

地震観測記録に基づく 鋼管矢板井筒基礎の振動特性検討

原島 実¹・森 洋²・新井曜子³・竹田哲夫⁴

¹正会員 リテックエンジニアリング株式会社 技術本部 (〒107-0052 東京都港区赤坂6-4-2 赤坂MSビル)
E-mail:harashima@retec.co.jp

²非会員 弘前大学准教授 農学生命科学部 地域環境工学科 (〒036-8561 青森県弘前市文京町3)
E-mail:h-mori@cc.hirosaki-u.ac.jp

³正会員 リテックエンジニアリング株式会社 技術本部 (〒107-0052 東京都港区赤坂6-4-2 赤坂MSビル)
E-mail:araiy@retec.co.jp

⁴非会員 リテックエンジニアリング株式会社 (〒107-0052 東京都港区赤坂6-4-2 赤坂MSビル)
E-mail:takeda@retec.co.jp

本報文は、レインボーブリッジ側橋部の橋脚基礎で、東北地方太平洋沖地震など過去10年間に観測された13地震による振動特性を整理し、特に、近距離および遠距離地震に対する鋼管矢板井筒基礎での地震時挙動を検討したものである。鋼管矢板井筒基礎部の卓越周期は、時間の経過に伴って変化し、加速度が大きくなるに従って長周期化する傾向にあった。また、鋼管矢板井筒基礎部全体で、ロッキングの様な変形はほとんど見られず、頂版コンクリート部で回転拘束された独立杭の集合体に近似した変形挙動を示した。

Key Words : Strong Motion Observation, the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, Steel Pipe Steel Pile Foundation, Vibration Properties

1. はじめに

軟弱地盤に架設されている東京ゲートブリッジや木曽川橋などを代表とする長大橋梁の基礎には、鋼管矢板井筒基礎が多く採用されているが、地震観測記録から地震時の応答特性や振動特性を検討した例は、ほとんど報告されていない。

レインボーブリッジ(吊橋)側橋部(3径間+4径間+3径間連続桁橋)の基礎には、鋼管矢板井筒基礎が採用されており、1992年以降、側橋部中央のP31橋脚基礎部(写真-1)で、地震観測が行われてきた。

本報文は、東京都内でも震度5強を観測した2011年東北地方太平洋沖地震での観測記録、ならびに過去10年間の地震観測記録を整理し、鋼管矢板井筒基礎の地震時挙動や振動特性を検討したものである。

2. 橋梁と基礎の概要

P31橋脚基礎は、東京港を横断するレインボーブリッジのお台場側橋部に位置している(写真-2)。基礎は、

小判形断面(長手方向約51.5m、短手方向約39.9m)で高さ約25.5mの鋼管矢板井筒基礎である。橋脚は、高さ約47mの2層門形ラーメン構造で、下部の約18.1mはRC柱、上部の約28.9mは鋼製柱で構成されている。また、2層門形ラーメンの上層に高速11号台場線、下層には臨海道路と新交通システムおよび歩道が併設されている(図-1)。

鋼管矢板井筒基礎の頂版コンクリートの厚さは9.8mあり、外径1.2mの鋼管矢板が使われている。頂版部では周囲に厚さ25mmの鋼管が100本、頂版部より下の4.7m区間では周囲および隔壁部に厚さ23mmの鋼管が205本、さらに下の11m区間では厚さ18mmの鋼管が205本配置されており、継手はP-P型(D=165.2mm, t=11mm)である。なお、耐震設計では、レベル2地震動に対して側橋部全体をフレームでモデル化した動的解析を行っており、鋼管矢板井筒基礎は1本の梁モデルとし、剛性を建設省土木研究所で開発された鋼管矢板井筒基礎の3次元非線形静的解析プログラムによる変形モードに適合するように設定している。ちなみに、継手のずれ(せん断変形)に対する結合度を表す合成効率 η が1.0の場合は完全剛結、0.0の場合は各々の鋼管矢板が独立杭となるが、動的解析では独立杭に近い0.0015が使用されている^{1,2)}。



写真-1 レインボーブリッジ全景³⁾



写真-2 P31 橋脚全景

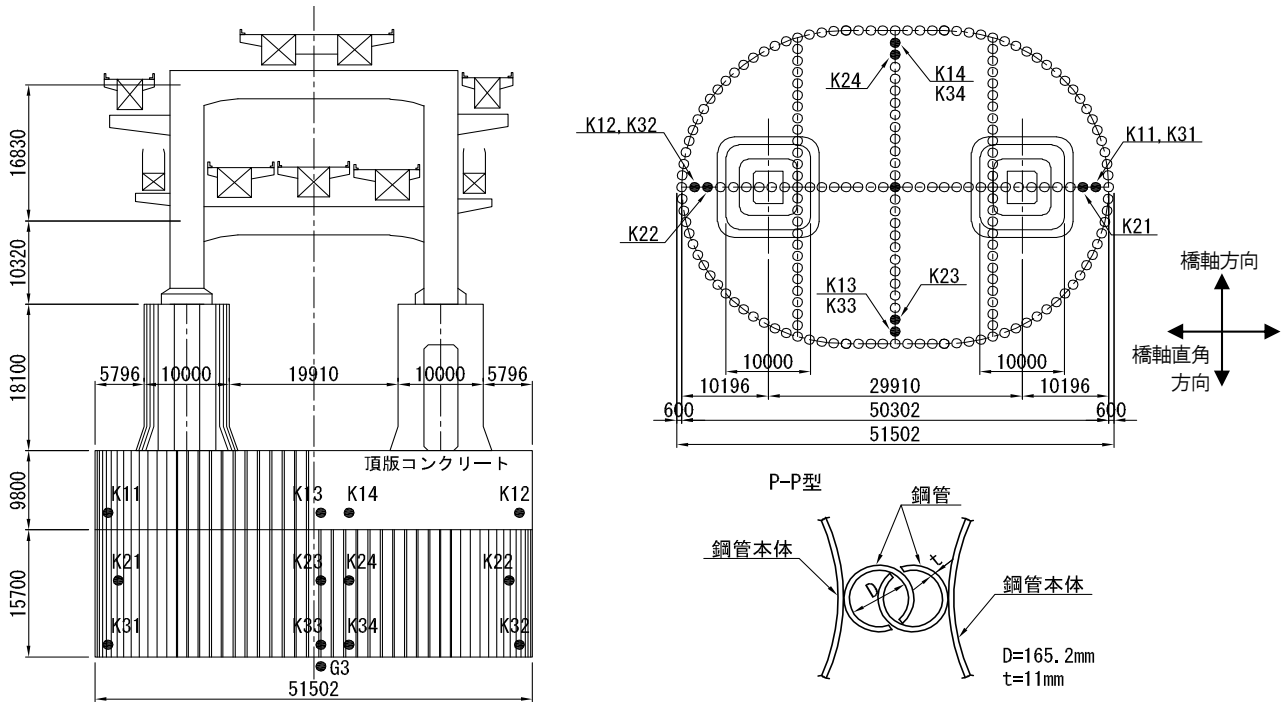


図-1 P31 橋脚基礎一般図・継手構造図^{4・5)}

3. 地震観測

(1) 地震観測システム

強震計の設置位置を図-2に示す。基礎部では上段、中段、下段の深度方向それぞれに4か所強震計が設置されている。ただし、強震計K11、K23およびK24については、計器故障のため欠測とした。

また、基礎から50m離れた地盤の地表面 (G1) と工学的基盤面 (G2) に強震計が設置されている。

(2) 観測地震

千代田区および中央区で震度3以上の地震が観測されたときの過去約10年間における基盤面 (G2) での観測地震の諸元を表-1に、これらの観測波の加速度応答スペクトルを図-3に示す。ここで、xは橋軸方向、yは橋軸直角方向およびzは鉛直方向を示す。

観測波形のデータ処理はFFTを使用し、基線補正は単

純平平均値によるシフト補正、スペクトルの平滑化はハニングウィンドウを用いている⁶⁾。

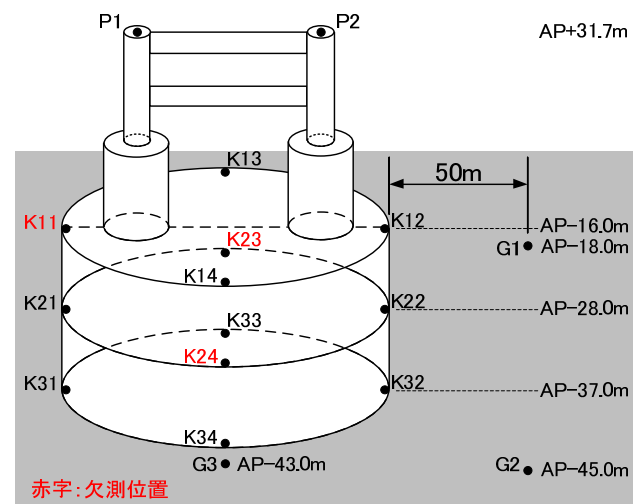


図-2 強震計設置位置図^{4・5)}

表-1 検討対象地震諸元一覧表⁷⁾

地震 番号	発生年月日	発生時刻	マグニ チュード	震源地	震源位置		震源 深さ (km)	震央 距離 (km)	継続 時間 (sec)	震 度		P31基盤 観測値		
					北緯	東経						G2(X)	G2(Y)	G2(Z)
					度 分	度 分						gal	gal	gal
01	2003年9月20日	12:54:52.2	5.8	千葉県南部	35 13.1'	140 18.0'	70	67	100.24	4	3	-14.98	-15.47	4.82
02	2003年10月15日	16:30:35.7	5.1	東京湾	35 36.8'	140 2.9'	74	25	72.99	3	4	31.13	33.08	7.14
03	2004年10月6日	23:40:40.1	5.3	茨城県南部	35 59.3'	140 5.3'	66	48	98.99	4	4	8.76	-11.54	-4.85
04	2004年10月23日	17:56:00.3	6.8	新潟県中越地方	37 17.5'	138 52.0'	13	201	193.24	4	3	5.43	-5.04	-4.06
05	2005年7月23日	16:34:56.3	6	千葉県北西部	35 34.9'	140 8.3'	73	34	138.74	4	4	-42.69	-33.20	10.68
06	2005年8月16日	11:46:25.7	7.2	宮城県沖	38 8.9'	142 16.6'	42	358	239.49	3	4	-11.60	9.31	4.43
08	2006年8月31日	17:18:18.6	4.8	東京湾	35 37.9'	140 1.4'	76	23	59.24	3	3	-13.28	-20.42	5.49
15	2009年8月9日	19:55:52.1	6.8	東海道南方沖	33 7.6'	138 24.2'	333	306	160.74	4	3	-11.99	17.12	8.00
16	2009年8月11日	5:07:05.7	6.5	駿河湾	34 47.1'	138 29.9'	23	150	140.74	4	3	-8.58	8.51	-5.00
22	2011年3月11日	14:46:18.1	9	三陸沖	38 6.2'	142 51.6'	24	389	799.74	5強	5弱	58.96	-69.61	-35.22
23	2011年3月11日	15:15:34.2	7.6	茨城県沖	36 7.2'	141 15.1'	43	144	440.49	4	—	-21.58	25.05	-12.70
27	2011年4月11日	17:16:12.0	7	福島県浜通り	36 56.7'	140 40.3'	6	167	251.74	4	3	8.82	-8.79	-6.16
30	2011年4月16日	11:19:31.6	5.9	茨城県南部	36 20.4'	139 56.7'	79	80	135.74	4	3	-14.04	13.43	-6.81

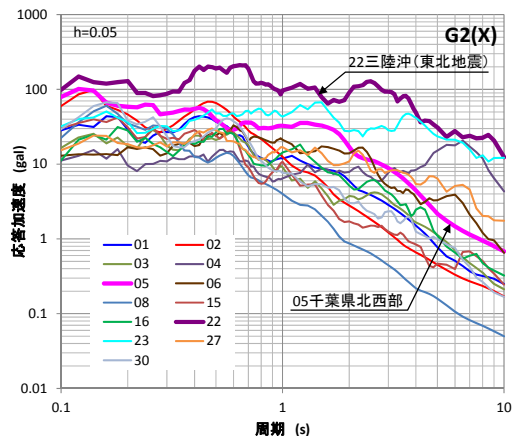


図-3 観測波加速度応答スペクトル

4. 検討用地震波の選定

詳細検討を実施するための地震波形は、どの周期帯でも応答加速度が一番大きかった、地震番号22の三陸沖の2011年東北地方太平洋沖地震（以下、東北波）と、東北波に比べて近距離で発生した地震の中から最大加速度が

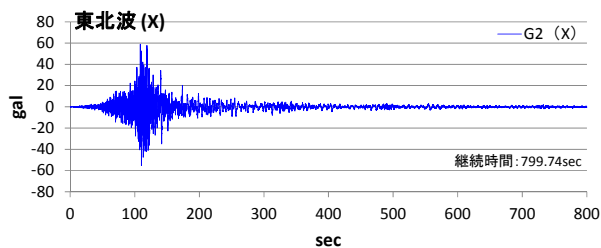


図-4 東北波G2観測波形

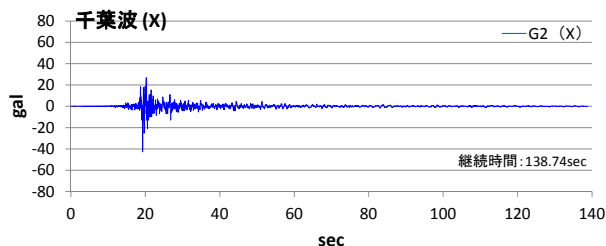


図-5 千葉波G2観測波形

比較的大きい地震番号05の千葉県北西部地震（以下、千葉波）を表-1の中から選定した。

両地震の基盤面（G2）での観測波形x成分（橋軸方向）を図-4、図-5に示す。また、地表面（G1）および基盤面（G2）のx成分およびy成分（橋軸直角方向）のフーリエスペクトル図を図-6、図-7に示す。

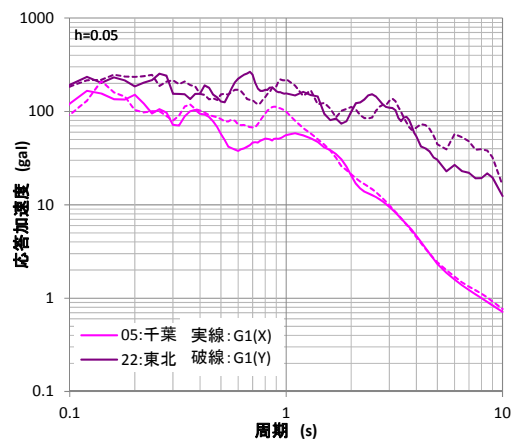


図-6 G1加速度応答スペクトル

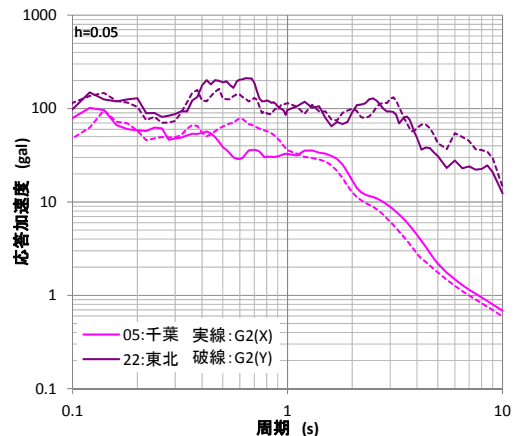


図-7 G2加速度応答スペクトル

東北波は継続時間が長く、長周期成分のパワーが相対的に大きいですが、継続時間が短い千葉波では、長周期成分のパワーが小さい。

5. 自由地盤の地震応答解析⁸⁾

橋脚基礎の地震時挙動と振動特性を検討するにあたっては、地盤そのものの挙動や地盤物性を把握しておく必要がある。そのため、構造物の影響を受けない自由地盤とみなすG1およびG2観測波形を用いて、東北波および千葉波のシミュレーション解析（SHAKE）を行った。

地層構成を図-8（左側）に、各地層のG- γ 曲線・h- γ 曲線を図-9⁹⁾に、せん断ひずみおよび減衰定数の解析結果を図-8（右側）に示す。また、図-10、図-11には基盤面にG1観測波形を入力した時の、地表面での解析波形とG2観測波形を示しており、東北波および千葉波とも再現性は良いと考える。

図-8に示された東北波の最大せん断ひずみは、深度12.7～15.5m（シルト質砂のYc2層）で0.35%であり、等価剛性は初期剛性の30%程度まで低下している。一方、千葉波の最大せん断ひずみは、東北波と同深度で発生しているものの、0.081%と東北波よりも小さく、40%程度まで剛性が低下している。

なお、等価剛性を用いた地盤の1次固有周期は、東北波ではX方向で1.03秒、Y方向で1.00秒、千葉波ではX方向で0.94秒、Y方向で0.97秒であった。

地層番号	深度 (m)	地層区分	東北波				千葉波			
			せん断ひずみ (%)	減衰定数 初期値 収束値	せん断ひずみ (%)	減衰定数 初期値 収束値	せん断ひずみ (%)	減衰定数 初期値 収束値	せん断ひずみ (%)	減衰定数 初期値 収束値
地表	0.0		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	3.50	シルト(Yc2)	0.02	5.3	0.017	4.8	0.017	4.8	0.017	4.8
2	7.00		0.08	6.8	0.041	6.0	0.041	6.0	0.041	6.0
3	10.50		0.13	8.4	0.046	6.1	0.046	6.1	0.046	6.1
4	12.70		0.17	9.1	0.054	6.3	0.054	6.3	0.054	6.3
5	15.50	シルト質砂	0.35	15.0	0.081	10.1	0.081	10.1	0.081	10.1
6	18.00		0.01	4.6	0.005	4.1	0.005	4.1	0.005	4.1
7	20.50	シルト混り細砂 (Eds)	0.01	4.7	0.007	4.2	0.007	4.2	0.007	4.2
8	23.00		0.02	4.8	0.008	4.2	0.008	4.2	0.008	4.2
9	25.20	細砂(Eds)	0.01	4.5	0.006	4.1	0.006	4.1	0.006	4.1
10	27.50		0.01	4.5	0.007	4.2	0.007	4.2	0.007	4.2
11	28.50	砂質シルト(Edc)	0.02	6.0	0.013	4.6	0.013	4.6	0.013	4.6
12	31.60		0.02	5.2	0.013	4.6	0.013	4.6	0.013	4.6
13	35.30	砂礫(Edg)	0.00	4.0	0.002	3.8	0.002	3.8	0.002	3.8
14	37.30	固結シルト(Km)	0.01	4.3	0.005	4.1	0.005	4.1	0.005	4.1
基盤			最大値 = 0.35	最大値 = 15.0	最大値 = 0.081	最大値 = 10.1	最大値 = 0.081	最大値 = 10.1	最大値 = 0.081	最大値 = 10.1

図-8 せん断ひずみ、減衰定数震度分布

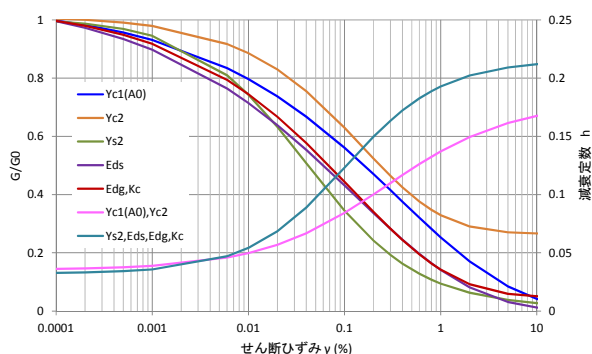


図-9 G- γ 曲線・h- γ 曲線

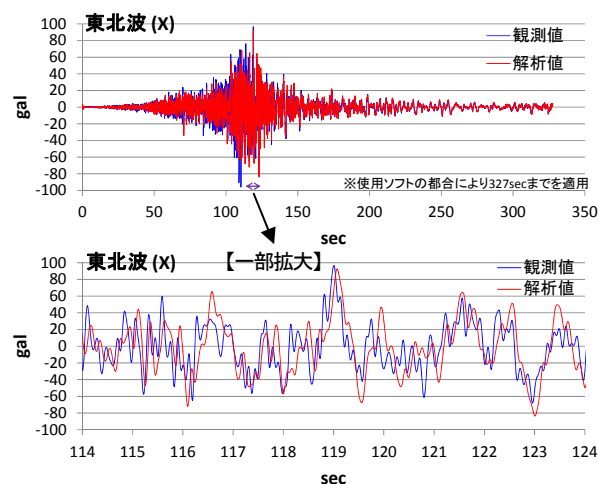


図-10 東北波の地震解析波との比較

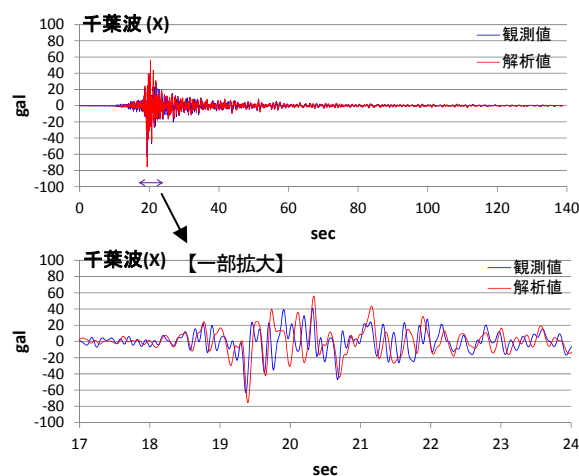


図-11 千葉波の地震解析波との比較

6. 基礎の地震時挙動と振動特性

東北波および千葉波における基礎の観測波形（K14 (X)）を図-12、図-13に示す。

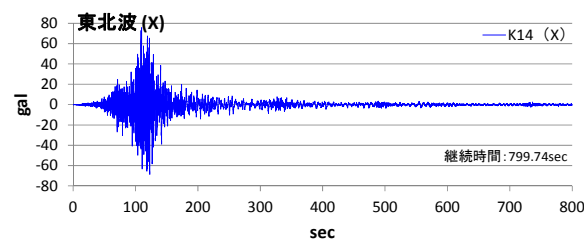


図-12 東北波時刻歴波形：K14 (X)

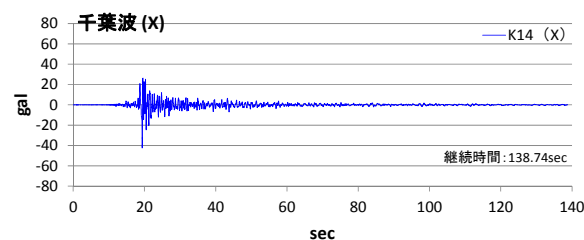


図-13 千葉波時刻歴波形：K14 (X)

観測波形のフーリエスペクトルを図-14、図-15に、基礎直下部の基盤面にある強震計（G3）に対する伝達関数を図-16、図-17に示す。

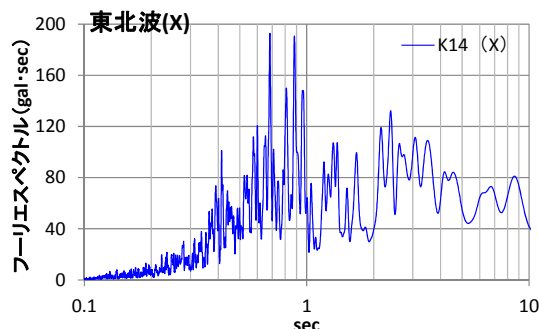


図-14 東北波フーリエスペクトル：K14(X)

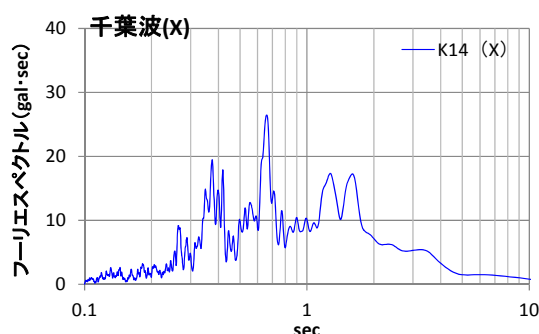


図-15 千葉波フーリエスペクトル：K14(X)

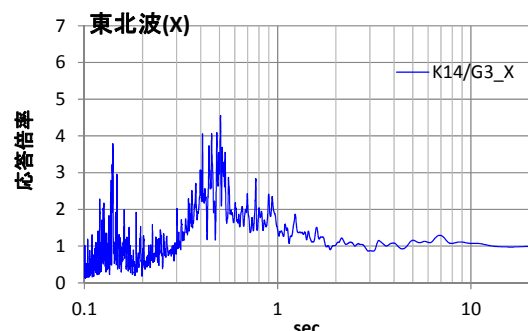


図-16 東北波伝達関数：K14(X)

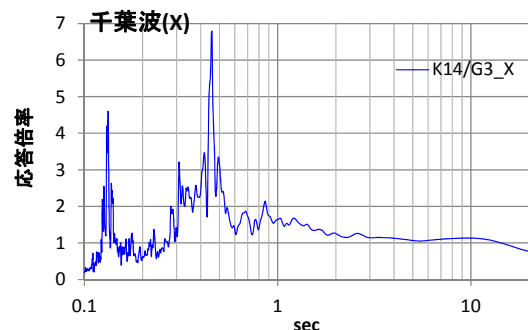


図-17 千葉波伝達関数：K14(X)

千葉波では伝達関数での卓越周期のピーク値が明瞭であるが、東北波では卓越周期帯に複数の小さなピーク値が見られ、卓越周期を特定するのが困難である。そこで、

曲げ剛性が等価な1本の棒に置き換えた鋼管矢板井筒基礎に対して、先のSHAKEによる地盤の等価剛性を水平ばねにしたフレームモデルで固有値解析を実施した。そして、この結果を参考に伝達関数から橋脚基礎の卓越周期を特定し、卓越振動モードを求めた。固有値解析による振動モードを図-18、図-19に、伝達関数から求めた卓越振動モードを図-20に示す。

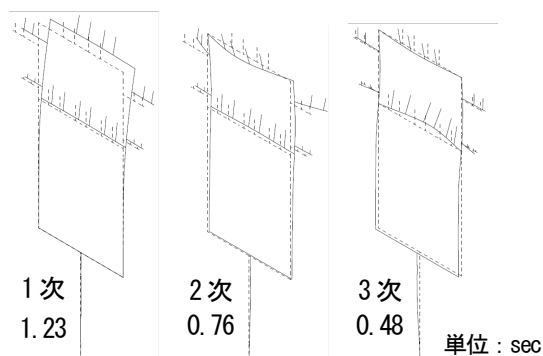


図-18 東北波振動モード図（橋軸方向）

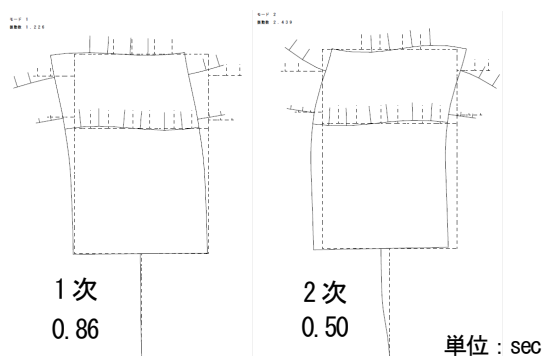


図-19 東北波振動モード図（橋軸直角方向）

(1) 卓越周期と卓越モードの特徴

図-18、図-19に示す固有値解析結果では、橋軸方向および橋軸直角方向とも、1次は橋脚の振動が卓越して基礎はほとんど振動しないモードで、2次は基礎のスウェイ振動が主体となっていて、橋脚が逆方向に揺れるモードである。

図-20に示す卓越周期結果では、橋軸方向および橋軸直角方向とも、1次の卓越周期での差異は認められないものの、2次の卓越周期では、千葉波よりも東北波の方が長周期化する傾向にあった。また、モード形状では、橋軸方向1次ならびに橋軸直角方向1次、2次での差異は認められなかったものの、東北波による橋軸方向2次モード形状では基礎上段（頂版）変位に対する橋脚変位の割合の方が大きくなるのが分かる。なお、橋軸方向2次において、橋脚部で左右の柱頂部変位が異なっているのは、ねじれの影響によるものと推測できる。基礎中段および下段で変位のばらつきが東北波の方が大きいのは、継手における合成効率の低下度合いが増加したこと

が要因の一つとして考えられる（図-20）。

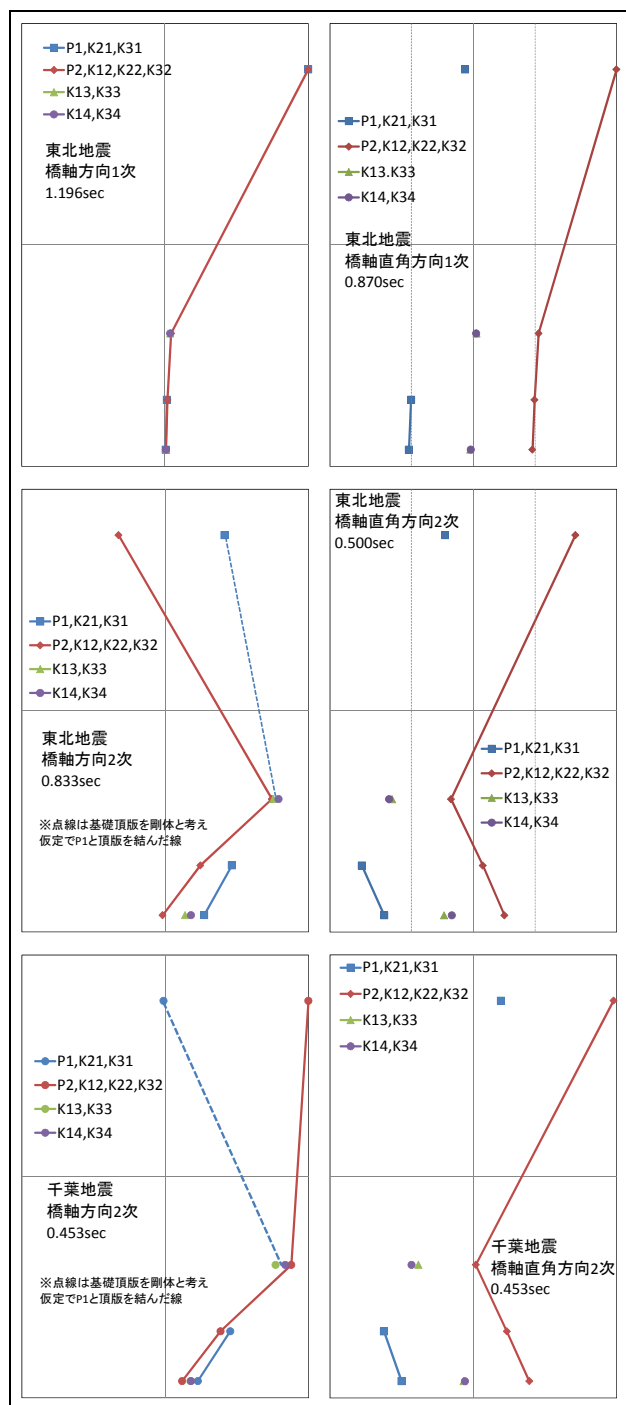


図-20 卓越周期とモード図

(2) 東北波と千葉波における基礎の卓越周期の違いについて

基礎の振動が卓越する2次周期について、東北波が千葉波よりも長周期になった主な理由は、東北波の方が千葉波よりも地盤の塑性化が進んだことによるものと推測される。また、東北波による橋脚頂部の最大加速度の方が千葉波よりも大きいため、基礎天端に作用した上部工や橋脚の慣性力も大きくなり、これに伴って鋼管矢板井筒基礎の特徴である矢板間のせん断剛性（合成効率）が

著しく低下したことも理由の一つであると考えられる。

一方、上記の要因としては、東北波と千葉波の最大加速度比が $1.38 (=58.96\text{gal}/42.63\text{gal})$ であるのに対して、1次および2次の卓越周期帯における最大応答加速度スペクトル比が、1.0秒近辺で $3.3 (=100\text{gal}/30\text{gal})$ 程度、0.5秒近辺で $4.0 (=200\text{gal}/50\text{gal})$ 程度となり、数倍大きくなっていることから、両地震の最大加速度の違いだけでなく、近距離地震と遠距離地震による特性の違いが影響しているとも考えられる。

(3) 東北波における基礎での複数の卓越周期について

千葉波のフーリエスペクトルや伝達関数では、2次周期帯に明瞭なピークが見られるが、東北波では複数のピークに分散して明瞭なピークが見られない。これは、東北波の継続時間が長く、時間経過に伴うひずみレベルも大きく変化するという地震特性と、鋼管矢板井筒基礎に作用する慣性力の時間的変化によるものと推定される。

そこで、東北波を20秒間隔に分割して求めた分割時間範囲毎のフーリエスペクトルを図-21に示す。図-21はスペクトル値が大きい100~160秒の3区間の結果ではあるが、各分割時間範囲で、ピークの高さと出現位置（周期）が異なることと、ひとつの卓越したピークが明瞭に出現することが確認できた。

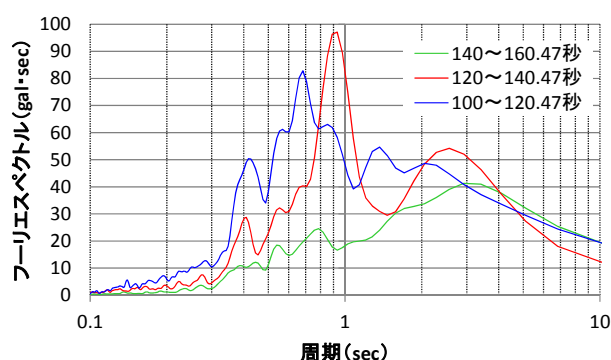


図-21 東北波地震フーリエスペクトル

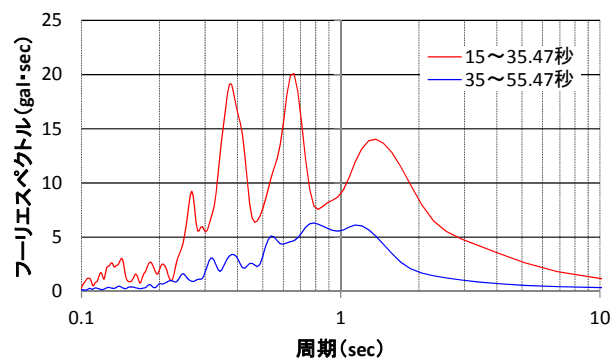


図-22 千葉波地震フーリエスペクトル

なお、千葉波についても同様に分割時間範囲毎のフーリエスペクトルを実施した（図-22 参照）。図-22はス

ペクトル値が大きい 15~55 秒の 2 区間の結果であり、最大加速度の発生した時刻（19.28 秒）が含まれる 15~35 秒区間でピーク値が突出しており、継続時間全域のフーリエスペクトルでも同様なピークが出現している。

(4) 基礎の変形形状について

図-23、図-24 には、両波形による基礎 upper 段の水平変位が最大値を示す時刻での基礎の水平変位（x 成分）を示す。

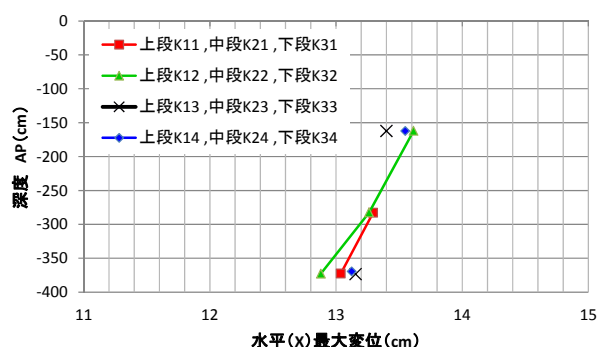


図-23 東北波地震基礎頂版最大変位時分布

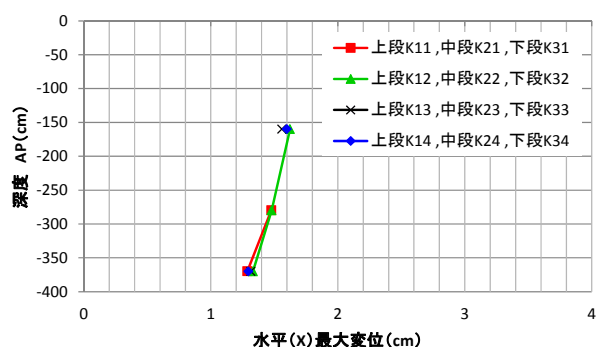


図-24 千葉波地震基礎頂版最大変位時分布

千葉波よりも東北波の方が、全体変位（上段変位と下段変位の平均）および基礎本体の変形（上段変位と下段変位の差）とも大きくなっている。また、同時刻の基礎 upper 段の鉛直変位（z 成分）から、ほとんどロッキングしていないことが確認できたため、観測された基礎の変位は、地盤の水平変位に基礎の変形が重なったものであると考えられる。従って、鋼管矢板間の結合度が小さいことや基礎の高さ（約 25.5m）が外径（約 39.9m）よりも小さいことを考慮すると、基礎の変形は、全体としてはほとんどロッキングしないで、頂版コンクリートで杭頭部が回転拘束された独立杭の様な集合体としての挙動に近い変形を呈していると推定できる。なお、地盤の水平変位量に対する基礎本体の変形量の割合に注目すると、約 0.05（＝0.6cm/13cm）となる東北波に対して、千葉波は約 0.20（＝0.3cm/1.5cm）となるため、基礎本体の変形量は地盤の水平変位量に比例するとは言えない。ちなみ

に、y 成分での基礎の変形形状についても、同様な傾向が示されている。

7. まとめ

今回の検討結果を以下に示す。

- 地震観測記録の分析により、架橋地点における東北波の地震特性を把握でき、遠距離地震と近距離地震の振動特性の違いを確認できた。
- SHAKE による地盤のシミュレーション解析により、架橋地点の地震時地盤物性やひずみレベル等を把握できた。
- フレームモデルによる固有値解析および地震観測記録の伝達関数から、震央距離や地震規模の異なる東北波および千葉波における基礎の卓越周期および卓越モードを把握できた。
- 東北波が千葉波よりも基礎の卓越周期が長周期になるのは、地盤のひずみレベルや鋼管矢板井筒基礎に作用する慣性力が大きいためであることを確認できた。
- 東北波の場合、伝達関数やフーリエスペクトルにおいて、基礎の 2 次周期帯での複数のピークがみられるのは、継続時間が長く、時間経過に伴い地盤のひずみレベルや鋼管矢板井筒基礎に作用する慣性力が大きく変動するという東北波の地震特性によるものであることが確認できた。
- 基礎 upper 段の水平変位が最大となるとき基礎の変形形状は、全体としてはほとんどロッキングしないで、頂版コンクリートで杭頭部が回転拘束された独立杭の集合体としての挙動に近い変形であることが確認できた。また、地盤と基礎部の水平変位関係は、必ずしも比例関係にはないということが分かった。

8. おわりに

今回の検討により、軟弱地盤に架設された長大橋梁での鋼管矢板井筒基礎の地震時挙動や振動特性を把握するための基礎資料を得ることができた。今後は、地震観測記録を照合しながら、基礎と周辺地盤の動的相互作用に着目した解析的検討を進める予定である。また、今回の報告が鋼管矢板井筒基礎の地震時動的挙動解明の一助になれば幸いである。

謝辞：本検討を実施するにあたり、有益な助言、情報をいただいた大保直人博士、山野辺慎一博士を始め多くの関係者に感謝いたします。

参考文献

- 1) 日本道路協会：鋼管矢板井筒基礎設計指針・同解説, 1984年
- 2) 日本道路協会：鋼管矢板井筒基礎設計施工便覧, 1997年12月
- 3) 東京都港湾局ホームページ
(<http://www.kouwan.metro.tokyo.jp/photogallery/>)
- 4) 東京都港湾局他：昭和62年東京港連絡橋台場海上部下部工実施設計耐震検討報告書, 昭和63年3月
- 5) 東京都港湾局他：東京港連絡橋台場海上部基礎計測及び解析検討報告書[動的解析編], 平成5年3月
- 6) 大崎順彦：新・地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版会, 1994年5月
- 7) 東京都港湾局他：平成24年度東京港港湾構造物耐震性評価検討調査委託報告書, 平成25年3月
- 8) 吉田望：地盤の地震応答解析入門, 鹿島出版会, 2005年5月

Study on Dynamic Properties of Steel Pipe Steel Pile Foundation Based on Strong Motion Records

HARASHIMA Minoru, MORI Hiroshi, ARAI Yoko, and TAKEDA Tetsuo

In this study, strong motion data recorded at the substructure of side span of Rainbow Bridge were analyzed to examine seismic behavior of the steel pipe steel pile foundation during moderate close earthquakes and severe distant earthquakes. The records of 13 earthquakes were observed in the past 10 years, including the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake.

Predominant period where the response of the steel pipe steel pile foundation is dominant, changes with the lapse of time during an earthquake, and becomes longer according to the increase in response acceleration. The steel pipe steel pile foundation hardly shows rocking movement, but deforms like a pile group whose pile-heads are fixed to a top concrete slab.