

第4章 構造物の非線形特性の推定

4.1 解析対象構造物

解析対象構造物を図4.1、表4.1に示す。解析対象構造物は、脱線痕跡、地震動の継続時間、列車速度、列車速度、構造形式を考慮し、渡沢北BL（営業キロ程205k870m86）以北をモデル化することとした。具体的には、当該区間の構造物全体を俯瞰し、構造物全体の挙動を再現できるように、渡沢北BL～十日町BL R6までの15構造物を抽出して解析対象とした。

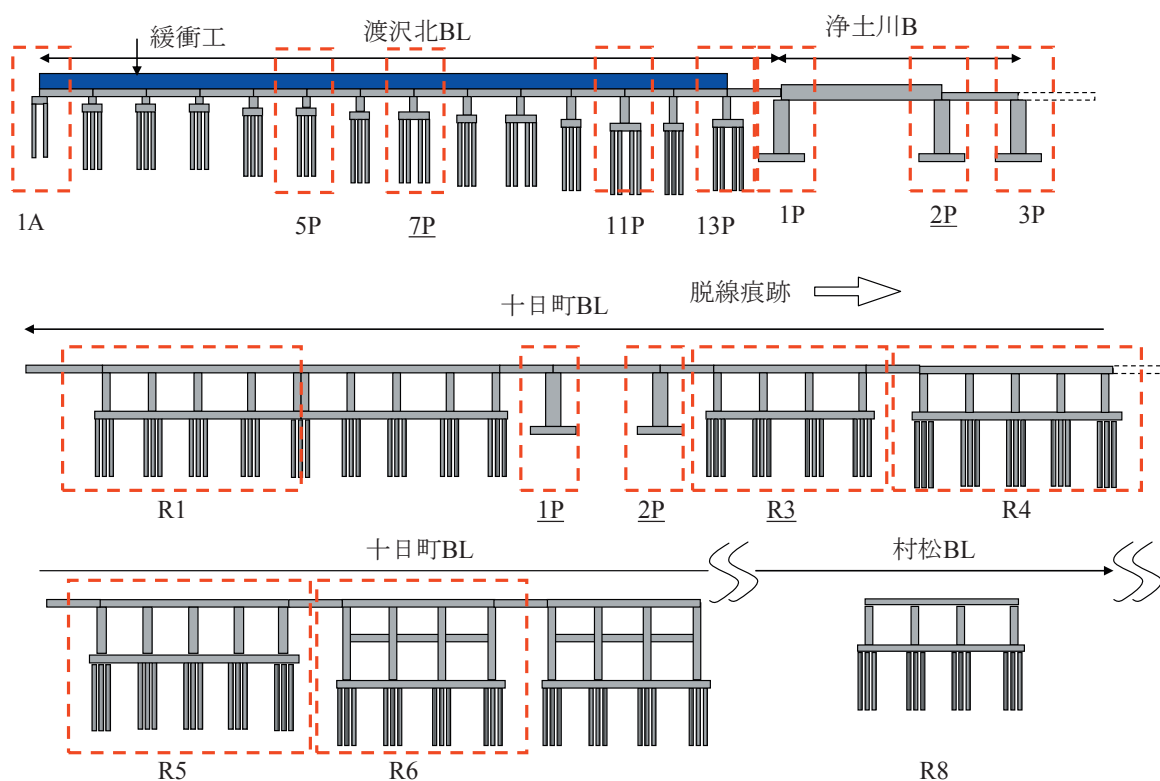
渡沢北BLは、スパン10mのRC単純桁14連、橋台1基、壁式橋脚13基から構成されている。不整形地盤上に位置しており、橋脚高さが2mから5.5mまで変化している。基礎は、打ち込み杭で、杭長は何れも10m前後である。渡沢北BLは、全長に渡りスノーシェルターが設置されている。

浄土川Bは、スパン30mのPC下路桁、前後の調整桁1連、壁式橋脚3基から構成されている。橋脚は何れも直接基礎となっている。

十日町BLは、ラーメン高架橋13基、調整桁12連、壁式橋脚2基から構成されている。ラーメン高架橋は、3又は4径間で、調整桁式と背割式が混在している。高架橋高さは、7.5m(R1)から15m(R13)に変化しており、R6以降は2層構造となっている。基礎は、打ち込み杭で、杭長は何れも5から15mとなっている。調整桁は、スパン20mのPC6主I形桁1連及び10又は12mのRC2主T形桁である。壁式橋脚2基は直接基礎となっている。

当該地区の軌道構造は全てスラブ軌道であり、高欄は場所打ち高欄である。

十日町BL 1Pの一般図と配筋を図4.2、図4.3に、十日町BL R3の一般図と配筋を図4.4、図4.5に示す。



構造物の名称に下線：材料試験実施構造物

BL:高架橋, B:橋梁, P:橋脚, R:ラーメン高架橋, A:橋台

※図中の緩衝工はスノーシェルターを示す。

図4.1 解析対象構造物

表4.1 解析対象構造物一覧

解析 番号	現状キロ程	橋梁名称		形式	基礎 形式	杭長 (m)	高さ(m)	スパン(m)		地質** (再調査)
								起点	終点	
1	205 k 870 m 86	渡沢北BL	1A	橋台	杭	11	—	—	10.00	(No. 2)
	205 k 880 m 86	渡沢北BL	1P	壁式橋脚	杭	9	2.000	10.00	10.00	—
	205 k 890 m 86	渡沢北BL	2P	壁式橋脚	杭	9	2.500	10.00	10.00	—
	205 k 900 m 86	渡沢北BL	3P	壁式橋脚	杭	9	2.500	10.00	10.00	—
	205 k 910 m 86	渡沢北BL	4P	壁式橋脚	杭	11	3.000	10.00	10.00	—
2	205 k 920 m 86	渡沢北BL	5P	壁式橋脚	杭	11	3.000	10.00	10.00	717
	205 k 930 m 86	渡沢北BL	6P	壁式橋脚	杭	11	4.000	10.00	10.00	—
3	205 k 940 m 86	渡沢北BL	7P	壁式橋脚	杭	11	4.000	10.00	10.00	718
	205 k 950 m 86	渡沢北BL	8P	壁式橋脚	杭	12	4.000	10.00	10.00	—
	205 k 960 m 86	渡沢北BL	9P	壁式橋脚	杭	11	5.000	10.00	10.00	—
	205 k 970 m 86	渡沢北BL	10P	壁式橋脚	杭	12	5.000	10.00	10.00	—
4	205 k 980 m 86	渡沢北BL	11P	壁式橋脚	杭	12	5.500	10.00	10.00	719
	205 k 990 m 86	渡沢北BL	12P	壁式橋脚	杭	13	5.500	10.00	9.80	—
5	206 k 000 m 66	渡沢北BL	13P	壁式橋脚	杭	12	5.500	9.80	12.00	720
6	206 k 012 m 66	浄土川B	1P	壁式橋脚	直接	—	10.500	12.00	30.00	(No. 4)
7	206 k 042 m 66	浄土川B	2P	壁式橋脚	直接	—	10.500	30.00	15.00	(No. 4)
8	206 k 057 m 66	浄土川B	3P	壁式橋脚	直接	—	10.500	15.00	15.00	(No. 4)
9	206 k 073 m 37	十日町BL	R1-1	1層ラーメン高架橋	杭	7	7.512	15.00	8.40	(No. 5)
	206 k 081 m 77	十日町BL	R1-2		杭	7	7.487	8.40	8.40	—
	206 k 090 m 17	十日町BL	R1-3		杭	7	7.462	8.40	8.40	(No. 5)
	206 k 098 m 57	十日町BL	R1-4		杭	7	7.436	8.40	8.40	—
	206 k 106 m 97	十日町BL	R1-5		杭	7	7.411	8.40	0.88	(No. 5)
	206 k 108 m 75	十日町BL	R2-1	1層ラーメン高架橋	杭	7	7.406	0.88	8.40	—
	206 k 117 m 15	十日町BL	R2-2		杭	7	7.381	8.40	8.40	—
	206 k 125 m 55	十日町BL	R2-3		杭	7	7.355	8.40	8.40	—
	206 k 133 m 95	十日町BL	R2-4		杭	7	7.330	8.40	8.40	—
	206 k 142 m 35	十日町BL	R2-5		杭	7	7.305	8.40	8.00	—
10	206 k 150 m 86	十日町BL	1P	壁式橋脚	直接	—	10.550	8.00	20.00	(No. 5)
11	206 k 170 m 86	十日町BL	2P	壁式橋脚	直接	—	10.050	20.00	8.00	(No. 5)
12	206 k 179 m 42	十日町BL	R3-1	1層ラーメン高架橋	杭	10	8.995	8.00	7.89	—
	206 k 187 m 31	十日町BL	R3-2		杭	10	8.972	7.89	8.10	(No. 6)
	206 k 195 m 41	十日町BL	R3-3		杭	10	8.947	8.10	7.89	—
	206 k 203 m 30	十日町BL	R3-4		杭	10	8.923	7.89	10.00	(No. 6)
13	206 k 214 m 42	十日町BL	R4-1	1層ラーメン高架橋	杭	14	8.756	10.00	8.34	(No. 7)
	206 k 222 m 76	十日町BL	R4-2		杭	14	8.706	8.34	8.60	(No. 7)
	206 k 231 m 36	十日町BL	R4-3		杭	14	8.654	8.60	8.60	—
	206 k 239 m 96	十日町BL	R4-4		杭	14	8.603	8.60	8.34	—
	206 k 248 m 30	十日町BL	R4-5	杭	14	8.565	8.34	12.00	—	
14	206 k 261 m 42	十日町BL	R5-1	1層ラーメン高架橋	杭	14	9.497	12.00	8.34	(追No. 1)
	206 k 269 m 76	十日町BL	R5-2		杭	14	9.447	8.34	8.60	(追No. 1)
	206 k 278 m 36	十日町BL	R5-3		杭	14	9.395	8.60	8.60	—
	206 k 286 m 96	十日町BL	R5-4		杭	14	9.344	8.60	8.34	—
	206 k 295 m 30	十日町BL	R5-5		杭	14	9.294	8.34	10.00	—
15	206 k 306 m 47	十日町BL	R6-1	2層ラーメン高架橋	杭	10	13.496	10.00	7.84	(追No. 2)
	206 k 314 m 31	十日町BL	R6-2		杭	10	13.445	7.84	8.10	(追No. 2)
	206 k 322 m 41	十日町BL	R6-3		杭	10	13.396	8.10	7.84	—
	206 k 330 m 25	十日町BL	R6-4		杭	10	13.354	7.84	12.00	—

解析対象

※地質（再調査）：各地質調査結果は、以下の資料に基づく

717, 718, 719：建設当初の地質柱状図

(No. 2) (No. 4) (No. 5) (No. 6) (No. 7)：2006年1月調査

(追No. 1) (追No. 2)：2006年1月追加調査

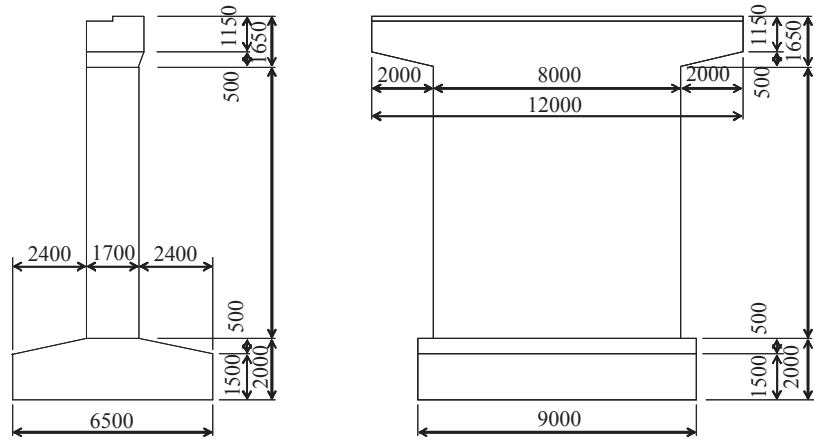
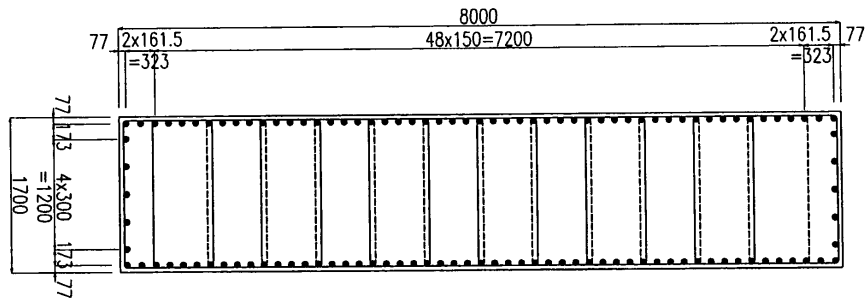


図4.2 十日町BL 1P一般図



鉄筋の種別 : SD345
 軸方向鉄筋 : D22 (線路方向53本, 線路直角方向7本)
 帯鉄筋 : D13-6組-600ctc

図4.3 十日町BL 1P<体配筋

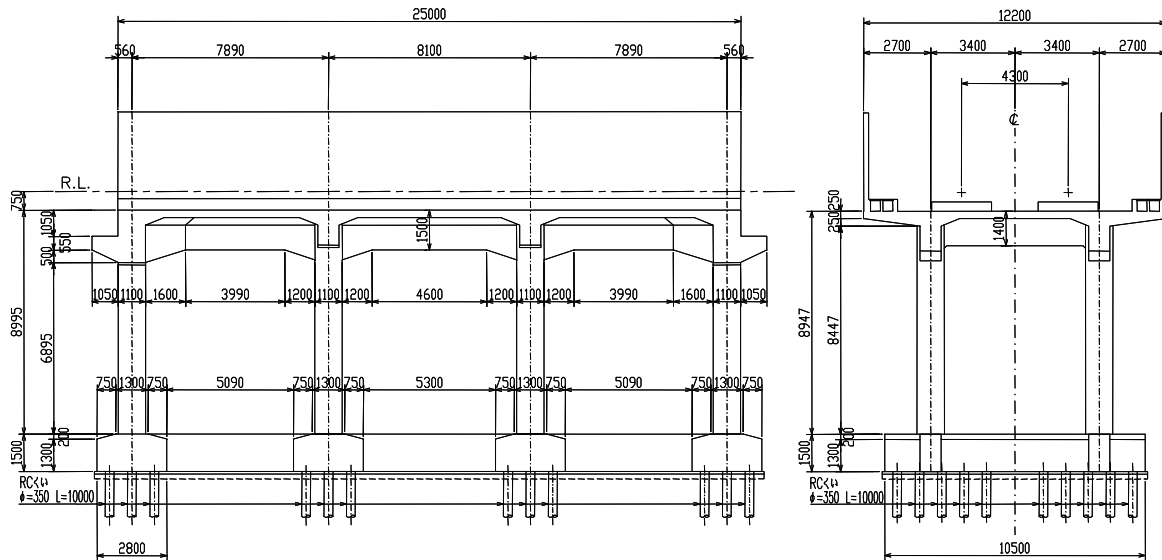
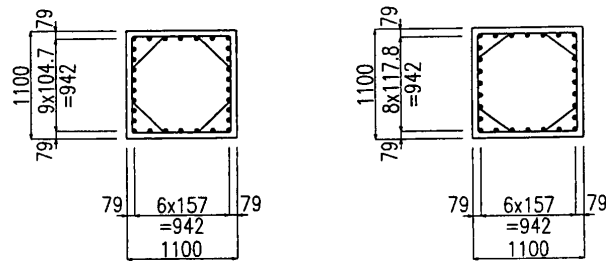


図4.4 十日町BL R3一般図

←線路方向→



(中間C2・C3)

(端部C1・C4)

- 鉄筋の種類 : SD345
 軸方向鉄筋 : D32
 帯鉄筋 : D13-1.5組-150ctc (端部)
 D13-1.5組-300ctc (中間部)

図4.5 十日町BL R3柱配筋

4.2 材料試験

コンクリートおよび軸方向鉄筋の材料特性は、構造物の降伏剛性、および降伏強度に大きな影響を及ぼし、車両挙動解析の精度向上の観点から重要である。そこで、実構造物のコンクリートおよび鉄筋を採取し、強度試験を行った。脱線区間を中心に、渡沢北BL、浄土川B、十

日町BL、村松BLの構造物を対象に6箇所から、コンクリートコアおよび軸方向鉄筋を採取し、材料試験を行った。図4.1、表4.2に材料試験を行った構造物と試験数量を示す。

コンクリートの圧縮試験、および鉄筋の引張試験の結果を表4.3、および表4.4に示す。コンクリート強度の低いものが一部みられたが、脱線区間全体としては概ね設計仕様以上の試験結果が得られており、極端な施工不良

表4.2 調査箇所および試験数量

No.	構造物の名称		コンクリートの圧縮 供試体数(本)	鉄筋の試験片 本数(本)	構造形式	キロ程
1	渡沢北BL	7P	3	1	壁式橋脚	205k940m86
2	浄土川B	2P	3	1	壁式橋脚	206k042m66
3	十日町BL	1P	3	1	壁式橋脚	206k150m86
4		2P	3	1	壁式橋脚	206k170m86
5		R3	3	1	1層ラーメン高架橋	206k187m31
6	村松BL	R8	3	1	1層ラーメン高架橋	206k966m22
合計			18	6		

表4.3 コンクリートの圧縮強度

構造物の名称	圧縮強度 f_{ck} (N/mm ²)	高さ と直径の比 h/d	補正圧縮強度 ¹⁾ f_{ck} (N/mm ²)	平均圧縮強度 f_{ck} (N/mm ²)
渡沢北BL-7P	26.6	1.81	26.2	(19.6)
	16.6	2.08	16.6	
	16.0	2.04	16.0	
浄土川B-2P	30.9	2.01	30.9	31.1
	30.9	1.84	30.5	
	32.3	1.83	31.9	
十日町BL-1P	26.1	2.00	26.1	31.4
	31.5	2.01	31.5	
	36.7	1.93	36.7	
十日町BL-2P	30.8	1.88	30.5	35.4
	32.5	2.07	32.5	
	43.1	2.03	43.1	
十日町BL-R3	43.4	2.09	43.4	(43.1)
	39.7	1.98	39.7	
	46.1	2.12	46.1	
村松BL-R8	28.4	2.07	28.4	34.6
	39.2	2.10	39.2	
	36.3	2.07	36.3	
平均値 ²⁾	→	→	→	33.1

1) h/d による補正後の圧縮強度、 $h/d < 1.90$ の場合、 h/d にしたがって補正する (JIS A1107)

2) 全構造物の平均圧縮強度、各構造物の平均圧縮強度の最大値および最小値を除いた平均値

表4.4 軸方向鉄筋の降伏強度およびヤング係数

構造物の名称	種別	呼び径	降伏強度 f_y (N/mm ²)	ヤング係数 E_s (kN/mm ²)
渡沢北BL-7P	SD345	D22	(385.)	212.
浄土川B-2P	SD345	D29	(342.)	196.
十日町BL-1P	SD345	D22	360.	(188.)
十日町BL-2P	SD345	D29	378.	188.
十日町BL-R3	SD345	D32	378.	195.
村松BL-R8	SD345	D32	360.	(221.)
平均値 ¹⁾	→	→	369.	198.

全構造物の平均特性値、各構造物の平均特性値の最大値および最小値を除いた平均値

はなかったと考えてよい。

試験結果にみられるばらつきの原因が、施工時の工区割や材料の搬入状況など各構造物に依存するものなのか、あるいは製造や施工時のばらつきに依存するものなのかは不明であるが、調査数量が少ないこと、静的非線形解析の目的が走行シミュレーションに用いる構造物の全体挙動の把握であることから、平均値を用いることとした。

具体的には、コンクリートの圧縮強度、鉄筋の降伏強度、および鉄筋のヤング係数とともに、各構造物における平均値を算定し、算定した平均値の最大値および最小値を除いた値の平均値を解析用値とした。解析用値は、全構造物共通とし、以下に示す値とした。なお、解析に用

いる材料係数 γ_c 、 γ_s 、材料修正係数 ρ_m は、すべて1.0とする。

コンクリートの圧縮強度 f_{ck} : 33 N/mm²

軸方向鉄筋の降伏強度 f_{yk} : 370 N/mm²

軸方向鉄筋のヤング係数 E_s : 200 kN/mm²

4.3 解析方法

静的非線形解析モデルの例を図4.6に示す。検討は鉄道構造物等設計標準・同解説(耐震設計)¹⁾および鉄道構造物等設計標準・同解説(コンクリート構造)²⁾に準拠して行った。解析は平面骨組モデルとした。各部材の非

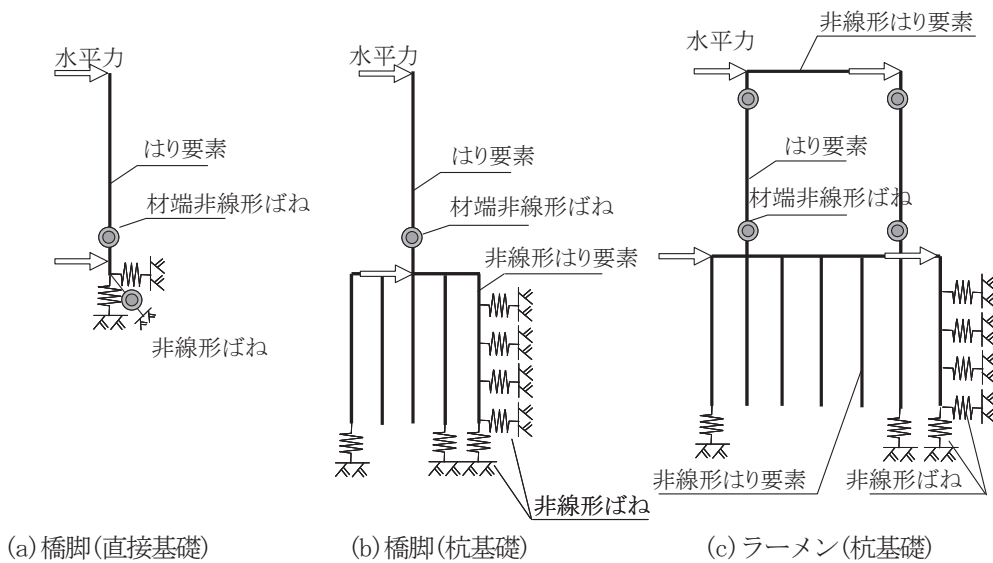
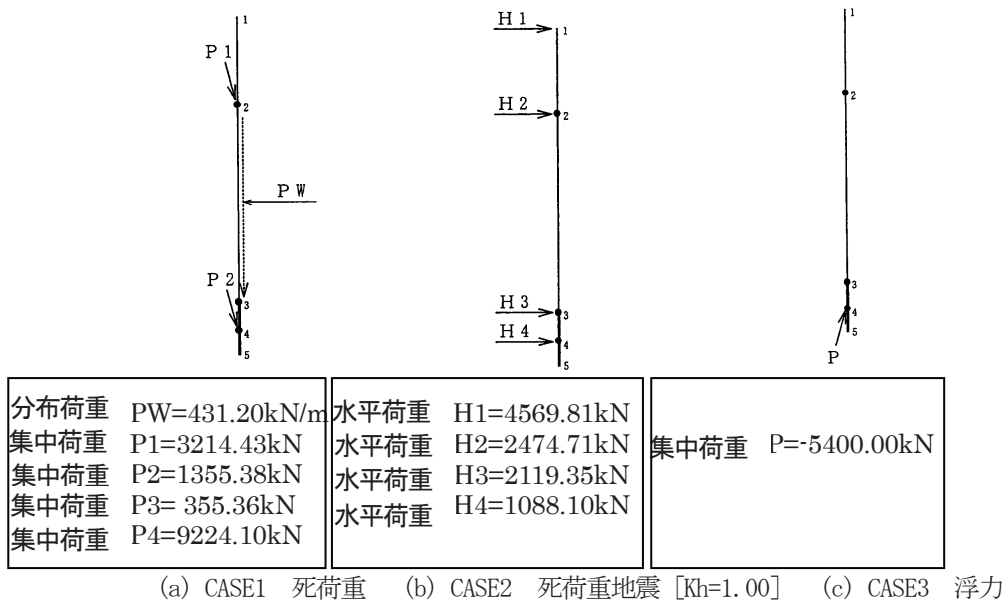


図4.6 静的非線形解析モデルの例

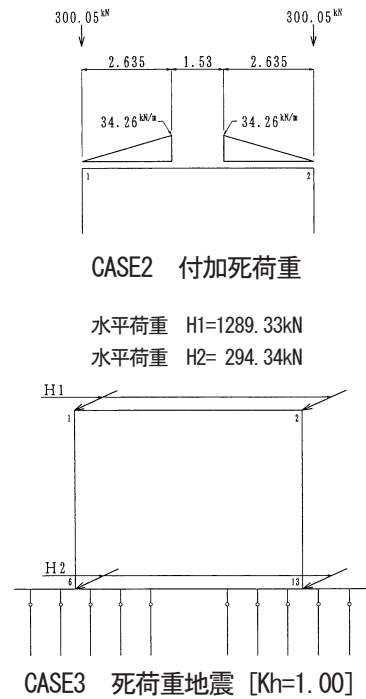
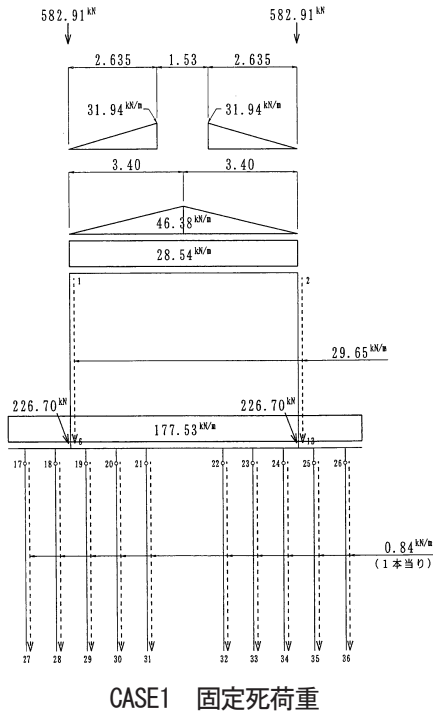


(a) CASE1 死荷重 (b) CASE2 死荷重地震 [Kh=1.00] (c) CASE3 浮力

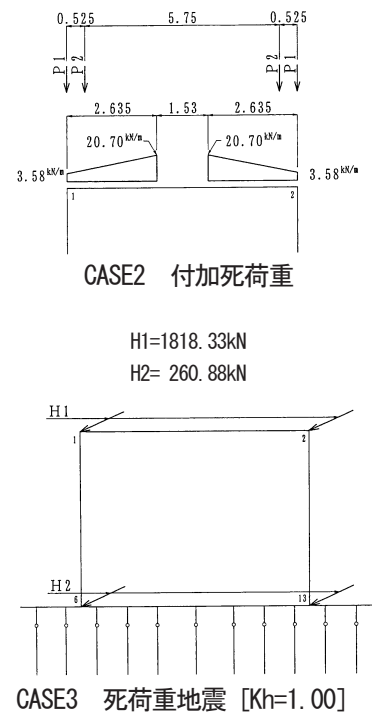
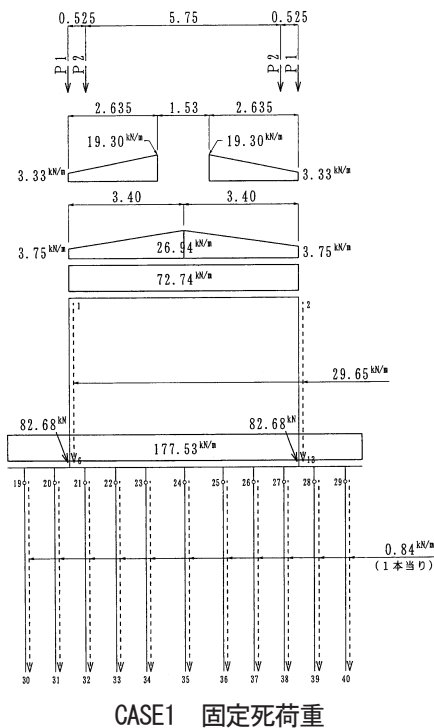
図4.7 十日町BL 1P荷重図

線形特性の設定については、鉄道構造物等設計標準・同解説(耐震設計)によった^{1) 3)}。柱の非線形性は、柱端部に非線形ばねを配置する材端ばねモデルによりモデル化し、その特性を曲げモーメント-部材角関係 ($M-\theta$ モデル) により表現した。横梁および杭は、非線形梁モデルとし、その特性を曲げモーメント-曲率関係 ($M-\phi$ モデル) により表現した。杭と地盤の間には非線形ばね

を配置した。地盤条件は、表4.1に示すように適用した。脱線前後区間及び主用な箇所について新たに地質調査を実施し、その結果を反映し定めた。3桁の数字が建設時の地質調査結果、No.2~7, 追No.1, 追No.2は脱線後に実施した地質調査の結果である。



(a) 中間C2・C3



(b) 端部C1・C4

図4.8 十日町BL R3荷重図

荷重については死荷重のみを考慮した²⁾。荷重の分担については隣接スパンの半分相当とした。荷重はラーメン高架橋の場合は柱と梁の接合部およびフーチング中心に、橋脚の場合はく体の天端とフーチングの中心に水平方向に集中荷重を変位制御により漸増荷重した。十日町BL 1Pの荷重図を図4.7に、十日町BL R3の荷重図を図4.8に示す。

また、十日町BL R1, R2の柱は、図4.9に示すような

鋼板巻き補強が既に実施されていた。補強鋼板等は柱の上下端に定着されていないため、鋼板と柱のすき間を充填したモルタルおよび寝巻きコンクリート分だけ断面が増加したものとして評価した。また、補強後の柱は、根巻きコンクリートの有無により、区間L1とL2で断面が異なるが、解析上は、(b)の平均的な断面を均一に有する部材として評価した。

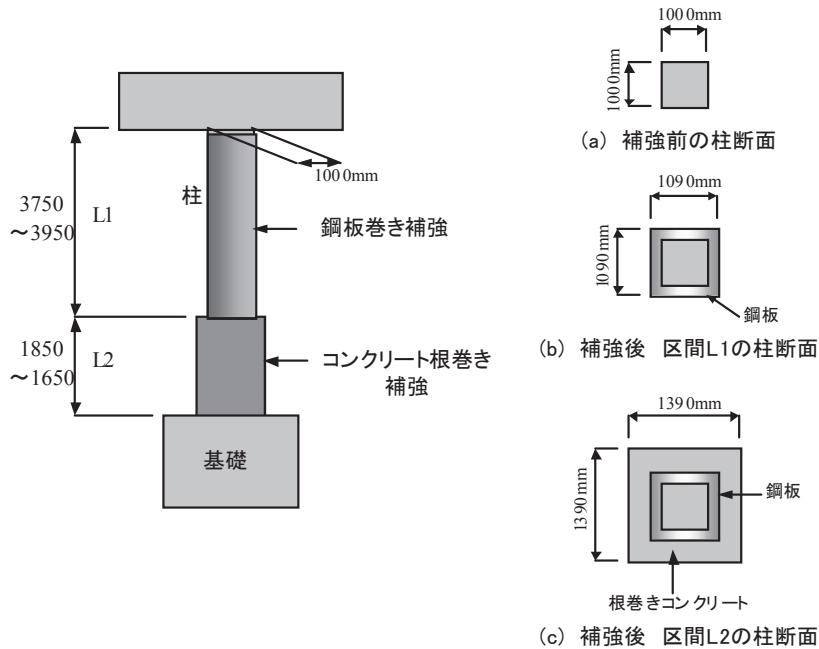


図4.9 十日町BL R1耐震補強状況

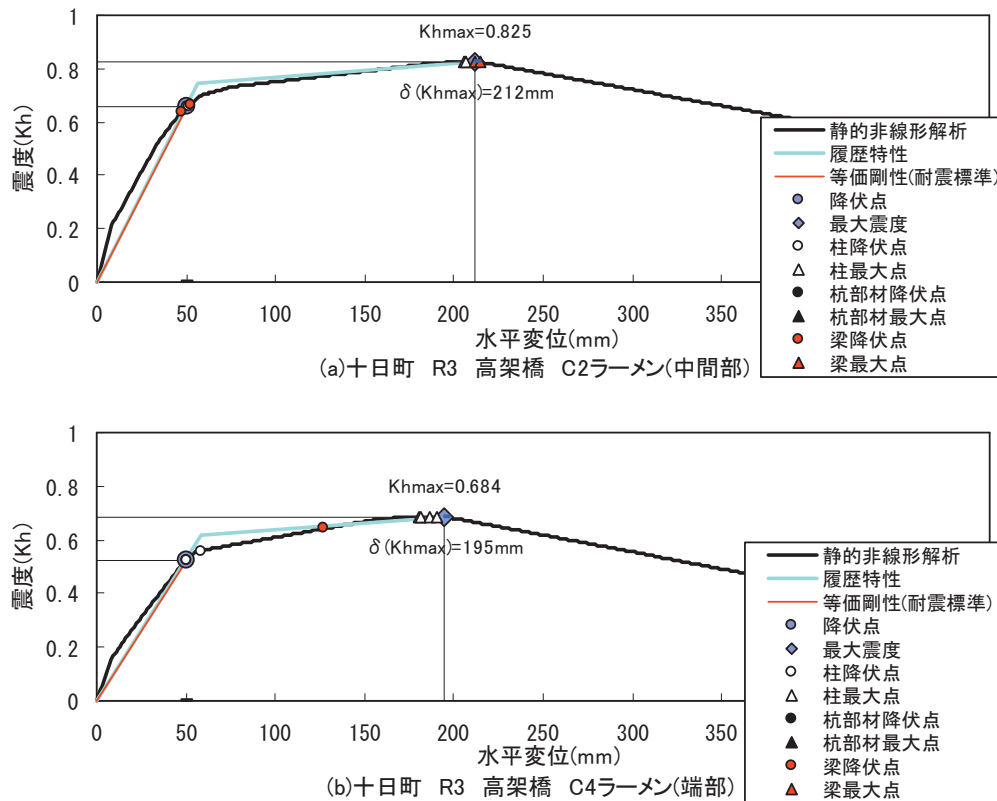


図4.10 十日町BL R3静的非線形解析結果

4.4 解析結果

十日町BL R3の静的非線形解析結果を図4.10に示す。本構造物は柱降伏先行型であり、降伏変位は50mm前後となっている。図に示すような骨格曲線に基づき、各構造物を1質点系でモデル化するための骨格線を定める。ラーメン高架橋の骨格線については、図4.10に示すように中間部と端部柱の骨格曲線を求め、これらから定まる骨格線を質量比に応じて加重平均化することにより求めた。またラーメン高架橋の第1折れ点の震度は、最大震度の90%としてモデル化を行った。これは、実際の骨格曲線を簡易な骨格線で現す場合において、両者の応答ができるだけ整合が取れるように配慮したものである。

静的非線形解析によって得られた結果を、各構造物の降伏過程分類別に、表4.5のように整理し、1質点系モデル用の骨格線モデルを作成した。骨格線モデルの作成結果を図4.11及び表4.6に示す。

- ① 渡沢北BL 1A, 5P, 7P, 11P及びI3Pは、杭周辺地盤が降伏した後、杭が順に降伏し、更に最大耐力に達する点で骨格が変化する傾向を示した。これらについてはトリリニアで骨格曲線をモデル化した。
- ② 浄土川B1Pは、柱降伏後、直接基礎の地盤が降伏する挙動を示し、トリリニアで骨格曲線をモデル化した。
- ③ 浄土川B 2P, 浄土川3P, 十日町BL 1P, 十日町BL 2Pは、いずれも直接基礎であるが、直接基礎の地盤が降伏し変位が増大する挙動を示した。これらについてはバイリニアで骨格曲線をモデル化することとした。
- ④ 十日町BL R1, 十日町BL R3, 十日町BL R4, 十日

町BL R5は、柱が降伏していく挙動となった。バイリニアで骨格曲線をモデル化した。

- ⑤ 十日町BL R6は、杭周辺地盤が降伏し、続いて柱が降伏していく挙動となった。トリリニアで骨格曲線をモデル化した。

図4.11の等価固有周期は耐震標準の定義に従い求めたもので、図中の第1勾配とは必ずしも一致しない。

固有周期の検討結果と地震後に測定した衝撃振動試験の結果を図4.12及び表4.7に示す。衝撃振動試験は、一般に歪レベルが小さい領域での固有周期であるため、一般的に固めの評価となっているが、参考値として比較して示した。

文献

- 1) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説－耐震設計，丸善，1999.11
- 2) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説－コンクリート構造物，丸善，2004.4
- 3) 渡邊忠朋，谷村幸裕，瀧口将志，佐藤勉：鉄筋コンクリート部材の損傷状況を考慮した変形性能算定方法，土木学会論文集，No.683/V-52，2001.8.

表4.5 (a) 降伏の形態（壁式橋脚）

Type	上部構造 構造形式	基礎形式	履歴特性	第1折れ点	第2折れ点	第3折れ点	備考
①	壁式橋脚	杭基礎	トリリニア	周辺地盤 降伏	杭部材過半数 降伏	最大震度	渡沢北1A, 5P, 7P, 11P
	壁式橋脚	杭基礎	トリリニア	杭部材過半数 降伏	最大震度	—	渡沢北13P
②	壁式橋脚	直接基礎	トリリニア	柱降伏	直接基礎 降伏	最大震度	浄土川1P
③	壁式橋脚	直接基礎	バイリニア	直接基礎 降伏	最大震度	—	浄土川2P, 3P, 十日町1P, 2P

表4.5 (b) 降伏の形態（ラーメン高架橋）

Type	上部構造 構造形式	基礎形式	履歴特性	第1折れ点	第2折れ点	第3折れ点	備考
④	1層ラーメン 高架橋	杭基礎	バイリニア	柱初降伏	最大震度	—	十日町R1, R3, R4, R5
⑤	2層ラーメン 高架橋	杭基礎	トリリニア	周辺地盤 降伏	柱降伏	最大震度	十日町R6

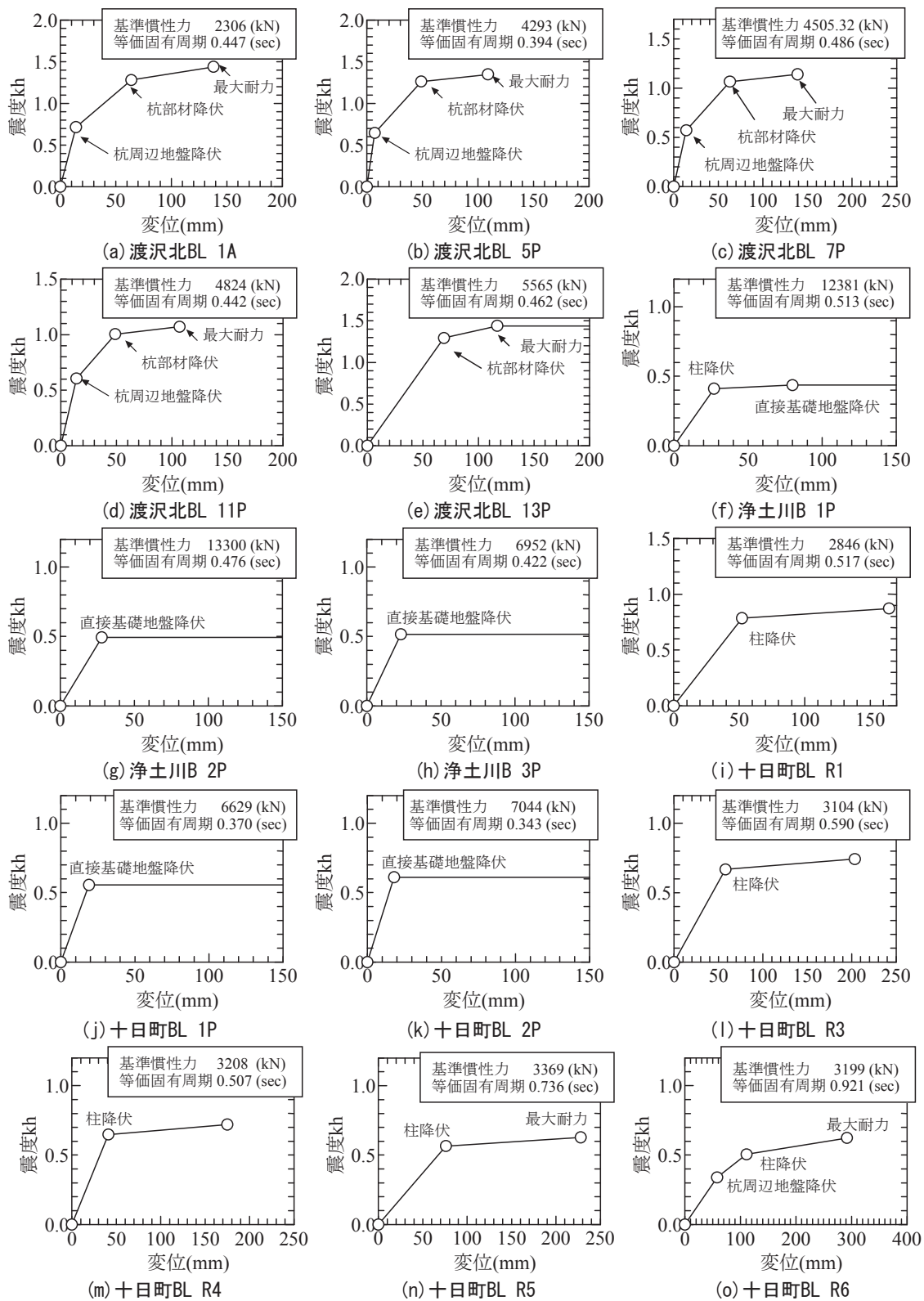


図4.11 静的非線形解析の結果

表4.6 静的非線形解析の結果

解析番号	橋梁名称	構造形式 上部構造	構造形式 基礎構造	基準慣性力 (Kh=1.0)			第1			第2			第3		
				折れ点 震度(Kh)	折れ点 反力(kN)	折れ点 変位(mm)	折れ点 震度(Kh)	折れ点 反力(kN)	折れ点 変位(mm)	折れ点 震度(Kh)	折れ点 反力(kN)	折れ点 変位(mm)	折れ点 震度(Kh)	折れ点 反力(kN)	折れ点 変位(mm)
1	渡沢北 1A	橋台	杭基礎	0.715	1648.64	14.00	117760.0	1.282	2956.02	64.00	26147.66	1.440	3320.34	138.00	4923.17
2	渡沢北 5P	橋脚	杭基礎	0.645	2768.77	7.00	395538.0	1.263	5421.63	49.00	63163.43	1.348	5786.51	109.00	6081.27
3	渡沢北 7P	橋脚	杭基礎	0.571	2572.54	14.00	183752.7	1.065	4798.17	63.00	45420.98	1.140	5136.06	139.00	4446.04
4	渡沢北 11P	橋脚	杭基礎	0.605	2918.71	14.00	208479.1	1.004	4843.61	49.00	54997.13	1.071	5166.84	107.00	5572.91
5	渡沢北 13P	橋脚	杭基礎	1.293	7196.39	69.00	104295.4	1.439	8008.97	117.00	16928.85	1.439	8008.97	500.00	0.00
6	浄土川 1P	橋脚	直接基礎	0.411	5088.61	27.00	188467.1	0.437	5410.52	80.00	6073.72	0.437	5410.52	500.00	0.00
7	浄土川 2P	橋脚	直接基礎	0.494	6570.47	28.00	234659.7	0.494	6570.47	500.00	0.00				
8	浄土川 3P	橋脚	直接基礎	0.516	3587.64	23.00	155984.3	0.518	3601.55	500.00	29.15				
9	十日町 R1	1層4径間	杭基礎	0.785	2234.67	52.10	42892.02	0.872	2482.97	164.40	2211.04				
10	十日町 1P	橋脚	直接基礎	0.556	3685.97	19.00	193998.3	0.556	3685.97	500.00	0.00				
11	十日町 2P	橋脚	直接基礎	0.611	4304.20	18.00	239122.3	0.611	4304.20	500.00	0.00				
12	十日町 R3	1層3径間	杭基礎	0.668	2073.89	57.80	35880.45	0.742	2304.32	203.50	1581.54				
13	十日町 R4	1層4径間	杭基礎	0.648	2077.37	41.40	50209.50	0.720	2308.19	174.60	1732.53				
14	十日町 R5	1層4径間	杭基礎	0.565	1904.35	76.10	25013.14	0.628	2115.95	99.00	9272.34				
15	十日町 R6	2層3径間	杭基礎	0.340	1074.46	58.00	18432.91	0.506	1583.40	111.00	9753.19	0.623	1959.83	292.00	2116.05

表4.7 各構造物の固有周期

解析番号	橋梁名称	構造形式 上部構造	構造形式 基礎構造	基準慣性力 (Kh=1.0)	第1		第2		第3	
					折れ点 震度(Kh)	折れ点 反力(kN)	折れ点 震度(Kh)	折れ点 反力(kN)	折れ点 震度(Kh)	折れ点 反力(kN)
1	渡沢北 1A	橋台	杭基礎	2306	117760	0.280	0.280	—	—	—
2	渡沢北 5P	橋脚	杭基礎	4293	395538	0.208	0.208	0.144	0.69	0.69
3	渡沢北 7P	橋脚	杭基礎	4505	183753	0.313	0.313	0.152	0.49	0.49
4	渡沢北 11P	橋脚	杭基礎	4824	208479	0.304	0.304	—	—	—
5	渡沢北 13P	橋脚	杭基礎	5566	104295	0.462	0.462	0.134	0.29	0.29
6	浄土川 1P	橋脚	直接基礎	12381	188467	0.513	0.513	0.282	0.55	0.55
7	浄土川 2P	橋脚	直接基礎	13301	234660	0.476	0.476	0.292	0.61	0.61
8	浄土川 3P	橋脚	直接基礎	6953	155984	0.422	0.422	0.195	0.46	0.46
9	十日町 R1	1層4径間	杭基礎	2846	42892	0.515	0.515	0.241	0.47	0.47
10	十日町 1P	橋脚	直接基礎	6629	193998	0.370	0.370	—	—	—
11	十日町 2P	橋脚	直接基礎	7045	239122	0.343	0.343	0.234	0.68	0.68
12	十日町 R3	1層3径間	杭基礎	3104	35880	0.588	0.588	0.315	0.54	0.54
13	十日町 R4	1層4径間	杭基礎	3208	50210	0.506	0.506	0.372	0.74	0.74
14	十日町 R5	1層4径間	杭基礎	3369	25013	0.734	0.734	0.410	0.56	0.56
15	十日町 R6	2層3径間	杭基礎	3199	18433	0.833	0.833	0.546	0.66	0.66

