

## 1995年兵庫県南部地震で被害を受けた場所打ちコンクリート杭の損傷評価

田中 良一 小林 勝巳  
佐々木 聡

### 概 要

1995年兵庫県南部地震の被害を受けた建物(1973年 竣工)に対し、地震の18年後に免震改修工事が行われた。この工事に伴い、建物を支持する場所打ちコンクリート杭全数が杭頭部約 4m の範囲で露出し、ほぼ全ての杭に地震による損傷が確認された。本報では杭の被害状況調査を実施し、杭の破壊パターンを 杭頭接合部の曲げ破壊、杭軸部の曲げ破壊およびせん断破壊、杭頭接合部のずれ破壊に大別した。

さらに対象敷地の地盤や杭のモデル用をいた解析を行い、杭の水平耐力および被害要因を検討した。その結果、杭頭接合部では、全体として地震時には建物重量の 0.4~0.5 倍程度の水平力を上部構造から受けた可能性があり、この水平力の影響および地震時の地盤の応答変位が杭の損傷に与える影響が大きかったと考えられることが分かった。

### Report on damage of cast-in-place reinforced concrete pile during the 1995 Hyogoken-nanbu Earthquake.

#### Abstract

This paper reports the cast-in-place reinforced concrete piles of a 8-story SRC building that were damaged by the 1995 Hyogoken-Nanbu Earthquake in Japan.

The damage of the piles could be observed during the seismic isolation retrofit work of the building 18 years after the earthquake. At first, the damages of the piles were investigated and grouped into four types by considering the crack of concrete and reinforcing bar conditions; the bending failure at pile-pile cap connection, the bending failure of pile, the shear failure, and the slip failure at the connection. Secondly, numerical analyses were carried out in order to estimate the factors of these damages. Based on the analytical study, it was found that the maximum total shear force might be about 40 to 50% of the building weight during the earthquake. And the results of numerical analyses show that both the seismic deformation of the ground and the horizontal force from the superstructure had large effects on the damages of the piles.

キーワード: 場所打ちコンクリート杭、曲げ破壊  
せん断破壊、応答変位、杭頭回転ばね

§1. はじめに

兵庫県神戸市に建つ建物に、1995 年兵庫県南部地震の 18 年後に免震改修工事が行われ、既存耐圧盤の下端より 3.8~4.4m 程度が掘削され、この建物の場所打ちコンクリート杭が全数露出し、地震による損傷が確認された。

本研究では、場所打ちコンクリート杭の耐震性に関する検討を行うことを目的に、この建物の杭の損傷を調査し被害状況の概要をまとめ、その後解析によって杭の水平耐力や被害要因の検討を行った。杭の損傷は、一部を除き掘削直後と被りコンクリートを除去した後に観察した。本報では、まず杭の損傷調査を行った結果について報告し、次に杭および地盤のモデルを作成し解析を行って杭の水平耐力および被害要因を検討した結果を報告する。

なお、図 1 に示すように、本建物は免震改修工事の際に GL-9~15m の範囲の地盤改良を行い直接基礎形式とすることにより、既存の杭の支持力に期待しない建物となっている。

§2. 建物概要および既往の報告

(1) 建物および杭の概要

対象とした建物は、神戸市 JR 三ノ宮駅の南約 800m に位置する地上 8F/地下 1F の建物である。1973 年に竣工した建物であり、1995 年兵庫県南部地震により損傷を受けているが、補修・補強を行い継続使用されてきた。

図 1、図 2 に軸組および杭伏を示す。構造形式は、X,Y 方向共に耐震壁付 SRC ラーメン構造であり、X 方向が 7m × 8 スパン、Y 方向が 7.9m~12m が 4 スパン(うち 1 スパンは地下階のみ)である。杭は、オールケーシング工法による場所打ちコンクリート杭である。A~D 通り間は地上階を有し、柱 1 本あたり 2~5 本の杭で建物荷重を支持している。基礎梁は幅が 700mm~1400mm、せいが 1500mm~3100mm である。

図 3、図 4 に杭の断面および柱状図を示す。杭長 15.0m ~16.6m、杭径 φ 1200 または φ 1100 で、主筋はそれぞれ 16-D19 (SD30)、14-D19(SD30)、フープ筋は φ 13@250 (SR24) で共通である。コンクリートの設計基準強度(Fc)は 210 kgf/cm<sup>2</sup> である。

(2) 地震直後の調査報告

1995 年兵庫県南部地震直後の調査<sup>1)</sup>では、上部構造は、外壁、耐震壁のせん断ひび割れ、柱および梁の曲げひび割れが確認され、中破と判定されている。また、周辺地盤で、

液状化による噴砂が見られ、周辺地盤が約 50cm 沈下している。液状化は GL-3~10m の砂分を含む層で発生したと推定されている。なお、建物自体の傾斜や沈下は確認されていない。調査では、杭のコアボーリングの後、ボアホールカメラによる観察が行われ、杭頭部付近で水平および斜めひび割れが観察され、GL-10m よりも深い位置でひび割れが観察されている。

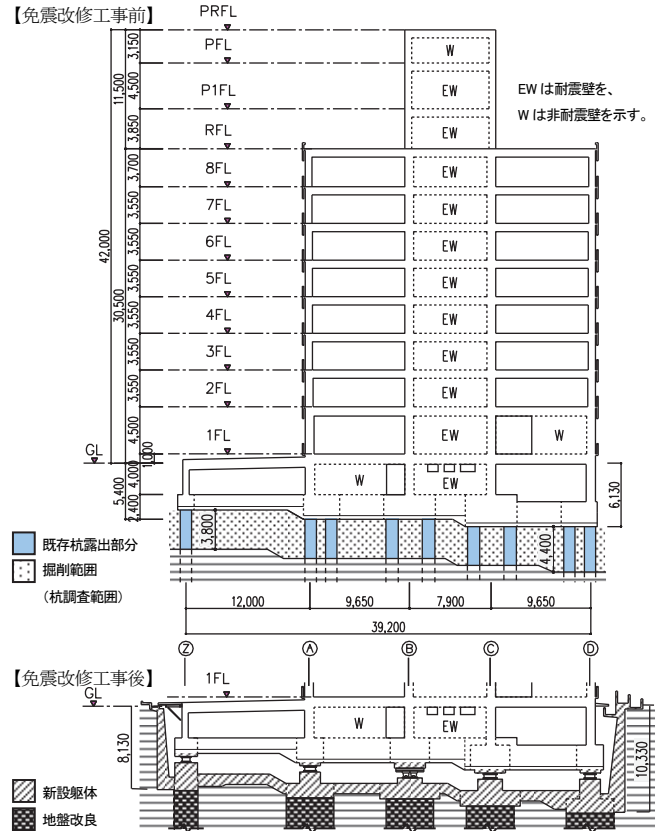


図 1 免震改修工事前後の軸組 (7 通)

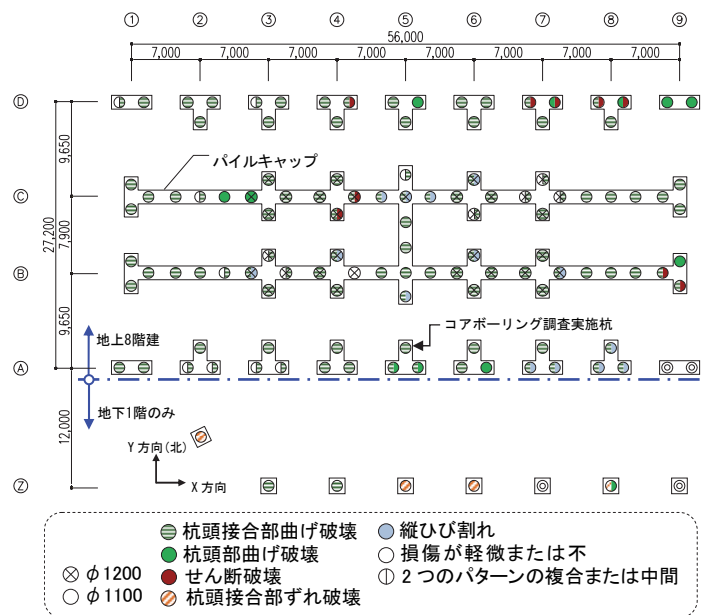


図 2 杭伏および杭頭の破壊パターン

### §3. 杭の被害調査結果と被害の特徴

#### (1) 杭の破壊パターン

観察された杭の主な破壊パターンは、a) 杭頭接合部または杭頭部の曲げ破壊、b) せん断破壊、c) 杭頭接合部のずれ破壊またはこれらが複合したものに大別することができる。図2に各杭の破壊パターンを示し、写真1～5に破壊パターンの例を示す。

a) 杭頭接合部または杭頭部の曲げ破壊：杭頭接合部付近のみが曲げ破壊したパターンと、杭頭接合部から杭径の範囲のコンクリートが曲げ破壊しているパターンが見られた。両パターンとも杭主筋が座屈または塑性変形していた。また、杭のフープ筋で囲まれたコアコンクリートが比較的健全な場合と斜めひび割れが生じている場合が見られた。

b) せん断破壊：露出部分全長にわたりせん断ひび割れが生じていた場合と杭頭部の限られた範囲でせん断破壊を生じていた場合が見られた。また、曲げ降伏後のせん断破壊と推定される複合パターンも見られた。

c) 杭頭接合部のずれ破壊：杭とパイルキャップの接合面で水平にずれ変位が生じている破壊パターンで、杭主筋が水平変位に伴い局部変形していた。ずれ変位が大きい場合は主筋の破断も生じていたが、この破壊パターンのコンクリートの損傷は局所的であり、概ね杭頭から20～40cm程度の範囲であった。

なお、一部の杭では、地震直後の調査でも報告があるように、GL-10m(杭頭位置から約4m)よりやや深い位置で曲げひび割れと思われる損傷が見られた。

#### (2) 杭被害の特徴

図2に示すとおり、全体のうち地下階のみを支持する杭には、杭頭接合部のずれ破壊が多く、地上部を支持する杭では、特に杭頭接合部の曲げ破壊が多く見られた。これは杭頭付近の応力がこれらの杭頭接合部に対して厳しかったことに加え、建設当時の設計方法によるところが大きいと考えられる。つまり、杭頭をパイルキャップに飲み込まないとした設計方法を選択しているため、図5に示すように、杭コンクリート打設後、杭頭部を研ってレベルの調整を行ったうえで捨てコンクリートを打設したと推定される。また、曲げ破壊した杭のフープ筋内のコンクリートは被りコンクリートに比べ損傷が少なく、継続的に建物荷重を支持できた要因の一つと考えられる。このほか9本と本数は少ないものの、一部の杭にせん断破壊が見られた。その理由として、軸力とスパン比の変動の影響が考えられるが、現段階では明確な要因は不明である。

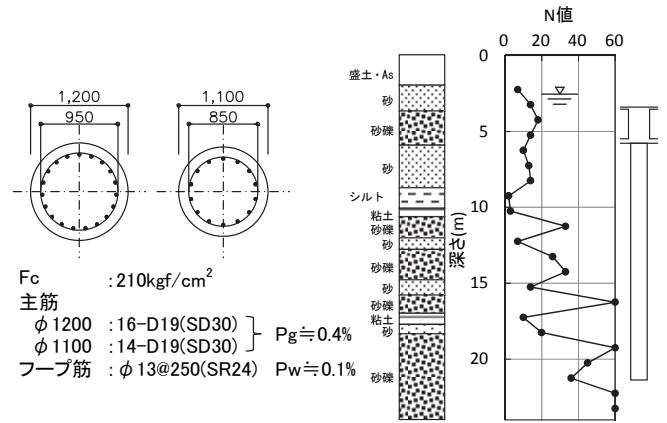


図3 杭断面

図4 ボーリング柱状図

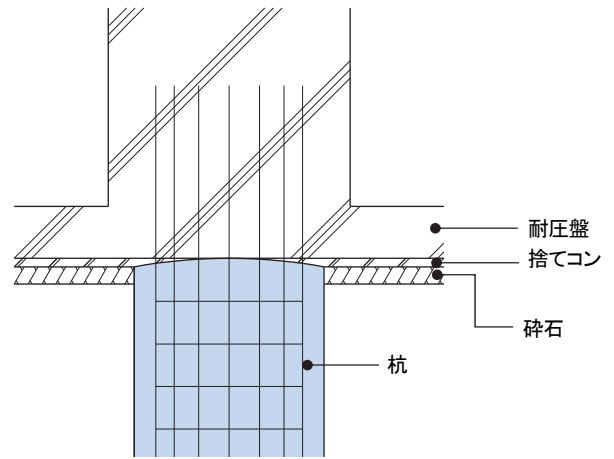


図5 本建物の杭頭接合部施工状態の推定



写真1 杭頭接合部の曲げ破壊 (B-5)



写真 2 杭頭部の曲げ破壊(A-6)



写真 3 せん断破壊(C-4)



写真 4 杭頭接合部のずれ破壊(Z-6)



写真 5 杭頭部の曲げ破壊とせん断破壊の複合(D-7)

## §4. 解析による杭の被害要因の検討

前章までに述べた杭の損傷状況について、地震時の応力状態やの杭の水平耐力など、被害要因を検討することを目的に、杭および地盤のモデルを作成し解析を行った。

### 4.1 解析方法

#### (1)解析対象

本報の解析対象は、124 本の杭のうち、地震時のせん断力および曲げモーメントが負担出来なかったと考えられる杭 7 本を除く 117 本の杭とした。

#### (2)解析モデル

解析対象の全杭に等しい杭頭強制変位を与え、杭及び杭頭接合部の応力を図 6 に示すような単杭モデルによって計算した。計算に用いた地盤のモデルは免震改修工事に伴い行われた地盤調査の結果をもとに作成した。なお、杭頭接合部については、当時の設計方法によりパイルキャップに飲み込まない形式であったため、図 7 に示す曲げモーメントと回転角の関係を杭頭回転ばねにモデル化した。

杭コンクリートと鉄筋の力学的性質は、本建物の杭から採取した供試体の試験結果から表 1 に示す値とした。ただし、実際の被害状況で杭頭接合部の曲げ破壊が多く、一部で杭頭接合部付近にやや脆弱なコンクリートが見られた。そこで、杭頭接合部のコンクリートの圧縮強度は、杭頭の曲げ破壊を生じた杭(11 本)については軸部と同じ  $45\text{N/mm}^2$  とし、それ以外の杭については  $21\text{N/mm}^2$  とした。

#### (3)解析ケース

解析ケースは、各杭の軸力および地震時の地盤応答変位の有無で分け、表 2 に示す 4 ケースで検討を行った。各ケースの軸力の範囲および  $\phi 1100$  の杭のコンクリート強度に応じた  $\text{Mu-N}$  関係を図 8 に示す。

Case1~3 は地盤の変位を考慮せず、杭頭の強制変位のみを与えたケース、Case4 は、杭頭の強制変位と地震時の地盤の応答変位を与えたケースである。非線形水平地盤ばね  $p-y$  関係は図 9 に示すように想定した。また、図 10 に Case4 で想定した地盤の応答変位算出のための加速度波形と応答スペクトルおよび地盤変位分布を示す。この地盤変位は、永野他<sup>3)</sup>による二次元差分法を用いた 1995 年兵庫県南部地震の本建物近傍の工学的基盤上の計算地震動を入力波とし、液状化を考慮した有効応力解析により求めた杭頭位置の地震動において、加速度が最大となる時(図 10 時刻(a))の地盤変位分布とした。Case4 においては液状化の影響を考慮し、過剰間隙水圧比の応じた低減を行った。

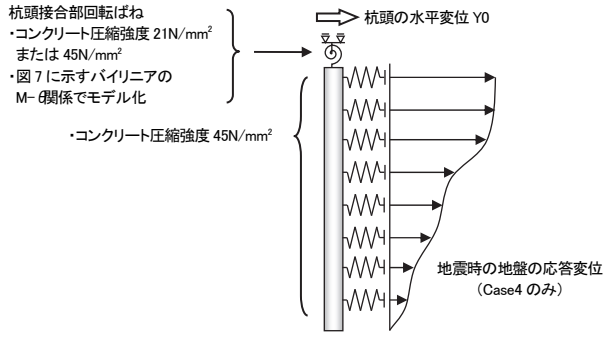


図6 杭および地盤のモデル概要

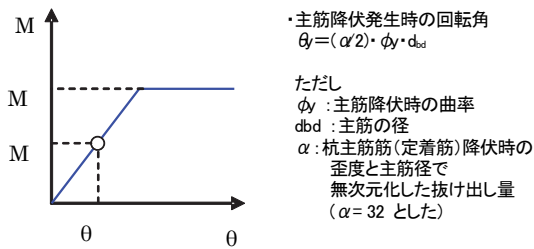


図7 杭頭接合部回転ばねの M-θ 関係

表1 杭の力学的性質

径 mm	軸部コンクリート圧縮強度 N/mm <sup>2</sup>	主筋		フープ筋	
		配筋	降伏強度(N/mm <sup>2</sup> )	配筋	降伏強度(N/mm <sup>2</sup> )
φ1200	45	16-D19	360	φ13@250	288
φ1100		14-D19			

杭から採取した供試体の試験結果による

表2 解析 Case 一覧

Case名	各杭の軸力分布	地盤の変位および水平地盤ばね剛性の低減
Case1	長期荷重時の軸力分布	なし
Case2	Y(北)方向正加力時の短期荷重時の分布 (C0 0.2、基礎部分の水平震度 0.1相当)	
Case3	長期荷重時との変動分をCase2の1.5倍とした分布	
Case4	Case3と同じ	

あり  
(水平地盤ばねは、過剰間隙水圧比の平方根に比例して低減)

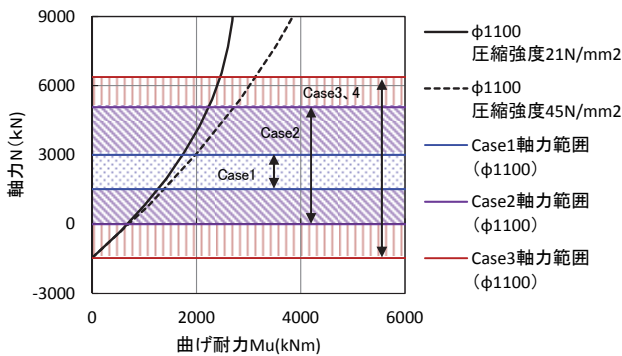


図8 各 Case の軸力範囲とφ1100の杭の Mu-N 関係

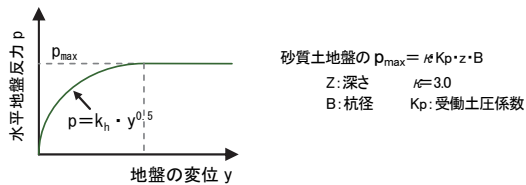


図9 地盤の非線形水平地盤ばね p-y 関係

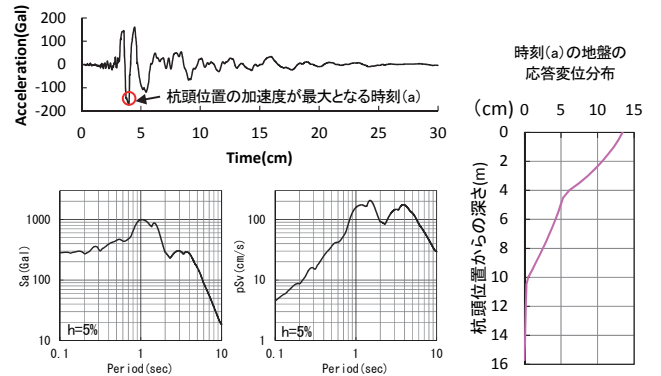


図10 検討用地震動および加速度最大のときの地盤応答変位

## 4.2 解析結果

本報で用いる記号とその説明を表3に示す。

表3 本報で用いる記号とその説明

記号	記号の説明	備考
W	建物重量	W = 303.141(kN)
N	各杭の軸力	圧縮正、引張負の値
Y0	各杭の杭頭の変位	-
M0	各杭の杭頭の曲げモーメント	-
Q0	各杭の杭頭のせん断力	-
ΣQ0	建物全体の杭の杭頭のせん断力の総和	-
ΣQ0/W	ΣQ0のWに対する比	-
Mu	各杭の軸力の応じた曲げ耐力	図4に示すN-Mu関係
M0u	各杭の軸力の応じた杭頭の曲げ耐力	同上
Qs	損傷限界せん断力(図7(1)式で与える)	-
Qsu	せん断耐力(図7(2)式で与える)	円形断面を等価長方形断面に置換 <sup>5)</sup>
Mc	各杭のひび割れモーメント(図8(3)式で与える)	-

### (1) 杭頭および杭頭接合部の曲げ耐力

図11に Case3と Case4 の各杭の M0- Y0 関係を、図12に Case1~4の(Q0/W) · Y0 関係を示す。図11(左)および図12(左)を見ると、地盤変位のない Case1~3 では、全杭の杭頭接合部の曲げモーメント M0 が曲げ耐力 M0u に達するときの Y0 は 2~3cm 程度で、図12によればこのときの ΣQ0/W は 0.4~0.5 程度となっている。また、全体の Y0-(ΣQ0/W) 関係は、変動軸力が大きいケースほど ΣQ0/W がやや小さくなっている。一方図11(右)および図12(右)を見ると、地盤変位のある Case4 では、杭頭接合部にほとんどせん断力がかからない状態でも、全杭で M0 が M0u に達していることが分かる。

### (2) 杭頭のせん断耐力

顕著なせん断ひび割れが見られた C-4 の杭について、Q0- Y0 関係、Qsu、Qs との対応を図13に示す。同図によれば、地盤変位のない Case3 では Y0 が 3cm 付近で、Case4 では、Y0 が 17cm 付近で Q0 が Qs と近い値となっている。実際に顕著なせん断ひび割れが発生したことから、地震時にこの程度のせん断力が作用した可能性があり、図12を見るといずれの Case も、このときの ΣQ0/W は 0.4~0.5 程度となっていることがわかる。

(3) 杭地中部の曲げモーメント

本検討において地震時の状況に近いと推定される、 $\Sigma Q0/W$  が 0.4 のときの曲げモーメント分布 (Case3、4) のうち、圧縮軸力の大きい C-5 の杭について図 13 に示す。Case3、4 とも杭頭接合部の曲げモーメントは  $M0u$  に達しており、地盤変位のある Case4 では地中部の曲げモーメントも大きくなっている。既往の被害調査でも GL-10m 以深でひび割れが観察されており、 $M_c$  と比較してこの部分で曲げモーメントが大きいことと対応していると考えられる。

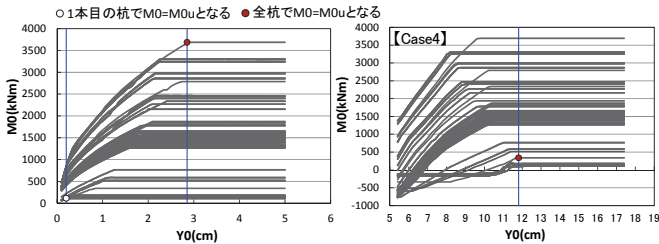


図 11 全杭の  $M0-Y0$  関係 (Case3、Case4)

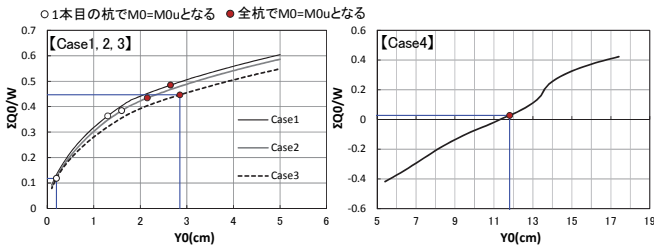
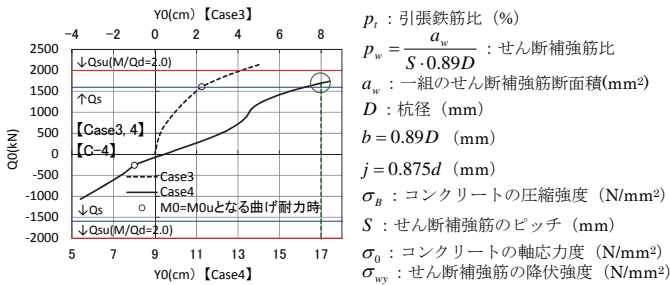


図 12  $(\Sigma Q0/W)-Y0$  関係

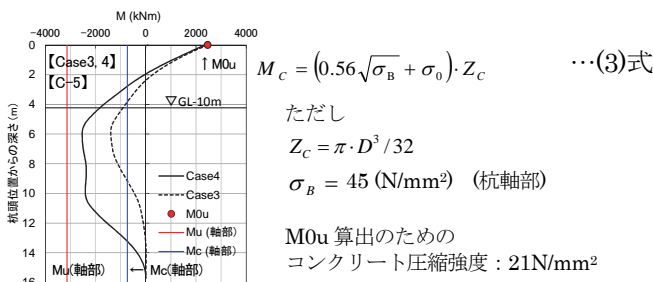


$$Q_s = \frac{3}{4} \cdot f_s \cdot A_c \quad \dots(1)式$$

ただし  $f_s = \min \left\{ 1.5 \left( \frac{\sigma_B}{30} \right), 1.5 \left( 0.49 + \frac{\sigma_B}{100} \right) \right\}$   $A_c$  : 杭の断面積 (N/mm<sup>2</sup>)

$$Q_{su} = \left\{ \frac{0.053 p_t^{0.23} (18 + \sigma_B)}{M/(Qd) + 0.12} + 0.85 \sqrt{p_w \cdot \sigma_{wy}} + 0.1 \sigma_0 \right\} \cdot b \cdot j \quad \dots(2)式$$

図 13 C-4 杭の  $Q0-Y0$  関係 (Case3、Case4)



$$M_c = (0.56 \sqrt{\sigma_B} + \sigma_0) \cdot Z_c \quad \dots(3)式$$

ただし

$$Z_c = \pi \cdot D^3 / 32$$

$$\sigma_B = 45 \text{ (N/mm}^2\text{)} \text{ (杭軸部)}$$

$M0u$  算出のための  
コンクリート圧縮強度 : 21N/mm<sup>2</sup>

図 14 C-5 杭の曲げモーメント分布 (Case3、4 : N=6373kN)

4.3 解析および検討のまとめ

地震時に一部を除いたほぼ全数の杭を対象に解析を行い、地震時の応力および水平耐力について検討した。曲げ耐力に関しては、地盤の応答変位を考慮しない場合で、建物重量の 0.4~0.5 倍程度の水平力がかかったとき全ての杭頭接合部が曲げ破壊する結果となった。地盤の応答変位を考慮すると、上部構造からのせん断耐力がほとんど生じない場合でも全ての杭頭接合部が曲げ破壊する結果となり、地盤変位の影響が大きいことが分かった。せん断耐力に関しては、各 Case とも建物重量の 0.4~0.5 倍程度の水平力が杭頭接合部にかかったときせん断耐力に達する結果となった。これらの結果から、実際の地震時にもこの程度の水平力が生じた可能性があると考えられる。

§5. おわりに

本報では 1995 年兵庫県南部地震の被害にあった後、補修を行い 18 年間継続使用された建物について、免震改修工事に伴って露出した場所打ちコンクリート杭について、地震による被害状況の調査および解析による被害要因の検討を行った。ほぼ全数の杭に損傷があることを確認し、杭の主な破壊パターンを大別した。

謝辞

本報告作成にあたり、北海道大学 教授 飯場正紀先生、建築研究所 平出 勉氏 柏尚稔氏には貴重なご意見、ご指導を頂きました。ここに記して、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会近畿支部基礎構造部会、兵庫県南部地震による建築基礎の被害調査事例報告集、1996
- 2) 社団法人営繕協会、建築共通仕様書(昭和 44 年版)
- 3) 永野 他、兵庫県南部地震時の神戸市内における基盤地震動及び地盤増幅特性、日本建築学会構造系論文集、第 511 号、1998
- 4) 林 他、鉄筋コンクリート造円形断面部材のせん断終局強度式の適用性、コンクリート工学、Vol.42、2004

ひとこと

本報のように建物全体で地震被害を受けた場所打ちコンクリート杭の掘削を行い、被害を調査した例はないため、本研究の成果は貴重な技術的資料となると考えています。



田中 良一