付属資料３　浄土川橋梁の沈下解析と車両挙動への影響

1.　浄土川橋梁の概要

地震直後の軌道レベル測量結果によると，脱線箇所付近における一部の直接基礎形式の橋脚が沈下（浄土川橋梁付近約 7cm 程度，十日町橋梁付近約 3cm 程度）していた。そこで，これらの沈下メカニズムの解明，ならびに列車挙動に与える影響について検討した。

図 1 に浄土川橋梁の概要を示す。浄土川橋梁第 2 橋脚（建設キロ程 205k421m80，営業キロ程 206k042m66）は高さ 10.5m，く体断面 8.0m×3.0m であり，直接基礎形式である。そこで，この橋梁を対象として，土質調査結果から得られた地盤の動的変形特性を用いて沈下原因の究明のために数値解析を行った。

地震時における橋梁の沈下現象を解明できる解析方法として，簡便法（地震応答解析と自重解析を併用した方法）と詳細法（地震時の有効応力解析と地震後の圧密解析を併用した方法）の 2 種類が考えられるが，ここでは詳細法を適用した。**図 2** に詳細法の解析フローを示す。詳細法は，図に示すように地震中の過剰間隙水圧の上昇を模擬した有効応力解析を行い，過剰間隙水圧の上昇に起因したせん断剛性の低下と地震後の圧密による沈下の双方を評価できる手法できるため，地震中，地震後の経時的な沈下の変化が追跡できる。

2.　有効応力解析法の理論モデル

地震による地盤中の間隙水圧の上昇に伴い，地盤強度（もしくは剛性）が軟化し，極端な場合には液状化が生じる。このような現象の解析には，低ひずみレベルから破壊までの現象をシミュレーションが必要となるため，

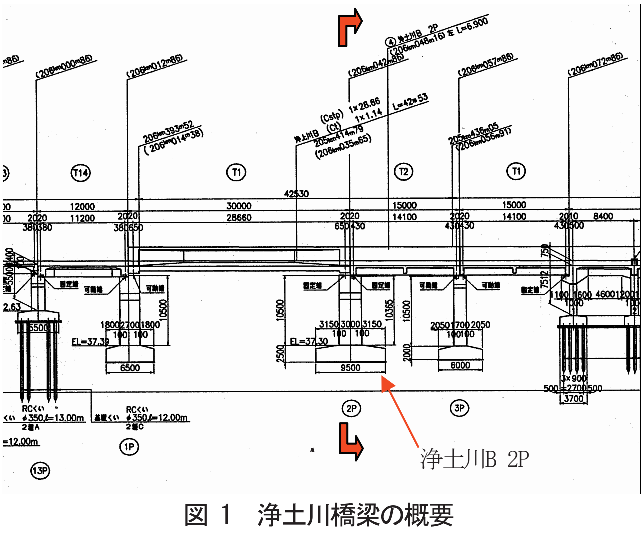

図 1　浄土川橋梁の概要

2次元静的自重解析
↓
2次元動的解析
↓
地震中の沈下量の算定
↓
2次元圧密解析
↓
地震後の圧密沈下量の算定
↓
地震による沈下量の算定

図2　詳細法の解析フロー

飽和地盤を土粒子（固体相）と間隙水（液体相）からなる二相系混合体理論を用いた有効応力解析法が有効となる。通常，このような条件での構造物の沈下は，以下の三つからなると考えられる。

① 地震中非排水条件での間隙水圧上昇に伴う支持力（せん断剛性）の低下による沈下

② 地震中排水条件による間隙水圧消散に伴う沈下

③ 地震後排水条件による圧密沈下

従来の解析経験より，今回のような主要動持続時間の短い（約 15 秒）地震波に対して，上記②の影響が小さいと判断されることから，ここでは①と③を対象にした。

図3に①の有効応力解析に用いる固体相の変形特性を規定するモデルである東畑・石原によるマルチスプリングモデルを示す。また，**図4**に液体相の過剰間隙水圧の上昇を規定するモデルである井合による過剰間隙水圧モデルを示す。このモデルを用いれば，緩い砂質土の場合密な砂質土の場合における間隙水圧特性の違いを表現できる。

③の解析では，地震終了時の地盤状態を初期状態として，地震後の圧密（浸透流）解析を実施した。

なお**表1**には，その他の主な解析条件を示す。

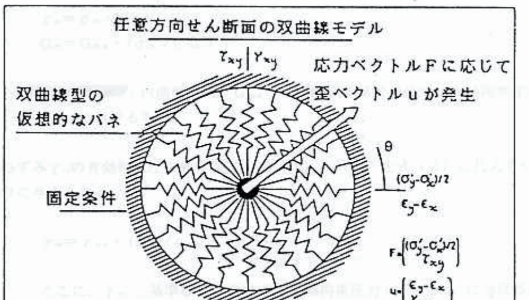

図 3　マルチスプリングモデル概念図

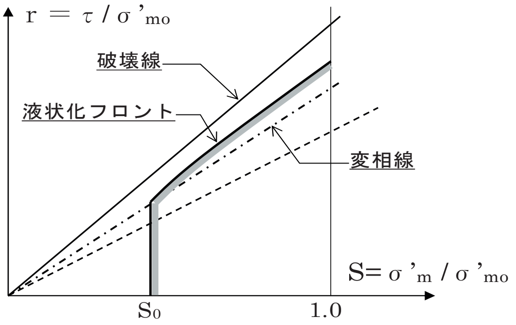

図 4　過剰間隙水圧モデル（液状化フロント）

表 1　詳細解析法の主な解析条件

入力地震動		基盤波の推定に用いる地盤データは地震後実地盤調査結果
基準観測波		JN3波（JRの新長岡記録）
入力基盤面		Vs＝750m/ s
解析法	地震中	・2次元の動的解析 ・間隙水圧の考慮できる ・地震中の沈下計算できる
	地震後	・地震後水圧の消散による圧密沈下の計算できる

3.　地震直後の沈下量

図5は当該地区の基盤で想定される地震動を，**図6**は地震による地盤の変形状況を，**図7**には地震直後の過剰間隙水圧の発生状況を示す。地震直後に想定される橋梁天端の沈下量は6.0cmとなった。

これに対して**図10**には，地震後の過剰間隙水圧の消散状況とそれに伴う圧密沈下量の推移（詳細は次項による）を示しているが，これによると，地震後約1週間で生じる過剰間隙水圧の消散に伴う沈下量は1.7cmであり，地震中の沈下6.0cmとの合計沈下量は7.7cmとなった。この計算沈下量は実調査値にかなり近く，解析が概ね妥当であると考える。

これより浄土川橋梁における解析結果を総括すると，地震中の沈下量は約8割，地震後の圧密沈下量は約2割であることが分かった。

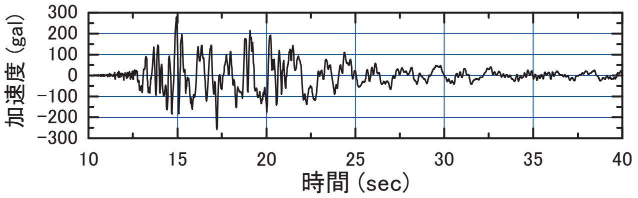

図 5　入力基盤波

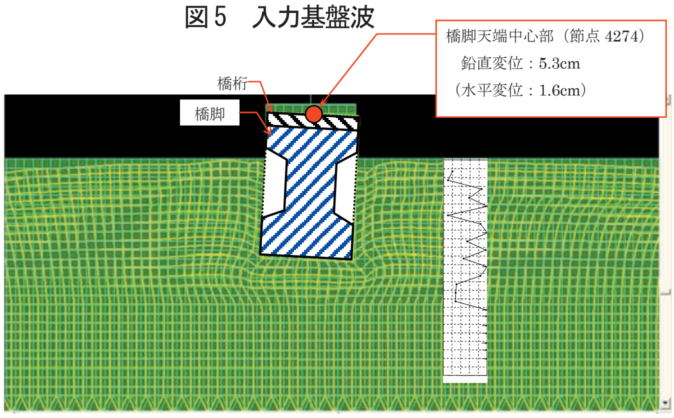

図 6　地震終了時に生じた変位量

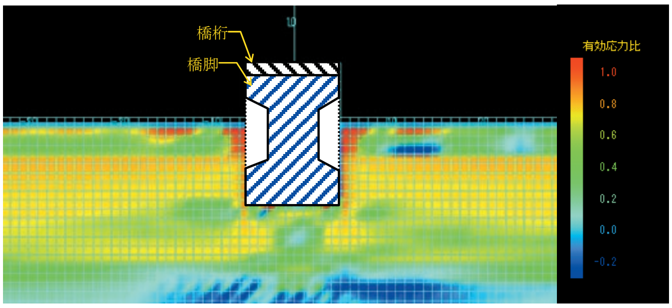

図 7　地震終了時の有効応力比コンター図

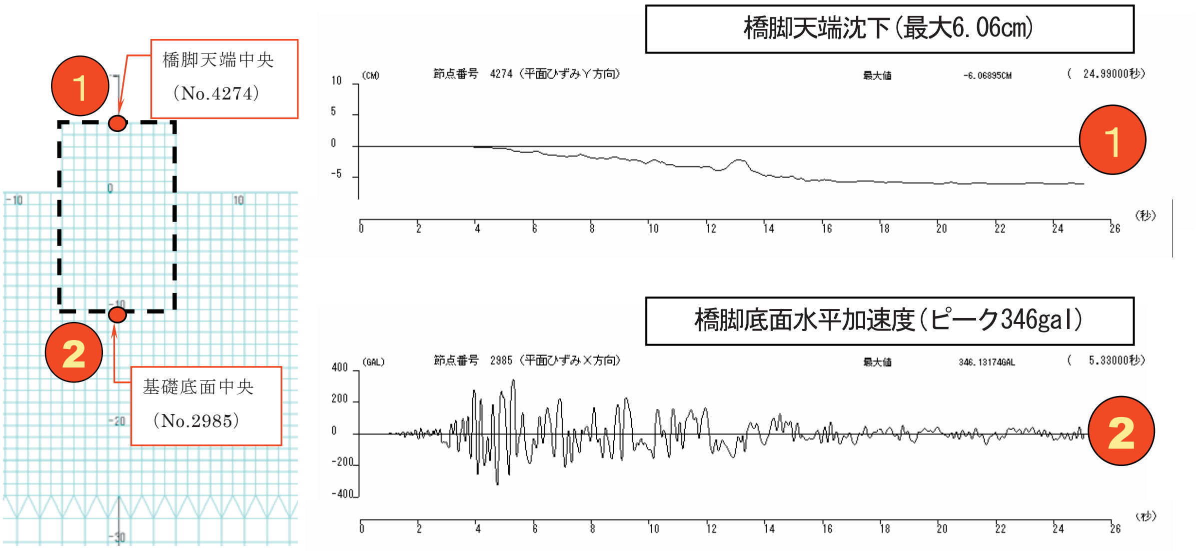

図 8　橋脚沈下量・加速度の時刻歴図

地震中の沈下量は地震波の時刻歴に連れて徐々に生じるため，脱線した新幹線が浄土川を通過した時点の沈下量はさらに小さいものと推定される。**図8**には橋脚の沈下量と水平加速度の時刻歴図を示すが，この図から橋脚と上部構造物の重さによって橋脚天端中心部位で振動が生じ，振動時間の経過につれて沈下が除々に累積し，地震終了時には6.0cmに達したことが分かった。ただし，主要動が到達した5sec頃においての沈下量は10mm程度と小さいことから，列車脱線への影響はその分だけ小さくなると考える。

4.　地震後圧密解析

4.1　解析モデル

地震後の過剰間隙水圧の消散にともなう圧密沈下量は，土水連成解析を行った。本解析では，有効応力解析で算出した地震終了時の地盤応力状態を初期状態として，地盤の透水性による間隙水圧の消散効果を考慮して圧密解析を行った。ここで，水理条件としては液状化層の最上部に排水条件を設定し，変位の拘束条件としては，鉛直方向はローラ，基盤は固定とした。

4.2　解析結果

図9に圧密解析結果の一例として，地震による間隙水圧の消散に伴う，地盤の圧密沈下量の経時変化を示す。全沈下量については，この圧密沈下量に，地震中の沈下量である6cmを加える必要がある。地震終了後7.7日目の橋脚天端中央部の鉛直沈下量は1.7cmであり，地震終了時の6.0cmを加えると7.7cmとなる。地震終了5日後に実測された沈下量が7cmであったが,この値にかなり近く，今回の解析は概ね妥当であったと考える。

図10は，地震による過剰間隙水圧の消散状況を経時的に示したものである。橋脚基礎直下の地盤は透水性が悪いため，地震直後に間隙水圧が格段的に高いことが分か

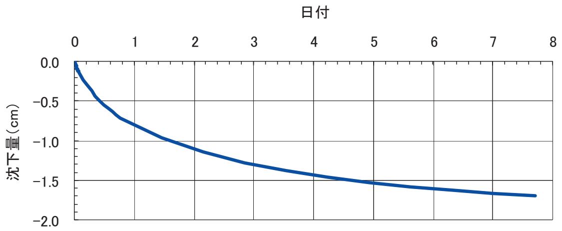

図9　地震終了後時間に伴う圧密沈下量の変化

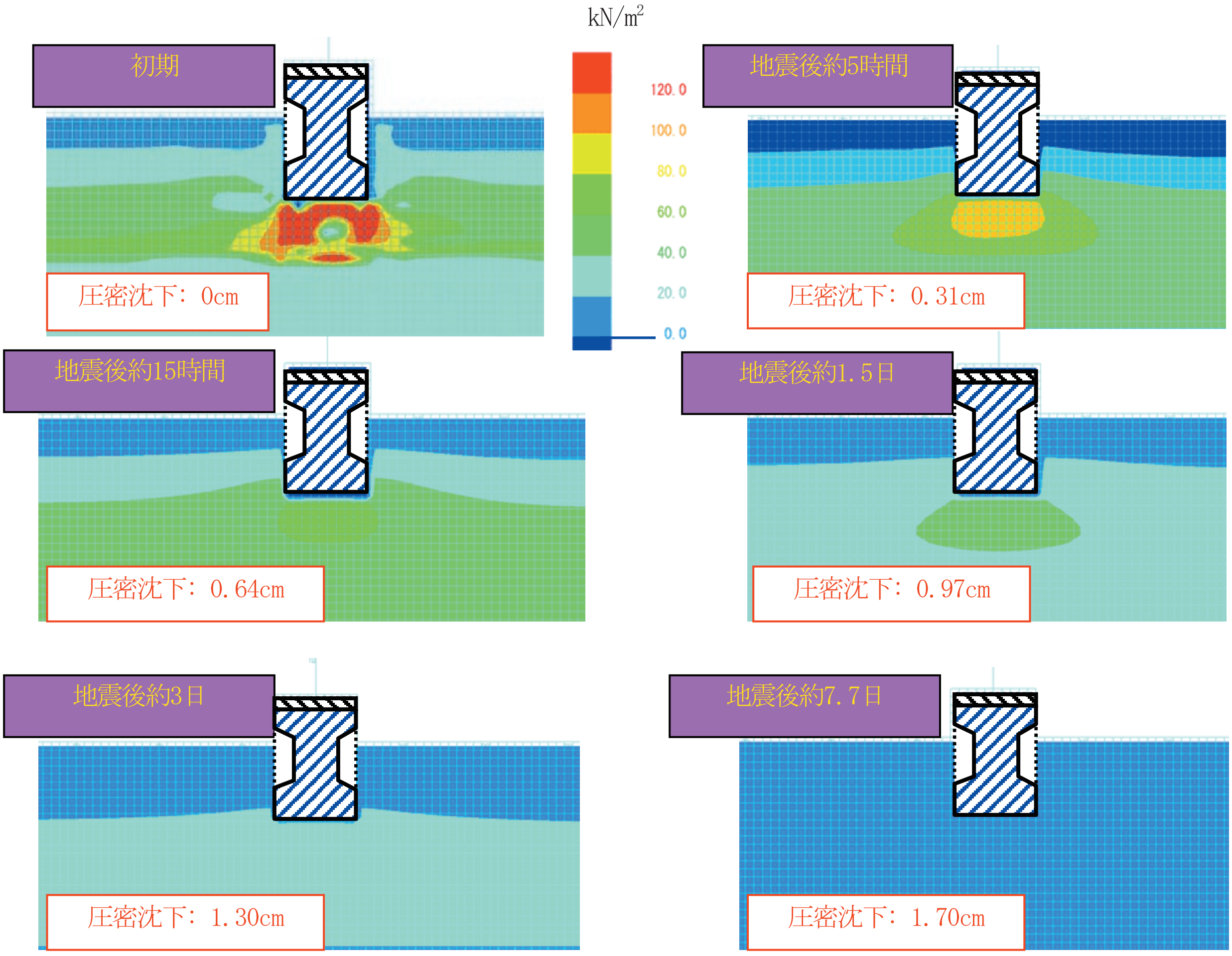

図10　地震終了後の間隙水圧コンターの経時変化と圧密沈下量

る。水圧消散の時刻歴を見るとこの部分の消散は自然地盤より遅れることが顕著である。全体的に言えば，地震後約15時間目の水圧が約1/2以下に下がり，3日目には大半の部分が消散した。圧密による沈下量は，地震後1.5日目の圧密量が全体の約半分くらいであり，7日目にはほぼ終了することがこの解析によって判明した。

5.　沈下が車両挙動に及ぼす影響

浄土川橋梁付近（約70mm）ならびに十日町高架橋T2～T4付近（約30mm）で生じた沈下が，車両脱線に及ぼす影響を定量的に把握するため，地震直後の測量結果に基づく高低変位を設定した軌道モデルを**図11**のように作成し，200系新幹線電車が軌道沈下箇所を走行した場合のシミュレーションを行った。

前述の沈下解析によると，地震による沈下は時々刻々進行的に生じる。しかしながら，ここでは安全側への配慮から，地震で生じた軌道変位（沈下）を地震前から生じていたものと仮定し，その軌道を車両が走行した条件で，地震中の車両の挙動解析を行った。

5.1　解析条件

(1) 車両モデル

・200系新幹線電車（M’226，空車），走行速度204km/h

(2) 軌道モデル

・直線区間，下り勾配3‰，6‰（勾配変更点：206k211m）

※ 206k211m±22.5mの範囲に半径15000mの縦曲線を挿入。

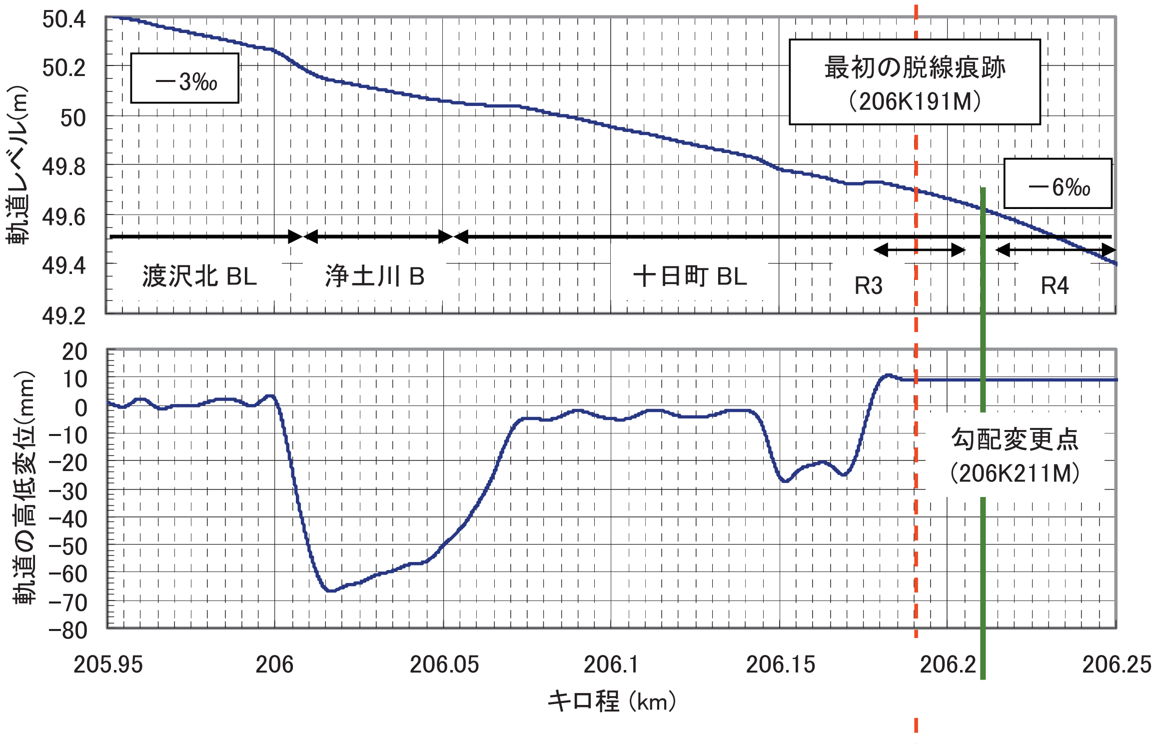

図11　車両挙動解析で用いた軌道の沈下条件

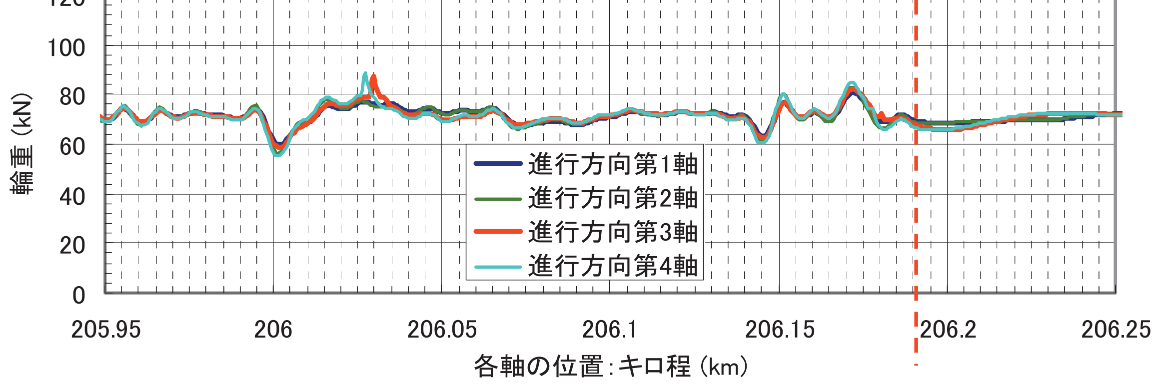

図12　車両各軸の輪重計算結果

・軌道変位：10月28日に実施した左右レールのレベル測量結果を平均し，勾配を除去した高低変位のみを考慮

5.2 解析結果

各軸の輪重計算結果を**図12**に示す。図から以下のことが分かる。

(1) 浄土川橋梁付近と十日町高架橋P1～P2付近の各軌道沈下開始箇所に車両が進入した直後に輪重が減少した。輪重最小値は，前者が進行方向第4軸の約55kN（輪重減少率22.9%，206k0m付近），後者が進行方向第4軸の約60kN（輪重減少率15.7%，206k145m付近）であった。

(2) 軌道沈下が戻り始める地点で一旦輪重が増加し，沈下箇所を通過した直後に輪重が減少するが，このときの輪重減少率は上記(1)より小さかった。

(3) 最初の車輪乗り上がり痕跡があった206k191m地点では，沈下箇所の通過により発生した輪重変動が収まり，輪重最小値は第4軸の約66kN（輪重減少率7.6%）で静止輪重とほぼ同じ値であった。

(4) 206k211mの勾配変化点を走行した際にも顕著な輪重変動は発生しなかった。

以上のとおり，仮に浄土川橋梁や十日町高架橋において，地震後の軌道レベル測量結果（浄土川橋梁約70mm，十日町高架橋約30mm）と同じだけ沈下した軌道上を車両が走行したとしても，その高低変位が脱線発生地点における輪重変動に及ぼす影響は小さいことが分かった。したがって，車両の脱線は，例えば地震動による大きな軌道振動等，高架橋の沈下による軌道変状以外の要因によって発生したと考えられる。また，206ｋ211m地点での勾配変化が車両の脱線に及ぼす影響は，無視できる程度に小さかったと考えられる。

6. まとめ

今回の地震によって直接基礎で支持された浄土川橋梁や十日町高架橋の一部が沈下した。このうち，特に沈下が大きかった浄土川橋梁第2橋脚を対象に，沈下原因の究明のための沈下解析を実施した。解析は，地震後実施した土質調査結果から推定した地盤の動的変形特性や液状化強度を用いて，2次元FEM有効応力解析を行った。また，地震後の間隙水圧消散を考慮した圧密解析も実施した。その結果，地震中における沈下は全沈下量の約8割，地震後の圧密による沈下は約2割あることが分かった。実測値との比較によって，本解析が妥当であることが検証された。なお，ここで計算された沈下割合に関しては，十日町高架橋についても同程度と考えられる。

また，これらの解析により主要動が到達した時点（脱線したと思われる時点：約5sec）での地震による沈下量は総沈下量の15％程度と考える。しかしながら，地震中のどの時点（時刻）で車両が橋梁を通過したか不明であることから，仮に全沈下量が主要動到達時に生じたとして過程して車両挙動解析を行った。

その結果，最初の脱線痕跡があった206k191m付近の輪重減少率は最大8％程度であり，仮りに，地震後に沈下した構造物の上を列車が走行したとしても，この沈下が脱線に及ぼす影響は小さいことが確認できた。