

耐震補強された RC 橋脚の全体系地震応答解析性状に関する研究

埼玉大学	学生会員	○阿部 正和
埼玉大学	学生会員	竹本 雄一郎
埼玉大学	フェロー会員	睦好 宏史
埼玉大学	正会員	牧 剛史

1. 研究背景・目的

阪神淡路大震災以降、既設 RC 橋脚に耐震補強が実施されてきた。RC 橋脚を耐震補強した場合に、橋脚躯体の曲げ・せん断耐力が増大する場合があります、大きな地震が起きた場合には損傷が橋脚躯体から杭などの基礎構造物に生じ、甚大な被害が生じることが危惧されている。しかしながら、補強した RC 橋脚の地盤・基礎を含む全体系の地震応答性状および損傷部位とその程度などはほとんど明らかにされていない。場合によっては基礎の補強などが必要になることが想定される。本研究では、RC 橋脚—基礎—地盤から成るサブストラクチャ仮動的実験手法（以下、仮動的実験）¹⁾を開発し、RC 橋脚が耐震補強された場合、基礎にどの程度の影響を及ぼすかを実験的に明らかにした。

2. 仮動的実験

仮動的実験では、ある自由度に対して復元力モデルを仮定する代わりに、載荷実験から検出した復元力を直接解析に取り込み、運動方程式を逐一解いていく。すなわち、複雑な復元力特性を示す部材の応答を載荷実験から直接検出することで、より精度の高い解を求めることができる手法である。一般に、復元力特性が複雑な部分は地盤 - 基礎系とされるため、地盤 - 基礎系の復元力を載荷実験から検出することとした。

本研究では、地震時に橋脚の水平運動、基礎の水平運動および回転運動が生じると仮定して、RC 橋脚系を 2 質点 3 自由度系でモデル化した。このとき基礎の水平運動をスウェイバネ、回転運動をロッキングバネで表し、減衰をダッシュポットで表している。そして、橋脚のバネに対してはバイリニア型の復元力モデルを仮定し、基礎のスウェイバネ、ロッキングバネに対しては載荷実験から復元力を検出し、コンピュータの応答計算にフィードバックしている（図-1）。このとき、応答計算で解かれる 3 自由度系の運動方程式を式（1）に

示す。

$$[M]\{\ddot{u}\} + [c]\{\dot{u}\} + [k]\{u\} = -[M]\{f\}\ddot{u}_g \quad (1)$$

$$[M] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix} \quad [K] = \begin{bmatrix} k & -k & -kH \\ -k & k+k_h & kH \\ -kH & kH & kH^2+k_r \end{bmatrix} \quad \{u\} = \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \theta \end{Bmatrix} \quad \{f\} = \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

[C]：5%のレーリー減衰

$\ddot{u}_g$ ：水平地震動

m_1 ：上部構造の質量

k ：橋脚バネの初期剛性

m_2 ：フーチングの質量

k_h ：スウェイの初期剛性

I ：回転慣性

k_r ：ロッキングバネの初期剛性

H ：橋脚高さ

運動方程式を解くための数値積分法は、RC 構造物のように剛性劣化をする部材において無条件に安定なオペレータ・スプリッティング (OS) 法²⁾を用いた。入力地震波は、神戸海洋気象台で観測された兵庫県南部地震の地表面波 NS 成分の 8 秒間を、相似則等により時間を 0.5 倍、振幅を 1.44 倍に調整したものをを用いた。この入力地震波の積分時間刻みは 0.01 秒、最大加速度は 11.82m/s^2 である。

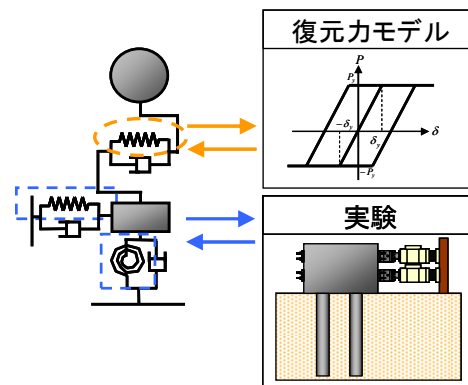


図-1 開発した仮動的実験システム

3. 対象構造物

本研究では RC 橋脚の耐震補強として適用例の多い RC 巻き立て補強を採用した。橋梁は兵庫県南部地震時の地震応答を求めるため、1995 年以前の設計基準をもとに許容応力度設計法で、震度が 0.25 として設計した。補強を施す前の RC 橋脚の曲げ降伏水平耐力は $0.6W_1$ （ W_1 ：上部工の重量）とし、補強された橋脚の曲げ耐力

を $1.2W_1$ と仮定した。橋脚、スウェイ、ロッキングの固有周期をそれぞれ T_1 、 T_2 、 T_3 とした時、供試体と実規模橋梁とで、 $T_1 : T_2 : T_3$ の比が同一になるように杭基礎を施工した。バイリニアモデルの降伏点など、3 自由度系に設定したパラメータを表-1 に示す。基礎は直径が 30cm、肉厚 6cm、杭長 13m の PHC 杭 (A 種) を 90cm 間隔で 2 本、プレボーリング工法を用いて打設し、高さ 145cm、断面 180cm×90cm のフーチングに、50cm 埋め込むことで作製した。供試体概要を図-2 に示す。

表-1 3 自由度系の設定値

質量	上部工 m_1 [ton]	フーチング m_2 [ton]	回転慣性 I [ton-m ²]
	11.16	5.021	3.912
橋脚	降伏耐力 P_y [kN]	降伏変位 δ_y [mm]	剛性 k [kN/mm]
	131.3	13.66	9.61
	剛性低下率	戻り剛性低下率	高さ H [m]
	0	0.1	0.94

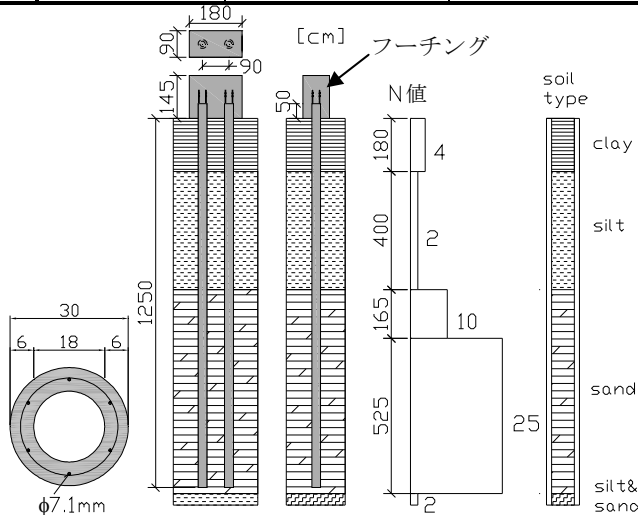


図-2 供試体概要

4. 載荷方法

本研究では、供試体に水平方向と回転方向の変位を与えるため、ジャッキ 2 つを用いてスウェイとロッキングを制御した。スウェイ・ロッキングの変位 (D_{sway} , D_{rocking}) を数値積分することで求め、これをジャッキ 1, 2 の変位 (D_{jack1} , D_{jack2}) に変換して載荷し、得られた復元力 (R_{jack1} , R_{jack2}) をスウェイ・ロッキングの復元力 (R_{sway} , R_{rocking}) に変換して、応答計算にフィードバックしている。変換式は式(2)、(3)を用いた。

$$\begin{Bmatrix} D_{\text{jack1}} \\ D_{\text{jack2}} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0.75 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} D_{\text{sway}} \\ D_{\text{rocking}} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{Bmatrix} R_{\text{sway}} \\ R_{\text{rocking}} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0.75 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} R_{\text{jack1}} \\ R_{\text{jack2}} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

5. 仮動的実験結果

図-3 に仮動的実験から求めた荷重-変位関係を示す。橋脚部分では応答は線形領域にとどまり、ほとん

ど損傷していないことが分かる。しかし、基礎のスウェイ、ロッキングを見ると大きく塑性変形していることがわかる。スウェイバネの最大変位についても仮動的実験後の正負交番試験から得られた終局変位の 71% 程度に達していることから、基礎での損傷が大きいことがわかる。図-4 に杭の PC 鋼棒に張ったひずみゲージから求めた最大曲率分布を示す。深さ 2m 付近で曲率が大きくなり、事前の曲げ試験で求めた杭の降伏曲率よりも 2.4 倍程度大きくなっている。これらのことから杭が損傷していることがわかる。

6. まとめ

(1) 復元力特性を精度良く再現することが困難である地盤-基礎系に対して、載荷実験から直接復元力を検出することにより、より実挙動に近い全体系地震応答を求めることができる仮動的実験手法を開発した。

(2) RC 橋脚に耐震補強を施すことにより、橋脚自体の損傷程度は小さくなるが、橋脚から基礎に伝達される地震力が増加するため、基礎の水平運動、回転運動が大きくなる傾向が見られた。このことから損傷が橋脚から杭基礎に移行することが明らかになった。

7. 参考文献

- 1) 岡田恒男：電算機-アクチュエータオンラインシステムによる構造物の地震応答実験 1982. 1
- 2) 中島 正愛 石田雅利 安藤和博：サブストラクチャ仮動的実験のための数値積分法，日本建築学会，構造系論文報告集，No. 417，pp. 107-117，1990. 1

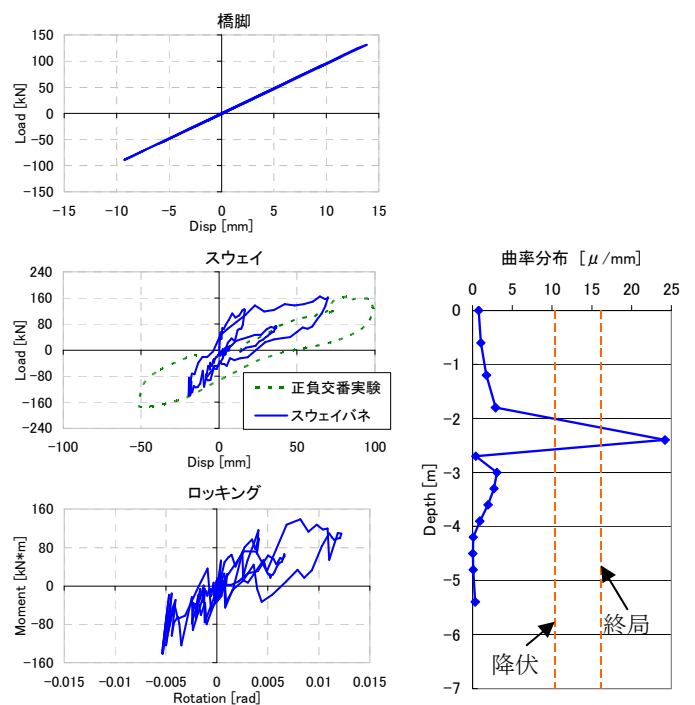


図-3 荷重変位関係

図-4 最大曲率分布