

新石狩大橋斜杭基礎の動的応答に関する一考察

A consideration of dynamic response analysis by foundation with tapered circular pile group of NEW-ISHIKARI-OHASHI

(株)長大	正会員	高畑智考 (Tomochika TAKAHATA)
(株)長大	正会員	長谷川正 (Tadashi HASEGAWA)
(独)土木研究所寒地土木研究所	正会員	西 弘明 (Hiroaki NISHI)
(独)土木研究所寒地土木研究所	正会員	佐藤 京 (Takashi SATO)
室蘭工業大学	フェロー	岸 徳光 (Norimitsu KISHI)

1. はじめに

橋梁構造物の地震応答解析における、基礎-地盤系のモデル化手法として、一般的には簡便性を考慮してフーチング底面に基礎のせん断抵抗、曲げ抵抗を集約バネとしてモデル化する場合が多い。

しかしながら、構造物の地震時応答は基礎構造や周辺地盤の影響を大きく受けることから、実際の挙動を精度良く予測するためには、基礎-地盤系の動的相互作用を考慮した連成解析が必要となる。周辺地盤の影響を考慮した連成解析モデルとしては、二次元あるいは三次元有限要素モデル、バネ-質点系モデル(以下、骨組要素モデル)等が挙げられる。解析精度の観点からは有限要素モデルの適用が望ましいと考えられるが、解析規模の拡大に伴う解析所用時間や費用の観点からは、全てにおいて有限要素モデルを適用することは現実的に困難である。従って、実設計における適用性に配慮する場合には、比較的簡易な骨組要素モデルによって精度良く評価可能な解析モデルの構築が望ましいものと考えられる。

このような観点から、本研究では基礎-地盤系の動的相互作用を考慮した骨組要素モデルの適用性に関する検討を行った。検討対象としたのは、昭和50年代以前に比較的多く見られた斜杭を有する橋脚基礎である。なお、骨組要素モデルの適用性検討は、別途実施した三次元有限要素解析(以下、固体要素解析モデル)と比較する形で行っている。

2. 解析対象橋脚の概要

新石狩大橋は、石狩川河口上流約24kmに位置する橋長917.8mの長大橋であり、昭和43年に竣工した。

上部工形式は、5径間連続鋼合成鈹桁2連、単純鋼合成鈹桁2連、バランスド・ランガー橋1連、3径間連続鋼合成鈹桁1連で構成されている。

基礎工形式は、5径間連続鋼合成鈹桁部が鋼管杭斜杭基礎、バランスド・ランガー橋部がニューマチックケーソン基礎、3径間連続鋼合成鈹桁部が場所打ち杭基礎である。

本検討では、地震時に複雑な挙動を示すことが想定される鋼管杭斜杭基礎を解析対象とした。

図-1には、解析対象橋脚の概要図を示している。

本橋脚は、直径3.8m、高さ8.0mの円形断面コンクリート製橋脚である。杭基礎は、全長37m、直径812.8mm、板厚12.7mm(杭頭から8.81m下方位置で板厚を9.5mmに段落し)の鋼管杭基礎であり、12本の杭を $\theta = 12.5^\circ$ の角

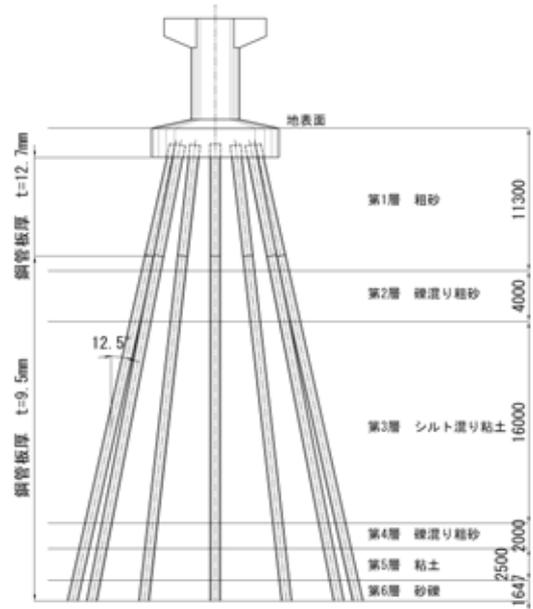


図-1 解析対象橋脚概要図

表-1 地質調査による地層構成および平均N値

地層番号	土質	地層厚	平均N値
第1層	粗砂	11.3	10
第2層	礫混り粘土	4.0	30
第3層	シルト混り粘土	16.0	10
第4層	礫混り粘土	2.0	8
第5層	粘土	2.5	9
第6層	砂礫	1.6	50

度で放射状に配置した斜杭基礎である。

ここで、図中の地層構成は、平成17年度に当該地点で実施された地質調査結果に基づいて設定している。表-1には地質調査に基づく地層構成および平均N値を示している。

また、本橋脚は5径間連続鋼鈹桁を支持しており、地震時にはオイルダンパーにて各下部工に慣性力を分担させる構造であるため、地震時に分担する上部工質量は死荷重反力相当 ($W_u = 5,400\text{kN}$) によるものとした。

2. 解析概要

本解析では、基礎-地盤系の地震時応答特性評価を目的としていることから、フーチング、杭基礎、地盤のみをモ

デル化し、橋脚躯体は質量のみ考慮するものとした。なお、本解析で用いた動的応答解析プログラムは、骨組要素解析に関しては MIDAS/Civil2006、固体要素解析に関しては ABAQUS である。

3.1 骨組要素解析モデル

図-2には、本解析で用いた Penzien 型モデルの概要図を示している。

フーチングおよび鋼管杭には弾性梁要素を用い、周辺地盤は質量およびせん断剛性のみを考慮したマス - バネモデルを用いてモデル化を行った。なお、地盤の質量、せん断バネは各杭に分担させるものとし、地盤の質点が同一の挙動を示すように、同一の深さに位置する各地盤質点を剛体連結する構造とした。解析対象とする地盤範囲はフーチング長さの5倍である50m×50mの範囲とした。

また、杭体 - 周辺地盤間の相互作用効果を考慮する必要があることから、杭体 - 周辺地盤間に対しても弾性バネ要素を用いて結合している。

境界条件は杭基礎下端を完全固定とし、地震波入力方向（橋軸方向）に対して直角方向の並進方向成分および回転方向成分を拘束している。フーチング上端の節点位置には、上部工自重5,400kNおよび橋脚自重2,700kN分の質量を集中化して与えている。

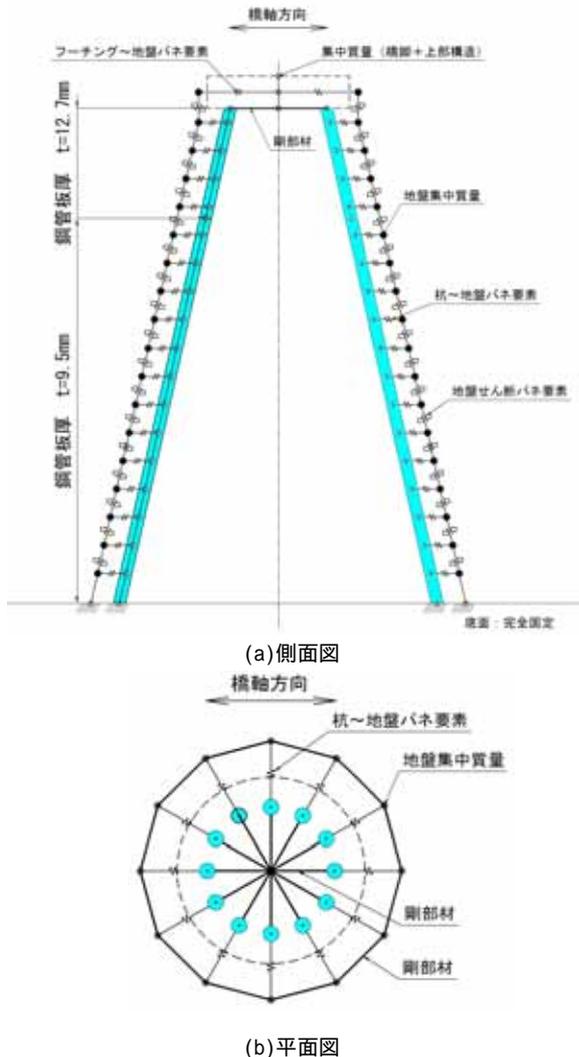


図-2 骨組要素解析モデル概要図

3.2 固体要素解析モデル

図-3には固体要素解析モデルの要素分割状況概要図を示している。使用要素は、フーチング部および地盤部には8節点固体要素を、鋼管杭は4節点シェル要素を用いている。解析対象範囲は、鋼管杭の影響を考慮して、フーチング幅の5倍の領域とし、対称性を考慮して1/2のモデルとした。

境界条件は、モデル底面を完全固定とし、対象面には対象条件を、他の側面は鉛直方向変位成分を拘束している。なお、フーチング天端には、骨組要素解析モデルと同様に上部工自重および橋脚自重に相当する質量を、シェル要素を用いて付加している。

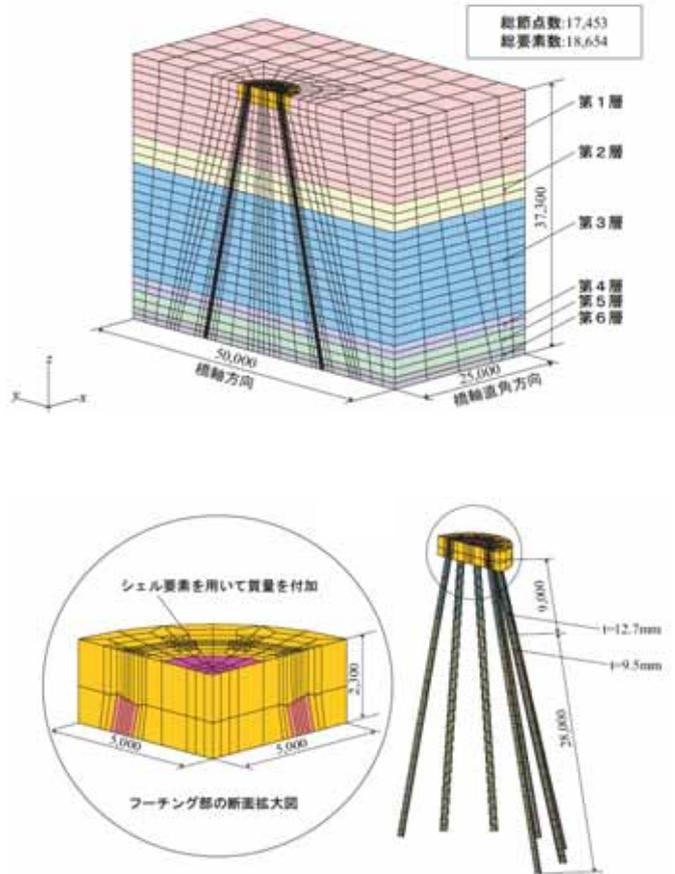


図-3 固体要素解析モデル概要図

3.3 材料物性値

表-2には、フーチング、鋼管杭の材料特性値を示している。

表-2 フーチングおよび鋼管杭の材料物性値

部材	弾性係数 E (MPa)	ポアソン比	単位体積重量 (kN/m ³)
フーチング	3.00E+04	0.20	24.5
鋼管杭	2.00E+05	0.30	77.0

また、表 - 3 には、周辺地盤の各地層における材料物性を示している。地盤の弾性係数（動的変形係数）は、道路橋示方書 耐震設計編に基づいて各地層の平均 N 値からせん断弾性波速度を算定し、これから動的せん断変形係数を求めて地盤の動的変形係数 E を推定した。

表 - 3 周辺地盤の材料物性値

地層番号	弾性係数 E (N/mm ²)	ポアソン比 ν	単位体積重量 (kN/m ³)
第 1 層	73.1	0.493	19.1
第 2 層	254.5	0.487	19.0
第 3 層	203.9	0.491	16.7
第 4 層	254.5	0.487	19.0
第 5 層	303.3	0.488	17.4
第 6 層	898.1	0.477	19.1

3. 地震応答解析法および入力地震動

地震応答解析は、骨組要素解析、固体要素解析ともに直接積分法による時刻歴応答解析（線形解析）とした。数値積分は、骨組要素解析では陰解法に基づいた Newmark-法を用い、 $\gamma = 1/4$ 、積分間隔は 1/100 s と設定した。固体要素解析には陽解法を適用し、積分間隔はクーランの条件を満たすように設定している。また、粘性減衰定数は、骨組要素解析には 1 次および 2 次の固有振動数に対して $h=5\%$ を与える Rayleigh 型減衰モデル、固体要素解析には系の 1 次固有振動数に対して $h=5\%$ を与える質量比例減衰モデルを用いた。

図 - 4 には、本解析に用いた入力地震動を示している。本解析では、2003 年に発生した十勝沖地震時に十勝河口橋の基盤で観測された加速度波形の橋軸方向波形を基に、P 波部分を除き、最大値を 100 gal に振幅調整した加速度波形を使用した。なお、解析には算出された 173sec の波形のうち、主要動の 30 s 間について解析を行った。

図 - 5 には入力加速度波形のフーリエスペクトルを示している。図より、本地震波形は 0.3Hz ~ 0.4Hz 付近に卓越振動数が存在していることがわかる。

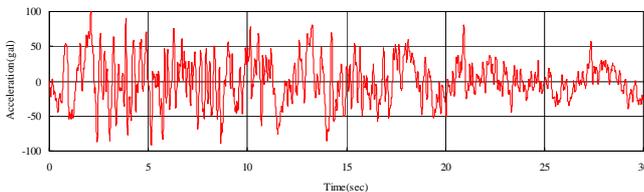


図 - 4 入力加速度波形

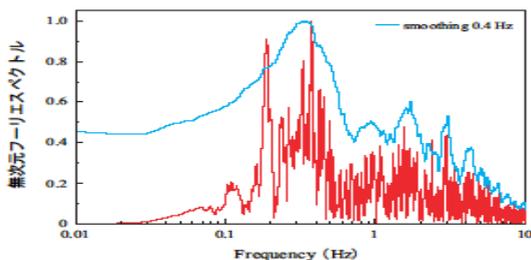


図 - 5 入力加速度波形のフーリエスペクトル

4. 数値解析結果の比較

4.1 固有振動解析結果

表 - 4 には骨組要素解析および固体要素解析における最低次固有振動数を示している。表より、解析手法による差は 1.0% 程度と小さく、両者は良く一致していることがわかる。

図 - 6 には最低次固有振動モードの深さ方向分布を各解析モデルで比較して示している。図より、最低次振動モードは、周辺地盤と杭体とが一体となって水平方向に変形し、杭体段落し部で屈曲点を有するモード分布を示している。各解析手法における固有振動モード分布を比較すると、杭体段落し部近傍で若干の差異が見られるものの、両者の分布性状は良く対応していると判断できる。

表 - 4 固有振動解析における最低次固有振動数

	固有振動数	比率
骨組要素解析	1.29	1.00
固体要素解析	1.30	1.01

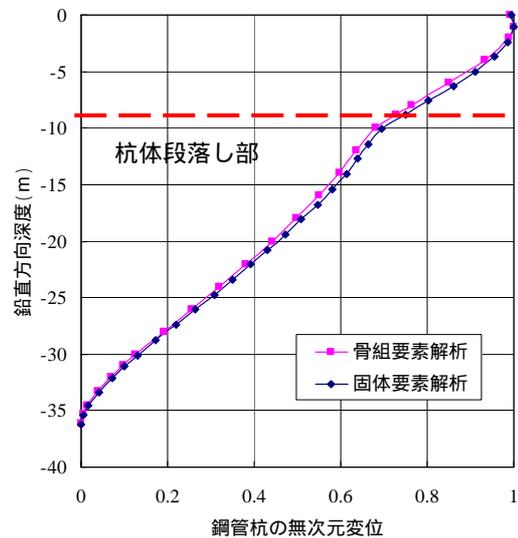


図 - 6 最低次固有振動モード分布比較

4.2 地震応答解析結果

(1) フーチング天端における応答特性の比較

表 - 5 には、フーチング天端位置における最大応答加速度、最大応答速度、最大応答変位を骨組要素モデルと固体要素モデルで比較して示している。

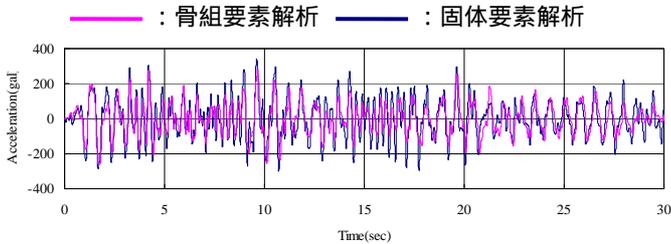
また、図 - 7 には、フーチング天端位置における加速度、速度、変位の各応答波形を骨組要素モデルと固体要素モデルで比較して示している。

表 - 5 フーチング天端最大応答値の比較

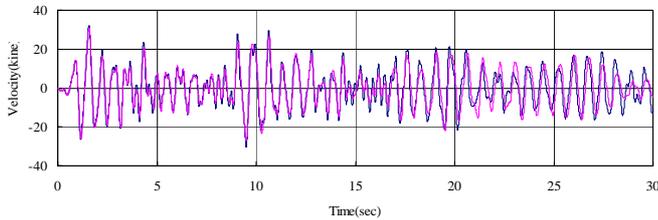
項目		骨組要素解析	固体要素解析
最大加速度	発生時刻(sec)	9.66	9.61
	応答値(gal)	277.6	340.6
最大速度	発生時刻(sec)	1.59	1.58
	応答値(kine)	30.7	32.3
最大変位	発生時刻(sec)	1.75	1.73
	応答値(mm)	37.6	37.4

応答加速度に着目すると、最大応答加速度に関しては、骨組要素解析が、固体要素解析と比較して 23%程度小さな値を示している。加速度応答波形に着目すると、周期特性は両者ではほぼ対応しているが、特に $t=20\text{sec}$ 付近で骨組要素解析が小さな値を示している。

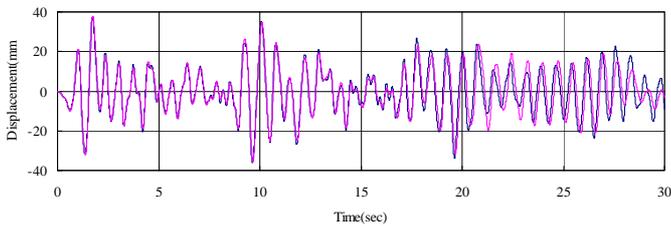
一方、応答速度および応答変位に関しては、最大応答値および応答波形性状ともに両者は比較的精度良く一致していることがわかる。



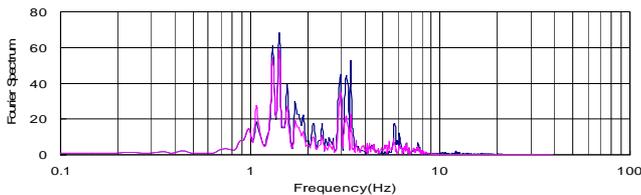
(a) フーチング天端の応答加速度波形



(b) フーチング天端の応答速度波形



(c) フーチング天端の応答変位波形



(d) 応答加速度波形に対するフーリエスペクトル

図 - 7 フーチング天端の応答波形比較

(2) 鋼管杭の軸方向応力度波形に関する比較

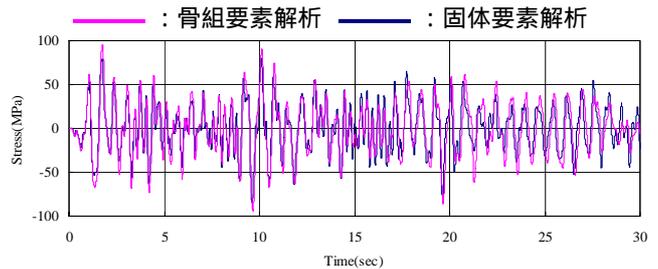
地震時における杭部材の健全性を把握することを目的として、杭頭部および段落し部における軸方向応力度波形の比較を行った。図 - 8 に応力度波形算出位置を示す。

また、図 - 9 に杭頭部および段落し部における軸方向応力度波形を骨組要素モデルと固体要素モデルで比較して示している。図より、発生応力度は、最大値、波形性状ともに両解析法で比較的一致していることがわかる。

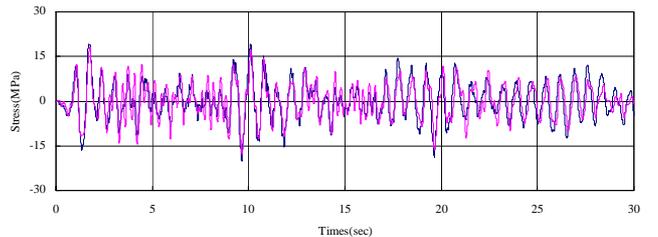
なお、応力度レベルは骨組要素解析では 90MPa 程度、固体要素解析では 80MPa 程度であり、いずれの場合においても杭体の降伏応力度には達していない。



図 - 8 杭体応力度波形算出位置



(a) 杭頭部応力度波形



(b) 段落し部応力度波形

図 - 9 鋼管杭軸方向応力度波形

5. 結論

- 1) 周辺地盤を多質点系せん断バネモデルで表現し、それを相互作用バネで連結した骨組要素モデル (Penzien型モデル) を構築することで、固体要素解析結果を比較的良い精度で再現可能である。
- 2) 本解析の対象とした鋼管杭斜杭基礎において、骨組要素モデルでは応答加速度の最大値が小さく評価される傾向にあるものの、応答速度、応答変位、杭体応力度は固体要素モデルと概ね一致する結果が得られた。