

新潟県中越地震における新幹線脱線 の原因に関する一考察

森 伸一郎¹・和仁 晋哉²

¹愛媛大学工学部環境建設工学科 助教授
(〒790-8577愛媛県松山市文京町3)

E-mail:mori@dpc.ehime-u.ac.jp

²愛媛大学大学院環境建設工学専攻 大学院生
(〒790-8577愛媛県松山市文京町3)

E-mail:shinya_kazuni6677@hotmail.com

2004年10月23日にマグニチュード6.8の新潟県中越地震が発生し、初めて新幹線が脱線した。その原因を振動という立場から検討するために著者らは脱線区間に沿う地盤の常時微動測定を行った。H/V比による地盤の卓越周期と表層地盤の層厚の関係を明らかにした。沖積層の卓越がH/V比の2次ピークに相当することがわかった。また、これらの点で1次元の地盤モデルにより地震応答を評価し、加速度、変位、線路に沿う曲率などの応答を求めた。さらに、被害の生じていない高架橋の応答も1質点系により評価した。地震時の列車の位置を、列車運転規則や乗員乗客の証言により推定した。これらに基づき脱線原因を考察した。

Key Words : earthquake damage, seismic response, microtremor, ground

1. はじめに

本論文は、新潟県中越地震の際に上越新幹線「とき325号」が脱線した原因を、現地での常時微動測定、脱線区間の地盤特性、地震応答解析により考察したものである。

2004年10月23日の新潟県中越地震の際に上越新幹線「とき325号」が脱線する事故が起きた。新幹線開業以来初めての事故であり、その脱線原因は調査中で未解明である。著者らは脱線地点付近の地盤振動特性を把握するために脱線区間を含む約1.7 kmの区間の計29地点の常時微動測定を行った。また、ボーリングデータを利用して脱線区間の17地点の地震応答解析を行った。

2. 脱線地点周辺の地形と地質

図-1に脱線区間付近の地盤構成と常時微動測定箇所を示す。新幹線は206.2 kmポイント（以下kmのみ示す）で脱線し、約1.6 kmの間、脱線したまま走行して207.8 km付近で停車した。この区間は地表面の標高が大きく変化し、起伏が激しくなっており、不整形な地盤である。滝谷トンネル出口付近から

206.4 km付近までは厚さ10-20 mの沖積段丘層である。表層厚は206.5 km付近では7-8 mしかないが、それ以北206.7 km付近からは次第に表層が厚くなる。この地点付近では沖積扇状地層となっており、なお、この地点での表層とは標高がおおよそ20-30 mに堆積する更新統の砂礫以浅の完新統を指す。脱線事故は不整形な地盤および表層の厚さの薄い区間で発生したものである。

3. 脱線区間の常時微動測定

(1) 常時微動測定方法

脱線区間の地盤振動特性を把握するために、常時微動測定を205.8から207.5 kmの区間において計29地点で行った。線路に沿って、原則として50 m間隔（一部は100 m間隔）とした。また、高架橋の卓越周期を把握する目的として、全測定点29地点中10地点についてはセンサーを橋脚部に取り付け、もう一方を地盤に設置して同時測定を行った。写真-1にセンサーを橋脚部に取り付けた様子を示す。センサーはゴムで橋脚に固定した。センサーは速度計であり、線路に平行方向をX成分（長岡駅方向を正）とし、線路直角方向（東方向を正）をY成分とした。各測

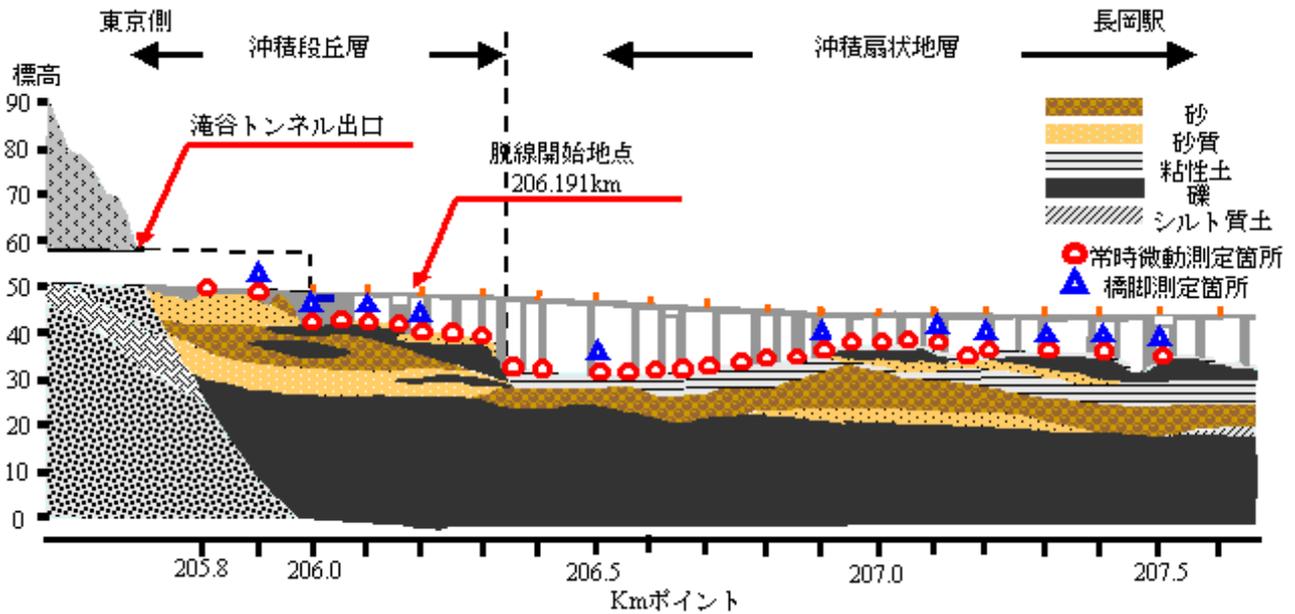


図-1 新幹線列車脱線地点付近の地盤構成と常時微動測定箇所



写真-1 橋脚にセンサーを設置する様子

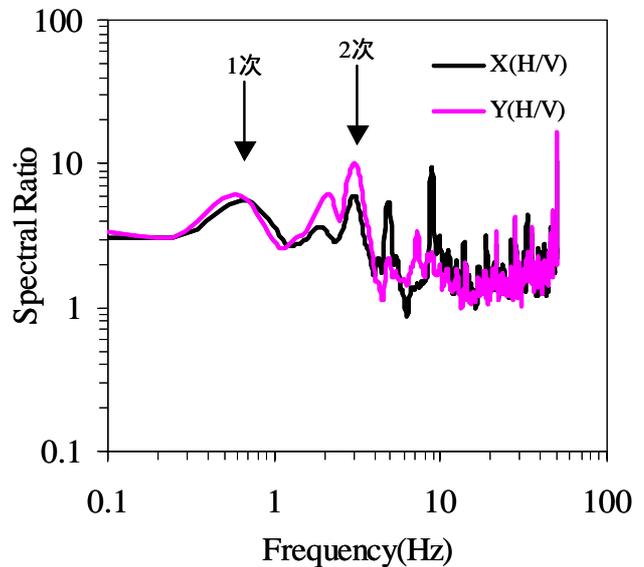


図-2 常時微動測定による 207.3km の H/V スペクトル比

定地点ではサンプリング周波数100 Hzで、25 Hzのローパスフィルターを施し約200秒間測定した。速度時刻歴波形の全データの中から、8セグメントにあたる頭部からの16384個のデータを解析に用いた。抽出した速度時刻歴波形はドリフト補正を施した後、フーリエ変換を行い、速度フーリエスペクトルを算出し、H/Vフーリエスペクトル比を求めた。さらにバンド幅0.5 Hzのparzenウィンドウによる平滑化を行った。平滑化されたH/Vスペクトル比から地盤の卓越周期を求める。

(2) 常時微動測定結果

図-2に207.3 kmのH/Vスペクトル比を例として示す。この測定地点だけでなく、他の多くの測定地点で共通する1次と2次の卓越するピークが認められ、水平2成分に差はなかった。図-3に測定された2次の

卓越振動数から読み取った卓越周期と表層厚の関係を示す。表層厚と地盤の卓越周期の間には、沖積段丘層では弱い相関が、沖積扇状地層では強い相関が認められる。したがって、この区間では、2次の卓越周期は表層地盤の卓越周期に対応していると考えられる。

また、微動測定により現れた1次の卓越周期は更新統の礫層よりも以深に存在する基盤岩に対応していると考えられる。常時微動測定結果よりおよそ、沖積段丘層のせん断波速度は220 m/sであり、沖積扇状地のせん断波速度は160 m/sである。更新統の礫層のVsを400 m/sとし、それ以深に基盤岩があると仮定して、4分の1波長則を適用する。図-4に1次の卓越周期に対応すると考えられる基盤岩深さの分布を示す。地山から続くと考えられる基盤岩が、地表からおおよそ90-120 mの深さに存在すると考えら

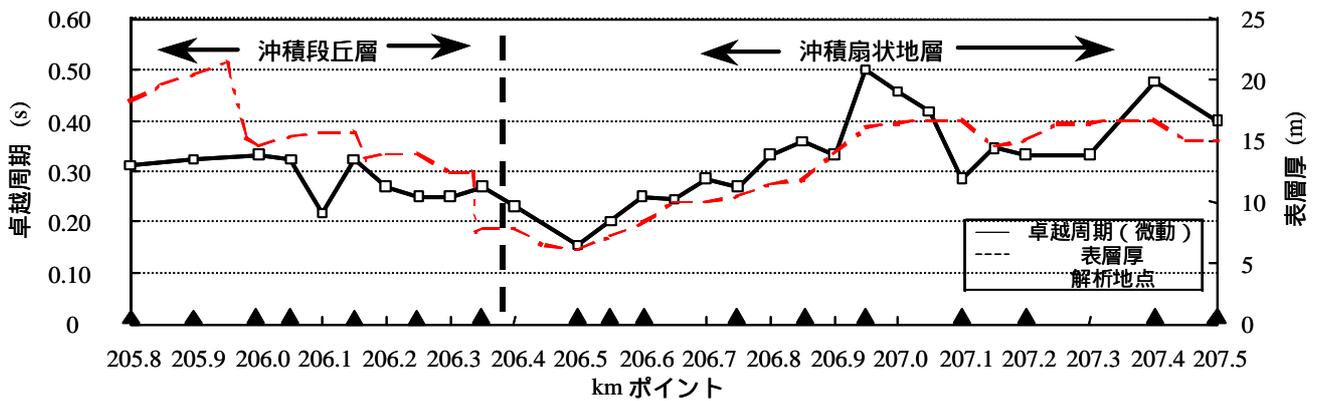


図-3 脱線区間地盤の卓越周期と表層厚の分布

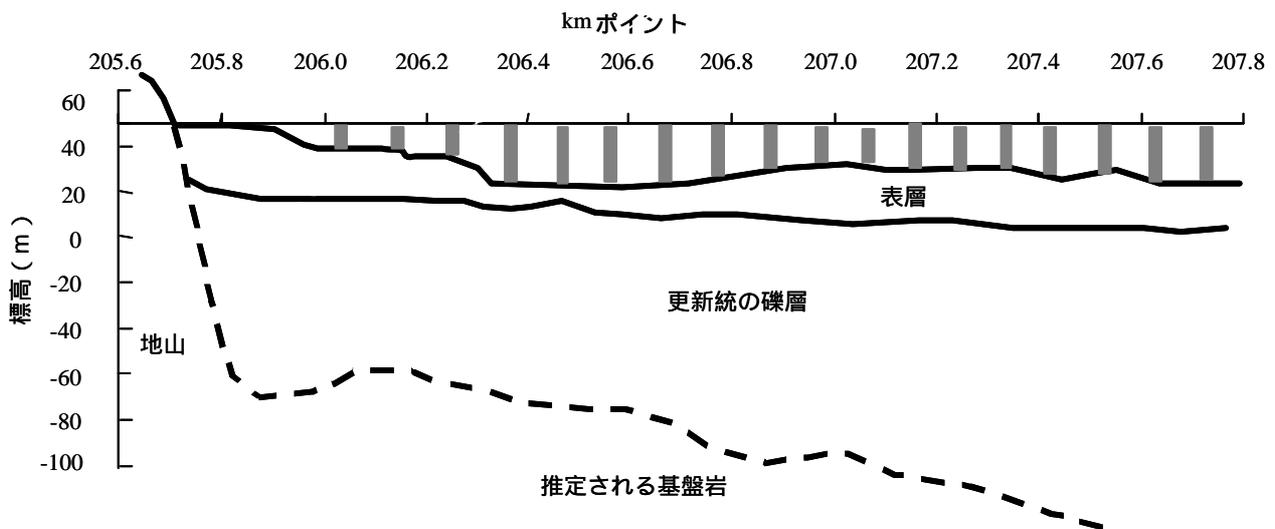


図-4 推定した基盤岩分布の概略図

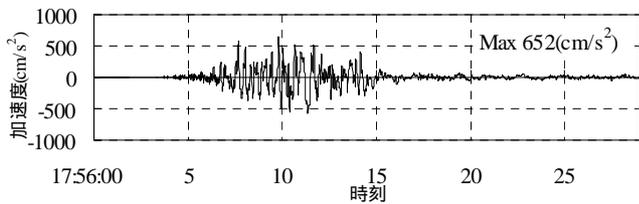


図-5 入力地震動 (205.8km)

れる。

4. 脱線区間地盤の地震応答解析

(1) 解析方法

脱線区間の地盤の地震時における応答を評価するため、ボーリングデータのある17地点(およそ50 mから150 mの間隔)において1次元の地盤モデルを作成し、等価線形化解析を行った。各土層のひずみ依存の繰返し変形特性は山口・安田の式³⁾より推定した。せん断波速度(V_s)はN値より推定³⁾。更新統の礫層は縁辺部より漸増しているが、ここでは礫層の堆積厚を一定とみなし、その影響を考えないことにする。下方入射の場合には礫層による入力地震波の位相のずれは大きくないと考えられるので、

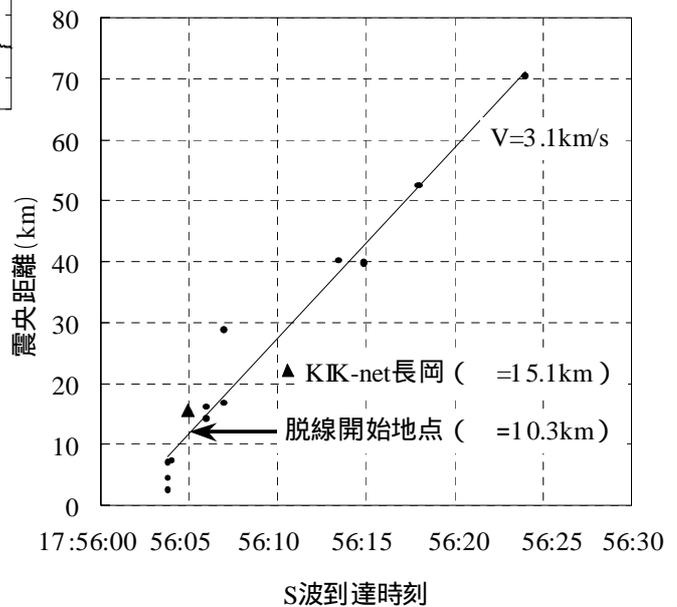


図-6 震央距離とS波到達時刻の関係

SHAKEを用いて、礫層上面を工学的基盤として入射波を入力する解析を行った。

(2) 入力地震動とその扱い

入力地震動は脱線地点から最も近くで、約6.5 km離れたKIK-net長  の地表EW成分（新幹線の進行直角方向）を使用した。図-5に解析対象地点の一つである205.8 kmの入力地震動を示す。80秒間を解析に使用し、図では始めの30秒間を示す。205.8 kmから207.5 kmの約1.7 kmの区間を解析の対象とするため、数値解析では入力地震波の位相差や堆積層表面波の影響を考慮する必要がある。今回の解析では前者を考慮する。図-6に強震観測地点の震央距離とS波到達時刻の関係を示す。様々な地点で観測された変位波形より各観測地点のS波到達時刻を推定し、S波到達時刻の差の分だけずらして地震波を入力した。

(3) 解析結果

図-7に解析区間の205.8 kmの解析結果を示す。また、図-8に各解析地点の地表の最大加速度、図-9に地表の最大変位、図-10に地表面の最大曲率の解析結果を示す。地表面の曲率は両側を含む3点の変位から算出した。応答加速度、速度は56分07秒から56分15秒の約8秒間が大きな加速度、速度となる。約56分05秒より地表の変位に変化が生じる結果となった。脱線区間の最大変位については大差がないが、最大加速度は206.4 km前後の表層の薄い区間ではやや大きくなる。地表面での曲率は滝谷トンネルを出た直後の区間は $1.0 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$ 程度となっており他の地点と比較すると大きくなっている。この区間の位相差が他の地点よりも大きいことがわかる。

5. 高架橋の固有周期と応答

(1) 高架橋の固有周期

図-11に206.2 kmと207.1 kmの代表的な速度フーリエスペクトル、同箇所速度フーリエスペクトル比を示す。また、表-1に常時微動測定により認められた各地点の高架橋の固有周期、増幅率、減衰を示す。高架橋の固有周期については、地盤に対して橋脚の水平Y成分（線路進行直角方向）のフーリエスペクトル比（H/Hスペクトル比）から評価した。高架橋の固有周期については、沖積段丘層の区間の橋脚が短い地点では高架橋の固有周期は短周期になっており、206.5 km付近の橋脚が長い地点は高架橋の固有周期が長い。それ以北、沖積扇状地層での高架橋の固有周期は約0.4秒である。脱線区間における高架橋は地表面の起伏が激しいことより高架橋橋脚の高さが異なっている。そのため、高架橋の固有周期に差が生じたと考えられる。フーリエスペクトルから、おおむねすべての地点でY方向（線路進行直角）の方がX方向（線路進行）よりも大きなフーリエスペクトルの振幅を示した。高架橋の固有周期に対応する増幅率についてもY方向がX方向よりも大きくな

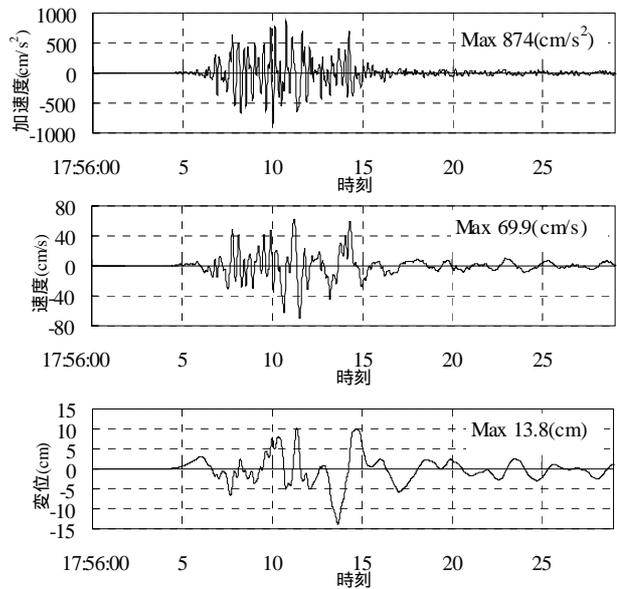


図-7 205.8 kmの応答加速度、速度、変位時刻歴

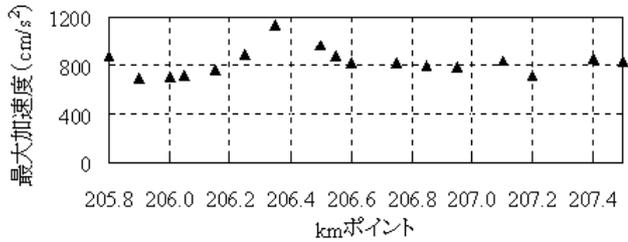


図-8 地表面の最大加速度

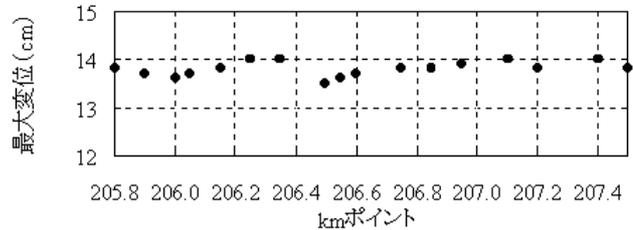


図-9 地表面の最大変位

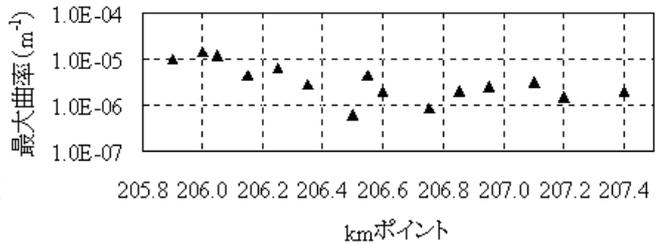


図-10 地表面の最大曲率

った。

各測定値点でH/Hスペクトル比からの高架橋そのものの固有周期よりも、フーリエスペクトルからの固有周期の方が長周期になる傾向が見られた。フーリエスペクトルの場合、地盤と構造物の連成系のため減衰が評価できないが、H/Hスペクトル比の場合は地盤と構造物の相互作用を考慮しないため基礎に

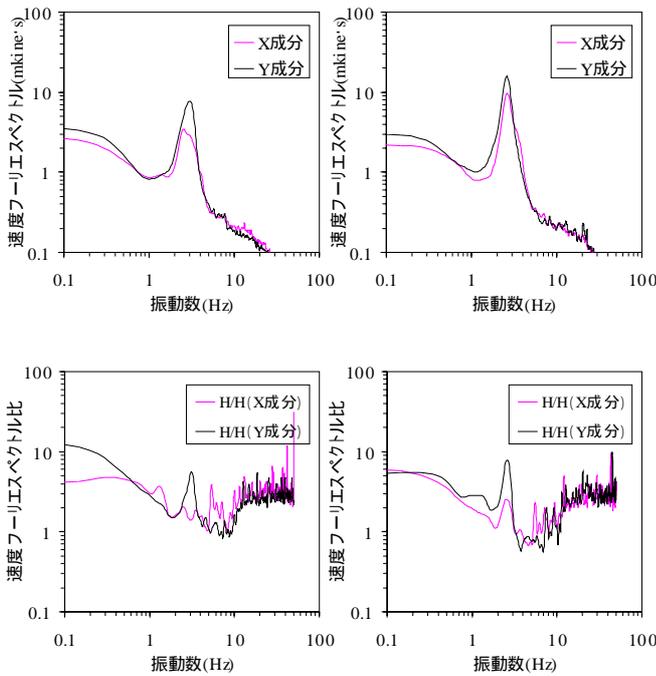


図-11 橋脚の速度フーリエスペクトル比

対する上部の減衰が評価することができる。

(2) 高架橋の応答

地盤の地震応答解析からの応答加速度時刻歴より高架橋の応答を算出した。高架橋は材料減衰や逸散減衰を含んだ減衰があると考えられるから、1質点系にモデル化した。その時の減衰は、微動測定により確認された高架橋の固有周期に対応する増幅率をもとに算定した。それによれば高架橋の減衰はおおよそ10%となった。図-12に高架橋の最大絶対変位、図-13に高架橋の最大曲率を示す。高架橋の絶対変位は、沖積扇状地層区間の固有周期が約0.4秒の高架橋で大きく、約20 cmとなった。高架橋の最大曲率は、沖積段丘層および沖積扇状地層の区間の高架橋の曲率が他の地点にある曲率と比べ大きい。

6. 地震時の列車の位置

脱線地点に到達する地震波と約210 km/hで高速走行している列車の位置関係を把握することは脱線原因を考察する上で重要な事柄と考え、列車の運転規則および乗員乗客の証言より地震時の列車の位置を推定する。まず、列車の運転規則により、列車が前駅を定刻に出発し、列車の加速度1.6 km/h/sで走行速度が210 km/hであった場合、列車は脱線開始地点には約56分24秒に到達することになる。図-14に列車の運転規則に従った場合の206.15 kmの地表の変位時刻歴と列車の位置を示す。厳密な列車の運行時刻や走行速度が分からないため、誤差を数十秒としても列車は脱線開始地点で大きな変位を受けた可能性がある。

乗客乗員の証言により地震時の列車の位置を推定する。ここでは列車の走行速度を210 km/h、車両1

表-1 微動測定による高架橋の卓越周期，増幅率，減衰

橋脚微動測定地点	卓越周期 (S)	増幅率	減衰
205.9	0.29	3.5	0.14
206.0	0.18	5.6	0.09
206.1	0.23	4.9	0.10
206.2	0.32	5.6	0.09
206.5	0.53	3.7	0.14
206.9	0.43	7.3	0.07
207.1	0.38	7.9	0.06
207.2	0.40	8.2	0.06
207.3	0.42	4.5	0.11
207.4	0.42	2.5	0.20
平均		5.4	0.11

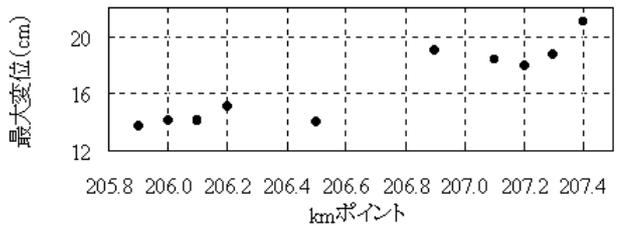


図-12 高架橋の最大絶対変位

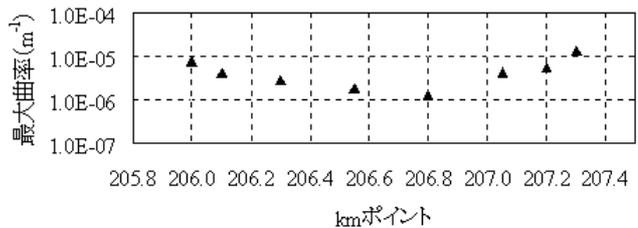


図-13 高架橋の最大曲率

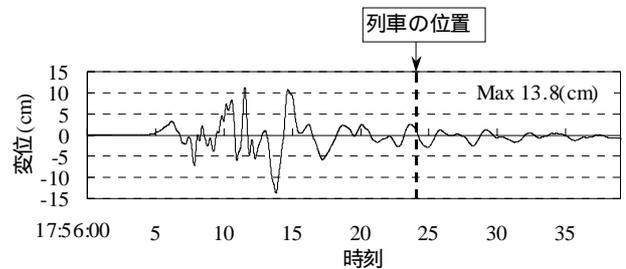


図-14 運転規則に従った場合の 205.15 km の地表の変位時刻歴 (Y 方向) と列車の位置関係

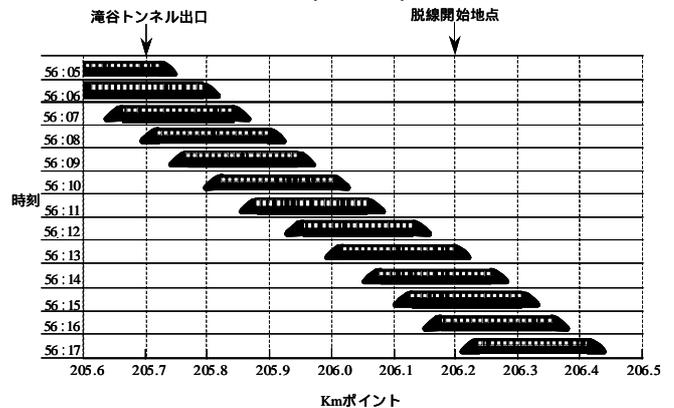


図-15 乗員乗客の証言より推定した各時刻における列車の位置

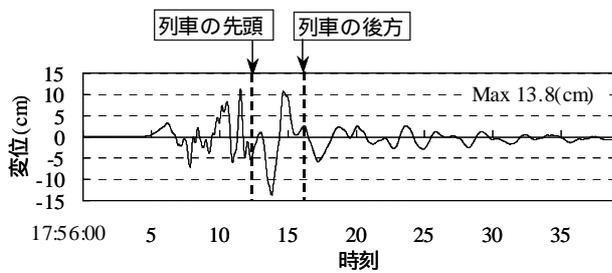


図-16 乗客乗員の証言に従った場合の 206.15 km の地表の変位時刻歴 (Y 方向) と列車の位置関係

両を 23 m とする。乗客乗員の証言のうち車掌は「トンネルを出た直後、横から風圧を受けたような感じがした」という。なお、車掌は地震発生時に 2 両目の車掌室にいた。車掌が横から風圧を受けた感じがしたという時刻は、変位が大きく変化する時刻とし、56分05秒とした。そこで、列車の2両目が56分05秒に滝谷トンネル出口を出たと仮定した。図-15に各時刻の列車の位置を示す。滝谷トンネルから脱線開始地点までの約500 mを走行する約8秒間は、地震による振動のなかで、列車は脱線せず走行していたことが推定できる。図-16に脱線開始地点から最も近くの解析地点である206.15 kmの地表の変位時刻歴と、この地点を通過する列車の先頭と後方の時刻を示す。約56分12秒に列車の先頭はこの地点にさしかかり、約56分16秒に列車の後方が通過することになる。この地点の地表面の最大変位は約56分14秒に13.8 cmとなり、本震の際の変位が最大となる時刻に列車は脱線開始地点付近を走行していたと推定できる。

7. 結論

新潟県中越地震における新幹線脱線の原因について、脱線区間の地盤と高架橋橋脚の常時微動測定および地震応答解析、高架橋の応答解析、乗員乗客の証言により考察した結果、次の結論を得た。

(1) 脱線区間の常時微動測定より1次と2次の卓越振動数が現れた。2次の卓越振動数は沖積扇状地の

表層に対応していると考えられる。また、1次の卓越振動数に対応するような基盤岩が、地表からおおよそ90-120 mの深さに存在すると考えられる。

(2) 礫層上面を基盤とし、入力地震動の位相差を考慮した解析で地表面の応答を評価した。最大加速度、最大変位には大きな差異はないが205.8から206.2 kmの区間では曲率が大きい。この区間で曲率が大きいのは、沖積段丘層の非線形化が寄与していると考えられる。

(3) 脱線区間の地表面は起伏が激しい地形で、それに伴って高架橋橋脚の高さも異なっている。そのため脱線区間における高架橋の固有周期は一定ではなかった。

(4) 沖積扇状地層区間の固有周期が約0.4秒程度の高架橋の変位が、他の地点にある高架橋よりも小さくなった。地震時において各地点の高架橋の応答には差異があったと考えられる。

(5) 運転規則および乗客乗員の証言による列車の位置と地震波の到達時刻の関係より、本震の際の地表面の変位が最大となる時刻に列車は脱線開始地点付近を走行していたと考えられる。

謝辞：本研究では、防災科学技術研究所のKIK-netおよびK-netの観測記録を使用させていただきました。記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 日本鉄道建設公団 新潟県建設局：上越新幹線（水上・新潟）地質図，1980年
- 2) 安田進・山口勇：種々の不攪乱土における土の動的変形特性，第20回土質工学研究発表会，pp539-542，1985年
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説（V耐震設計編），1996年
- 4) 独立行政法人防災科学技術研究所基盤強震観測網（KIK-net）ホームページ <http://www.kik.bosai.go.jp/kik/>
- 5) 朝日新聞のホームページ：<http://www.yahoo.co.jp/>
- 6) 航空・鉄道事故調査委員会：上越新幹線における列車脱線事故に係る鉄道事故調査について（経過報告），平成17年1月24日，<http://www.mlit.go.jp/araic/>

(2005.6.23 受付)

CONSIDERATION CONCERNING CAUSE OF SHINKANSEN DERAILMENT IN NIIGATAKEN TYUETU EARTHQUAKE

Shinichiro MORI and Shinya KAZUNI

The Niigataken tyuetu earthquake of magnitude 6.8 occurred on October 23, 2004, and the cause was considered. The relation between the excellence cycle of the ground compared with H/V and the thickness of the layer of the subsurface layer was clarified. It has been understood that the excellence of the alluvium corresponds to the second peak compared with H/V. Moreover, making the ground nonlinear was admitted from the seismic response analysis in the offing product terrace layer.