

基礎杭の振動破壊実験

田 蔵 隆
(技術研究所)
清 水 勝 美
(技術研究所)
広 瀬 利 光
(技術研究所)

§ 1. はじめに

大地震によって基礎杭が破壊するとした場合、どのような破壊形態になるか非常に興味があると同時に、その破壊形態が予測できるほどの十分な認識が杭基礎の耐震性を議論する上で重要である。基礎杭の地震破壊事例は1964年新潟地震、1978年宮城県沖地震などの過去の被害地震においてかなり多く報告されているが¹⁾、破壊現象は一般に偶然性を伴うこと、また被害状況が全部の杭のしかも全長にわたって調べられることが非常に少ないことなどから、基礎杭の破壊に関して普遍的な傾向を検出するまでには至っていないのが実情である。

本研究は、石膏で作成した群杭基礎模型を小型のせん断土槽中に設置し、振動破壊させることによってその破壊形態を調査し、計43ケースの振動破壊実験の結果を整理することにより基礎杭の破壊の一般的特徴の抽出を試みようとしたものである。

§ 2. 実験概要

図-1および写真-1、写真-2は、杭基礎模型ならびに実験土槽について示したものである。杭基礎模型は

3列×3列の群杭基礎モデルであり、杭径 $\phi=9$ mm、杭長 $l=100$ mm、杭間隔 $d=22.5$ mmである。杭の材料としては破壊し易く、かつ加工し易いものとして、ここでは石膏を用いた。

土槽はアクリル製のせん断土槽で、内寸法が長さ500mm、幅250mm、高さ115mmの非常に小さなものである。杭頭は厚さ10mmのアクリル板で作製したフーチングに

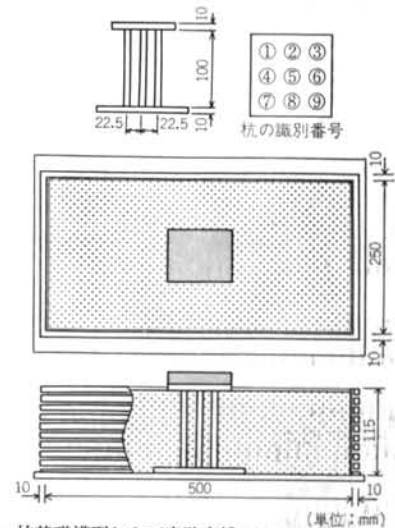


図-1 杭基礎模型および実験土槽 (単位: mm)

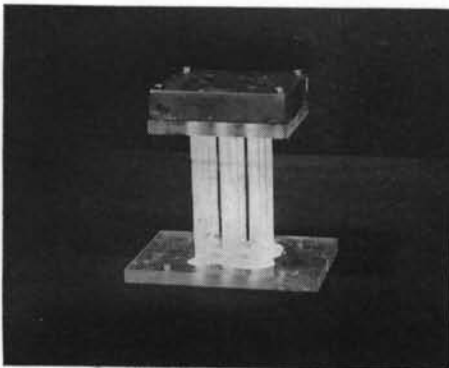


写真-1 杭基礎模型

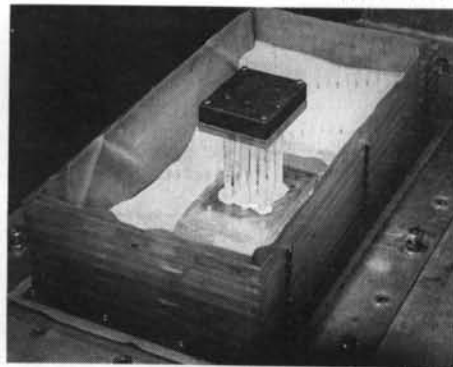
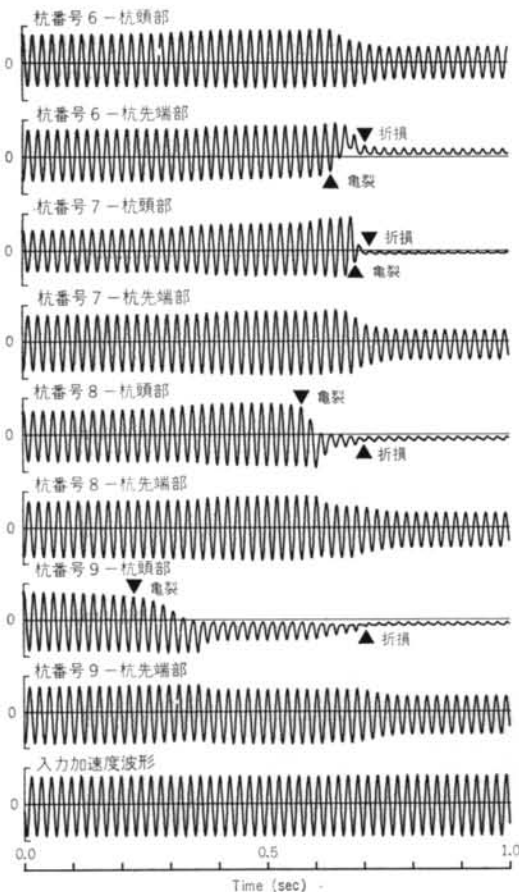


写真-2 杭基礎模型の設置状況

剛結し、杭先端も厚さ10mmのアクリル板に剛結し、それを土槽底面に固定した。また、上部工を想定して、重さ1.5kgfの鉄板をフーチング上に設置した。地盤材料としては豊浦砂の乾燥砂を使用した。地盤の1次固有振動数はおおむね50Hzである。

加振は正弦波で、徐々に加速度を増大させ杭を破壊させるようにした。加振振動数は50Hzあるいは10Hzとした。杭が破壊する際に小さな音を発するが、加振はその音が数回聞こえた時点で直ちに停止させることとした。

本実験は、基礎杭の破壊の定性的な傾向を調べることを主眼として行なったものであることから、相似則は勿論、実験方法ならびに実験装置に通常の振動実験のような十分な注意を払っていない。実験は合計43ケース行なった。



(注) 亀裂および折損時刻の推定は以下のように行なった。

亀裂：杭のひずみ記録の振幅が減少し始めた時刻

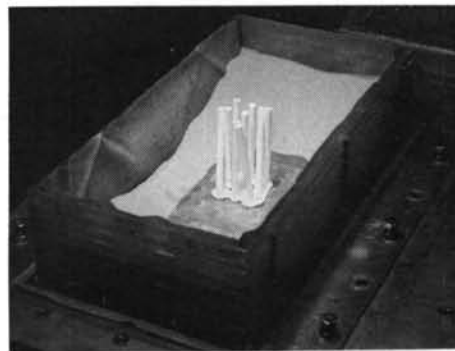
折損：杭のひずみ記録の振幅が極度に低下した時刻

図一 基礎杭のひずみ記録の一例 (杭番号6～9の杭頭部および杭先端部)

§ 3. 実験結果とそれに対する考察

基礎杭にひずみゲージを貼付し、振動破壊の状況をかなり詳細に調べる実験を数回行なった。ひずみゲージは杭の軸方向のひずみが計測できるように貼付したものであり、図一2はその実験から得られた杭のひずみ記録の一例について示したものである。杭番号の1～9とは、図一1に示したように9本の杭を識別するために付けた番号であり、杭番号1, 3, 7, 9の杭は四隅に配置された杭である。図一2の実験では、杭番号6～9の杭は亀裂が発生し折損に至ったが、残りの杭つまり杭番号1～5の杭に異常は発生しなかった。

杭に亀裂が入った時点で、杭番号9の杭頭部のひずみ波形に見られるように、最初にひずみ振幅の片側が急激に減少し、片振れの状態になる。他の杭はこのときから杭が折損するまで、これまで以上の荷重を分担することになり、ひずみは増加の傾向を示す。杭に亀裂あるいは折損が生じた場合ひずみ記録が著しく小さくなるのは、亀裂あるいは折損の発生位置とひずみゲージが貼付されている位置とが一致していないためであり (杭の亀裂あるいは折損位置は常に杭頭か杭先端部であり、ひずみゲ



写真一 3 杭基礎模型の破壊状況



写真一 4 基礎杭の破壊状況

| 実験 ケース | 加振 振動数 | 杭 番 号 | | | | | | | | |
|-----------|-----------|-------|---|----|----|---|---|----|----|----|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 1 | 50 | 上 | | | | | | | | |
| 2 | 50 | | | | | | | 上 | | 上 |
| 3 | 50 | 上 | | 上 | | | | | | |
| 4 | 50 | | | 上 | | | | | | |
| 5 | 50 | | | 上 | | | | | | 上 |
| 6 | 50 | 上 | | | | | | | | |
| 7 | 50 | | | | | | | 上 | | |
| 8 | 50 | 上 | | | | | | 上 | | |
| 9 | 50 | 上 | | | | | | | | |
| 10 | 50 | 上 | | | | | | | | |
| 11 | 50 | | | | | | | 上 | | |
| 12 | 50 | 上 | | | | | | | | |
| 13 | 50 | 上 | | | 上 | | | 上 | 上 | |
| 14 | 50 | | | | | | | 上 | | 上 |
| 15 | 50 | | | | | | | 上 | 上 | 上 |
| 16 | 50 | 上 | | | 上 | | | 上 | | |
| 17 | 50 | | | | | | 上 | | 上 | 上 |
| 18 | 50 | | | | | | 上 | | 上 | 上 |
| 19 | 50 | 下 | | 下 | | | | 上 | | |
| 20 | 50 | | | | 上 | | | 下 | | 上 |
| 21 | 50 | | | 上 | 上 | | | | | 上 |
| 22 | 50 | | | | | | 上 | 上 | 上 | 上 |
| 23 | 50 | | | | 上 | 上 | | | | 上 |
| 24 | 50 | 上 | 下 | | | | | | 上 | 上 |
| 25 | 50 | | | | 上 | | | 上 | | |
| 26 | 50 | | | 上 | 上 | 上 | | 上 | 上 | 上 |
| 27 | 50 | | | | | | | 上 | 上 | |
| 28 | 50 | 下 | 下 | | | | | | | |
| 29 | 50 | 上 | 上 | | | | | | | |
| 30 | 10 | | | | 下 | | 下 | | | 下 |
| 31 | 10 | | | 下 | 下 | | 下 | | | 下 |
| 32 | 10 | 下 | 下 | 下 | 下 | | 下 | 下 | | 下 |
| 33 | 10 | | | 下 | | | | | | 下 |
| 34 | 10 | | | 下 | | | | | | |
| 35 | 10 | | | 下 | | | | | 下 | 下 |
| 36 | 10 | 下 | | | | | 下 | | | 下 |
| 37 | 10 | 下 | | | | | | | | 下 |
| 38 | 10 | | | | 下 | | | | | 下 |
| 39 | 10 | | 下 | 下 | | | | | | 下 |
| 40 | 10 | 下 | | | | | | | | |
| 41 | 10 | | | | | | 下 | | | 下 |
| 42 | 10 | 下 | | | | | | | | |
| 43 | 10 | | 下 | 下 | | | | | | 下 |
| 合計 | | 18 | 8 | 13 | 10 | 2 | 8 | 15 | 10 | 21 |

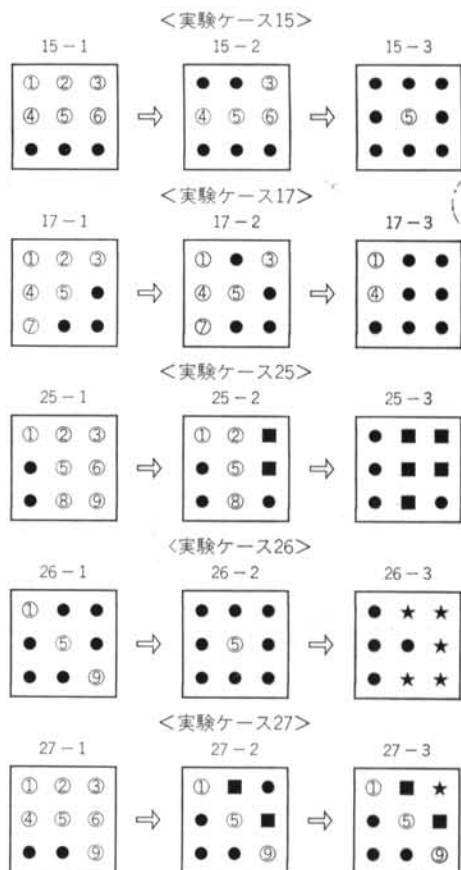
(注1) 杭番号1, 3, 7, 9は四隅の杭である。
(注2) 表中の上は杭頭部, 下は杭先端部が破壊したことを表わしている。

表一 杭基礎模型の振動破壊実験結果

ージはそれぞれの位置より少し離れたところに貼付されている), 杭のひずみが亀裂あるいは折損箇所に集中し, その他の部分でのひずみが発生しにくくなることによるためである。

図一2の実験では最初に杭番号9の杭頭部に亀裂が発生し, それによって順次杭番号8の杭頭部, 杭番号6の杭先端部, 杭番号7の杭頭部が亀裂, 折損といった状態に進展していったものと理解することができる。なお, 写真一3および写真一4は基礎杭の破壊状況の一例を示したものである。

表一1は, 43ケースの実験の破壊状態を整理したものである。表中の上, 下とは, 杭の破壊位置を示したもので, 上は杭頭部, 下は杭先端部の位置での破壊を表わしている。先述したように, 加振は杭が破壊するときの音を数回聞いた時点で素早く停止させるようにしたもので



(注) ○ 破損せず (数字は杭番号)
● 杭頭部の破壊
■ 杭先端部の破壊
★ 杭頭部と杭先端部の破壊

図一3 基礎杭の破壊の進展状況

あるが、そのタイミングには個々の実験でかなりの差が生じていることは否めず、加振を停止しないと最終的にすべての杭の杭頭かあるいは杭先端が破壊するという結果になる。破壊した杭が多い実験ケースのほとんどは、加振の停止までの時間が長かった場合、破壊した杭が少ない実験ケースはその逆の場合に相当している。

各実験ケースに関わる詳細な議論を省き、表-1の実験結果を大局的な観点から考察すると、以下のようにまとめることができる。

- (1) 四隅の杭のいずれかが必ず破壊する。
- (2) 中央部の杭は、他の杭に比較して破壊しにくい。
- (3) 杭の破壊する位置は杭頭部かあるいは杭先端部に限られ、杭の中間部では破壊しない。

表-1の一部の実験をさらに継続し、杭の破壊がどのように進展していくかを調査した。その結果を図-3に示す。図-3は破壊の進展状況を示したもので、図中の●は杭頭部の破壊、■は杭先端部の破壊、★は杭頭部と杭先端部の破壊を表わしている。最初に四隅のいずれかの杭が破壊し、次にその周辺の杭が破壊するといった傾向にあることは分かるが、それ以降の破壊の進展において明確なパターンはないことが理解できる。

§ 4. おわりに

基礎杭の振動破壊の定性的傾向を把握することを目的としたことから、多くの実験を行なうことが必要となり、そのため小型のせん断土槽を用い、高い精度を要求しない非常に簡略化した実験を行なった。その結果、上記の3つの知見が得られた。

四隅の杭のいずれかが必ず破壊するという結果、ならびに中央部の杭が最も破壊しにくいということに関しては、杭頭水平載荷に伴う荷重分担率を考えた場合、四隅の杭の荷重分担率は大きく、中央部の杭の荷重分担率が他の杭より小さいことを考えることによって説明することができる。また、杭の破壊する位置は杭頭部か杭先端部に限られ、杭の中間部では破壊しないという現象は、上部工の慣性力と地盤震動の両者を考慮した杭基礎の地震応答解析による杭の曲げひずみの最大応答分布を考えれば容易に予測できる。杭基礎の地震時挙動特性に関するこれまでの研究²⁾から、杭頭部の破壊は上部工の慣性力、杭先端部の破壊は地盤震動によるものと予想される。

このような研究成果を活かし、杭基礎の耐震問題について今後一層の議論が必要と考えられる。

謝辞 本研究を行なう上で中央大学岡内功教授から貴重なご意見を賜り、振動破壊実験を行なう上で当時中央大学の学生であった前田幸雄君（現在、国際電気株）と宮川力君（現在、中央大学大学院）に多大な協力をお願いした。記して、深謝の意を表わす次第である。

<参考文献>

- 1) 水野二十一：“基礎構造の震害—特に杭基礎について—” 構造物と地盤の動的相互作用シンポジウムテキスト（1985年4月）
- 2) T. Tazoh, K. Shimizu & T. Wakahara: “Seismic Observations and Analysis of Grouped Piles” Dynamic Response of Pile Foundations—Experiment, Analysis and Observation (Geotechnical Special Publication, No. 11), ASCE (April, 1987)