

(6) 1964年新潟地震で被害を受けた建物の杭の被害調査

佐藤工業(株) 小林 恒一、吉田 望、中村 晋

1 はじめに

地震被害のうち杭の被害は、構造物撤去後でないとは調査できないということもあり、調査の事例は少ないようである。筆者らは1964年新潟地震で地盤の液状化により被害を受けた建物の撤去時にその杭の調査を行う機会を得た。ここでは、得られた杭被害の概要と、解析的な検討を報告する。

2 構造物および地震被害の概要

調査対象は新潟市にある鉄筋コンクリート造3階建て建物(写真-1)の杭である。建物位置を図-1に○で囲んで示す。杭はRC杭(直径25cm、厚さ6cm)で、杭長は約5.5mである。図-2に杭の配置図を、図-3に土質柱状図を示す。地盤は砂層地盤で、地表部の盛土砂層の下にN値10程度の砂層が10m程度続き、杭はこの層に貫入されている。

1964年の新潟地震ではこの建物周辺で液状化が発生し、噴砂、噴水が見られている。また、この地震で建物は東側が約30cm沈下し、西側ではほとんど沈下しなかった。図-1には地震前後の航空写真を比べることによって求めた地震による永久変位¹⁾が示されているが、当建物のすぐ横で西側に36cmの水平変位と18cmの沈下が起こったことが示されている。

3 杭の引抜き調査

杭の調査を行うために原形をなるべく損なわないように杭を引抜いた。引抜き時には、建物撤去後耐圧版を取り除き、その後、外側にスパイラルをつけた外径60cmのケーシング(ジェットオーガー)を、杭の周囲にジェットで水を吹き出し杭周辺の砂を取り除きながら、杭下端までねじ込んだ(写真-2)。この様にして杭と周辺地盤の縁を切った後杭頭にワイヤーを付け、クレーンで杭を引抜いた。ジェットオーガーは上部でピン支持されているので、杭が曲がっていたとしてもこれに沿って曲がって行くことが可能であり、杭のたわみが30cm程度以内であれば原形をあまり損なわず杭を引抜くことが可能と考えられる。



写真-1 調査建物全景

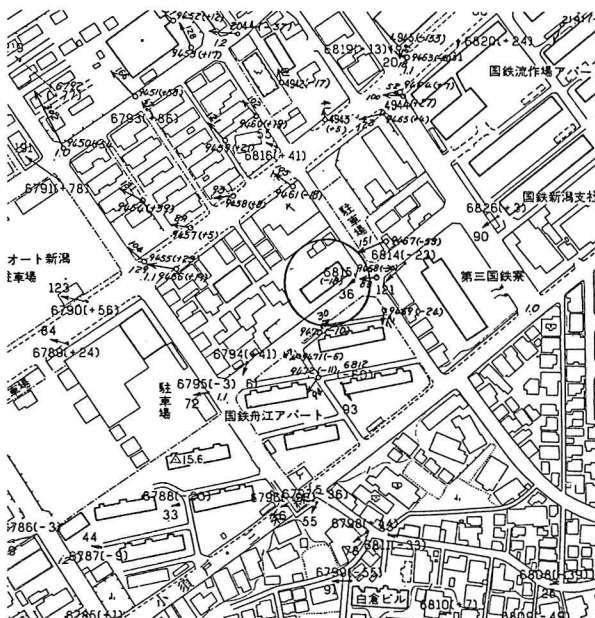


図-1 調査した建物と周辺地盤の永久変位

図-2に①～③で示す合計3本の杭を引抜いた。写真-3に引抜き後の杭を、図-4に杭の亀裂の模式図を示す。3本の杭のうち①は途中2箇所大きく破損していた(図-4、写真-4)。亀裂はいずれの杭でもほぼ全長にわたり観察され、①杭の大きな破損部分以外では亀裂幅は0.5～2mmであった。

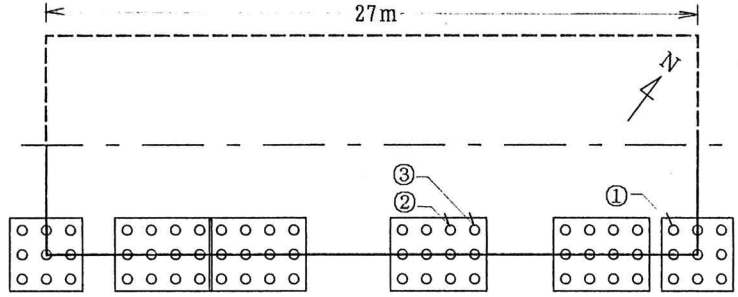


図-2 杭配置図

①の杭は変形が大きいためジットオーガーの挿入時や引き抜き時に変形を受けている可能性もあるので、残りの2本の杭について引抜き後たわみを計測した。図-5に計測結果を示す。たわみの向きはほぼ西側を向いており、図-1に示した永久変位の向きともほぼ同じである。

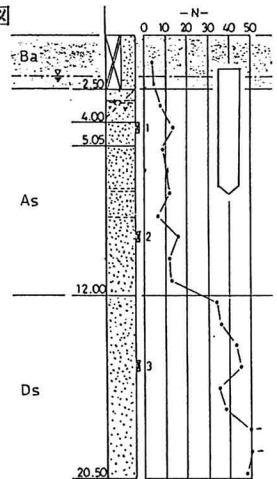


図-3 土質柱状図

4 数値解析

杭の変形と地盤の変形との関係調べるために、数値解析を行う。解析は、杭-地盤系を弾性支承上のはりと考え、地盤の変位を強制変位として加える方法である。地盤変位として次の3つを想定した。

- 三角形分布 $y = a(1 - \xi)$
- 放物線分布 $y = a(1 - \xi^2)$
- 余弦分布 $y = a \cos(\pi \xi / 2)$

ここで、

- a: 杭頭と杭先端位置の地盤の相対変位
- $\xi = x / l$, x: 杭頭からの深さ、
- l: 杭長 (5.5m)

y: 地盤の杭先端位置に対する相対変位
ここで、三角形分布は浜田等が新潟地震で



写真-3 引抜き後の杭

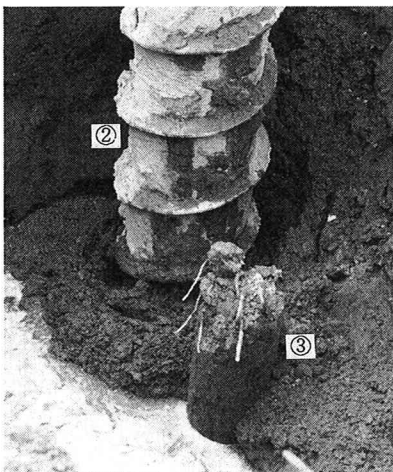


写真-2 引抜き時の様子

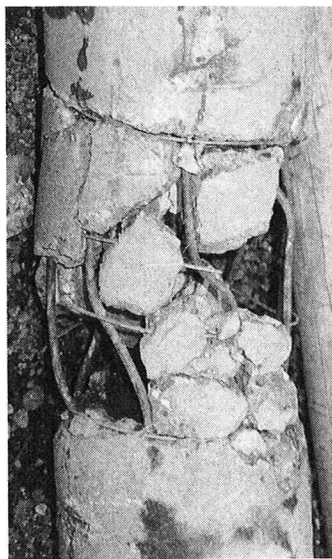


写真-4 ①杭の被害

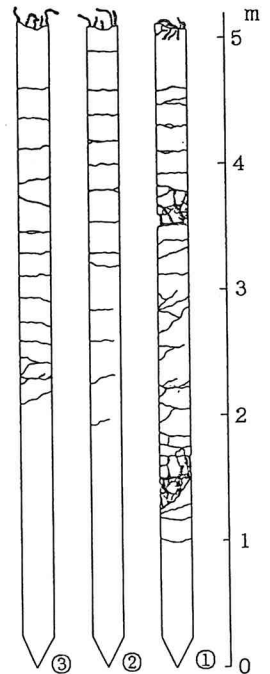


図-4 杭の亀裂模式図

被害を受けた杭の解析²⁾で用いた分布(ただしこの解析では上部非液状化層の変位は深さ方向に同じとし台形分布を用いているが、図-3に示すように本建物の杭は大部分が地下水位以下にあるので、ここでは三角形分布とした)、放物線分布は安田等の実験³⁾に見られるような地表層に近づくにつれて変位の増加率が増えるような変位に対応する分布、余弦分布は地中構造物の耐震計算でよく用いられる(例えば共同溝設計指針)分布である。境界条件としては杭先端では杭先端も液状化層内にあると考えられることからモーメント(M)、せん断力(Q)の両方を0とした。また、杭頭ではせん断力は加わっていない(Q=0)とし、杭頭のもう一つの境界条件と

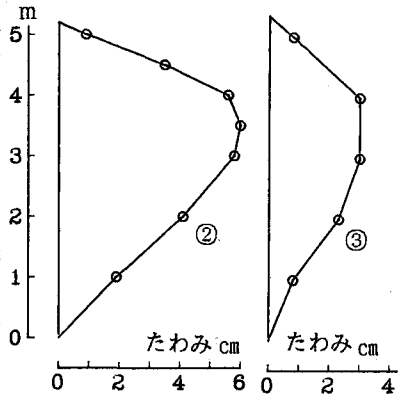


表-1 解析結果一覧

図-5 杭のたわみ

	地盤変位	杭頭回転拘束 ($y' = 0$)			杭頭回転自由 ($M = 0$)		
		たわみ	モーメント	せん断力	たわみ	モーメント	せん断力
ケース1							
ケース2							

たわみ (cm)
0 5 10

モーメント (t·m)
0 6 12

せん断力 (t)
0 3 6

して、杭頭の回転が耐圧版によって完全に拘束されているとした条件（たわみ角 $y' = 0$ ）と杭頭の回転が自由な条件（ $M = 0$ ）との二つを考慮した。次に地盤のばね定数は道路橋示方書に示された地盤反力係数 k に杭径を掛けたもの（ケース1）と、液状化時を想定し、このばね定数を1/10にした解析（ケース2）を行った。

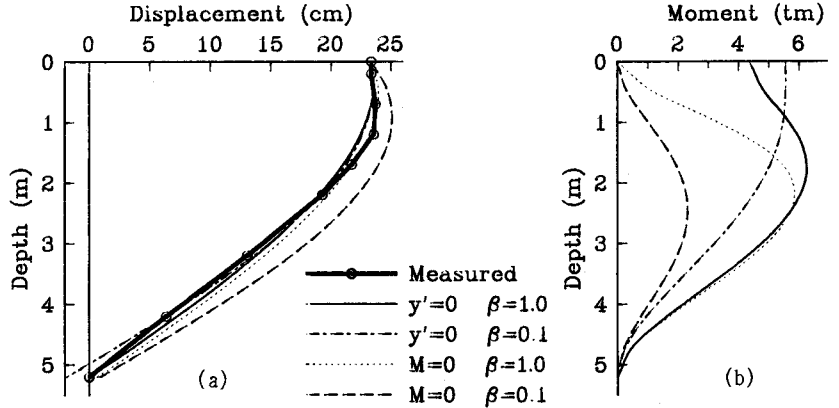


図-6 解析結果 (a)たわみ (b)モーメント

$$k = 0.2 E \cdot D^{-0.75} \quad (\text{kg/cm}^3) \quad E_s = 28N \quad D: \text{杭径 (cm)} \quad N: N \text{ 値}$$

解析の結果得られた杭のたわみ、曲げモーメント、せん断力を表-1にまとめて示す。図のスケールは地盤変位は地表で10cmとして計算したのものであるが、弾性計算であるので地表変位と応答値は比例している。図より、ケース1ではモーメント、せん断力分布は地盤変位のみならず境界条件の種類によっても大きく変わること、地盤変位と杭の変位は杭頭近くを除けば余り変わらないこと等がわかる。また、地盤のばね定数の影響として、剛性低下率（ β ）が小さい方（ケース2）の断面力と杭のたわみが小さいこと等もわかる。

図-5に示した杭の変形図では2本の杭とも杭の変形は杭頭近くではほぼ直線で、杭頭より1.5~2mのところで急激に曲がっている。表-1では図-5のたわみ形と近い杭の変形が生じる入力地盤変位分布は余弦分布である。また、余弦分布時の解析で杭頭の回転を拘束した場合にはモーメントは杭頭から杭中央付近まではほぼ一定であり、この区域は図-4に示した②、③杭の亀裂の範囲とほぼ対応している。一方①杭の破損状況と対応するような、2箇所でもモーメントが最大となるようなモーメント分布は表-1の中にはない。浜田等は杭頭が支持地盤に達している場合の杭について、杭先端でたわみを拘束する境界条件（ $y = 0$ ）と液状化層の上では地盤の相対変位はないとした台形地盤変位を与えた解析で①杭の被害と対応するような2箇所でもモーメントが最大となるモーメント分布を得ており²⁾、①杭と②、③杭では地盤条件や境界条件が違っていることも考えられる。

②杭について杭頭での回転が拘束されていたとして杭頭と杭先端の相対変位を求めると23.4cmとなる。そこで、この変位が地盤の杭頭位置の杭先端位置に対する相対変位であると、表-1で変位の一致度が一番よかった余弦分布の地盤変位を与えた解析を行った。図-6に解析結果を示す。図で杭の変位は変位分布の比較を容易にするため杭頭位置で杭の変位が想定した杭の変位23.4cmとなるように揃えて書いている。得られた杭の変形はいずれの境界条件を用いても実測値とよく一致している。また、図-6(b)に見られるように液状化を考慮して剛性低下率を0.1とした場合でもモーメントの値はひび割れモーメントを大きく越える部分が非常に多く、杭が地盤の変形により破壊することは明かである。

5 まとめ

1964年新潟地震で被害を受けた建物の杭を引き抜き調査した。応答変位法による解析では被害の小さかった2本の杭の変形は地盤の変位分布を余弦分布とすることによって比較的よく説明できた。

参考文献 1) (財)地震予知総合研究振興会、地盤永久変位ベクトル図

2) Hamada, M. et al, Study on Liquefaction Induced Permanent Ground Displacements, ADEP, 1986

3) 安田進 他、液状化による地盤の永久変位に関する振動台実験、第22回土質工学研究発表会、昭和62年、pp. 731-734