

付属資料 5 DIASTARSによる走行解析

1. 解析概要

「鉄道車両と構造物との動的相互作用解析プログラム (DIASTARS)」を用いて、渡沢北BLから十日町BL R6 (205k870～206k330m) 区間に対して200系新幹線10両編成列車を走行させ、推定地震動に対する構造物および車両の挙動解析を行った。

2. 解析目的

本解析の主な目的は、次の検討を行うためである。

- (1) 現地脱線地点および脱線号車と解析との対応性
- (2) 車体間の連結の影響の有無
- (3) 車両上載による構造物の応答への影響の有無 (車両と構造物との相互作用の影響)

3. 解析プログラムの概要

解析に用いたプログラムは、図1に概念図を示す鉄道総研が開発した「鉄道車両と構造物との動的相互作用解析プログラムDIASTARS (Dynamic Interaction Analysis for Shinkansen Trains and Railway Structures)」^{文献1)～4)}である。

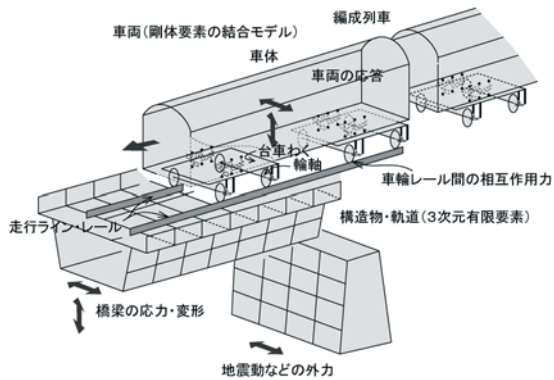


図1 DIASTARSの概念図

このプログラムの特徴は、車両モデルは、車体、台車、輪軸をそれぞれ剛体とし、それらを結合ばねおよびダンパーで繋いだ31自由度を有する3次元の1車両モデルを連結ばね等で繋ぎ、編成車両としてモデル化できるものであり、構造物モデルは、ばね、梁、シェルなどの有限要素を組み合わせて任意形式の構造物をモデル化できるものである。また、車輪・レール間には、ヘルツの接触ばねおよび線形クリープ則を用いた接触則を用いており、車輪とレールの曲線幾何形状を考慮することができ

る。

数値解法は、モード解析法を非線形問題に利用した解法を用いており、構造物の低次モードのみを用いて多自由度のモデルを効率的に解析できるようにされている。

車両モデルは、マルチボディモデルであり、図2に示すように車両・台車・輪軸間は空気ばねとストッパーの特性あるいは軸ばねとストッパーの特性を考慮した非線形ばねで結合されている。

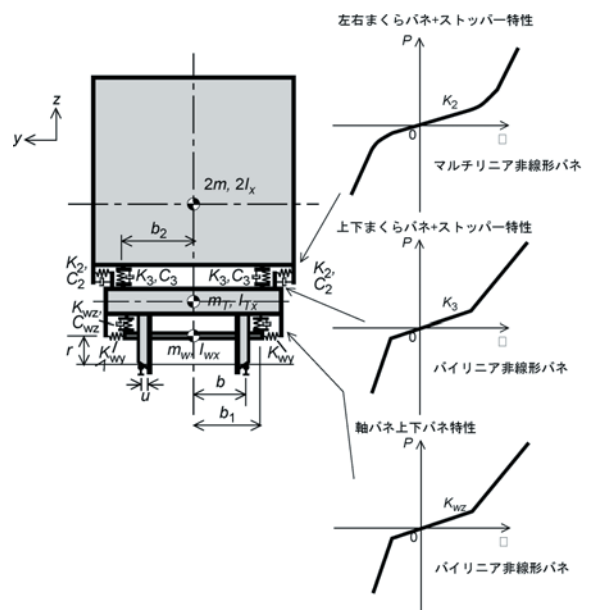


図2 車両モデルの断面と結合ばね

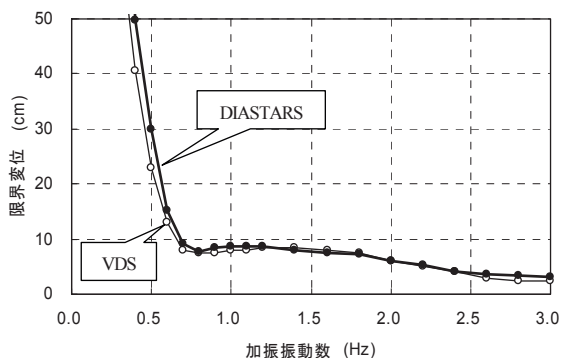
本解析による車両モデルの特徴を次に示す。

- 車両諸元は、200系226M (空車諸元) をモデルとした。
- 200系車両のまくらばり部分は、台車枠と一体と仮定してモデル化した。
- 車体間の連結は、上下方向および左右方向のばねとダンパー、およびローリング方向のダンパー (車端ダンパー諸元から計算) を考慮した。
- 車輪の形状は、円錐踏面とし、60kgレールとの曲線接触を考慮した。
- 車両数は、10両編成とした。

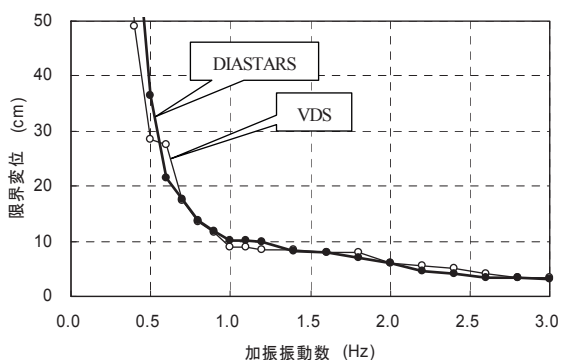
DIASTARSと本編で使用した車両運動シミュレータVDSとの違いを表1にまとめて示す。

4. 車両モデルの応答特性

DIASTARSによる車両モデルのモデル化の妥当性



(a) 車輪上昇量30mmを限界とした場合



(b) 車輪とレールの相対左右変位量70mmを限界とした場合

図3 DIASTARSとVDSとの正弦波加振に対する走行安全限界曲線の比較

(VDSモデルとの整合性)をみるために、車両モデルの応答特性について検討した。

図3に1車両モデル(車両間の連結なし)に対する全車輪同位相の正弦波5波加振に対する応答から、(a)車輪上昇量30mm、および、(b)車輪とレールの相対左右変位70mmを脱線限界として求めた走行安全限界曲線を示す。

図3より車両運動シミュレータVDSによる解析結果と比較すると、DIASTARSによる走行安全限界曲線の全体的な傾向としては、概ねVDSによる結果に沿ったものとなっているが、振動数に応じて多少の差異があることが分かる。

振動数により差異の大きさは違うが、車輪上昇量30mmでの限界値を比較すると、0.6Hz以下では15%程度となり、振動数が低くなると誤差が増加する。0.6~1.1Hzの範囲では誤差が+10%以下、2.6Hzを超える高振動数の範囲となると誤差が20%程度となる(ただし、この範囲でのVDSによる正弦波の変位振幅ピッチも限界値の20%程度である)。その他の範囲では誤差は±5%程度以下である。また、車輪とレールの相対左右変位量70mmでの限界値を比較すると、0.6Hz以下では±20%程度で、1.0~1.2Hzの範囲で+15%程度、1.8Hz付近で-10%程度、2.4Hz付近で-15%程度となる。その他の範囲では、

誤差は±5%程度以下となる。

特に1.0Hz付近での違いを生じさせている原因のひとつとして、車体一台車間の左右動ダンパ特性のモデル化の違いが考えられる。VDSの方では、負勾配を考慮した非線形特性のモデル化を行っているが、DIASTARSの方では、上記の非線形性を考慮すると収束しないため、バイリニアモデル(初期値11.44tf・s/m)によりモデル化している。

解析対象としている脱線地点の高架橋(R3~R6)の卓越振動数は1.0~1.8Hz付近であり、地震動成分の中でそれらの振動が励起されると考えられる。この範囲におけるDIASTARSのVDSからの差は、最大±15%程度と考えられる。

5. 構造物のモデル化

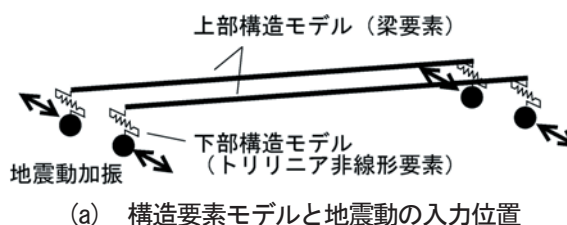
5.1 構造物のモデル化の方法

解析対象の構造物は、図4(a)に示すように上部構造は梁要素により、また、橋脚や高架橋柱は非線形ばね要素によりモデル化した。

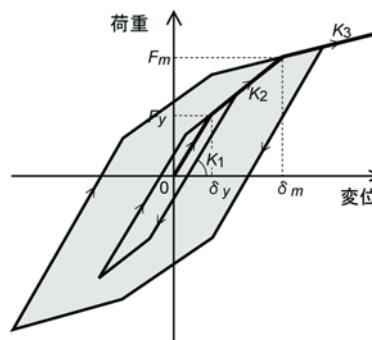
地震動は、図4(a)に示す下部構造モデルの下端(各橋脚基礎にあたる)節点に、第3章に示した地盤応答解析から得られるそれぞれ対応する加速度波形を入力した。

非線形モデルの骨格曲線は本編の解析と同じものを用いた。また、履歴特性は、図4(b)に示すような標準トリリニア型の履歴モデルである。

レールは走行ラインとして定義しており、線形の小返りばねを介して構造要素に取りついている



(a) 構造要素モデルと地震動の入力位置



(b) 履歴非線形モデル(標準トリリニア形)

図4 DIASTARSによる解析の構造モデルの概念図

表1 DIASTARSとVDSを用いた解析の比較

解析名 (使用モデル)		DIASTARSを用いた解析	VDSを用いた解析	
解析の種類		動的相互作用解析	動的角折れ考慮解析	1質点系応答解析結果を用いた全軸同位相加振解析
車両モデル	力学モデル	車体、台車枠、輪軸を剛体としてモデル化した1車両31自由度のマルチボディモデル	車体、まくらばり、台車枠、輪軸を剛体とした1車両70自由度のマルチボディモデル (ただし、レール支持に関する16自由度を含む)	
	まくらばり	台車枠に含めてモデル化	個別にモデル化	
	車体・台車枠 (まくらばり) 間の連結ばね・ダンパ	<ul style="list-style-type: none"> ばね：空気ばねとストッパー特性を組合せた特性のばねが1箇所に取り付いているとしてモデル化 上下方向：ひずみ硬化型のパイリニア非線形ばね 左右方向：ひずみ硬化型のマルチリニア非線形ばね 前後方向：ひずみ軟化型のパイリニア非線形ばね (側受けの摩擦力と等価にしたモデル) ダンパ：上下、左右方向：線形 	<ul style="list-style-type: none"> ばね 上下空気ばね：線形ばねモデル 上下動ストッパと異常上昇止めを個別に線形ばねでモデル化 左右空気ばね：線形ばねモデル 左右動ストッパを個別にマルチリニア非線形ばねでモデル化 前後空気ばね：線形ばねモデル ボルスタアンカ：前後方向の線形ばね ダンパ 上下空気ばね：線形 左右動ダンパ：負勾配を有するマルチリニア非線形モデル 	
	まくらばり・台車枠間のばね・ダンパ	—	ヨー方向の相対角変位のみを許容 (ピン拘束に相当) 摩擦力モデル	
	台車枠・輪軸間のばね・ダンパ	<ul style="list-style-type: none"> ばね：取扱いは同上 上下方向：ひずみ硬化型のパイリニア非線形ばね 左右方向：ひずみ硬化型のパイリニア非線形ばね 前後方向：線形 軸ダンパ：線形 	<ul style="list-style-type: none"> ばね 軸ばね：上下・左右線形ばねモデル 軸箱吊りを上下・左右のストッパとして線形ばねでモデル化 前後パイリニア非線形 軸ダンパ：上下パイリニア非線形 	
	車体間のばね・ダンパ	上下：線形ばね、線形ダンパ 左右：線形ばね、線形ダンパ ロー：線形ダンパ	なし	
	(編成) 車両数	10両	1両	
レール車輪接触モデル	曲線同士の接触、レビシヤルテクリープ力	3次元曲面同士の接触 カルカー非線形クリープ力		
構造物モデル	解析対象区間	渡沢北1A～十日町BL R6区間 (205k870～206k330m)		
	モデル化した構造物	<ul style="list-style-type: none"> 解析対象区間を19ブロックに分けて、次の2種類でモデル化 ①上部下部構造を梁と両端で支持する非線形ばねでモデル化 ②上部構造を両端が従属節点となる梁でモデル化 各構造物モデルの並進と回転運動が許される。 ①でモデル化：渡沢北1A-4P, 9P-10P, 13P～浄土川1B 1P, 浄土川2P-3P, 十日町高架橋R1-R2, 十日町1P-2P, R3, R4, R5, R6 ②でモデル化：渡沢北T5-T8, T11-12, 浄土川 T1, 十日町高架橋T1, T2, T4, T5, T6, T7 	15構造物 (渡沢北1A, 5P, 7P, 11P, 13P, 浄土川1B 1P, 2P, 3P, 十日町高架橋R1, 1P, 2P, R3, R4, R5, R6) ただし途中の桁は質量として付加 上記構造物区間は1質点系モデルにより求めた変位で並進運動をし、その間の桁は両端の構造物の動きに追随すると仮定	十日町R3, R4, R5の3構造物 ただし、高架橋間の桁は質量として付加
	使用履歴モデル	標準トリリニア型履歴モデル 骨格曲線は同右	ディグレーディングトリリニア型履歴モデル ただし、骨格曲線は3直線のもの2直線のものあり	
	構造物間の曲線補間	エルミート補間 (3次関数補間)	弾性支床上のはりモデル	
地震動	地震波の名称	推定地震動 (2次元解析による)		
	使用地表面地震波数	15種類+鉛直動 (共通)	15種類+鉛直動 (共通)	3種類+鉛直動 (共通)
	入力地点と方法	橋脚モデル下端 (地表面) で加速度入力 (モデルとしては力) ただし、上記①モデルの起終点に異なる地震波を入力している場合がある。	構造物モデル：橋脚下端 (地表面) から地震波 (加速度) 入力 車両モデル：レールレベルで絶対応答変位を入力	

表2 構造物のモデル化

ブロック番号	構造物	区 間	モデル
1	渡沢北1A～5P	205k871m～205k921m	梁要素＋両端非線形ばね
2	渡沢北T6, T7	205k921m～205k941m	梁要素（両端従属節点）
3	渡沢北7P～11P	205k941m～205k981m	梁要素＋両端非線形ばね
4	渡沢北T11, T12	205k981m～206k001m	梁要素（両端従属節点）
5	渡沢北13P～浄土川B 1P	206k001m～206k013m	梁要素＋両端非線形ばね
6	浄土川B T1	206k013m～206k043m	梁要素（両端従属節点）
7	浄土川B 2P～3P	206k042m～206k058m	梁要素＋両端非線形ばね
8	十日町BL T1	206k058m～206k073m	梁要素（両端従属節点）
9	十日町BL R1,R2	206k073m～206k143m	梁要素＋両端非線形ばね
10	十日町BL T2	206k143m～206k151m	梁要素（両端従属節点）
11	十日町BL 1P～2P	206k151m～206k171m	梁要素＋両端非線形ばね
12	十日町BL T4	206k171m～206k179m	梁要素（両端従属節点）
13	十日町BL R3	206k179m～206k204m	梁要素＋両端非線形ばね
14	十日町BL T5	206k204m～206k214m	梁要素（両端従属節点）
15	十日町BL R4	206k214m～206k249m	梁要素＋両端非線形ばね
16	十日町BL T6	206k249m～206k261m	梁要素（両端従属節点）
17	十日町BL R5	206k261m～206k296m	梁要素＋両端非線形ばね
18	十日町BL T7	206k296m～206k306m	梁要素（両端従属節点）
19	十日町BL R6	206k306m～206k331m	梁要素＋両端非線形ばね

5.2 解析対象区間の構造物のモデル化

解析対象区間の構造物は、表2および図5(a)に示す渡沢北BLから十日町BL(R6)までの構造物（延長約460m）であり、この区間の構造物を図5(b)に示すように19ブロックに分割してモデル化した。

渡沢北高架橋以前の区間については、渡沢北1Aと同じ振動が生じるように、また、十日町BL R6以降については、R6と同じ振動が生じるようにモデル化している。

渡沢北高架橋は、14連からなる単純桁が並ぶものであるが、5分割してモデル化した。

考慮した振動モードは4Hz以下のものとした。モード数は100である。減衰定数は5%とした。

6. 入力地震動

入力地震動は、本編で用いた推定地震動を利用した。

推定地震動は、下部構造モデルの下端の節点（各橋脚基礎にあたる）に、対応する地点の加速度波形を橋軸直角方向に入力した。上下動については共通波形を用いた。

入力地震動の時刻 $t=0$ は17時56分2秒に対応する。

表-3に入力地震動に関する節点番号の対応表を示す。

表3 入力地震動に関する節点番号対応表

入力地点構造物名	入力地震動を得た地盤解析モデルの節点番号	入力節点番号
渡沢北1A	8710	191
渡沢北5P	8402	192
渡沢北7P	8412	193
渡沢北11P	8373	194
渡沢北13P	8053	195
浄土川B 1P	7376	196
浄土川B 2P	7391	197
浄土川B 3P	7399	198
十日町R1	7761	199, 200
十日町1P	7201	201
十日町2P	7211	202
十日町R3	7809	203, 204
十日町R4	7819	205, 206
十日町R5	7642	207, 208
十日町R6	7099	209, 210

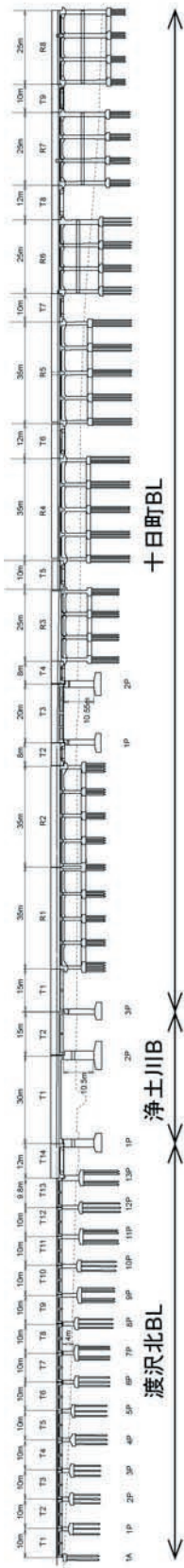
表4 構造物の固有周期の比較

ブロック番号	構造物	各ブロックの基本モード周期	1質点系モデルによる固有周期
3	渡沢北7P～11P	0.444	(7P)0.488 (11P)0.443
5	渡沢北13P～浄土川B 1P	0.506	(13P)0.464 (1P)0.514
7	浄土川B 2P～3P	1次 0.469 2次 0.398	(2P)0.477 (3P)0.424
9	十日町BL R1,R2	0.517	0.517
11	十日町BL 1P～2P	1次 0.360 2次 0.306	(1P)0.371 (2P)0.344
13	十日町BL R3	0.590	0.590
15	十日町BL R4	0.507	0.507
17	十日町BL R5	0.736	0.736
19	十日町BL R6	0.919	0.918

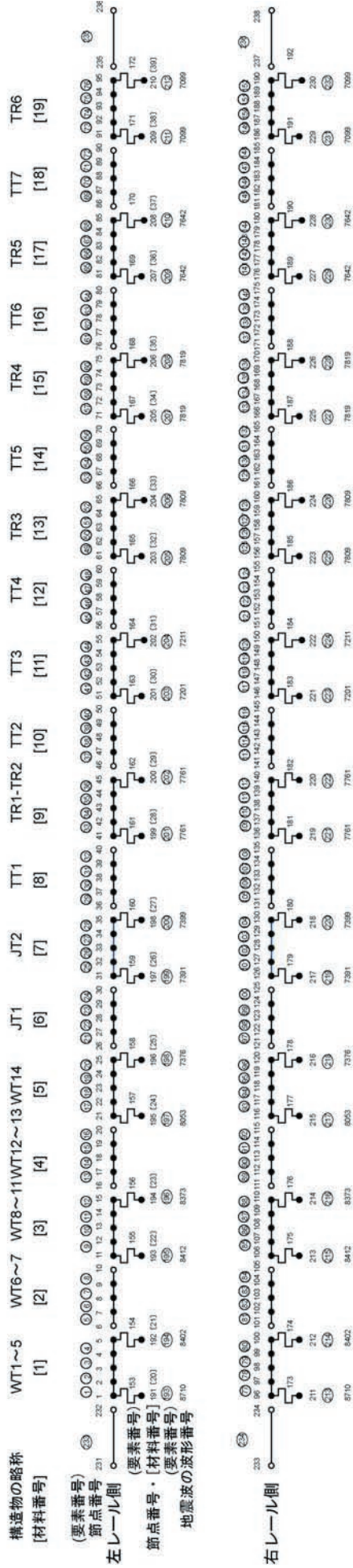
7. 構造物の応答

7.1 構造物の固有周期

モデル化した各構造物の固有周期を表3に示す。桁形式の構造物では、各ブロックの固有周期が、構造物のモデル化の違いにより本編のそれと若干異なっているものもあるが、ラーメン構造物の固有周期は一致していることが分かる。

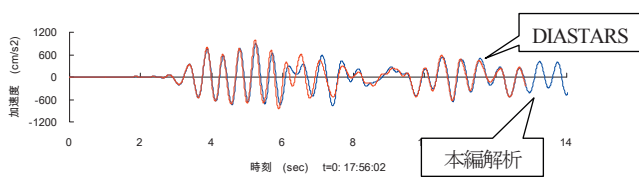


(a) 解析対象区間の構造物

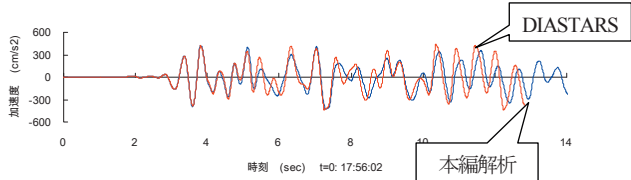


(b) 構造物のモデル化の方法

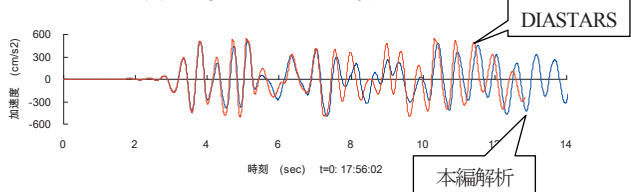
図5 渡沢北BL～十日町BL (R6) の構造のモデル化



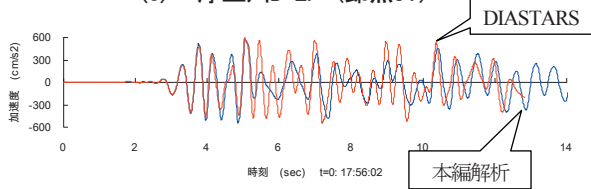
(a) 渡沢北BL 13P (節点21)



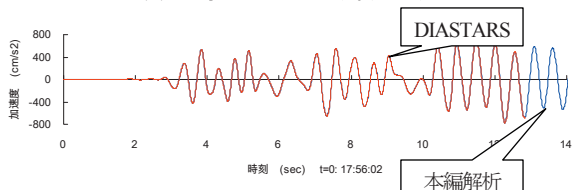
(b) 浄土川B 1P (節点25)



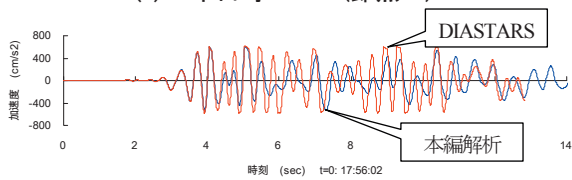
(c) 浄土川B 2P (節点31)



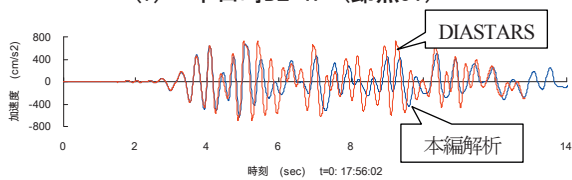
(d) 浄土川B 3P (節点35)



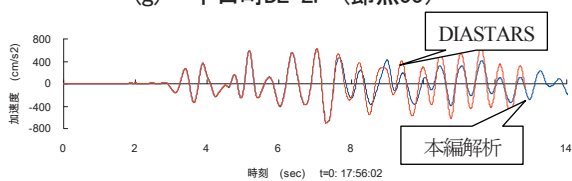
(e) 十日町BL R1 (節点41)



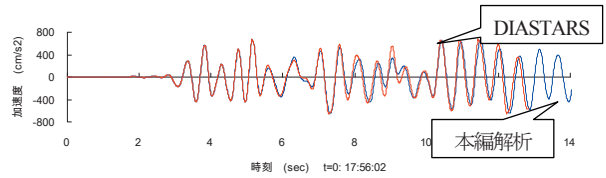
(f) 十日町BL 1P (節点51)



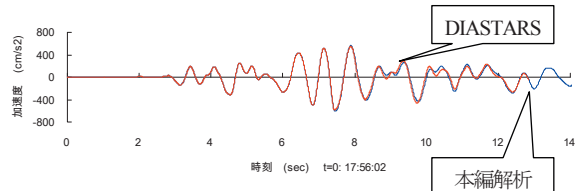
(g) 十日町BL 2P (節点55)



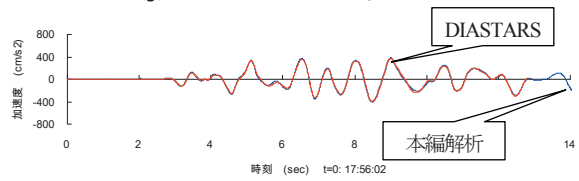
(h) 十日町BL R3 (節点61)



(i) 十日町BL R4 (節点71)



(j) 十日町BL R5 (節点81)



(k) 十日町BL R6 (節点91)

図6 構造物の応答加速度波形

表5 構造物の最大応答加速度の比較

構造物名	最大応答加速度 (cm/s ²)	
	DIASTARS	1質点系モデル
(a) 渡沢北BL 13P	994	908
(b) 浄土川B 1P	443	432
(c) 浄土川B 2P	547	527
(d) 浄土川B 3P	599	571
(e) 十日町BL R1	778	777
(f) 十日町BL 1P	620	610
(g) 十日町BL 2P	725	676
(h) 十日町BL R3	704	700
(i) 十日町BL R4	670	671
(j) 十日町BL R5	591	602
(k) 十日町BL R6	399	401

7.2 構造物の応答加速度

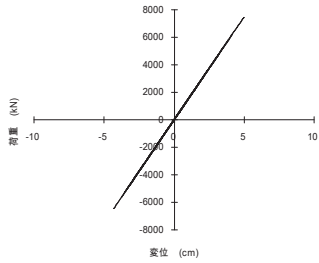
主な構造物の応答加速度波形を図6に示す。図6には、DIASTARSによるものと本編の解析により得られた構造物（1質点モデル）の応答波形を同時に示している。また、それらの最大加速度値の一覧を表5に示す。

DIASTARSによる解析のモデルでは、1ブロックとしてモデル化した構造物の橋脚の剛性や上部構造の質量配分および入力した地震動がブロック内の起点方と終点方で異なる場合があることや、構造要素の履歴特性の違いなど、本編で用いた1質点系モデルとは異なるため、両者の解析結果（波形や最大値）の細部は必ずしも同じとはならないが、図6から分かるように、両解析による構造物の応答波形は概ね一致しているといえる。

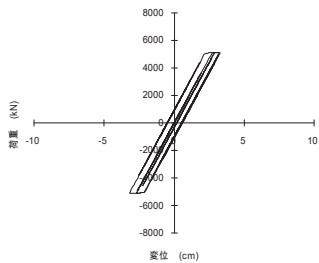
7.3 構造物の荷重－変位関係

構造物（橋脚・高架橋柱に対応する要素）の荷重と変位との関係を図7に示す。

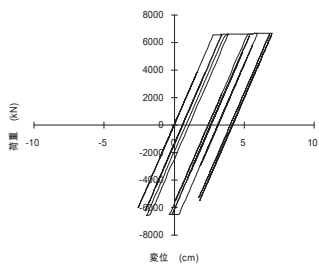
いずれの構造物も本編の解析と同様に概ね弾性域から塑性域に多少踏み込んだ程度の応答に収まっている。直接基礎の浄土川IBおよび十日町BLの1P、2Pでは応答塑性率が2を超えるが、これらも本編の解析結果と同様の傾向である。



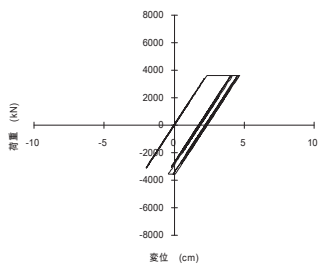
(a) 渡沢北BL 13P (要素157)



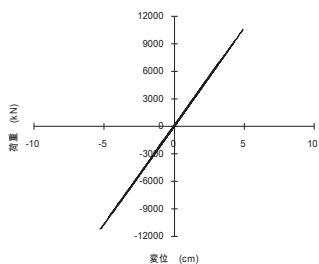
(b) 浄土川IB 1P (要素158)



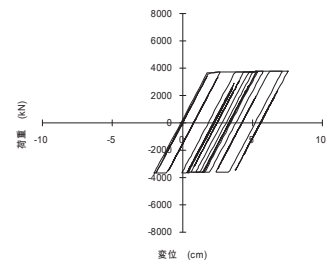
(c) 浄土川IB 2P (要素159)



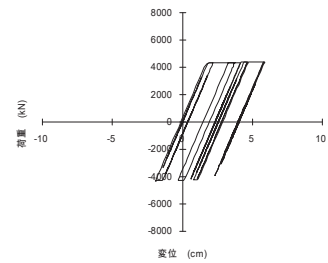
(d) 浄土川IB 3P (要素160)



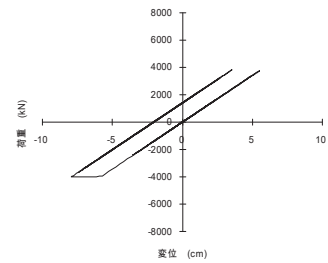
(e) 十日町BL R1 (要素161)



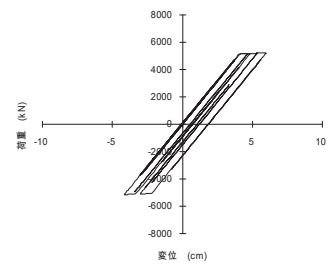
(f) 十日町BL 1P (要素163)



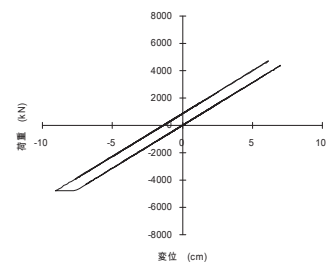
(g) 十日町BL 2P (要素164)



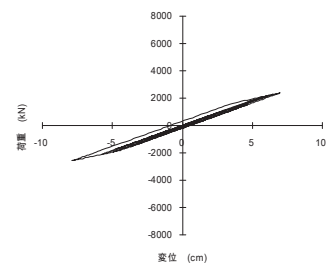
(h) 十日町BL R3 (要素165)



(i) 十日町BL R4 (要素167)



(j) 十日町BL R5 (要素169)



(k) 十日町BL R6 (要素171)

図7 構造物の荷重－変位関係

8. 走行性解析手順と解析結果

8.1 解析で比較対象とする現地調査結果

現地調査から確認された脱線地点、脱線車両（号車）と車輪の軸番号をまとめて表6に示す（本編・表8.1）。

表6 現地調査による脱線地点、号車・軸と脱線方向

キロ程	号車	軸	脱線方向
206k217m	10	4	左
206k264m	10	3	左
206k191m	8	1	右
206k294m	5	1	左
206k303m	4	1	左
206k295m	3	4	左
206k292m	3	3	左
206k278m	3	2	左
206k275m	3	1	左
206k450m	9	4	右
206k450m	9	3	右

表6に基づき、10号車から1号車までの4軸から1軸までの各軸を左から右へ順に並べたものを横軸に、キロ程を縦軸にとって脱線地点をプロットしたものを図8に示す。この図から脱線地点として206k200m～220m付近および206k270m～310m付近にあることが分かる。

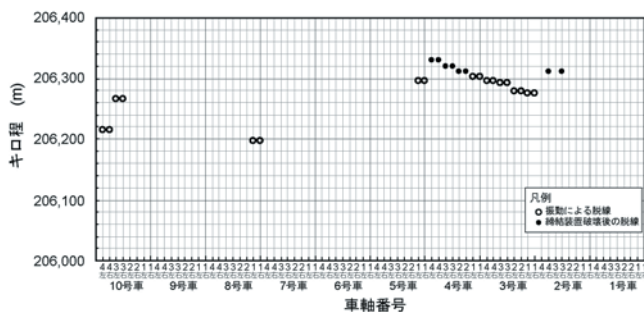


図8 現地調査による各車両・車輪の脱線地点

また、図9に現場の軌間拡大の状況について測定されたものを示す。どの地点から大きな横圧が生じて軌間拡大が生じたかが分かり、その特徴として205k960m付近から軌間拡大が始まっていること、206k040～206k200m

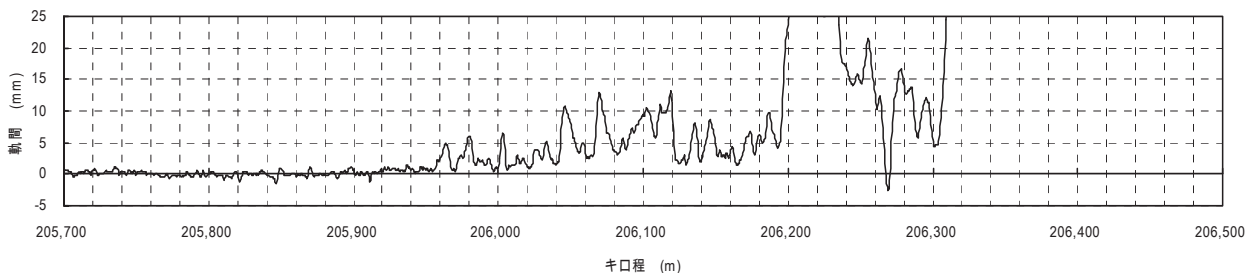


図9 現地測定により得られた軌間

区間では軌間拡大が顕著となることが見取れる。ただし、206k120～206k200m区間の拡大量は若干小さめであることがわかる。また、206k200m以降は締結装置の破壊による軌間拡大とされているものである

8.2 解析における脱線判定指標

DIASTARSによる解析では、各車両の車体、台車および輪軸の応答（変位、速度、加速度）、各車輪の車輪上昇量、横圧、輪重および車輪とレールの相対左右変位などが計算される。

ここでは、車輪とレールの相対左右変位を用いて脱線の可能性のある地点を示し、図8に示した現地調査による脱線地点との比較をすることとした。

脱線と判定する地点は、本編7章と同様に車輪とレールの相対左右変位に着目し、その変位が70mmに達した地点とすることとした。

8.3 地震動発生時の列車の走行開始位置の設定

現地調査からATC車上装置の電源異常検知時刻が17:56:03で、その時の列車位置は206k070m付近で、走行速度が204km/h (=56.67m/s) という推定がなされている。

一方、解析に用いた推定地震動の時刻 $t=0$ は17:56:02と設定されている。

両者の時間の整合が成り立てば、推定地震動の時刻 $t=0$ である17:56:02時点で（先頭）車両位置は、206k015m付近となる。逆に、電源異常検知時の地震動の大きさは正確に分からないものの、揺れの初期と考え、その時刻付近（推定地震動の波形から $t=3$ 秒程度）における（先頭）車両位置を206k070m付近とすると、推定地震動の時刻 $t=0$ での先頭車両位置は205k900m付近となる。

表7に $t=0$ 時の先頭車軸の位置に対応して表6に示した各車両の車軸が脱線が生じた地点に到達した時刻、および、先頭車軸が206k070m（十日町BL R1付近）および最後尾車軸（1号車第1軸）が205k960m（渡沢北13P付近）を通過した時刻を示している。

また、同表で網掛けをした時刻は、図6の波形から判断して対応する構造物に大きな応答加速度が生じている範囲を示している。

これらのことから推定地震動の時刻 $t=0$ での先頭車両位置としては、205k900m～206k000m程度の中という可

能性が高いと考えられるが、基盤・表層地盤内における地震動の伝達に関しては、不確実なところもあるため、推定地震動の時刻 $t=0$ における先頭車両の位置は、正確には特定できない。

このため、図10に示すように時刻 $t=0$ の先頭車両（車軸）の位置として205k905mを中心に10m間隔で ± 120 m（ほぼ1編成長）の区間において変化させた25ケースについて解析を行った。車両モデルの走行速度は204km/hとした。

表7 $t=0$ 時の先頭車軸位置と脱線発生位置から推定される脱線発生時刻

号車・軸番号	10-4	10-4	10-3	8-1	5-1	4-1	3-4	3-3	3-2	3-1	1-1
脱線等が生じた構造物とキロ程	TR1 206,070 (参考)	TR4 206,217	TR5 206,264	TR3 206,191	TR5 206,294	TR5 206,300	TR5 206,295	TR5 206,293	TR5 206,278	TR5 206,275	W11P 205,960
$t=0$ 時の先頭車軸位置	相対時刻差	0.00	0.87	0.78	3.92	4.46	4.46	4.47	4.47	4.46	
1	205,785	6.03	7.62	8.50	8.40	11.54	12.09	12.09	12.10	12.10	7.41
2	205,795	5.85	7.45	8.32	8.22	11.36	11.91	11.91	11.92	11.91	7.24
3	205,805	5.68	7.27	8.14	8.05	11.19	11.74	11.74	11.74	11.74	7.06
4	205,815	5.50	7.09	7.97	7.87	11.01	11.56	11.56	11.57	11.57	6.88
5	205,825	5.32	6.92	7.79	7.69	10.84	11.38	11.38	11.39	11.38	6.71
6	205,835	5.15	6.74	7.61	7.52	10.66	11.21	11.21	11.21	11.21	6.53
7	205,845	4.97	6.56	7.44	7.34	10.48	11.03	11.03	11.04	11.04	6.35
8	205,855	4.79	6.39	7.26	7.16	10.31	10.85	10.85	10.86	10.85	6.18
9	205,865	4.62	6.21	7.09	6.99	10.13	10.68	10.68	10.69	10.68	6.00
10	205,875	4.44	6.04	6.91	6.81	9.95	10.50	10.50	10.51	10.50	5.82
11	205,885	4.26	5.86	6.73	6.64	9.78	10.32	10.32	10.33	10.32	5.65
12	205,895	4.09	5.68	6.56	6.46	9.60	10.15	10.15	10.16	10.15	5.47
13	205,905	3.91	5.51	6.38	6.28	9.42	9.97	9.97	9.98	9.98	5.29
14	205,915	3.74	5.33	6.20	6.11	9.25	9.79	9.79	9.80	9.80	5.12
15	205,925	3.56	5.15	6.03	5.93	9.07	9.62	9.62	9.63	9.63	4.94
16	205,935	3.38	4.98	5.85	5.75	8.89	9.44	9.44	9.45	9.45	4.76
17	205,945	3.21	4.80	5.67	5.58	8.72	9.26	9.26	9.27	9.26	4.59
18	205,955	3.03	4.62	5.50	5.40	8.54	9.09	9.09	9.10	9.10	4.41
19	205,965	2.85	4.45	5.32	5.22	8.36	8.91	8.91	8.92	8.91	4.24
20	205,975	2.68	4.27	5.14	5.05	8.19	8.74	8.74	8.74	8.74	4.06
21	205,985	2.50	4.09	4.97	4.87	8.01	8.56	8.56	8.57	8.57	3.88
22	205,995	2.32	3.92	4.79	4.69	7.84	8.38	8.38	8.39	8.39	3.71
23	206,005	2.15	3.74	4.61	4.52	7.66	8.21	8.21	8.21	8.21	3.53
24	206,015	1.97	3.56	4.44	4.34	7.48	8.03	8.03	8.04	8.04	3.35
25	206,025	1.79	3.39	4.26	4.16	7.31	7.85	7.85	7.86	7.85	3.18

8.4 解析から得られる軌間拡大に関する情報

DIASTARSにより軌間拡大量を直接算定することはできないが、解析により求まる全車輪の横圧波形に基づき、低域通過フィルターを通したのちに、後処理として締結装置間隔（62.5cm）内に生じた最大横圧を求めることができる。

直8締結装置を用いた既往の実験結果によると、横圧が90kN程度以上となるとタイプレートが移動して軌間拡大に通じるとされている。

大に通じるとされている。

9. 走行性解析結果

図11～図16に時刻 $t=0$ での先頭車軸（10号車第4軸）の位置が205k785m, 205k855m, 205k895m, 205k935m, 205k975m, 206k015mにある場合の結果（車輪とレールの相対左右変位が10mm以上生じた地点のプロットおよび各地点で経験した最大横圧）を示す。

各図から読み取れる事柄を以下に示す。

① 図11に示した $t=0$ 時の先頭車軸の位置が205k785mの場合には、同図(a)から、10号車第4軸が206k216m付近で脱線に至る車輪とレールの相対左右変位（70mm）が生じているのが分かる。しかし、10号車は他の車軸も脱線に至る車輪とレールの相対左右変位を生じており、また、後続車両についてみると、3号車は脱線せず、4号車で脱線に至る車輪とレールの相対左右変位を生じる地点は、図8と比較すると70mほど手前になっている。さらに、同図(b)により90kNを超える大きな横圧は205k810m付近から発生しており、図9に示した軌間拡大が始まる地点よりかなり起点側であることが分かる。これらのことは、 $t=0$ 時の先頭車軸の位置がかなり起点側に過ぎているためと考えられる。

② 図12に示した $t=0$ 時の先頭車軸の位置が205k855mの場合には、同図(a)から、10号車第1軸、9号車第1軸、8号車第3、4軸が206k280m付近で、8号車第1、2軸、7号車が206k200m付近で、1、2号車が206k230m付近で脱線に至る車輪とレールの相対左右変位（70mm）が生じているのが分かる。しかし、これらは図8とかなり異なった位置で発生していると言える。一方、同図(b)により90kNを超える大きな横圧は205k960m付近から発生しており、図9に示した軌間拡大が始まる地点に近いことが分かる。

③ 図13に示した $t=0$ 時の先頭車軸の位置が205k895mの場合には、同図(b)により90kNを超える大きな横圧は205k940m付近から発生しており、図9に示した軌間拡大が始まる地点に近いことが分かる。しかし、図13(a)から、脱線に至る車輪とレールの相対左右変位（70mm）が生じるのは206k270m付近での7号車および6号車であり、図8に示された脱線号車と比較すると前方車両であることがみてとれる。また、それより後

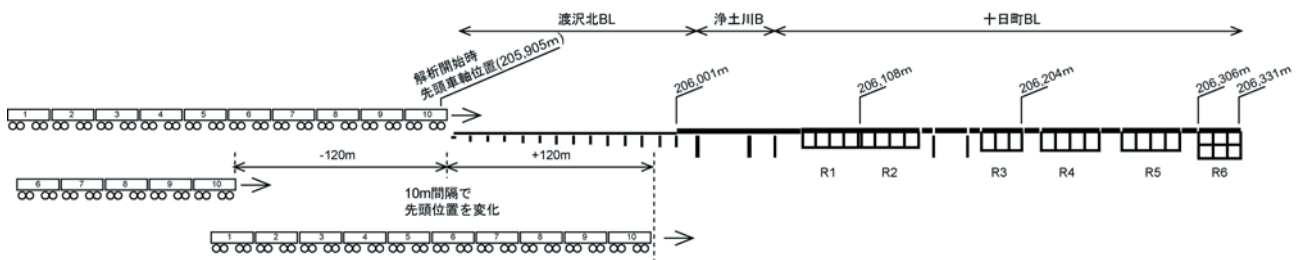
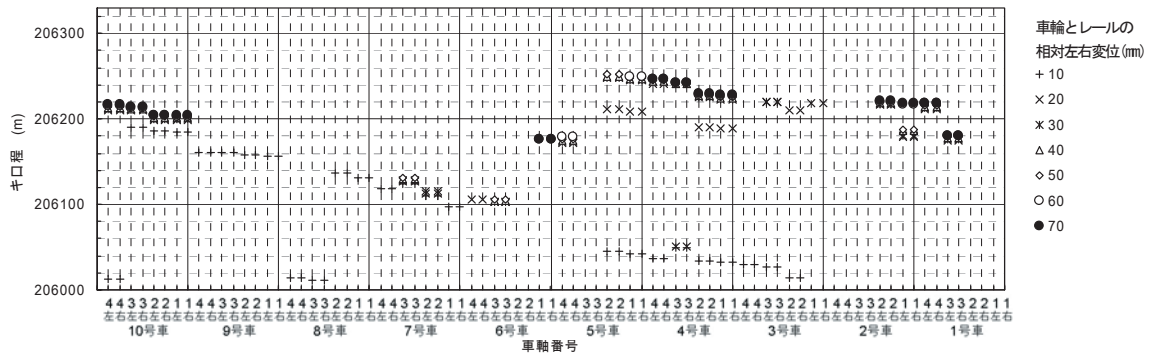
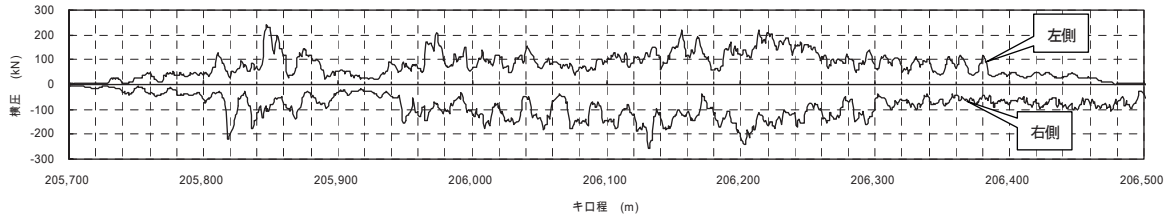


図10 時刻 $t=0$ における先頭車両（車軸）の位置

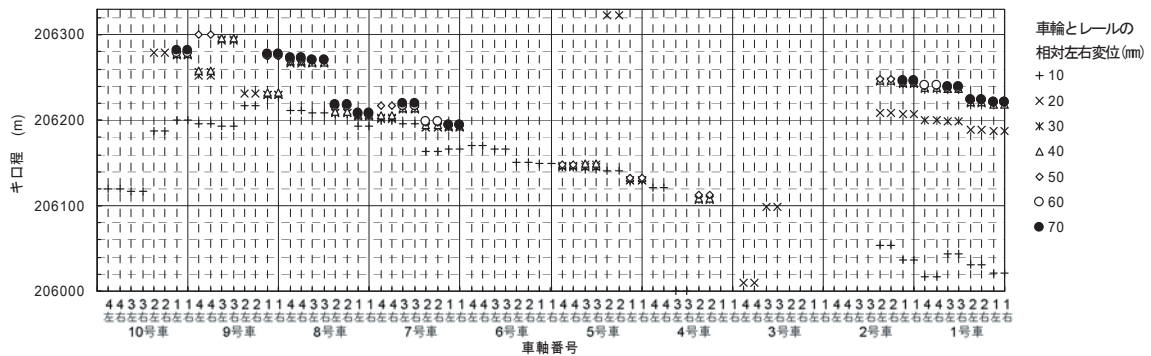


(a) 車輪・レール間の相対変位発生位置



(b) 横圧

図11 $t=0$ 時の先頭車軸の位置：205k785m



(a) 車輪・レール間の相対変位発生位置



(b) 横圧

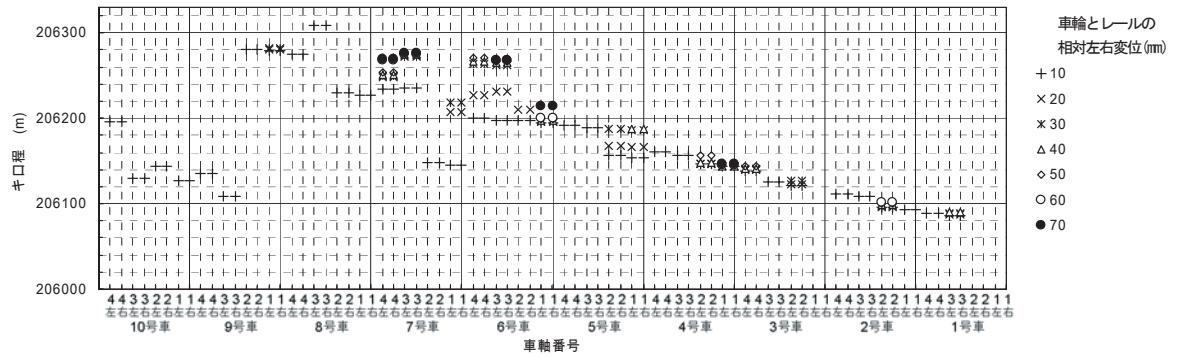
図12 $t=0$ 時の先頭車軸の位置：205k855m

方車両における大きな車輪とレールの相対左右変位の発生地点は、206k200mより起点側であることが分かる。

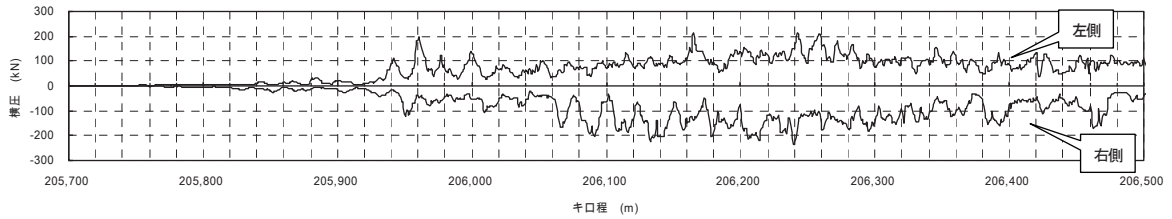
④ 図14に示した $t=0$ 時の先頭車軸の位置が205k935mの場合では、同図(b)により大きな横圧は205k970m付近から発生しており、図9に示した軌間拡大が始まる地点に近いことが分かる。しかし、図14(a)から、脱線に至る車輪とレールの相対左右変位(70mm)が生じるのは、206k300m付近での8号車、206k270m～250m付近での6～4号車および206k150m前後の2号車と1号車

であり、図8に示した脱線号車と比較すると解析で206k300m付近で脱線に至るものは、やや前方車両であることが分かる。

⑤ 図15に示した $t=0$ 時の先頭車軸の位置が205k975mの場合では、同図(b)により大きな横圧は206k000m付近から発生しており、図9に示された軌間拡大が始まる地点よりキロ程がやや後方であることが分かる。一方、脱線に至る車輪とレールの相対左右変位(70mm)が生じるのは206k280m付近での5号車および4号車、206k260m付近の3号車および206k200m付近の2号車と1

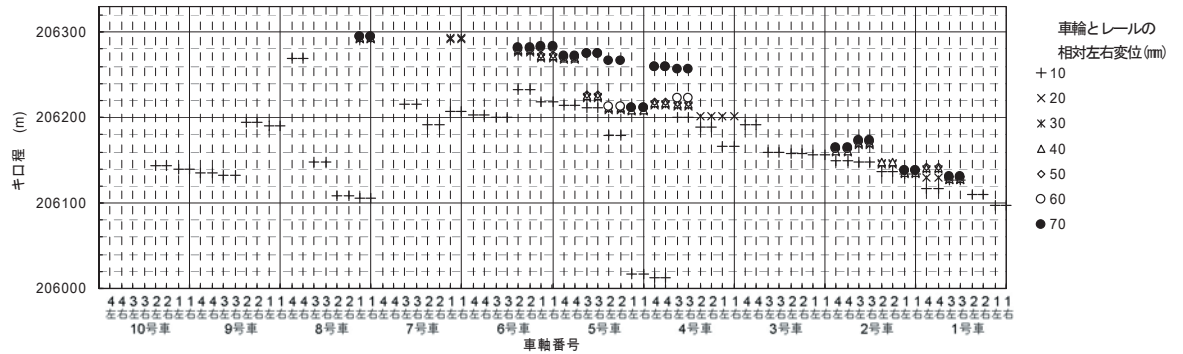


(a) 車輪・レール間の相対変位発生位置

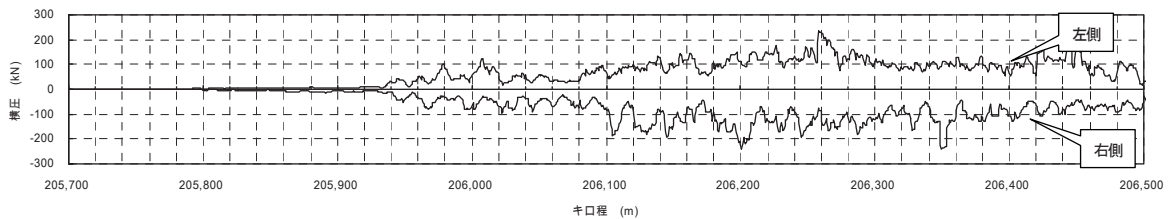


(b) 横圧

図13 $t=0$ 時の先頭車軸の位置：205k895m



(a) 車輪・レール間の相対変位発生位置



(b) 横圧

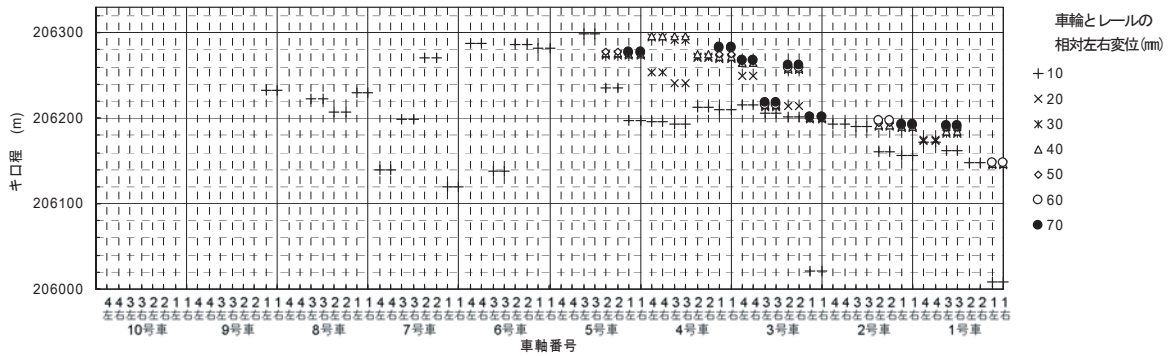
図14 $t=0$ 時の先頭車軸の位置：205k935m

号車であることがみてとれる。3, 4号車に関しては、
図8に示された脱線地点に近い。

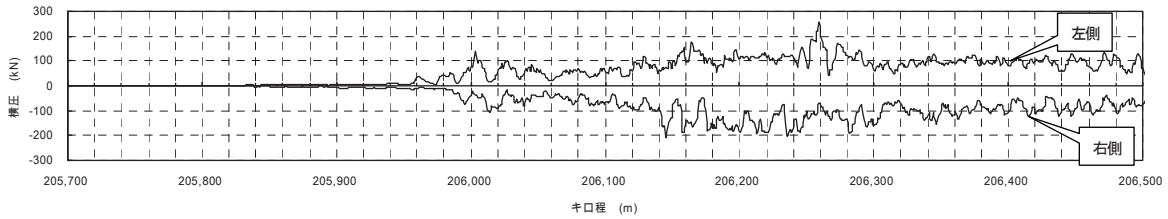
⑥図16に示した $t=0$ 時の先頭車軸の位置が206k015mの場合では、図16(b)をみると大きな横圧は206k020m付近以降から発生しており、図9に示された軌間拡大が始まる地点よりキロ程が、かなり後方となっていることが分かる。また、一方、脱線に至る車輪とレールの相対左右変位 (70mm) が生じるのは、206k250m付近での3号車および206k200m付近の1号車となり、図8に示されたものからみると、206k200m~300m付近で脱線するのは、やや後方の車両となることが分かる。

他の $t=0$ 時の先頭車軸の位置の結果と合わせて、これらの解析結果から、次ぎのことが言える。

①先頭車 (10号車) に関しては、 $t=0$ 時の先頭車軸の位置を205k785m~205k815mとした場合に206k204m~206k206m付近で車輪とレールとの相対左右変位が70mmを超えて脱線に至る解析結果となるが、この場合、後方車両 (2~4号車) の脱線地点が現地調査結果からみて50m~100m程度起点側にずれる地点 (206k200m~206k250m付近) に発生するようになる。この結果からみて、 $t=0$ 時の先頭車軸の位置は、

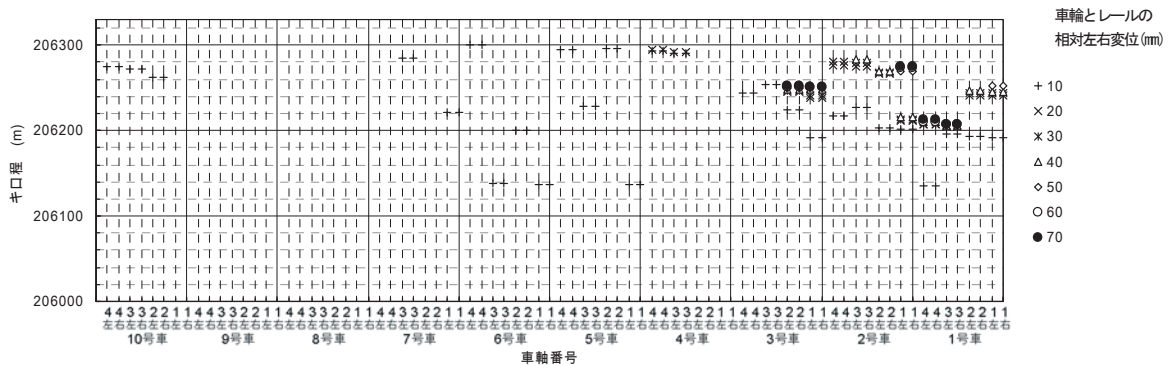


(a) 車輪・レール間の相対変位発生位置

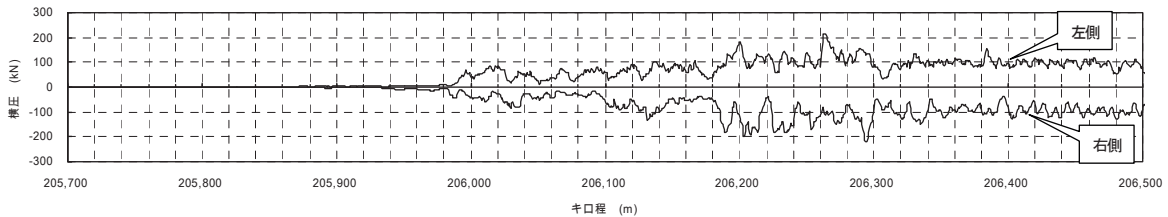


(b) 横圧

図15 $t=0$ 時の先頭車軸の位置：205k975m



(a) 車輪・レール間の相対変位発生位置



(b) 横圧

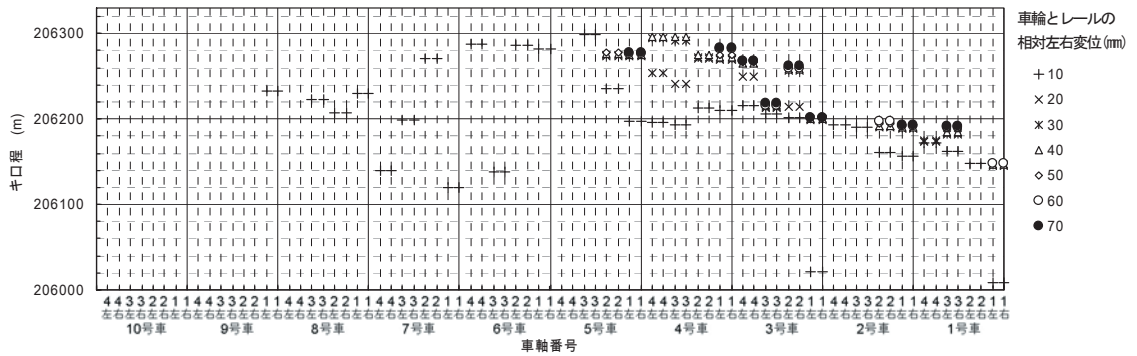
図16 $t=0$ 時の先頭車軸の位置：206k015m

205k815mより終点側であったと考えられる。

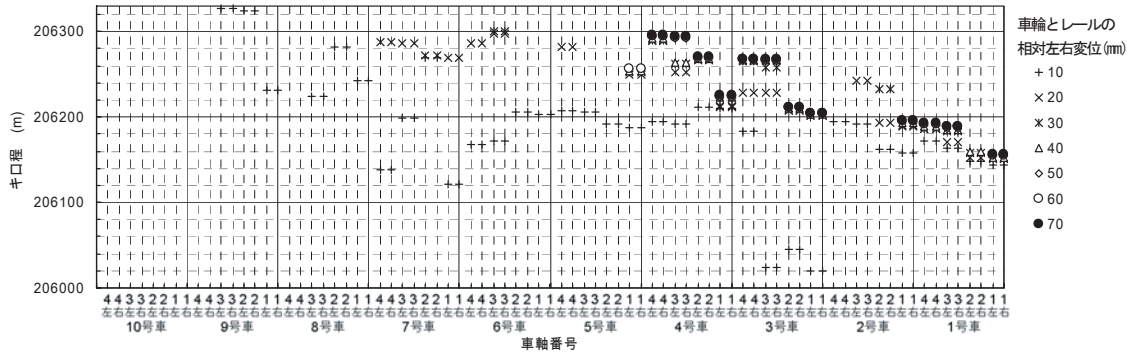
- ②現地調査により得られたような軌間拡大を生じさせる大きな横圧を生じさせるためには、少なくとも最後尾車（1号車）の第1軸が大きな振動を受けている時に205k960m付近（図9参照）に存在していなければならないため、解析において $t=0$ 時の先頭車軸の位置が205k985m付近より起点側にある必要があると考えられる。

- ③現地調査により得られた3および4号車の脱線地点との整合性からみて、比較的よい一致をみるのは、解析

において $t=0$ 時の先頭車軸の位置が205k975m付近で、その前後±20m程度のところである。



(a) 車両間の連結がある場合



(b) 車両間の連結がない場合

図17 車両間の連結が車輪とレールの相対左右変位発生地点に与える影響
($t=0$ 時の先頭車軸の位置：205k975m)

10. 車両間の連結の影響

DIASTARSを用いた解析では、上下および左右方向のばねとダンパー、ならびに、ローリングダンパーで車両同士が連結されているところに特徴がある。

連結の有無による影響を検討するために、図15に示したケースと同じ条件で、車両間の連結がある場合とない場合について解析を行い、両者を比較した。

図17に車両間の連結が車輪とレールの相対左右変位の発生地点や変位量に及ぼす影響を比較して示す。

図17(a)は車両間が連結されている場合で、図15(a)と同じものである。また、図17(b)は車両間の連結がない場合である。

両者を比較すると、全体的に連結がない場合の方が車輪とレール間の相対左右変位がやや大きく生じること、また、脱線に至る車輪とレールの相対左右変位が生じている車軸番号が異なる場合があること（例えば3号車）など、細部に違いが生じていることが分かる。しかし、大きな車輪とレール間の相対左右変位を生じる地点は、全体的にはほぼ同じキロ程で生じており、両者に大きな違いがないことも分かる。

11. 車両上載による構造物応答への影響

DIASTARSを用いた解析のもう一つの特徴は、車両と構造物との動的な相互作用を考慮することができるため、車両の上載による構造物の応答への影響について検討した。

図18に車両の上載の有無による構造物の応答波形の違いについての比較例として、十日町BL R3～R6の応答波形（相対変位）を示す。

相互作用ありの場合の $t=0$ 時の先頭車両（車軸）の位置は、205k975mとした。

図18より、いずれの構造物においても、列車の通過がはじまった後で、特に最大相対変位の発生時刻付近以降において両者の波形に若干の差が生じてくることが分かる。特に十日町BL R5、R6では、最大応答値が、相互作用がある場合に若干小さくなる傾向であることがみてとれる。振動系である車両が上載されることにより構造物の振動が抑制される現象が生じていると考えられる。しかし、波形から相互作用の有無による構造物の最大相対変位応答の差は10～15%程度であるとみなすことができる。

今回の解析では、構造物の応答に著しい塑性変形が生じていない程度の範囲であることなどから、両者の差は比較的小さいと考えられる。

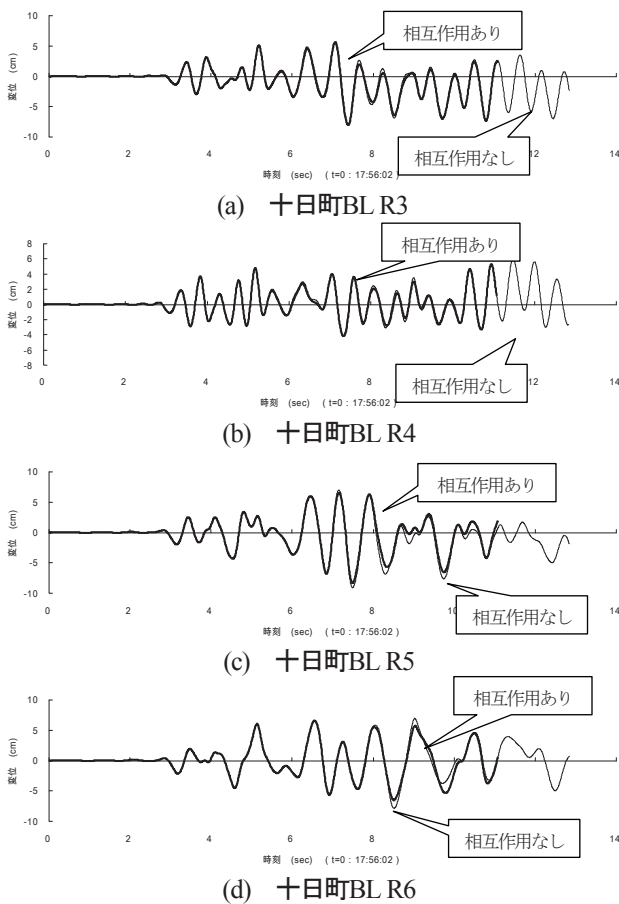


図18 車両の上載の有無による構造物の応答の違いの比較例（相対変位）

12. まとめ

「鉄道車両と構造物との動的相互作用解析プログラム (DIASTARS)」を用いて、渡沢北BLから十日町BL R6 (205k870~206k330m) 区間に対して10両編成の列車を走行させた解析を行った。

本解析から得られた結果は次のとおりである。

- ① 現地脱線地点・脱線号車と解析との対応性
現地調査結果による脱線地点および脱線号車と整合する結果には至らないが、206k300m付近における3, 4号

車の脱線タイミングに近い結果が、用いた推定地震動の $t=0$ 時に先頭車両が205k975m付近にある場合に得られた。

また、現地調査結果による軌間拡大と整合するためには、用いた推定地震動の $t=0$ 時に先頭車両は205k985mより起点側にあれば、205k960mより終点側で大きな横圧を発生させることが分かった。

② 車両間の連結の影響

車両間の連結がない場合の方が、全体的にやや大きめの車輪とレールの相対左右変位が生じること、また、脱線に至る車輪とレールの相対左右変位が生じている車軸番号が異なる場合があることなど、細部には違いが生じるため、詳細な検討を行うためには車両モデルとしては連結を考慮すべきと考えるが、脱線に至る車輪とレール間の相対左右変位を生じる地点は、全体的には同じキロ程付近で生じており、連結の有無による違いは、それほど大きくないと考える

③ 車両上載による構造物応答への影響

車両上載による構造物の応答への影響は余り小さくなく、構造物の最大変位振幅に与える影響としては今回の解析においては15%程度以下と考える。

文献

- 1) 涌井一, 松本信之, 松浦章夫, 田辺誠: 鉄道車両と線路構造物の連成応答解析法に関する研究, 土木学会論文集, No.513/I-31, pp.129-138, 1995.4.
- 2) 松本信之, 田辺誠, 涌井一, 曾我部正道: 非線形応答を考慮した鉄道車両と構造物との連成応答解析法に関する研究, 土木学会論文集A, Vol.63, No.3, pp.533-551, 2007.7.
- 3) 松本信之, 曾我部正道, 涌井一, 田辺誠: 構造物上の車両の地震時走行性に関する検討, 鉄道総研報告, Vol.17, No.9, pp.33-38, 2003.9.
- 4) 松本信之, 曾我部正道, 田辺誠: 編成車両および構造物の位相差振動が地震時走行性に及ぼす影響, 鉄道総研報告, Vol.19, No.9, pp.41-46, 2005.9.