

RC 造ボックスカルバートの遠心模型振動実験

米澤 健次¹・鈴木 正寛²・穴吹 拓也³・樋口 俊一⁴・伊藤 浩二⁵

¹株式会社大林組 技術本部技術研究所 構造技術研究部 (〒204-8558 東京都清瀬市下清戸 4-640)
E-mail: yonezawa.kenji@obayashi.co.jp

²株式会社大林組 技術本部技術研究所 構造技術研究部 (〒204-8558 東京都清瀬市下清戸 4-640)
E-mail: suzuki.masahiro.ro@obayashi.co.jp

³株式会社大林組 技術本部技術研究所 構造技術研究部 (〒204-8558 東京都清瀬市下清戸 4-640)
E-mail: anabuki.takuya@obayashi.co.jp

⁴株式会社大林組 技術本部技術研究所 構造技術研究部 (〒204-8558 東京都清瀬市下清戸 4-640)
E-mail: higuchi.shunichi@obayashi.co.jp

⁵株式会社大林組 技術本部技術研究所 構造技術研究部 (〒204-8558 東京都清瀬市下清戸 4-640)
E-mail: ito.kojiro@obayashi.co.jp

地盤と構造物の連成効果を考慮した高度な解析技術を確立することを目的として、RC 造ボックスカルバートを対象とした遠心模型振動実験を実施した。実験変数は杭基礎の近接の有無とし、近接構造物がボックスカルバートの応答性状に対する影響を検討した。その結果、入力レベルが小さい初期加振においては近接構造物の有無による影響が観られたが、地盤と構造物ともに非線形領域に至る加振においては、近接構造物の有無に関わらず、両者はほぼ同様の応答性状を示した。また、本実験を対象として地盤と構造物の連成系の非線形有限要素解析を実施し、実験結果との比較を行った。その結果、主筋ひずみ及び地盤・構造物の応答性状の比較より、解析は実験の地盤及び構造物の応答性状を概ね良好に再現できることを確認した。

Key Words : box culvert, centrifugal vibration test, finite element analysis

1. はじめに

近年、地中構造物や基礎構造物の耐震安全性を評価するために、地盤と構造物の連成効果を考慮した高度な解析技術が求められている。例えば文献 1)においては、非線形性の強い材料からなる RC 構造物を対象とし、コンクリートのひび割れや鉄筋の降伏といった非線形現象に加えて、鉄筋の腐食による付着性能の低下やひび割れ状態を考慮する等、複雑な条件での解析事例が紹介されている。このような解析手法の妥当性を検証するためには、実験結果との比較が不可欠であるが、地盤の非線形挙動ばかりでなく、構造物が非線形化するまでを対象とした基礎的な実験データは少ないのが現状である。

本研究では、RC 造ボックスカルバートと周辺地盤を試験体とした遠心力模型振動実験を実施し、構造物が非線形化するまでのデータを取得するとともに、近接構造

物の有無による RC 造ボックスカルバートの応答性状への影響を確認した。さらに、コンクリート系構造物の非線形解析ソフト「FINAL」によってこの実験を再現し、地盤と構造物の連成解析手法の妥当性を検証した。

本報では、RC 造ボックスカルバートを対象とした遠心模型振動実験と FEM 解析の概要及び結果について述べる。

2. 遠心力模型振動実験

本実験は、地震時における RC 造ボックスカルバートの非線形領域までの応答性状を把握するとともに、構造物および地盤の材料非線形性を考慮した解析手法の検証用データを得ることを目的とした。試験変数はボックスカルバートに近接する杭基礎構造物の有無とした。

表-1 鉄筋の材料特性

	ヤング係数 N/mm ²	降伏強度 N/mm ²	引張強度 N/mm ²
D1.0	1.85×10 ⁵	304	325
D1.9	2.14×10 ⁵	391	404

表-2 マイクロコンクリートの配合

W/C %	s/a %	Air %	単位量 kg/m ³			
			W	C	S	G
93	43	6.0	195	210	767	1036

C: 普通ポルトランドセメント
 S: 珪砂7号, 珪砂8号, 石灰石微粉末 混合重量比 1:3:6
 G: 珪砂4号, 珪砂5号, 珪砂6号 混合重量比 1:7:2
 混和材: 高性能 AE減水剤 0.8%, 増粘剤 0.02%
 (セメント+石灰石微粉末の単位量に対する比)

表-3 マイクロコンクリートの材料特性

ヤング係数 N/mm ²	圧縮強度 N/mm ²	割裂強度 N/mm ²
2.75×10 ⁴	31.4	2.02

表-4 セメント改良土基盤の材料特性

ヤング係数 N/mm ²	圧縮強度 N/mm ²
3.24×10 ³	1.51

(1) 試験体

a) 試験対象

試験対象は断面外形が 7.5m×7.5m, 壁厚 0.75m, 頂版及び底版厚さ 1m のボックスカルバートを想定した。

試験体の縮尺は 1/25 とし, せん断土槽の中央に仕切り板を設置して, 片方のボックスカルバートには杭基礎を近接設置した。以下, 杭基礎が近接する方を No.1, 杭基礎がない方を No.2 と呼称する。

b) ボックスカルバート

図-1 に RC 造ボックスカルバート模型の断面寸法及び配筋を示す。断面寸法は, 外寸 300mm×300mm, 内寸 240mm×220mm として壁厚を 30mm とした。上下床板の主筋は D1.9, 壁筋の主筋は D1.0, 配力筋及びせん断補強筋は D1.0 の縮尺鉄筋を使用した。ここで用いた縮尺鉄筋は, 一般に使用される異型鉄筋と同様に節を有している。縮尺鉄筋の材料特性を表-1 に示す。コンクリートは粗骨材と細骨材の縮尺率 1/25 を目標に粒度調整を行ったマイクロコンクリートを用いた。表-2 にマイクロコンクリートの配合を, 表-3 にマイクロコンクリートの材料特性を示す。

遠心実験を実施するにあたり, ボックスカルバートの復元力特性を得るために, 底版を固定し, 頂版に水平荷重を加える静的繰返し载荷試験を別途実施した。静的载荷試験より得られた荷重-変形関係を図-2 に示す。

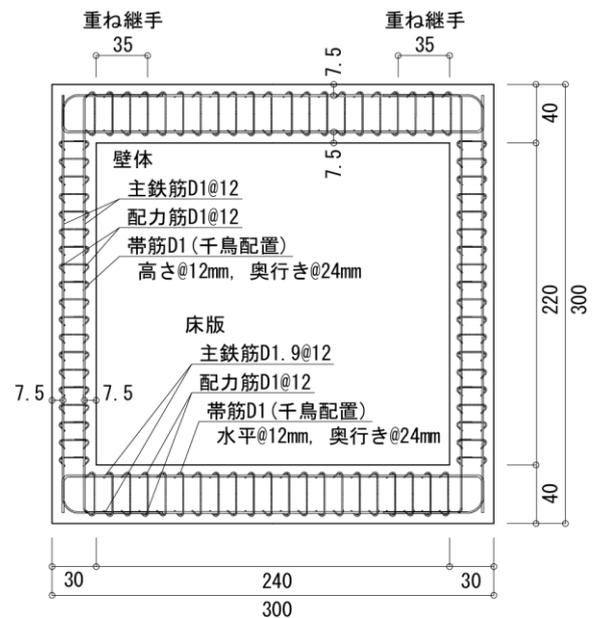


図-1 ボックスカルバートの配筋

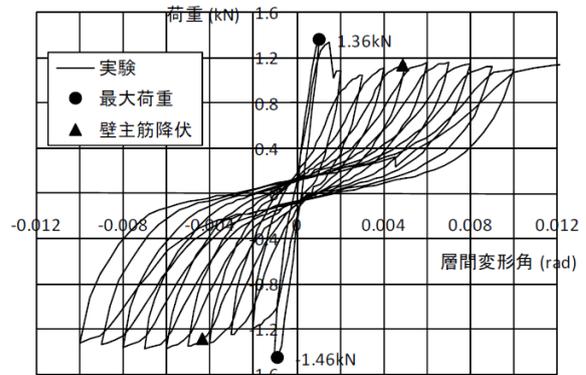


図-2 ボックスカルバート静的繰返し载荷試験における荷重-変形関係

c) 地盤

支持地盤は珪砂7号, セメント及び水を混合したセメント改良土基盤とした。表-4 にセメント改良土基盤の材料特性を示す。ボックスカルバートは岩着固定を模擬することとし, 鋼製角型パイプを用いて基盤厚さ 80mm 分のスペーサーを製作し, ボックスカルバートとせん断土槽を緊結した。

本実験の地盤条件は, 文献 2) に示す RC 造杭基礎を対象とした実験の地盤条件とほぼ同様に設定した。表層地盤は7号珪砂を用いた乾燥砂地盤とし, 乾燥密度と相対密度はそれぞれ $\gamma_d=1.48 \text{ g/cm}^3$, $D_r=80\%$ とした。表層地盤の平均的なせん断波速度は $V_s=130\text{m/s}$ 程度であると考えられる。図-3 に既往の実験²⁾における地盤のせん断剛性の深度分布を示す。

d) 杭基礎

試験体 No.1 に近接させる杭基礎は, 飽和地盤中の支持杭を模擬した既往の杭基礎遠心実験³⁾で使用した試験

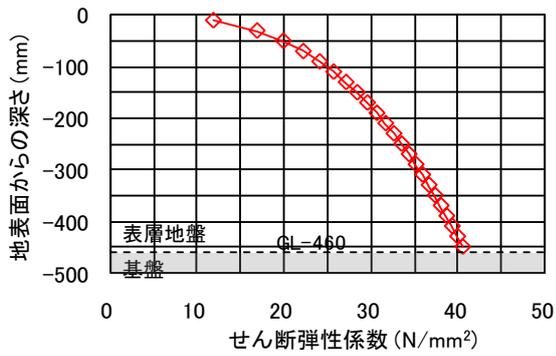


図-3 表層地盤のせん断剛性の深度分布

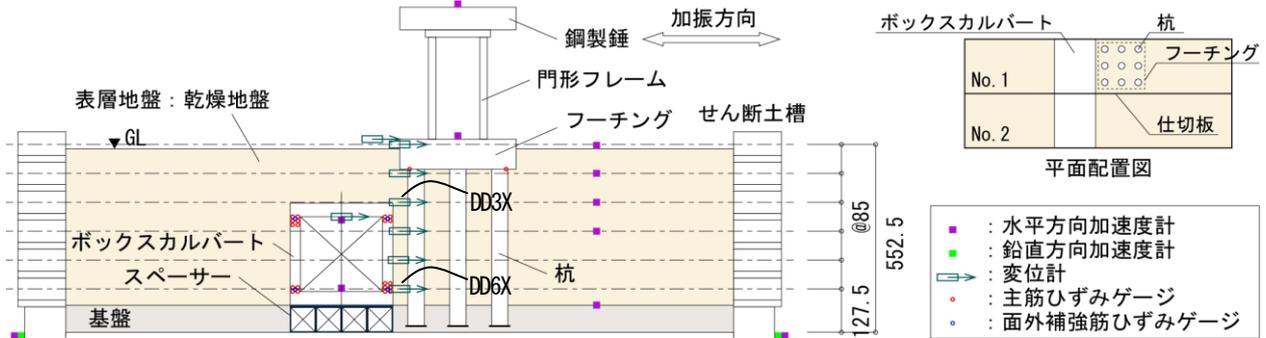


図-4 計測器の配置

体とした。この既往実験においては、フーチング及び上部構造物は無損傷であったが、RC杭にはひび割れ及び主筋の降伏を経験した。

e) 計測器

計測項目は、振動台上の加速度、地盤の加速度、ボックスカルバート頂版及び底版の加速度、フーチング天端の加速度、鋼製錘天端の加速度、せん断土槽の各層変位、ボックスカルバートの頂版及び底版の相対変位、フーチング天端の変位、ボックスカルバート壁上部・下部主筋のひずみ、杭頭部主筋のひずみとした。計測器の配置を図-4に示す。

(2) 加振条件

自重として25Gの遠心力を作用させながら、水平1方向に兵庫県南部地震ポートアイランド波形（以下、地震波と称する。）を用いた加振を6ケース実施した。加振は地震波による微小加振から開始し、徐々に入力レベルを漸増させ、加振No.d5においてボックスカルバート壁主筋の降伏を確認した。振動台で入力できる最大レベルの地震波を加えた後、30Hz正弦波による加振を2ケース実施して、ボックスカルバートの損傷を促した。

(3) 実験結果

以下に、ボックスカルバートに杭基礎が近接する場合（No.1）と近接構造物がない場合（No.2）の最大加振時における応答性状を比較して示す。表-5に地震波及び

表-5 振動台加速度の最大値

No.	入力加速度(m/s ²)	入力波	備考
d1	25.78 [1.031]	ポートアイランド地震波形	
d2	43.76 [1.750]		
d3	88.11 [3.524]		
d4	66.90 [2.676]		
d5	186.5 [7.460]		壁主筋降伏
d6	315.6 [12.62]	正弦波	最大加振
d7	460.6 [18.42]		
d8	269.3 [10.77]		

※[]の値は実大に換算した加速度を表す。

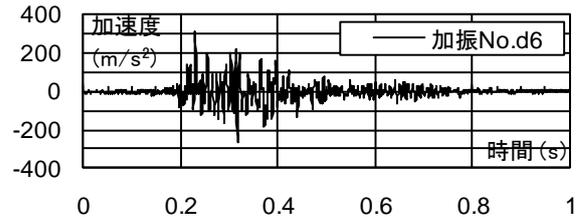


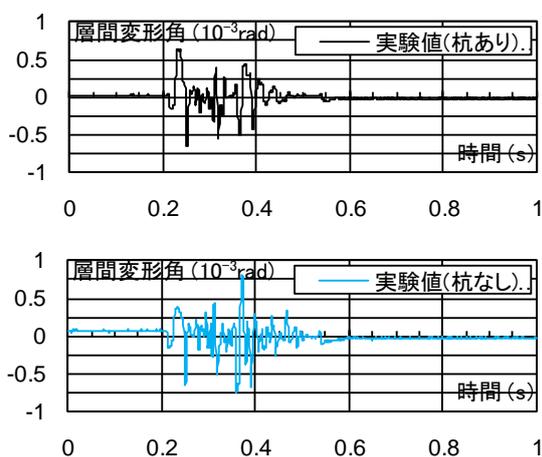
図-5 最大加振時の振動台加速度の時刻歴

正弦波による加振で計測した振動台上の加速度の最大値の一覧を、図-5に最大加振時における振動台上の加速度の時刻歴を示す。

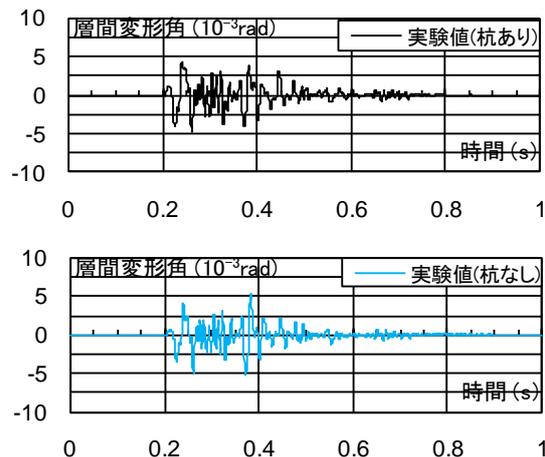
a) ボックスカルバートの層間変形角

図-6に加振No.d3及び加振No.d6におけるボックスカルバートの層間変形角の時刻歴を示す。層間変形角は上下床版の相対変位を内法高さ220mmで除して求めた。主筋が未降伏である加振初期（No.d3）における杭基礎がある場合とない場合の時刻歴では、両者の最大応答値はほぼ同程度であったが、最大応答近傍の振動数が異なり、近接構造物の有無がボックスカルバートの応答性状に少なからず影響していることがわかる。一方、地盤と構造物の両者が非線形領域に至る加振No.d6の応答性状に関しては、両者の波形に顕著な差異はなく、近接構造物の有無による影響は殆どないことがわかる。これは、加振No.d6において、杭基礎及びボックスカルバートと地盤が非線形化することにより、地盤と構造物の剛性の差が小さくなったことが理由として挙げられる。

b) ボックスカルバート壁主筋のひずみ



(1)加振 No.d3 : 加振初期



(2)加振 No.d6 : 最大加振

図-6 ボックスカルバート層間変形角の時刻歴

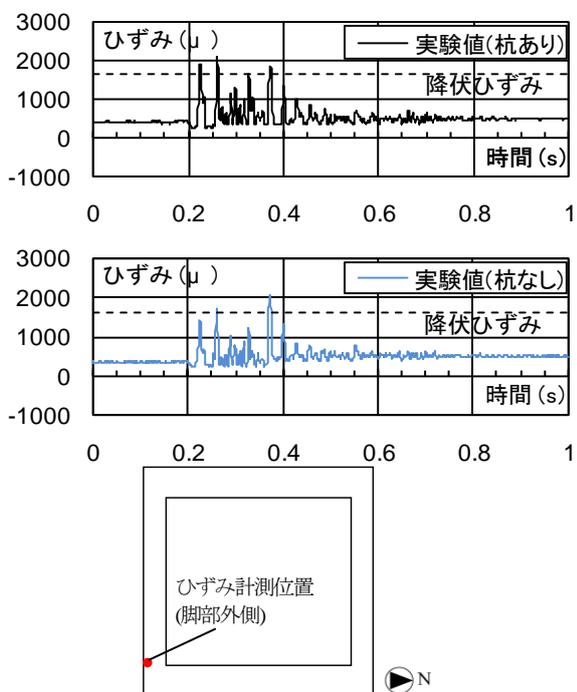


図-7 ボックスカルバート主筋ひずみの時刻歴(加振 No.d6)

図-7 にボックスカルバート壁主筋のひずみの時刻歴を示す。主筋位置は杭が近接しない方の壁の脚部における外側の主筋である。縮尺鉄筋 D1.0 の降伏ひずみは 1643μ であり、本実験においては、杭基礎がある場合もない場合も壁主筋が降伏領域に到達した。層間変形角と同様に、加振 No.d6 においては、主筋ひずみに関しても杭基礎の有無による影響は観られなかった。

c) ボックスカルバートのひび割れ

図-8 に試験終了後に観察したボックスカルバートのひび割れ発生状況を示す。No.1, No.2 とも壁の上下端部における水平ひび割れのみが生じており、曲げ降伏先行型であった。

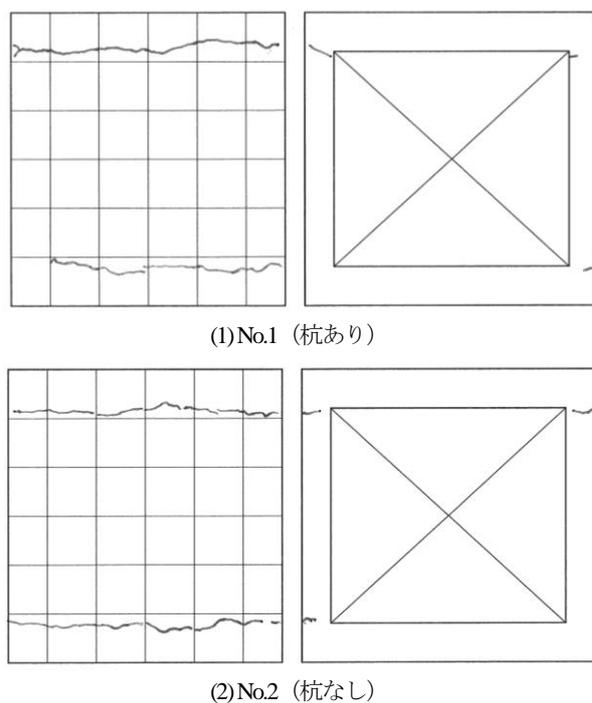


図-8 ボックスカルバートの試験終了時におけるひび割れ発生状況

d) 見かけのせん断剛性の評価

ボックスカルバートの剛性は、ひび割れ、鉄筋降伏等の発生により低下し、最大加振近傍においては地盤の剛性と同程度であったと推察した。そこで、地盤とボックスカルバートのせん断応力-せん断ひずみ関係に基づき、見かけのせん断剛性を比較した。

前述のボックスカルバート静的載荷試験の荷重-変形関係から、カルバートの見かけの初期せん断剛性及び、壁主筋降伏時の見かけのせん断剛性を算出し、割線剛性で表すこととした。見かけの初期せん断剛性は図-2 における+1 サイクルに生じた最大荷重の 1/3 荷重点に最も近い点 ($0.182 \times 10^3 \text{ rad}$, 0.34 kN)、主筋降伏後の見かけの

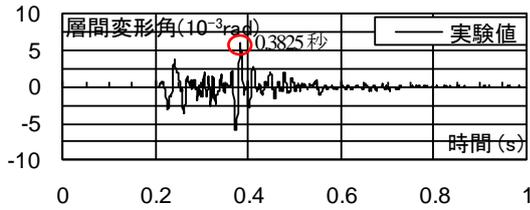


図-9 地盤層間変形角の時刻歴(加振 No.d6)

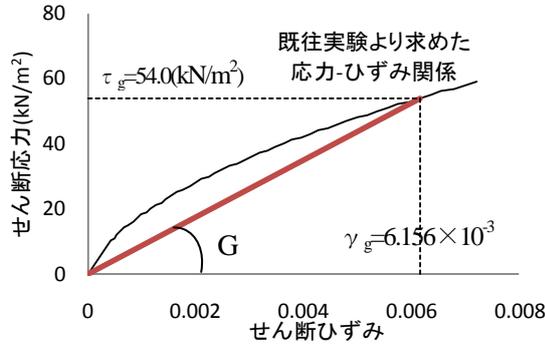


図-10 地盤の割線剛性の算出

せん断剛性はボックスカルバート主筋が降伏した+5 サイクルのピーク点 ($5.00 \times 10^3 \text{ rad}$, 1.14 kN) と原点を結んだ剛性とした。ここで、荷重を応力に変換する際の断面積は、静的載荷試験供試体の平面投影面積 (0.0366 m^2) とした。

地盤の初期せん断剛性は、既往の実験²⁾で得られた初期せん断弾性係数分布(図-3)に基づき、GL-310mmにおける値とした。地盤の最大変形時におけるせん断剛性は、図-9に示す地盤層間変形角の時刻歴(加振 No.d6)より、地盤最大変形時刻 0.3825 秒におけるせん断ひずみ $\gamma_g = 6.156 \times 10^3$ より求めた。ここで、地盤の変形はボックスカルバートの高さに合わせるため、図-4に示す変位計 DD3X と DD6X の相対変位から求めた。

図-10に硅砂の動的変形特性試験と地盤の初期剛性を基に修正 R-O モデルで表した地盤の応力-ひずみ関係を示す。図-10より地盤最大変形時の地盤のせん断応力は $\tau_g = 54.0 \text{ kN/m}^2$ と求まり、地盤最大変形時の地盤のせん断剛性は、図-10に示す修正 R-O モデルのスケルトンカーブの割線剛性として算出した。

表-6にボックスカルバート及び地盤の見かけの剛性を比較した結果を示す。この結果より、ボックスカルバートの剛性は加振を経るごとに低下し、主筋降伏後は剛性が地盤の剛性よりも小さくなったため、ボックスカルバートは周辺地盤の変形に追随する挙動となったことがわかる。

e) 近接構造物の有無の影響

本実験において、非線形領域におけるボックスカルバートの応答性状は近接する構造物の有無に関わらずほぼ同様であった。これは、加振を経るごとにボックスカル

表-6 見かけのせん断剛性の比較(単位: kN/m^2)

	カルバート	地盤
初期せん断剛性	5.19×10^4	3.60×10^4
せん断剛性	6.23×10^3 (主筋降伏時)	8.77×10^3 (最大変形時)

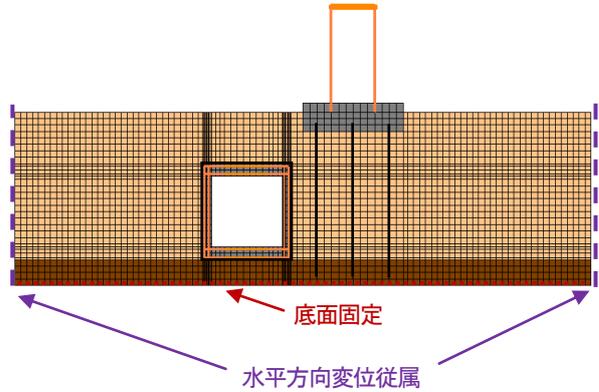


図-11 解析モデルのメッシュ

バートの剛性が低下したことと同様に、杭基礎の剛性も低下し、鉄筋降伏後は地盤の剛性よりも小さくなったためと考えられる。

3. FEM解析

(1) 解析モデル

a) 解析モデルのメッシュ

図-11に解析モデルのメッシュを示す。解析は平面ひずみ問題とし、フーチングとボックスカルバート及び地盤は四辺形平面ひずみ要素でモデル化し、杭と上部構造物は梁要素、ボックスカルバートの主筋はトラス要素、面外拘束筋は四辺形要素の鉄筋層としてモデル化した。杭基礎(RC杭及びフーチング)と地盤、ボックスカルバートと地盤は節点を別々に定義し、その間に接合要素を挿入して、杭の軸方向相対すべり、ボックスカルバートとフーチング面におけるせん断すべり及び剥離を考慮した。杭を表す要素は支持基盤及びフーチング内部まで埋込み、埋込み端部の節点を支持基盤の節点と緊結して相対すべりが生じないようにした。

b) 材料構成モデル

図-12にコンクリート、鋼材及び地盤の応力-ひずみ関係の概要を示す。材料強度等は前述の材料試験結果に基づき定義した。

コンクリート材料の応力-ひずみ関係は、圧縮側は修正 Ahmad モデル⁴⁾、引張側は引張強度までは線形とし、ひび割れ後は引張応力を負担しないこととした。繰返し載荷時の履歴特性は長沼らのモデル⁵⁾、コンクリート破

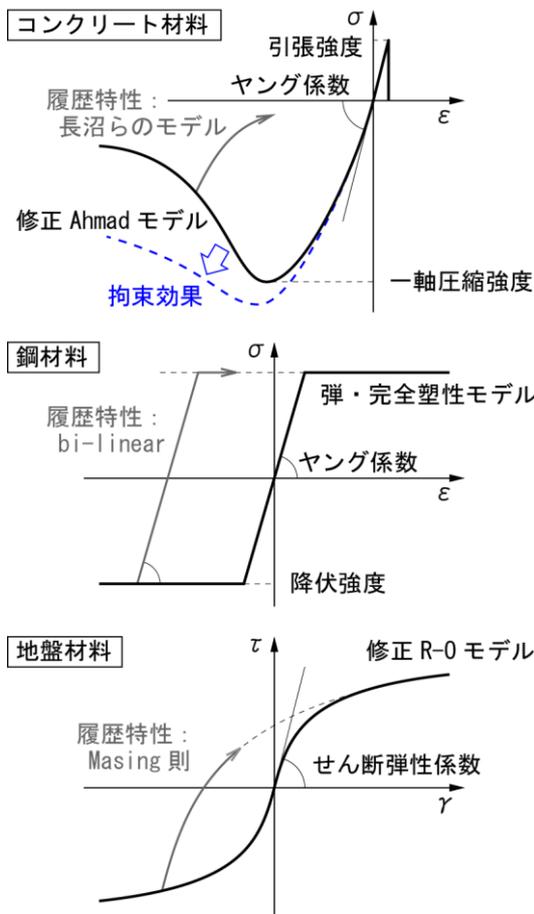


図-12 ボックスカルバート主筋ひずみの時刻歴

壊条件は Ottosen の 4 パラメータモデルに畑中らの係数を考慮したモデル⁶⁾、ひび割れ面におけるせん断伝達特性は長沼のモデル⁷⁾により表した。

鋼材の応力-ひずみ関係は降伏点を折れ点とする弾・完全塑性モデルで表した。

地盤の応力-ひずみ関係は修正 R-O モデルにより表し、繰返し載荷時の履歴特性は Masing 則に基づくものとした。地盤の初期せん断弾性係数は図-3 に示した深度分布に従い、鉛直方向の位置に応じた値を要素ごとに定義した。

c) 境界条件

モデルの底面は完全固定とし、せん断土槽の変形を模擬するため、モデル長辺方向端面の節点間には水平方向変位を従属させ、側面の鉛直方向はフリーとした。

d) 加振条件

解析の加振は、地盤、構造物ともに非線形領域に至った加振 No.d6 を対象とした。入力加速度は振動台上で計測した加速度を基に、水平方向（モデル長辺方向のみ）、鉛直方向、モデル短辺方向軸周りの回転の 3 成分の加速度とした。

減衰は初期剛性比例型とし、減衰定数は一次固有振動数に対して 3% と仮定した。

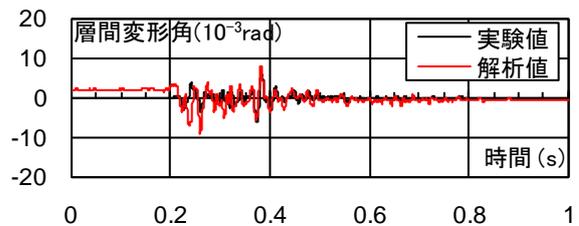


図-13 地盤層間変形角の時刻歴(加振 No.d6)

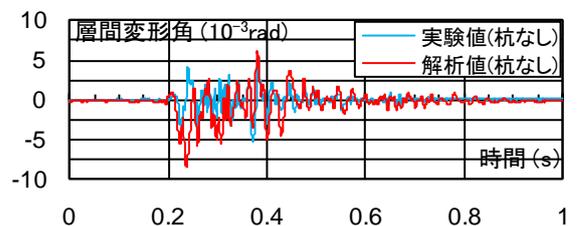
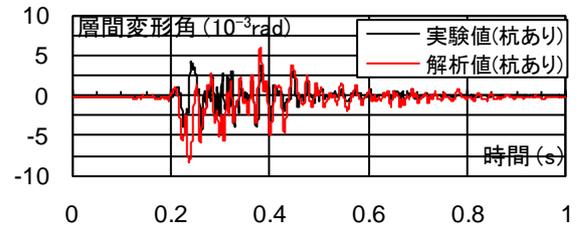


図-14 ボックスカルバート層間変形角の時刻歴(加振 No.d6)

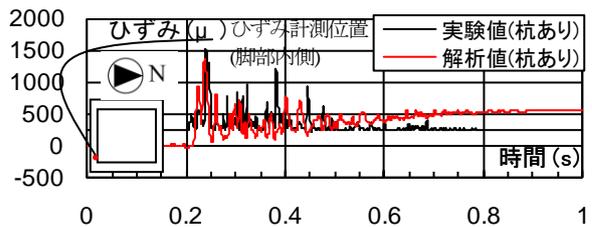


図-15 ボックスカルバート主筋ひずみ時刻歴(加振 No.d6)

(2) 解析結果

図-13 に地盤の層間変形角、図-14 にボックスカルバートの層間変形角の時刻歴を実験結果と比較して示す。地盤及びボックスカルバートともに、0.20~0.25 秒の応答性状においては、実験と解析で差異が観られるが、その間以外に関しては、実験の応答性状を良好な精度で再現できていることがわかる。この 0.20~0.25 秒間の応答性状の差異については、実験における加振 No.d6 以前の加振の影響が、解析では考慮されていないことが理由として挙げられる。また、近接構造物の影響については、図-14 からわかるように、近接構造物の有無を変数とした解析ケースの比較において顕著な差異はなく、実験と同様な傾向を示した。

図-15 にボックスカルバートの主筋ひずみの時刻歴を実験結果と比較して示す。主筋位置は杭が近接しない方の壁の脚部における内側の主筋である。応答波形に若干の差異はあるが、最大応答値はほぼ同じであり、主筋ひ

ずみに関しても実験と解析は良好に対応した。

図-16 にボックスカルバートの最大変形時における損傷状況を示す。ボックスカルバートの主要なひび割れは、図中に赤丸で示すように、壁の上下端部に集中しており、せん断変形よりも曲げ変形が支配的であったと言える。即ち、解析の損傷状況は実験と同様の傾向を示した。

以上より、ここで仮定した解析手法により、実験における地盤及び構造物の非線形応答性状を良好な精度で再現できることを確認した。

4. まとめ

RC 造ボックスカルバートの縮小模型を用いた遠心模型振動実験を実施し、近接する構造物の有無による応答性状に与える影響を検証した。本実験におけるボックスカルバートの応答性状には、低い入力レベル加振においては近接する構造物の有無による影響が少なからず認められたが、地盤及び構造物が非線形領域に達する加振においては、近接構造物の影響は殆どないことがわかった。これは、加振を経るごとにボックスカルバート及び杭基礎の剛性が低下し、鉄筋降伏後は地盤の剛性よりも小さくなったためと考えられる。本実験を対象として、地盤と構造物の連成効果を考慮した非線形時刻歴解析を実施した。その結果、ボックスカルバートの主筋ひずみや変形等、実験における地盤及び構造物の非線形応答性状を良好な精度で再現できることを確認した。また、解析においても、近接構造物の有無による影響はほとんど現れず、実験と同様な傾向を示した。

参考文献

- 1) 土木学会：原子力発電所屋外重要土木構造物の構造健全性評価に関するガイドライン，pp.315-342，2008。
- 2) 穴吹拓也，堤内隆広，米澤健次，樋口俊一，伊藤浩二，江

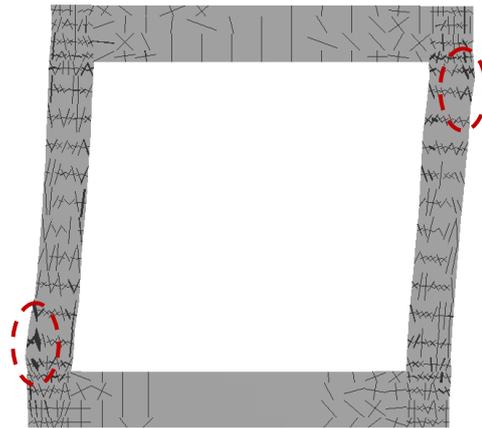


図-16 解析によるボックスカルバートの損傷状況

尻譲嗣：RC 杭基礎を対象とした遠心振動実験と構造物～地盤連成系 FEM 解析，第 13 回日本地震工学シンポジウム論文集，GO44-Thu-PM-5，pp.1062-1069，2010。

- 3) 鈴木正寛，大塚林菜，樋口俊一：RC 杭基礎構造物の遠心模型振動実験，第 66 回年次学術講演会講演概要集，I-504，2011。
- 4) 長沼一洋：三軸圧縮下のコンクリートの応力～ひずみ関係，日本建築学会構造系論文集，第 474 号，pp.163-170，1995。
- 5) 長沼一洋，大久保雅章：繰返し応力下における鉄筋コンクリート板の解析モデル，日本建築学会構造系論文集，第 536 号，pp.135-142，2000。
- 6) S. Hatanaka, Y. Kosaka and Y. Tanigawa: Plastic Deformational Behavior of Axially Loaded Concrete under Low Lateral Pressure - An Evaluation Method for Compressive Toughness of Laterally Confined Concrete (Part 1) - , Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No.377, pp.27-40, 1987.
- 7) 長沼一洋：平面応力場における鉄筋コンクリート板の非線形解析モデル 鉄筋コンクリート壁状構造物の非線形解析手法に関する研究（その 1），日本建築学会構造系論文報告集，第 421 号，pp.39-48，1991。

CENTRIFUGE VIBRATION TEST OF RC BOX CULVERT

Kenji YONEZAWA, Masahiro SUZUKI, Takuya ANABUKI,
Shunichi HIGUCHI and Koji ITO

Recently, it is desirable that nonlinear responses of structures are clarified by soil-structure interaction analysis, especially for evaluating the seismic performances of underground structure or foundation, due to a severe seismic action is expected for the seismic design. In this research, centrifugal vibration tests of reinforced concrete box culvert under severe earthquake was conducted, firstly. Then, finite element analysis for the test was conducted to clarify an applicability of the analytical method. By comparing experimental results and analytical results, it is confirmed that reasonable non-linear responses of both ground and RC box culvert were reproduced by the analysis.