

# 繰返し载荷を受ける直接基礎橋脚の 地震時傾斜・沈下連成挙動に関する検討

## A Study on Seismic Coupled Incline and Settlement Behavior of Pier Shallow Foundation under Reciprocal Loading

21N3100016H 川田 草貴 (基礎・地下構造研究室)  
Soki KAWADA / Foundation and Underground Structure Lab.

**Key Words** : eccentric load, inclined load, bearing capacity, hysteric energy, settlement

### 1. 研究背景

地震時における慣性力の作用によって直接基礎に偏心・傾斜荷重が作用して基礎底面地盤が塑性化した場合には、鉛直方向の荷重が増加していても鉛直下向きに変位（沈下）が生じる場合がある。桁等を支持する直接基礎に地震後に有害な沈下量が残留すると地震後の鉄道や道路の供用性・復旧性に影響が出るため、これらの性能を評価するためには、地震後に残留する沈下量を高精度に把握する必要がある。しかし水平載荷と鉛直変位の関係が明らかになっていないため、直接基礎の地震後の沈下量を直接照査できていないのが現状である。そこで本研究では、直接基礎橋脚模型に地震時における載荷経路を模擬した水平載荷実験を実施し、水平載荷と鉛直変位の関係を規定するパラメータについて考察した。

また地震後の直接基礎の沈下量を評価するモデルとして、非線形特性と履歴特性を考慮した地盤ばねを基礎底面に多数配置する分布地盤ばねモデルが提案されている<sup>1)</sup>。このモデルは沈下量の累積的な増加を比較的簡易に、かつ精度よく評価できると考えられるものの未だ荷重規模等の検証が限定的であり、実務において全面的な実用化には至っていない。そこで本研究では、分布地盤ばねモデルを用いた動的非線形骨組み解析の結果を死荷重を広範に変化させた本模型実験の結果と比較することで、分布地盤ばねモデルの実現象に対する再現性を検討した。

### 2. 水平載荷実験

#### (1) 実験概要

図-1に実験装置の概要を示す。土槽寸法は幅1000mm、高さ400mm、奥行き199mmである。模型地盤は乾燥豊浦砂を用いて空中落下法にて作成し、その乾燥密度は平均 $1.58\text{g/cm}^3$ 、相対密度は平均86%であった。直接基礎橋脚模型は、基礎幅100mm、高さ336mm、奥行き195mm、質量3.3kgの剛体模型である。この上に錘として鉄板を複数枚設置することで死荷重として鉛直荷重 $V$ を一定に載荷した。また基礎模型底面には摩擦抵抗を確保する

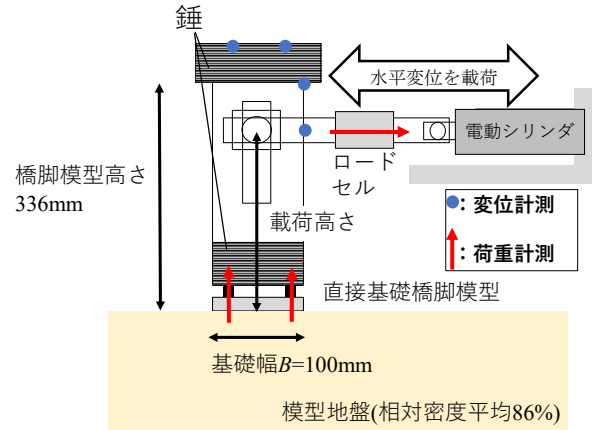


図-1 実験装置模式図

ためサンドペーパーを貼り付けてある。また直接基礎橋脚模型はピンおよびリニアガイドで電動シリンダと結合している。

計測は、レーザー変位計により模型上面（上部に設置した錘の上面）の鉛直変位2点、および模型上面（橋脚部の上面）と載荷高さの水平変位2点を計測している。また載荷点に設置してあるロードセルで水平荷重を計測している。

次に載荷方法について説明する。実験模型が載荷点を重心位置とする1質点系でモデル化できると仮定し、実地震波で加振した際の載荷点の応答変位をNewmark $\beta$ 法により解析的に求め、得られた応答変位の通りに載荷点に変位するように電動シリンダで $0.1\text{mm/s}$ の一定速度で準静的に載荷を行った。

入力変位波形は載荷終了毎にスケールを倍で増加させている。具体的には、入力変位波形の最大値 $\delta_{\text{m}}$ を、降伏変位 $\delta_{\text{y}}$ の1倍、2倍、4倍、8倍となるようにスケールを載荷終了毎に増加させた。なお、この $\delta_{\text{m}}$ と $\delta_{\text{y}}$ の比 $\delta_{\text{m}}/\delta_{\text{y}}$ は降伏変位に対する入力変位波形の最大値の割合を示すものであり、塑性率 $\mu$ とする。この入力変位波形は、鉄道標準L2スペクトルI（海溝型）と神戸地震波（内陸型）の2種の地震波から作成した（図-2）。この他、各 $\mu$ での水平変位を1回のみ与える場合（繰返し回数

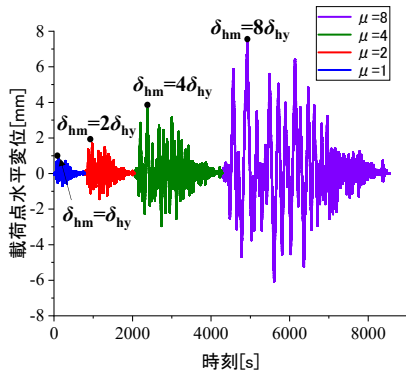


図-2 載荷点水平変位時刻歴 (425\_200\_内陸型)

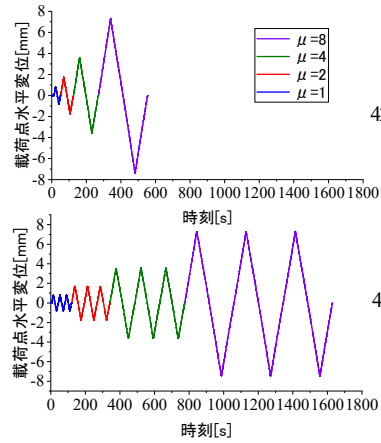


図-3 載荷点水平変位時刻歴

(繰返し回数1回, 3回)

表-1 実験ケース

ケース名	載荷高さ (mm)	入力波	模型死荷重 F(N)	死荷重安全率 F <sub>s</sub>	ケース名	載荷高さ (mm)	入力波	模型死荷重 F(N)	死荷重安全率 F <sub>s</sub>
128_100_3	100	繰返し回数3回	128	44	128_100_海溝型	100	鉄道標準L2 スペクトル1	128	44
260_100_3			260	22	260_100_海溝型			260	22
425_100_3			425	13	425_100_海溝型			425	13
603_100_3			603	9.3	603_100_海溝型			603	9.3
128_100_1	100	繰返し回数1回	128	44	128_100_内陸型	100	兵庫県南部 地震	128	44
260_100_1			260	22	260_100_内陸型			260	22
425_100_1			425	13	425_100_内陸型			425	13
603_100_1			603	9.3	603_100_内陸型			603	9.3
128_200_3	200	繰返し回数3回	128	44	128_200_海溝型	200	鉄道標準L2 スペクトル1	128	44
260_200_3			260	22	260_200_海溝型			260	22
425_200_3			425	13	425_200_海溝型			425	13
603_200_3			603	9.3	603_200_海溝型			603	9.3
128_200_1	200	繰返し回数1回	128	44	128_200_内陸型	200	兵庫県南部 地震	128	44
260_200_1			260	22	260_200_内陸型			260	22
425_200_1			425	13	425_200_内陸型			425	13
603_200_1			603	9.3	603_200_内陸型			603	9.3

V<sub>m</sub>=5659N(無偏心・無傾斜の極限鉛直支持力)

V<sub>m</sub>=5659N(無偏心・無傾斜の極限鉛直支持力)

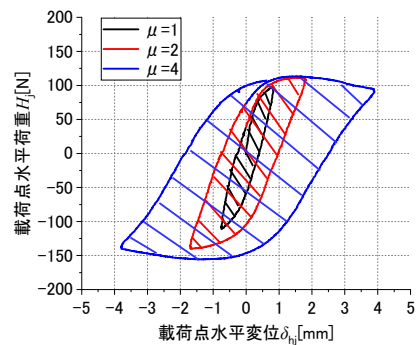


図-4 履歴吸収エネルギー (斜線部)

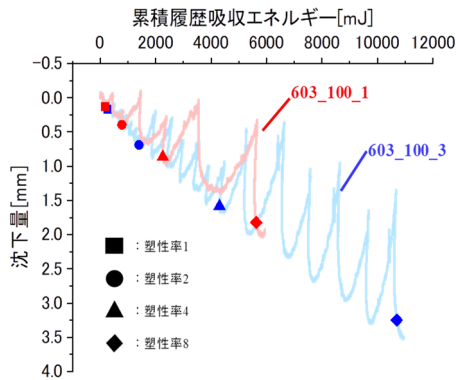


図-5 履歴吸収エネルギーと沈下量の関係

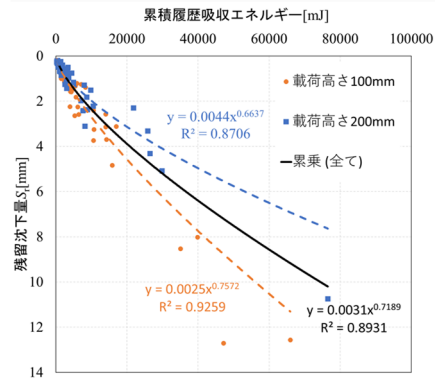


図-6 累積履歴吸収エネルギーと残留沈下量の累乗近似

1回)と, 3回のみ与える場合(繰返し回数3回)の実験も行った(図-3)。

この他, 載荷高さや模型死荷重も残留沈下量に影響を及ぼすと考えられるため, パラメータとして設定した。載荷高さについては100mmと200mm(それぞれ基礎幅の1倍と2倍), 模型死荷重については $V/V_m=2\sim 10\%$ 程度(すなわち死荷重安全率 $F_s=9\sim 44$ 程度)となる範囲で4ケース設定した。これらの実験ケースを表-1に示す。

## (2) 実験結果

沈下は底面地盤の塑性化によって生じるものであり,

塑性化の程度が大きいかほどそこで消費されたエネルギーは大きいはずである。そして, 任意の時点までに載荷点でした仕事の累計, すなわち累積履歴吸収エネルギーを用いることで, その時点までの累積沈下量の大きさを簡潔にモデル化できる可能性が考えられる。一般に, 1サイクルあたりの履歴吸収エネルギーは図-4の斜線部の面積として定義されるが, ここでは瀧本・川島<sup>2)</sup>の考え方等を参考としてこれらを順次累積させたものを, 累積履歴吸収エネルギーとした。図-5に, 累積履歴吸収エネルギーと沈下量の関係の一例を示す。各 $\mu$ 終

了時点の沈下量を残留沈下量として図中に併せて示すと、履歴吸収エネルギーの累積に伴って残留沈下量も累積的に増加していく傾向が確認できる。簡単のため履歴を除いて残留沈下量のみ抽出し、全実験ケースでプロットした結果を図-6に示すと、残留沈下量と履歴吸収エネルギーの関係は緩やかな非線形性を有しながら、高い相関があることが分かった。ただし载荷高さの違いに着目すると近似式に差異が見られ、累積履歴吸収エネルギーで沈下量を推定するには载荷高さによる補正を行う必要がある。

### 3. 非線形分布地盤ばねモデルによる動的骨組み解析

本章では分布地盤ばねモデルによる数値解析結果から累積履歴吸収エネルギーと残留沈下量の間関係を整理することで、模型実験で得られた特徴を分布地盤ばねモデルが再現できるか検討した。

#### (1) 解析モデル概要

解析モデルの条件は類似の解析事例<sup>9)</sup>を参考とし、図-7に示すようなモデルとした。具体的には、橋脚高さ12m、基礎幅5m、奥行き5mの直接基礎橋脚とし、基本とする構造物総重量は文献<sup>3)</sup>を参考に8551kNとした。これらの条件の下、重心位置が基礎幅の2倍の10mになるように各節点の重量と位置を決定した。地盤ばねについてはフーチングに101の節点を配置し、各節点に非線形地盤ばね要素を設けることで分布地盤ばねモデルとしている。従って地盤ばね1つ当たりが負担する死荷重は85.51kNとなり、死荷重安全率を模型実験の最小安

全率9.3と合わせるために、地盤ばね要素の極限鉛直支持力を802kNとした。ここから死荷重をパラメータとするため、極限鉛直支持力802kNを一定としたまま地盤ばね1つ当たりにかかる死荷重を低下させることで、死荷重安全率を模型実験の4つの実験ケースと揃えた ( $F_s=44, 22, 13, 9.3$ )。

ここで地盤ばねの非線形性のモデル化について図-8で説明する。本研究では基礎幅の10%で極限鉛直支持力に達するとし、これより小さい変位レベルで剛性が低下するとする第一折点を設けた。なお極限鉛直支持力を  $P_2$ 、第一折点の鉛直支持力を  $P_1$  とすると、 $P_1/P_2=50\%$  としている。また  $P_2$  の値については、模型実験における偏心・傾斜荷重作用時の極限鉛直支持力の低減率を802kNに乘算して、低減して評価した。

鉛直地盤ばね定数  $K_v$  については、別途実施した鉛直単調载荷実験の結果から  $K_v$  を調べて模型実験での死荷重による沈下量を計算して、解析ケースでも基礎幅に

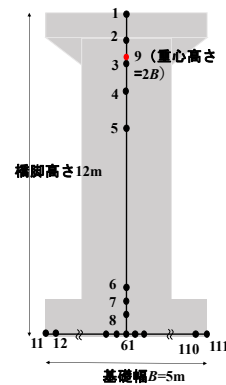


図-7 解析モデル

表-2

常時の死荷重安全率 $F_s$	9	13	22	45
解析モデル死荷重[kN]	8551	6027	3687	1815
地盤ばね1つ当たりの鉛直荷重[kN]	85	60	37	18
極限鉛直支持力[kN]	802	802	802	802
$P_2$ 低減率	0.346	0.267	0.228	0.141
偏心・傾斜を考慮した極限鉛直支持力[kN]	278	214	183	113
$P_1/P_2$ [%]	50			
地盤ばね定数[kN/m]	1177			
第一折点 $P_1$ [kN]	139	107	91	57
剛性低下率 $\alpha$	0.31	0.22	0.18	0.11

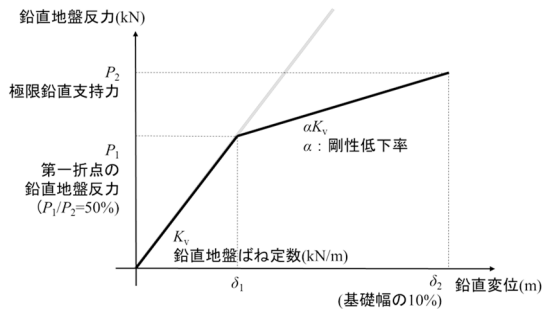


図-8 鉛直地盤ばねのモデル化

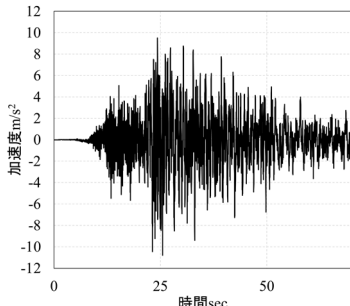


図-9 入力地震波 (海溝型)

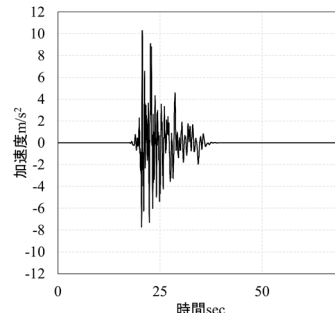


図-10 入力地震波 (内陸型)

対して同等の割合で沈下するように  $K_v$  を決定した。これらの実験ケースを表-2にまとめる。なお、模型実験の結果載荷高さが累積履歴吸収エネルギーと残留沈下量の関係に感度を持っていたことから、重心位置を変化させたケースは設定していない。

## (2) 入力地震波

入力地震波については、海溝型として1978年宮城県沖地震を、内陸型として兵庫県南部地震の加速度波形を入力した(図-9, 図-10) またP- $\Delta$ 効果を考慮するため、鉛直下向きに重力加速度 $10\text{m/s}^2$ を与えている。

## (3) 解析結果

各解析モデルの橋脚天端位置の水平変位を、内陸型の応答のみ図-11にまとめる。死荷重が重いケースは応答水平変位が大きく、載荷終了時に水平変位が残留していることが分かる。

次に各解析モデルのモーメント $M$ -回転角 $\theta$ 関係を内陸型のみ図-12にまとめる。死荷重が大きいほど作用するモーメントは大きくなり、これに伴って大きく回転変形を生じている。

ここで骨組み解析における累積履歴吸収エネルギーと残留沈下量の関係を調べる。累積履歴吸収エネルギーは図-12の $M$ を重心高さ $10\text{m}$ で除して重心位置に作用する水平荷重とし、重心位置における水平変位との関係から重心位置で累積する履歴吸収エネルギーを計算した。そして $M=0$ となる点における沈下量を残留沈下量として抽出し、全ケースで図-13にまとめた。分布地盤ばねモデルを用いた骨組み解析の結果から調べた累積履歴吸収エネルギーと残留沈下量の関係は、模型実験と同様に概ね同一線上に集約している。

## 5. まとめ

水平載荷実験の結果、任意の時点までに累積した載荷点の水平方向の履歴吸収エネルギーと、このときに残留している沈下量には死荷重や地震波に依らない強い相関関係があることが分かった。エネルギーの累積方向と変位方向が一致していないにも関わらずこのような結果が得られたことは、水平載荷によって地盤が塑性化することで基礎全体が沈下するという、地震時の傾斜・沈下連成挙動から妥当であると考えられる。また分布地盤ばねモデルによる数値解析の結果を整理すると同様の傾向が見られたことから、分布地盤ばねモデルは直接基礎の地震時挙動自体をよく表現できるモデルであると言える。ただし定量的には累乗近似の係数の差異がかなり大きく、近似式まで精度よく一致させるためには $P_1/P_2$ の割合や非線形特性・履歴特性のモデル化などについてより詳細な検討が必要である。

## 参考文献

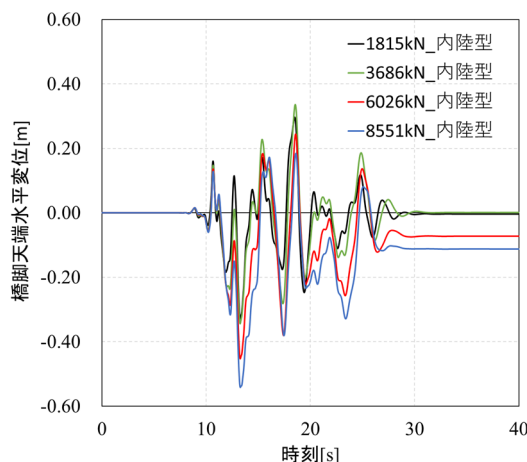


図-11 橋脚天端水平変位時刻歴 (内陸型)

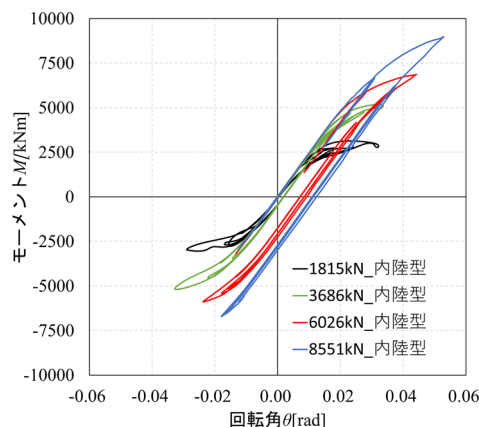


図-12 モーメント  $M$ -回転角  $\theta$ 関係 (内陸型)

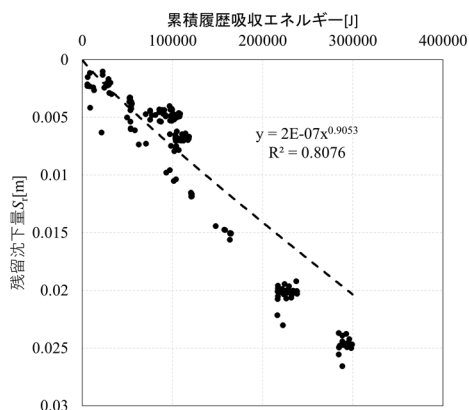


図-13 累積履歴吸収エネルギーと残留沈下量の関係

- 1) 西村隆義, 西岡英俊, 神田政幸, 館山勝: 分布地盤ばねモデルによる地震後の直接基礎の沈下量評価法, 鉄道総研報告, Vol.24, No.7, pp. 23-28
- 2) 滝本和志, 川島一彦: 基部で曲げ破壊する RC 橋脚のエネルギー吸収容量の定式化, 土木学会論文集, No.532/V-30, pp. 5-13, 1996.
- 3) 石田彩, 西岡英俊, 佐名川太亮, 尾崎匠: レベル2地震動による直接基礎の支持地盤塑性化後の残留沈下に関する数値解析, 第 47 回土木学会関東支部技術研究発表会, I-5, 2020.