

# (65) 道路橋基礎杭の地震時挙動観測および解析

清水建設(株) (正員)田 蔵 隆 (正員)中 松 新 (正員)清水勝美  
(正員)木全宏之 (正員)古川 禎一 (正員)若原敏裕

## 1. まえがき

筆者らは基礎杭の地震時挙動特性の解明と杭基礎の合理的な耐震設計法確立のための基礎資料の提供を目的として、軟弱地盤に建設された道路橋橋脚基礎杭に対する地震観測を実施してきた。

本論文はこれまでに得られた観測記録に基づき、基礎杭の地震時挙動特性、杭基礎の制震性ならびに斜杭の効果に関する検討結果について示したものである。

## 2. 地震観測ならびに地盤概要<sup>1)2)</sup>

地震観測は図1および図2に示すような加速度計およびひずみ計配置により実施している。加速度計は地表に1台(GS1)、基盤に4台(GB1~GB4)、フーチングに3台(BS1~BS3)、橋脚および橋桁に3台(BR1~BR3)の合計11台である。加速度計の水平方向は橋軸方向(H1方向)と橋軸直角方向(H2方向)に一致させてあり、図1に示す+の方向が加速度記録の正の方向である。ひずみ計は固定支承であるP6橋脚の基礎杭に設置した。P6橋脚は斜杭を含む64本(8列×8列)の鋼管杭(杭径φ=600mm、杭長 $l=22$ m、直杭肉厚 $t=9$ mm、斜杭肉厚 $t=12$ mm)で支持されており、杭先端は支持層中に十分根入れされている。直杭と斜杭の各1本に対し、ひずみ計はそれぞれ深さ方向に4断面(SA1~SA4、SB1~SB4、1断面当り4台)、合計32台を設置した。

本道路橋の建設地盤は海岸砂洲によるおぼれ谷閉塞の典型的な軟弱地盤<sup>3)</sup>で、P6橋脚とP7橋脚の間を流れる河川の後背湿地である。図3にP6橋脚近傍で実施した土質調査結果を示す。表層は層厚約22m、N値0の腐食土およびシルトの互層で、せん断波速度40~65m/secの非常に軟弱な沖積層である。支持層はN値50以上の粘性土および砂質土から成る洪積層で、せん断波速度は400m/secである。

これまでに合計14個の地震記録が得られており、地表部で最も大きな加速度を与えた地震は昭和58年8月8日の神奈川・山梨県境地震(No.12地震、 $M=6.0$ 、 $\Delta=42$ km、 $D=20$ km)で、GS1のH1方向で $113.5$ cm/sec<sup>2</sup>である。

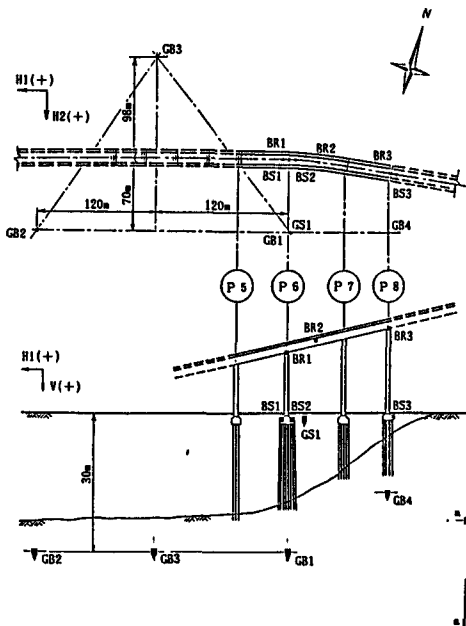


図1 加速度計配置図

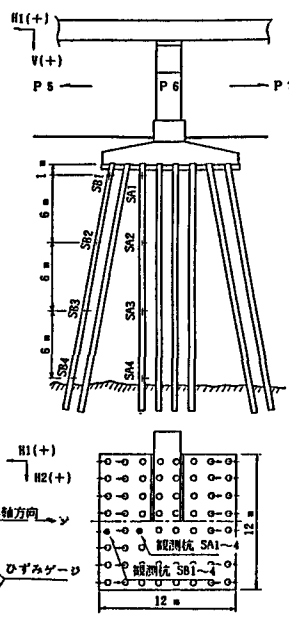


図2 ひずみ計配置図

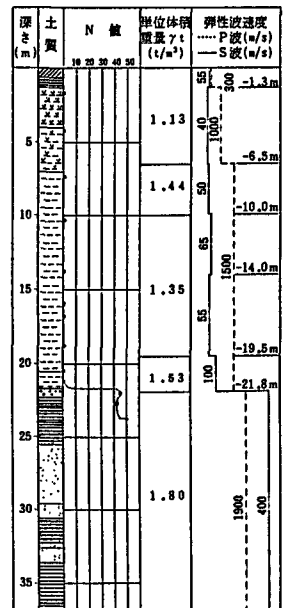


図3 土質調査結果

## 3. 基礎杭の地震時挙動特性

直杭と斜杭の各計測断面における地震時ひずみ記録から、軸ひずみ $\epsilon_N$ 、橋軸方向回りの曲げひずみ $\epsilon_M$ およ

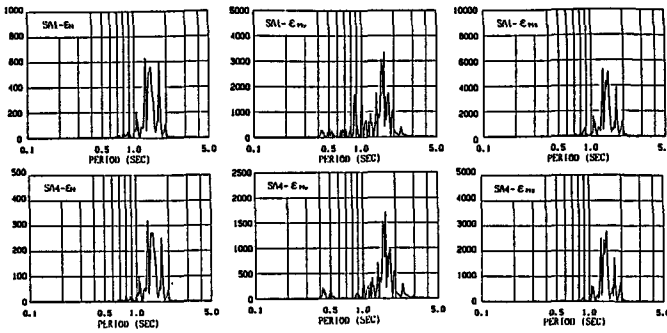


図4 軸ひずみおよび曲げひずみのパワースペクトル (No.12地震)

び橋軸直角方向回りの曲げひずみ  $\epsilon_{Mz}$  を計算した。図4は軸ひずみおよび曲げひずみのパワースペクトルの一部について示したものであるが、杭の深さ方向に各ひずみのスペクトル特性の大きな変化は見られなかった<sup>1)</sup>。

図5はP6橋脚フーチング(BS1)および地盤地表部(GS1)の加速度記録のパワースペクトルについて示したものである。これと図4のひずみ記録のスペクトルとを対比すると、斜杭、直杭ともに  $\epsilon_N$  と  $\epsilon_{Mz}$  のスペクトルはBS1-H1のスペクトルと良い対応関係にあり、 $\epsilon_{Mz}$  のスペクトルはBS1-H2のスペクトルに類似していることがわかる。

図6は杭頭部で最大ひずみが発生した時刻を中心に、その前後5秒間のひずみ分布の経時変化を見たものである。軸ひずみは深さ方向に漸減する傾向にあり、曲げひずみは杭頭と杭先端部で大きく、杭の中間部では小さいことがわかる。

図7はP6橋脚のフーチング部BS1のH1およびH2方向の加速度が最大となる時刻での杭のひずみ分布を示したものである。計測を実施している斜杭および直杭が図2に示したように、フーチング中心線に対し両者同じ側にあるにもかかわらず、斜杭と直杭の軸ひずみの正負が逆になっている。つまり、斜杭が引張りであるとき直杭は圧縮の状態にある。図8は斜杭と直杭の軸ひずみ波形を重ね描きしたものであるが、この現象は記録の全継続時間を通じて発生していることがわかる。

図4から図8の結果はいずれもNo.12地震の観測記録によるものであるが、上述した特徴的な傾向は観測された地震記録すべてに共通して見られた現象である。

#### 4. 杭基礎の制震性

図9は基盤(GB1)に対する地表(GS1)とP6橋脚フーチング部(BS1)の加速度記録のH1方向の平均周波数伝達関数を対比したものである。フーチング部での加速度応答倍率は地盤地表部に比べて小さくなっており、杭基礎の制震効果が推察される。

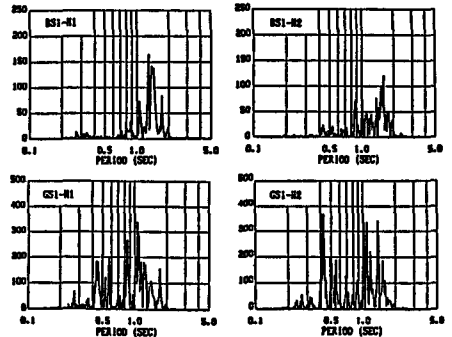


図5 フーチング部および地盤地表部のパワースペクトル (No.12地震)

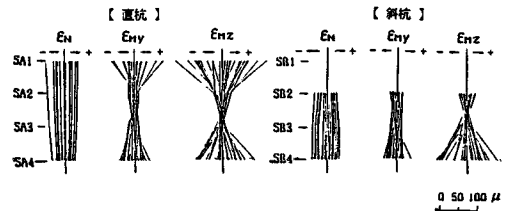


図6 ひずみ分布の経時変化 (No.12地震)

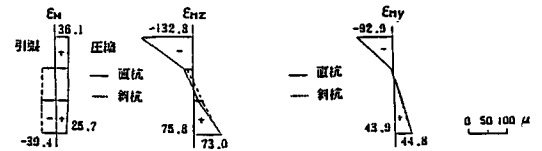


図7 フーチング部の水平加速度が最大となる時刻でのひずみ分布図 (No.12地震)

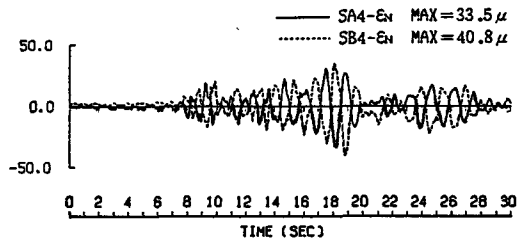


図8 斜杭と直杭の軸ひずみ波形の重ね描き (No.12地震)

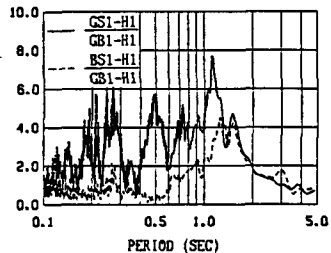


図9 基盤に対する地表およびフーチング部の平均周波数伝達関数

5. 斜杭を有する杭基礎の地震時挙動特性に関する考察  
 斜杭の使用目的は基礎の水平抵抗力増強にあるが、その地震時挙動特性に関しては十分解明されていない。本地震観測では特筆すべき現象の1つとして、斜杭と直杭の軸ひずみの正負が常に逆になるという観測結果が得られている。ここではこの現象を理解するために、斜杭を有する杭基礎に対して行った数値実験結果について示す。  
 (1) 杭頭水平外力ならびに地盤に強制せん断力を与えた場合の挙動特性

斜杭を有した杭基礎の挙動特性について検討するために、フーチングに水平外力を静的に作用させた場合と地盤に強制せん断力を用いた場合に関して、直杭だけで構成された杭基礎との挙動特性の比較を行った。

図10はこの検討のために用いた解析モデルである。モデルAはすべてが直杭である杭基礎モデルで、モデルBはモデルAにおける両端の杭を斜杭とした杭基礎モデルである。

図11はフーチングに同じ水平力を作用させたときの両モデルの杭部の変形状態を対比したものである。モデルAのフーチングはわずかながら時計回りに回転しているのに対し、モデルBの方は反時計回りの回転になっている。また、この解析によって得られた各杭の軸ひずみは、モデルAではpile1、pile2が引張ひずみ、pile3、pile4が圧縮ひずみであるのに対し、モデルBの場合はpile1、pile3が引張ひずみで、pile2、pile4が圧縮ひずみである<sup>4)</sup>。

地盤に強制せん断力を用いた場合に関しても同様の結果が得られた。単純なモデルによる解析結果であるが、これより地震観測によって得られた斜杭と直杭の軸ひずみの正負が逆になるという現象が理解できる。

(2) 観測記録に基づくフーチングの水平動とロッキング動の関係

図12はNo.12地震の観測記録に関して、BS1とGB1のH1方向の記録の差から求めたフーチングの相対変位波形(加速度の正の方向と反対方向が正の方向である)と、BS1とBS2の鉛直方向(V方向)の変位記録の差を両加速度計の距離で除すことによって求めたフーチングの回転角の波形(反時計回りの回転を正とした)を重ねて描いたものである。比較のために両波形の最大値を1.0としているが、記録の全時刻を通して両者はきわめてよく一致した関係にあり、斜杭を有する杭基礎のフーチングの水平動とロッキング動の関係について、前節での考察結果が観測記録においても確認できる。

(3) 周波数伝達関数による地震時挙動特性の比較<sup>5)</sup>

図13は1質点ばね系でモデル化した上部工を図10に示した両解析モデルに付加し、モデルAとモデルBの基礎に対する上部工の水平方向の周波数伝達関数について比較したものである。この解析における地盤の1次固有周期は1.5秒であり、上部工の地盤との連成1次周期は0.57秒である。また、減衰定数はいずれの場合も一律5%を与えた。図13より地盤の1次周期および上部工と地盤の連成周期付近で斜杭による制震効果が期待できることがわかる。

ところで、図2に示した基礎杭の配置図からわかるように、地震観測の対象とした杭基礎は橋軸方向にその半数が傾斜角 $10^\circ$ の斜杭

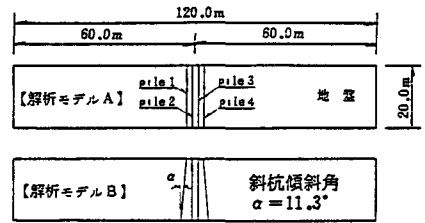


図10 解析モデル

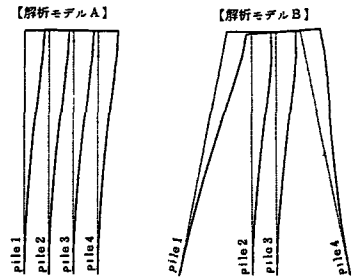


図11 杭部の変形状態

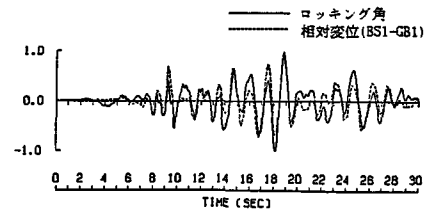


図12 フーチング部の水平動およびロッキング動 (No.12地震)

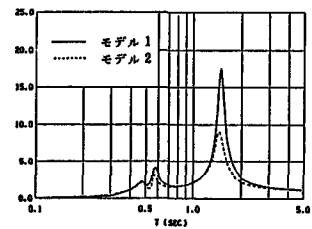


図13 有限要素法による基礎に対する上部工の周波数伝達関数

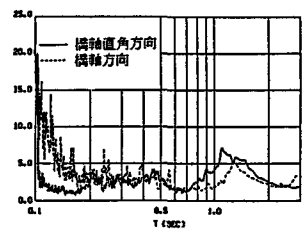


図14 観測記録に基づく基礎に対する上部工の周波数伝達関数

になっている。図14は斜杭による制震効果を観測記録から検討するために、橋軸ならびに橋軸直角方向の基盤に対する橋脚天端の周波数伝達関数について比較したものである。卓越周期に差異があるため、両者を同等に比較することには問題があるが、斜杭が打設されている方向すなわち橋軸方向の伝達率が橋軸直角方向の伝達率に比べて、地盤の卓越周期付近で幾分か小さくなっていることがわかる。

### 6. 基礎杭の地震被害とそれに対する考察<sup>6)</sup>

地震観測で得られた杭先端部でも大きな曲げひずみが発生するという結果に対して、ここでは基礎杭の震害調査報告の中から、調査が杭の全長に渡って行われたものについて調べ、杭の被害箇所と地層の関係について考察した。

1964年の新潟地震による昭和大桥のP4橋脚の基礎杭(鋼管杭、 $\phi = 600\text{mm}$ 、 $l = 25\text{m}$ 、上杭  $t = 16\text{mm}$ 、下杭  $t = 9\text{mm}$ )の被害調査結果が福岡によって報告されている<sup>7)</sup>。杭先端から約6mの位置で曲げによる永久変形が生じていたとされているが、この位置は併記されている土質柱状図においてN値が10程度の地層から30程度の地層に変化する境界部に一致している。また、同じ新潟地震によって被害を受けた事務所ビルの基礎杭(RC杭、 $\phi = 300\text{mm}$ 、 $l = 10\text{m}$ )の震害調査結果が西沢らによって報告されている<sup>8)</sup>。図15はその被害状況を示したものであるが、フーチングから下方に3.1m~3.5mの位置と杭先端部から上方に2.2mの所で破損が著しく、コンクリートが圧壊剝離し、軸方向鉄筋およびスパイラル補強筋が露出していたと報告されている。図中の土質柱状図から、杭先端部における被害の位置は支持層と表層の境界に一致していることがわかる。さらに、1978年の宮城県沖地震によるRC造3階建の事務所基礎杭(RC杭、 $\phi = 250\text{mm}$ 、 $l = 5\text{m}$ )の被害調査結果が報告されている<sup>9)</sup>。これまでと同様、基礎杭のひび割れが地層剛性の変化する杭先端部において発生していることが確認できる。

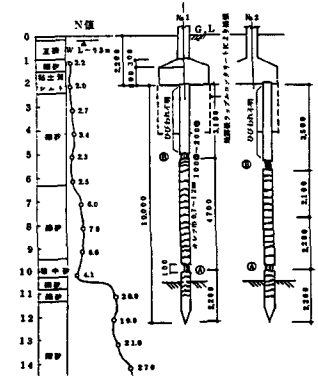


図15 基礎杭の震害例(西沢ら)

ここで示した基礎杭の地震被害はいずれも地層剛性に変化する部分で発生しており、地震観測結果において見られた杭先端部での大きな曲げモーメントの発生が杭の地震被害に結びついている可能性が考えられる。

### 7. あとがき

軟弱地盤中の基礎杭の地震時挙動特性として、本研究によって得られた知見をまとめると以下のように書ける。

- (1) 基礎杭に発生する曲げモーメントは杭頭部と杭先端部で大きく、杭の中間部では小さい。また、基礎杭の地震被害例において、剛性が大きく変化する地層の境界部でも被害が発生しており、地震観測で見られた杭先端部での大きな曲げモーメントの発生が杭の地震被害に結びついている可能性が考えられる。
- (2) 水平外力に対して斜杭を打設することは有効である。しかし、観測記録に基づいて検討した結果には有限要素法解析で得られるような著しい効果は見られなかった。
- (3) 斜杭と直杭の軸ひずみの正負が常に逆になるという現象は、斜杭が打設されたことによって生じるフーチングのロッキング振動に起因していることがわかった。

### 8. 謝 辞

本地震観測を実施する上で、藤沢市建設局西野康雄氏はじめ多くの方々に多大な御便宜を計って頂いた。また、地震観測結果の考察において、九州大学小坪清真教授、鳥野清助教授、中央大学岡内功教授、九州工業大学高西照彦助教授、東海大学浜田政則助教授から貴重な御意見を賜った。記して深謝の意を表す次第である。

### 9. 参考文献

- (1) Ohira, A., Tazoh, T., Dewa, K., Shimizu, K. and Shimada, M.: Observations of Earthquake Response Behaviors of Foundation Piles for Road Bridge, Proc. of the 8th WCEE, Vol. III, July, 1984.
- (2) 田蔵、清水、出羽、嶋田、時田：道路橋基礎杭の地震時挙動観測、第18回土質工学研究発表会、1983年6月。
- (3) 田蔵、清水、嶋田、木全：基盤の深さが大きく変化する地盤の震動特性について、第18回土質工学研究発表会、1983年6月。
- (4) 田蔵、中檢、清水、木全、増野、岡内：斜杭を有する群杭基礎の地震時挙動特性に関する考察、第19回土質工学研究発表会、1984年6月。
- (5) 田蔵、中檢、清水、木全、古川：斜杭を有する杭基礎の地震時挙動特性に関する考察、第12回土木学会関東支部技術研究発表会、1985年3月。
- (6) 田蔵、中檢、清水、木全、古川：基礎杭の地震被害に対する一考察、第20回土質工学研究発表会、1985年6月。
- (7) Fukuoaka, M.: Damage to Civil Engineering Structures, Soil and Foundation, Vol.6, No.2, March, 1966.
- (8) 西沢、河村、田尻：新潟地震時に破損した既製RC工の調査と耐震解析(その1)、日本建築学会大会学術講演会梗概、1982年10月。
- (9) 日本建築学会編：1978年宮城県沖地震災害調査報告、日本建築学会、1980年2月。