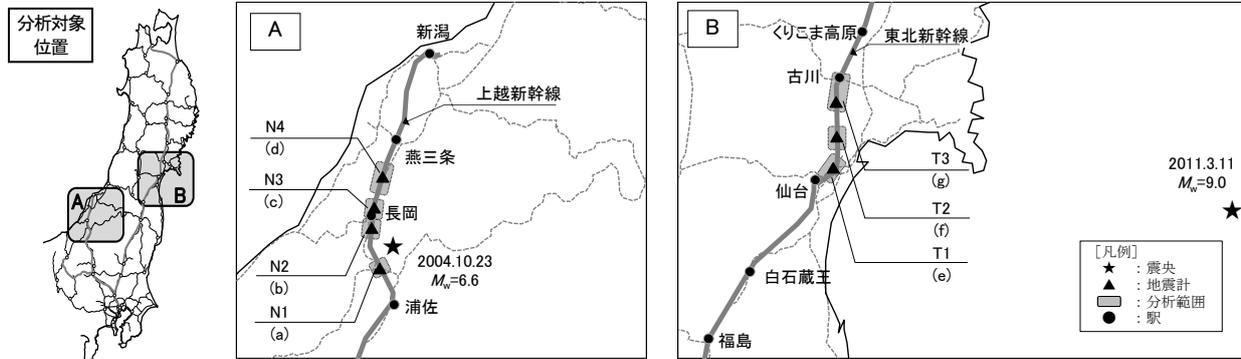


図-1 分析範囲

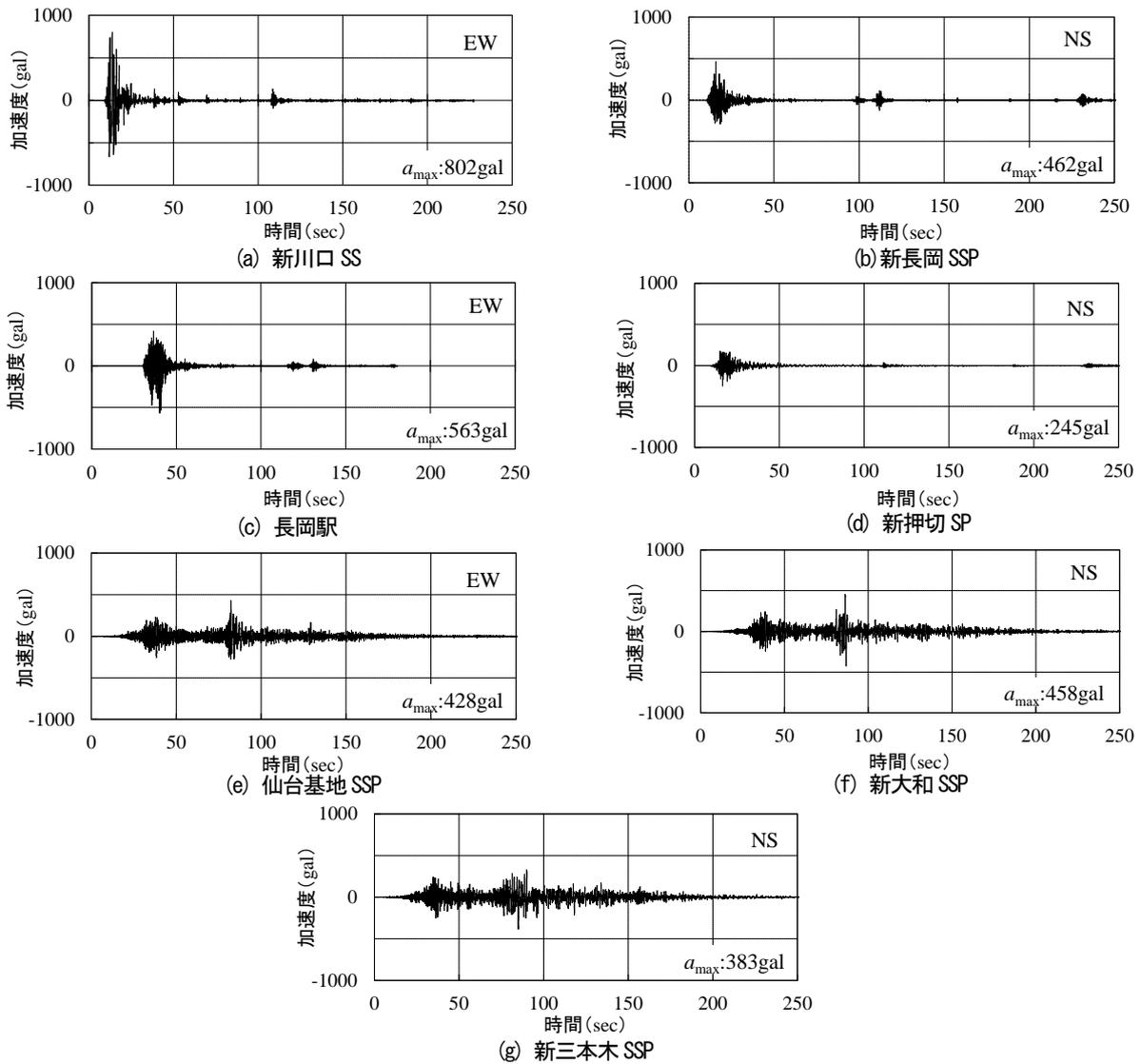


図-2 観測地震波形 (地表面)

表-2 土質分類と単位体積重量、平均粒径、細粒分含有率の代表値⁷⁾

土質分類	単位体積重量 $\gamma(\text{kN/m}^3)$	平均粒径 $D_{50}(\text{mm})$	細粒分含有率 $F_c(\%)$
表土	17.0	0.020	100
粘土	15.0	-	100
シルト	17.5	0.025	90
砂質シルト	18.0	0.040	70
シルト質細砂	18.0	0.070	50
微細砂またはシルト混り細砂	18.5	0.100	20
細砂	19.5	0.150	10
中砂	20.0	0.350	5
粗砂	20.0	0.600	0
砂礫	21.0	2.000	0

であるといえる。

なお、抽出した分析地点は離散的であるため、地震計設置位置から約 5km 範囲の地点を 1 分析範囲とし、同一地震計による観測データを用いることとした。同一分析範囲内で複数の地震計が存在する場合は、最も近傍の地震計で得られた観測波形を採用した。

地震波形は JR 東日本で設置している地震計による地表面観測波とし、南北、東西のうち、最大加速度を観測した方向成分を用いて液状化判定を実施した。東北地方太平洋沖地震は、継続時間 150s~200s と、新潟県中越地震と比べて非常に長い点が特徴であった。

(2) 液状化判定手法

液状化判定は、鉄道技術基準³⁾に準じ、累積損傷度理論により実施した。

液状化判定を行う際に用いる地盤条件は、新幹線新設時に行われた既存の土質柱状図^{5)・6)}を用い、単位体積重量 γ 、細粒分含有率 F_c 、平均粒径 D_{50} は文献⁷⁾を参考に表-2 のとおり各土質分類の代表値から設定した。静止土圧係数 K_0 、動的せん断強度比~繰返し回数との関係は、既存の土質柱状図^{5)・6)}の N 値を用いて鉄道技術基準³⁾により推定した。ただし、埋土層については、その土質性状が不明確であることから、非液状化層として取扱い液状化判定を実施した。液状化判定に用いた地震波形は、先述のとおり各分析範囲で最大加速度を観測した地表面の波形を用いた。

(3) 現地調査および文献調査

地盤の液状化発生状況および構造物の被害状況について現地調査および文献調査を実施した。

a) 地盤の液状化発生状況調査

地盤の液状化発生状況は、「新潟県中越地震」は JR 東日本の被害調査報告書および既往の文献⁸⁾に基づき、「東北地方太平洋沖地震」では現地踏査による液状化の痕跡やヒアリングから判別した。これらは全て地表面の目視観察によるものである。

b) 構造物の被害状況調査

構造物の被害状況は、地盤の液状化による構造物への影響、および列車の運行に支障をきたす損傷の有無に着目して高架橋および橋りょうを対象に調査した。構造物の被害状況は、震災時の被害調査報告書に基づき整理し、構造諸元等は工事誌や財産図等による調査を行った。

3. 液状化判定の結果と液状化発生状況の比較

(1) 地表面における液状化の発生頻度

液状化判定の結果得られた P_L 値と液状化発生状況の調査結果との関係を図-3(a)に示す。図中のデータラベルは地点数である。液状化の発生状況において現地踏査で地盤の変状が液状化と地震動のいずれの要因によるか判断がつかない箇所は「不明」として整理している。

ここで、液状化判定の結果で液状化抵抗率（以下、 F_L 値）が 1.0 未満 ($P_L=0.0$) となるにも関わらず、地盤の液状化発生状況調査の結果で液状化の痕跡が見られた地点が 4 地点確認されている。これは、液状化判定に用いた土質柱状図^{5)・6)}が地震発生時の地盤改変状況を適切に評価できていなかったために生じた可能性がある。例えば、新幹線構造物建設時以降に人工改変された埋戻し土等が局所的に液状化した可能性などが考えられる。

埋め土等の人工改変層の性状については、各分析地点におけるばらつきが大きい。そこで、人工改変地形を除く自然地形に着目し、液状化判定の結果が F_L 値が 1.0 未満となる 24 地点について液状化の発生状況を整理すると図-3(b)となり、 P_L 値の増加に伴う液状化発生率の上昇傾向が確認された。また、 P_L 値が 20 を超える場合、半数以上の地点で液状化に伴う地表面の変状が確認される結果となった。

(2) 液状化指数と地震動

F_L 値が 1.0 未満となる自然地形に着目して、地表面最大加速度と P_L 値および地盤の液状化発生状況を図-4に

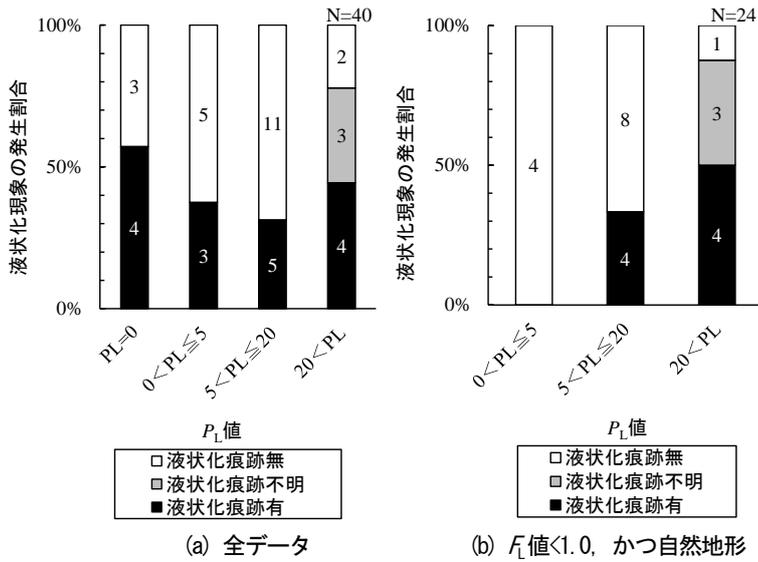


図-3 F_L 値と液状化発生状況

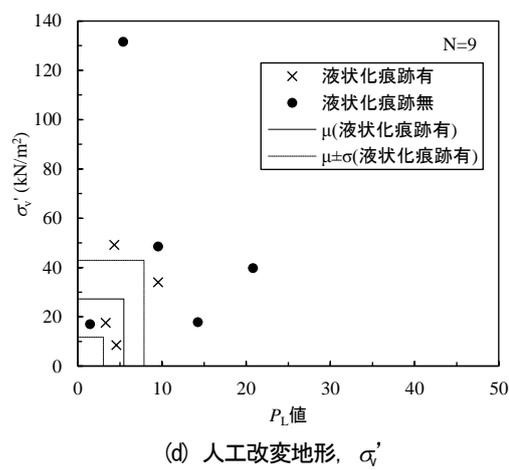
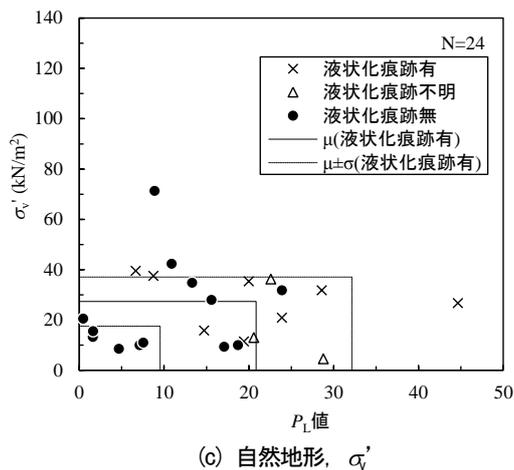
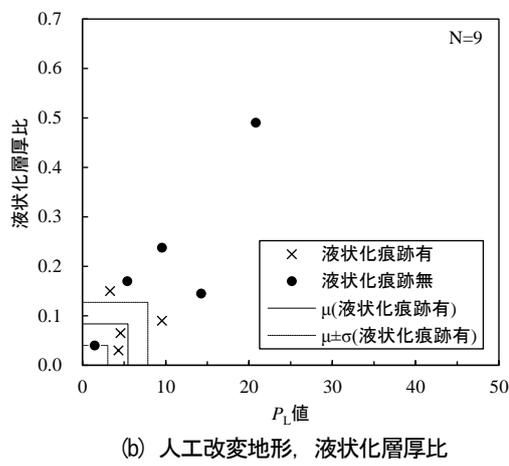
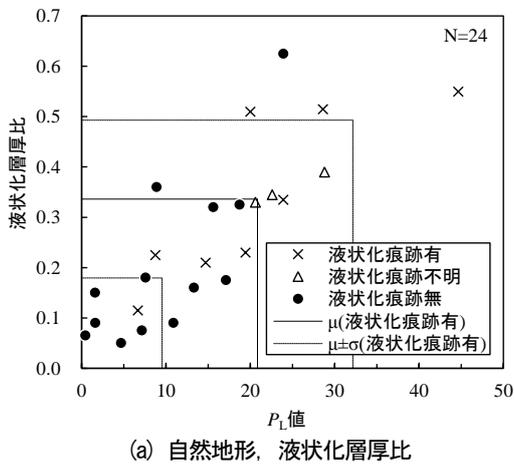
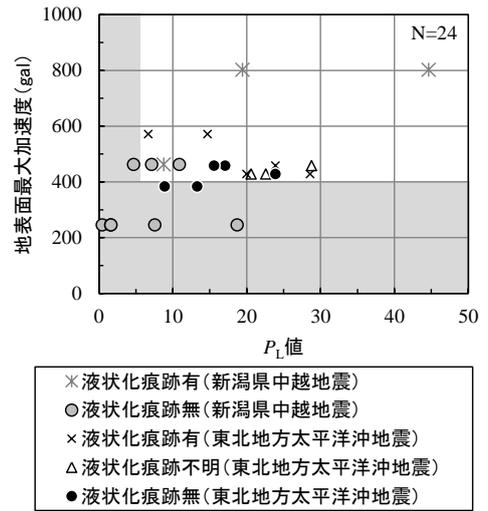
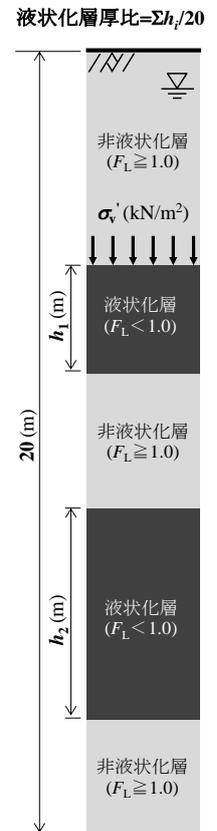


図-5 検討対象箇所 F_L 値と液状化層厚比と σ'_v



示す。

地表面最大加速度 400gal~500gal の F_L 値に着目すると、新潟県中越地震に比して東北地方太平洋沖地震の方が高くなる傾向が確認できる。これは観測地震波の継続時間

が長くなる程、 F_L 値が上昇する傾向を反映したものと推察される。

地表面の液状化の痕跡は、最大加速度が 400gal 程度以上、 F_L 値が 5 程度以上となる地点で多く確認された。

(3) 液状化指数と地形的特徴

F_L 値が 1.0 未満となる地点を対象として、 P_L 値と液状化層厚および有効上載圧（以下、 α_v ）の関係を図-5 に示す。また、液状痕跡が確認された地点の液状化層厚比と α_v の分布平均値 μ および標準偏差 σ を併記する。ここで地表面から深度 20m 範囲に対する F_L 値が 1.0 未満となる液状化層厚の比を液状化層厚比と定義する。 α_v は、最も浅い液状化層上面に作用する有効土被り圧とする（図-6）。

図-5(a),(c)から、自然地形では P_L 値が 5 を超える地点で地表面での液状化に伴う変状が確認され、20 を超えるとその発生頻度が高くなる傾向が確認できる。また、液状化層厚および α_v については、液状化層厚が 2m（液状化層厚比 0.1）を超える地点、 α_v が 40kN/m^2 未満の地点で地表面への変状が多く確認される結果となった。

一方、図-5(b),(d)から人工改変地形では、 P_L 値が 20 未満であっても地表面への変状が多く確認される結果であった。また、液状化層厚は 4m（液状化層厚比 0.2）未満の地点、 α_v が 50kN/m^2 未満の地点で地表面への変状が多く見られた。人工改変地形は、自然地形に比して表層に埋め土や盛土などの人工改変層が存在していることが多く、これらの人工改変層が液状化することにより、自然地形に比して地盤の液状化の影響が地表面へ生じやすくなると推察される。

4. 液状化指数と構造物損傷度の関係

(1) 分析対象地点の構造物概要と被害状況

分析対象とした線区の構造物は、1971 年～1982 年に建設されており、全国新幹線網建造物設計標準⁹⁾を主として設計されたものである。耐震設計は、震度法または修正震度法により行われており、設計上考慮されている

地震動は設計水平震度 $K_H=0.20\sim 0.25$ 程度である。当該構造物は大半が標準設計により設計された構造物であり、現存する設計計算書によれば、液状化の影響を考慮した設計はなされていないと思われる。また、当該地点の地層構成は、極端な不整形性はなく、側方流動の影響は少ないと考えられる。

全 40 地点の分析対象構造物の基礎構造形式の割合を図-7、損傷種別毎の割合を図-8 に示す。ここで、損傷とは、電架柱や防音壁等の付帯施設を除く土木構造物を対象とし、補修を行う必要のない軽微な損傷は、無損傷として分別した。

結果、補修を行った構造物の部位に着目すると地上での損傷が大半を占めていることが分かる。これは、地盤諸数値や構造部材に考慮されている設計上の安全余裕、地上構造物が先行して損傷したことにより、地上構造部材の降伏荷重以上の地震時慣性力が基礎へ伝達されなかったこと等に起因すると考えられる。地震動により地表面から上方の構造物の応答が大きくなり損傷を受けた構造物は見られたものの、液状化に起因したと考えられる構造物の損傷は確認されなかった。

(2) 液状化指数と構造物被害

分析地点近傍の構造物への損傷発生割合と P_L 値の関係を図-9(a)に示す。また、この内、列車の運行に支障をきたす地点の発生割合との関係を図-9(b)に示す。列車運行の可否は、軌道変位量または被災直後に運行再開のために実施された健全度調査から判断している。

結果、構造物の損傷が生じる割合と P_L 値の相関は見られないが、図-9(b)において P_L 値が 0.0 となる地点を除く地点に着目すると P_L 値が高い程、構造物に生じた損傷が列車の運行に支障をきたす割合が高くなる傾向であった。地震動と P_L 値の相関を考慮すれば、 P_L 値が高い程、地震動による影響を大きく受け、構造物の損傷が

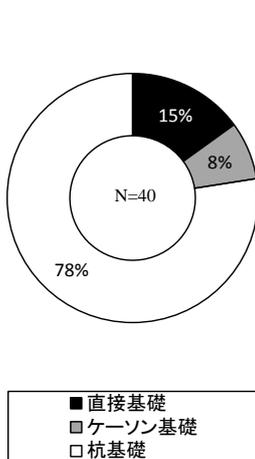


図-7 基礎構造形式

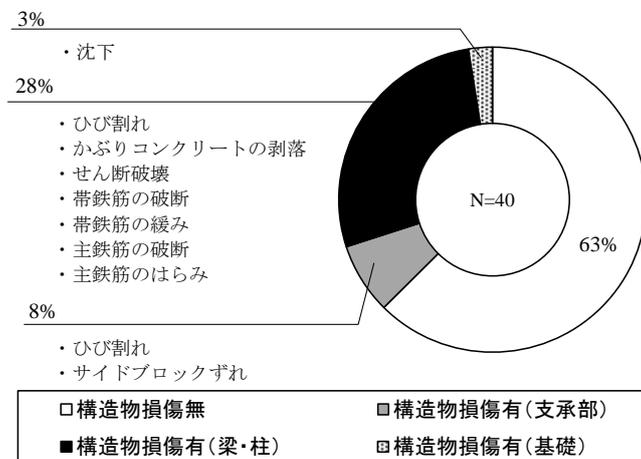


図-8 構造物の損傷状況

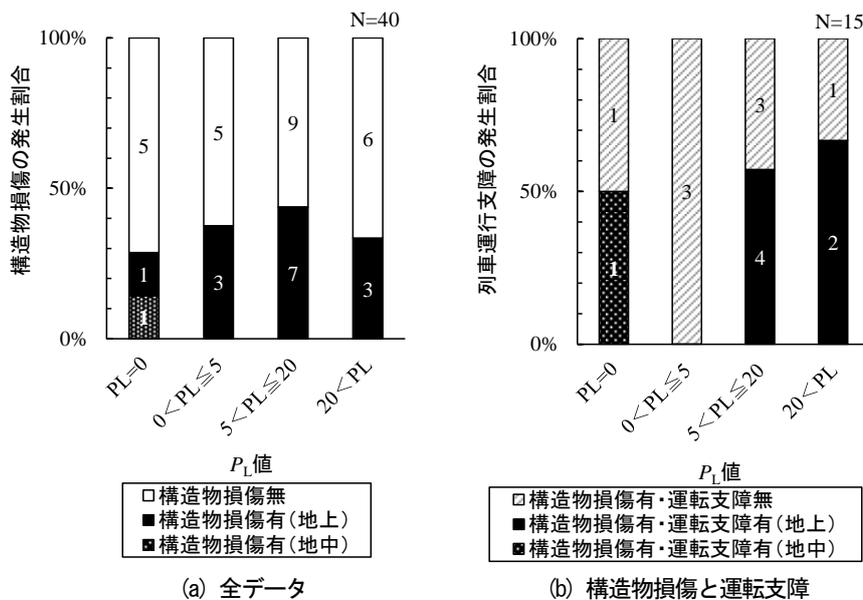


図-9 P_L 値と構造物の損傷状況



図-10 杭頭部の損傷状況

重度化することが想定される。この傾向は P_L 値が 5 を超える地点で顕著に見られ、損傷を受けた構造物の半数以上で列車の運行支障に至っていた。しかしながら、 P_L 値=19.4 となる地点の杭基礎について、地盤を掘り起し目視確認を行った結果、杭頭部には補修を必要としない軽微なひび割れが見られる程度であった（図-10）。

地盤が液状化することによる基礎構造物への影響については、地中深部の液状化に伴い杭体が損傷している可能性は否定できないものの、本稿で対象とした F_L 値が 1.0 未満となる分析地点の杭またはケーソン基礎を有する構造物においては、地震後の残留沈下、残留水平変位および残留傾斜は確認されていない。これらの構造物は、建設当時の設計計算書に液状化時の検討に関する記載がないことから液状化の影響を考慮したものではなかったと推察される。しかし実際の現象は、 P_L 値が高い地点においても基礎の安定を損なう変状は生じていなかった。

分析地点の地層構成が比較的的水平成層地盤であることを考慮すれば、側方流動の懸念がない地盤条件では、杭基礎の安定を損なうような損傷が発生する可能性は小さいと考えられる。これは、一般的には構造物の設計を地上構造物先行降伏としていることから、側方流動が無ければ基礎の損傷より地震動の影響による変形で地上構造物へ変状の発生源が先に生じるためであると推定される。

5. まとめ

本分析を通じて実被害に基づき、液状化指数と地盤の液状化発生状況および構造物の損傷状況について考察し

た。得られた知見を以下に列記する。

- (1) 地盤の液状化に伴う地表面への変状は、 P_L 値が 5 以上、地表面最大加速度が 400gal 以上となる範囲で発生しうることを確認した。
- (2) 地形的特徴の観点では、自然地形に比して人工改変地形の方が、地表面での液状化発生リスクが高い傾向が見られた。特に、人工改変地形では、表層付近の人工改変層において液状化の発生リスクが高いと考えられる。
- (3) 側方流動の懸念が少ない条件下では、液状化を考慮せずに設計されたと推察される構造物であっても、液状化に伴い基礎の安定を損なうような基礎部の被害は生じていない事例が多かった。

参考文献

- 1) 石原雅規, 増山博之, 佐々木哲也, 谷本俊輔: 東北地方太平洋沖地震における液状化を踏まえた液状化判定法の検討, 土木研究所資料, 第 4280 号, 2014.1.
- 2) 和田旭弘, 鈴木博人, 藤原寅士良, 高崎秀明: 京葉線における液状化状況と鉄道構造物, 基礎工, Vol.40, No.4, pp.71-73, 2012.4.
- 3) 国土交通省鉄道局監修, 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説, 耐震設計, 丸善, 2012.9.
- 4) 国土地理院: 地理院地図 (電子国土 Web), <http://maps.gsi.go.jp/>
- 5) 日本鉄道建設公団新潟新幹線建設局: 上越新幹線 (水上・新潟間) 地質図, 1980.3.
- 6) 日本国有鉄道仙台新幹線工事局: 東北新幹線 (桑折・有壁間) 地質図, 1981.12.
- 7) 安田進: 液状化の調査から対策工まで, 鹿島出版会, 1988.11.
- 8) 若松加寿江: 日本の液状化履歴マップ 745-2008, 東京大学出版会, 2011.

- 9) 施設局・建設局・新幹線建設局・構造物設計事務所：全国新幹線網建造物設計標準（東北、上越、成田用），1972.6.

(2015.?.? 受付)

A STUDY OF THE RELATIONSHIP BETWEEN LIQUEFACTION AND DAMAGE OF RAILWAY VIADUCTS

Hiroyuki KAWANAKAJIMA and Torajiro FUJIWARA

The ground which needs consideration for liquefaction is increasing because the design seismic wave for infrastructures is tend to be severer. Many existing studies have mentioned the relationships between the occurrence of liquefaction by earthquake and liquefaction judging method. Although, the relationships between the structural damage and the potential of liquefaction index is less studied.

We investigated the structural damage and the occurrence of liquefaction where strong seismic motion was observed along the Shinkansen railway viaducts in 2011 off the Pacific Coast Tohoku Earthquake, and Mid Niigata Prefecture Earthquake in 2004.

The result shows that the relationships between the occurrence of liquefaction and the potential of liquefaction index is similar to existing studies, but those between structural damage and that is less harmonic. And many railway viaducts which were not designed for liquefaction had not been damaged on the liquefaction grounds which could be judged by the potential of liquefaction index.