A - 75

三次元有限要素法による橋梁基礎構造の動的応答特性評価

Dynamic response analysis of pile foundation for bridge structures

室蘭工業大学	フェロー	岸	徳光 (Norimitsu Kishi)
室蘭工業大学	正 員	小室	雅人 (Masato Komuro)
(独)土木研究所寒地土木研究所	正 員	西	弘明 (Hiroaki Nishi)
(独)土木研究所寒地土木研究所	正 員	岡田	慎哉 (Shinya Okada)
室蘭工業大学	○学生員	吉澤	佳展 (Yoshinobu Yoshizawa)

1. はじめに

現在,道路橋示方書における橋梁基礎構造の耐震設計で は,慣性力を水平震度に置換した静的解析に基づいて耐震 性能照査が行われており,動的応答については考慮されて いない.また,近年,実務設計で一般的に実施される橋梁 の動的応答解析では,地盤-基礎系の影響を単純化した集 約バネで表現する場合が多い.しかしながら,実挙動を精 度よく予測するためには地盤-基礎系の動的な相互作用効 果を考慮することが必要である¹⁾.

このような観点から,著者らはこれまでより合理的な解 析手法として,集約バネモデルの精度を高めた骨組要素モ デルによる解析手法に関する検討を行ってきた.本研究で は,その適切なモデル化手法に関する検討や妥当性の検 証に資するための基礎データの収集を目的として,異なる 基礎形式を有する3橋脚(新石狩大橋 P-1橋脚,石狩河口 橋 P-3橋脚,十勝河口橋 P-7橋脚)を対象に,周辺地盤を 考慮した三次元有限要素法による固有振動解析および地震 応答解析を実施した.なお,本論文では,橋軸方向の応答 特性に限定して検討を行うこととする.

2. 各橋梁における基礎形式の概要

本研究で対象とした各橋梁の基礎構造はいずれも鋼管杭 によって支持された杭基礎形式である. 図-1 には杭の配 置位置を示している.以下,各基礎部に関する概要を示す.

2.1 新石狩大橋 P-1 橋脚基礎部

新石狩大橋 P-1 橋脚の基礎部には全長 37.0 m, 外径 812.8 mm, 板厚 12.7 mm(杭頭部から 8.8 m 下方の位置において,





板厚 9.5 mm に変化) の鋼管杭基礎が計 12 本配置されている. これら鋼管杭基礎は,フーチングに対して 12.5°の傾斜を有しており,直径 10.0 m,高さ 2.3 m の円形型フーチングと結合された基礎形式となっている.

2.2 石狩河口橋 P-3 橋脚基礎部

石狩河口橋 P-3 橋脚の基礎部には全長 42.0 m, 板厚 16.0 mm (杭頭部から 10.0 m, 20.0 m 下方の位置において, そ れぞれ板厚 12.7 mm, 9.5 mm に変化)の長杭が 30 本, 全長 13.0 m 板厚 12.7 mm の短杭が 16 本の計 46 本配置されてお り, それぞれ橋軸方向幅 10.9 m, 橋軸直角方向幅 22.5 m, 高さ 2.5 m の小判型フーチングに結合されている. なお, 杭の外径はいずれも 812.8 mm である. また, 鋼管杭間は 回転を許容する連結パイルによって結合され,上部では井 筒状の基礎形式となっている.

2.3 十勝河口橋 P-7 橋脚基礎部

+勝河口橋 P-7 橋脚の基礎部には全長 30.0 m, 外径 1,219.2 mm, 板厚 19.0 mm (杭頭部から 12.5 m 下方の位置において, 板厚が 14.0 mm に変化)の鋼管杭基礎が計 38 本配置されている. これら鋼管杭基礎は,橋軸方向幅 22.8 m,橋軸 直角方向幅 21.0 m,高さ 4.0 m の矩形型フーチングと結合 された基礎形式となっている.

3. 数值解析

3.1 解析モデル

図-2には、各橋梁の基礎部における橋軸方向の地震動 入力に対するモデルの要素分割状況を示している。本研究 では,設計図面および各橋脚近傍で実施された既往の地質 調査結果に基づき,詳細な三次元の有限要素モデルを作成 した. 表-1には、本解析で使用した構造部材の材料物性 値を一覧にして示している. なお, 周辺地盤の物性値につ いては地質調査結果に基づいて決定した。モデル化には、 フーチング部および地盤部には8節点固体要素を,鋼管杭 には4節点シェル要素を用いている。周辺地盤のモデル化 範囲は、鋼管杭の影響を考慮して、橋軸方向あるいは橋軸 直角方向のフーチング幅に対して5倍に設定し,対称性を 考慮した 1/2 の解析モデルとした。また、本解析モデルに はフーチング上面に表-2に示す各基礎部が負担する上部 工分担自重および橋脚自重の 1/2 に対応する質量をシェル 要素を用いて付加している。境界条件は底面を完全固定と し,対称面には対称条件を,他の側面は高さ方向のみに拘 東条件を与えることとした.



平成18年度 土木学会北海道支部 論文報告集 第63号

全体系

(c) 十勝河口橋 P-7 橋脚基礎部の三次元モデル



3.2 入力地震動

本解析では、2003年に発生した十勝沖地震本震時に十勝河口橋の基盤で観測された基盤波形の橋軸方向成分を基とし、これを最大加速度100galに振幅調整して用いることとした.なお、解析には観測記録波形の初期微動P波区間を除いた主要動S波区間の30秒間を用いることとした. 図-3には、本解析に用いた入力加速度波形とそのフーリエスペクトルを示している.図より、入力加速度波形の卓越振動数は0.35 Hz 付近であることが分かる.

3.3 解析手法

地震応答解析は、入力加速度波形を全要素に対して物体 力として与えることにより行った.また、減衰は質量比例 型減衰とし、各解析モデルに関して、全体系モデルでの最 低次固有振動数に対して*h*=5.0%に設定した.なお、解析 には三次元構造解析用汎用プログラムである ABAQUS²⁾ を用い、陽解法に基づく直接積分法による線形時刻歴応答 解析を実施した.

鋼管杭基礎部

表-1 構造部材の材料物性値の一覧

部材	弾性係数 <i>E</i> (GPa)	ポアソン比 v	単位体積質量 ρ(×10 ³ kg/m ³)
鋼材	200.0	0.30	7.86
鉄筋コンクリート	30.0	0.20	2.50
コンクリート	25.0	0.20	2.35

表 - 2	2	各基礎部が負担する重量の一覧	Ē
-------	---	----------------	---

	上部工分担自重	橋脚自重
解析 セテル	(kN)	(kN)
新石狩大橋 P-1 橋脚基礎部	5,400	2,700
石狩河口橋 P-3 橋脚基礎部	11,300	14,300
十勝河口橋 P-7 橋脚基礎部	51,180	11,638





表-3 各解析モデルの最低次固有振動数一覧(Hz)

解析モデル	全体系 <i>fa</i>	杭基礎のみ <i>f</i> b	地盤のみ <i>fc</i>
新石狩大橋 P-1 橋脚基礎部	1.30	0.39	1.30
石狩河口橋 P-3 橋脚基礎部	1.25	0.26	1.26
十勝河口橋 P-7 橋脚基礎部	1.25	0.30	1.26

4. 解析結果および考察

4.1 固有振動解析

地震応答解析に先立ち,各解析モデルに関して固有振動 解析を行い,最低次固有振動数と振動モード分布の特定を 行った.なお,本解析にはABAQUSを用い,弾性解析に 基づいて実施した.**表-3**には,各解析モデルの固有振動 解析結果より得られた最低次固有振動数を一覧にして示し ている.なお,表には各解析モデルに関して基礎構造のみ および地盤のみの場合の解析結果も併せて示している.表 より,基礎構造のみの場合は 0.26 ~ 0.39 Hz であるのに対 して,全体系の場合には 1.25 ~ 1.30 Hz となり,地盤の影 響を大きく受けていることが分かる.

4.2 動的地震応答解析

図-4には、地震応答解析結果より得られた波形データ の一例として、各解析モデルのフーチング天端位置にお ける応答加速度波形を示している.また、表-4~6には、 図-4における最大/最小応答加速度、応答変位およびそれ らの発生時刻を一覧にして示している.表より、応答加速



表-4 新石狩大橋 P-1 橋脚基礎部の天端応答値一覧

τ α Π	応答加速度	発生時刻	応答変位	発生時刻
項目	(gal)	(sec)	(cm)	(sec)
最大值	340.58	9.61	3.74	1.73
最小值	-301.04	10.72	-3.61	9.64

表-5 石狩河口橋 P-3 橋脚基礎部の天端応答値一覧

ж П	応答加速度	発生時刻	応答変位	発生時刻
惧目	(gal)	(sec)	(cm)	(sec)
最大值	274.00	17.47	3.66	1.76
最小值	-253.09	5.74	-3.26	1.39

表-6 十勝河口橋 P-7 橋脚基礎部の天端応答値一覧

77 H	応答加速度	発生時刻	応答変位	発生時刻
項目	(gal)	(sec)	(cm)	(sec)
最大值	258.43	10.54	3.91	1.77
最小值	-225.00	1.76	-3.50	1.39

度の最大/最小値に着目すると,天端位置における加速度 応答倍率はいずれの場合も2~3倍程度であることが分か る.また,応答変位に着目すると,十勝河口橋 P-7橋脚基 礎部の応答値が大きく現れており,これは杭基礎が密に配 置されていることによる群杭効果の影響を受けているもの と推察される.なお,新石狩大橋 P-1橋脚基礎部に関して もフーチング幅が狭いことによる密な杭基礎の配置となっ ているが,斜杭を採用していることにより,群杭効果が低 減しているものと推察される.

図-5には、各解析モデルに関して、フーチング天端位置での応答変位が最大となる時点における鋼管杭の変形性状を固有振動解析から得られた最低次振動モードと併せて示している。なお、縦軸/横軸には、それぞれ杭の深さ h_0 および δ_{max} で無次元化している。図より、最大応答変位



図-5 最大応答変位時における杭の変形性状

時の変形性状と最低次振動モードを比較すると,両者いず れの場合もよく一致していることから,天端の最大応答変 位時には最低次の振動モードに類似した並進振動となるこ とが分かる.

図-6には、フーチング天端位置での最大応答変位時点 における鋼管杭基礎の軸方向応力分布を示している.最大 応答変位時の杭の変形性状と併せて,各基礎の応力分布に 着目すると,剛性差のある地層境界において応力集中する 傾向があること、また、その層を境界として変形性状も変 化していることが分かる. また, 各基礎部の応力分布に着 目すると、(a) 図に示す新石狩大橋 P-1 橋脚基礎部では、橋 軸方向に関して最外杭の全域において、ほぼ均等な応力の 分布を示している。また、フーチング直下には応力集中は 見られず、ここでも斜杭の効果が働いているものと推察さ れる.(b)図に示す石狩河口橋 P-3 橋脚基礎部では,杭先端 部にのみ応力集中が見られ、杭先端部が剛性の高い支持層 区間で基礎の支持力を全て受け持っていることが分かる. また、フーチング直下には応力集中は見られず、本基礎形 式においてパイル連結した井筒構造とすることにより、全 体構造として挙動していることが推察される. なお, 最大 応力は杭基礎の円弧配置部に発生しており、これは群杭効 果であるものと推察される。(c)図に示す十勝河口橋 P-7橋 脚基礎部では、フーチング直下に応力集中が見られる。こ れは,浅い層に軟弱土層が存在することの他,鉛直支持力 のみに着目しているため, 杭間が連結されていないことに より,曲げ作用に対して単杭として抵抗する構造になって いることに起因しているものと推察される.

5. まとめ

本研究で得られた結果を整理すると、以下のようになる.

- 三次元有限要素法を用いた固有振動解析および地震応 答解析結果により、今回検討対象とした3橋脚の動的 応答特性に関する基礎データを得ることができた。
- 2) 天端の最大応答変位時点における杭の変形性状と固有 振動解析結果による最低次の振動モード分布の比較に おいて,両者がよく一致することから,天端の最大応 答変位時には最低次振動モードと同様の曲げ変形が卓 越した並進振動となることが推察される。

最後に今後の展望として,上部構造を含めた解析モデル に関しても同様な解析を行い,橋梁全体系を対象とした耐 震評価に関する検討も行う予定である.





参考文献

- 1) 土木学会:橋の動的耐震設計,丸善(株),2003.3
- 2) ABAQUS Analysis User's Manual, Ver. 6.6, 2006