1995年兵庫県南部地震による既製コンクリート杭の 被害様相についての一考察

AN INVESTIGATION ON ASPECTS OF DAMAGE TO PRECAST CONCRETE PILES DUE TO THE 1995 HYGOKEN-NAMBU EARTHQUAKE

杉村 義広*, カルキー マダン**, 三 辻 和 弥***

Yoshihiro SUGIMURA, Madan B. KARKEE and Kazuya MITSUJI

Aspects of damage at deeper underground part of precast concrete piles, subjected to lateral flow at liquefied reclaimed land during the 1995 Hyogoken-Nambu earthquake, referred to as the K-shaped failure in this paper, are investigated. Attempt is made to utilize the distributed load method, proposed earlier by the first author, to estimate the cause of this type of failure. Results of the analysis show that the stress in pile at the slip surface exceeds the ultimate strength and, it is effective and important to consider relatively specific loading condition, consisting of the concentrated load at the slip surface in combination with the distributed load due to active earth pressure, to portray the observed behavior.

Keywords: Precast concrete piles, Earthquake damage, Shear failure, Lateral flow, Infinitely long piles,
Theoretical solution to horizontal resistance of piles

既製コンクリート杭, 地震被害, せん断破壊, 側方流動, 無限長杭, 杭の水平抵抗理論解

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震では, 上部構造だけでなく杭基礎の被害も少なからず認められ, とくに使用例の多い既製コンクリート杭の被害事例が多く報告されている¹⁾。その被害様相は, 杭頭付近の損傷と杭地中部の損傷に大別されるが, 前者は上部構造の慣性力が主因となった杭頭付近のせん断破壊あるいは曲げせん断破壊で(中には圧壊に至った例もある), 宮城県沖地震(1978)における被害様相が再現されたものであることを筆者らも繰り返し指摘したことがある²⁾。後者は, 埋立て地での被害が典型的な例であり, 埋立て層が液状化し, 側方流動することによって引き起こされた埋立て層境界付近あるいは埋立て層内での破損, すなわち折れ曲がりの様相を示す被害タイプである³⁾。これは, 兵庫県南部地震独特の被害様相とも言え, 後述するように, その後この現象を解釈するための多くの研究がなされているが, 本論文でもこの既製コンクリート杭の被害タイプについて新しい考え方に基づく想定メカニズムを構築することにより考察を与えることを試みる。

2. 側方流動による杭の典型的な被害形式とその解析に関する研究

筆者らが行った文献調査によれば, 液状化後の側方流動による被害の典型例として中澤他による論文^{4)~6)}と時松他の論文⁷⁾をあげることができる。これらに共通しているのは, 建物を支持している海側

と陸側の杭の被害様相が全く異なり, とくに海側の杭が地中部で「く」の字型に折れるような被害推定イメージ図として示されていることである(以下, この典型的被害形式を「く」の字型損傷と略記する)。また, 他の例では, 撤去を余儀なくされた建物の調査に際してとか, 上部構造はさしたる構造的被害がないのに傾斜し, その復旧のためにとか, さらには今後の杭基礎の耐震設計の参考のためにといった理由などで, 詳細に調査されたものとして鈴木他¹⁰⁾, 山田他¹¹⁾(この事例はSC+PHC+STの継杭の中杭であるPHC杭部分が損傷したのが特徴的), 松村他¹²⁾があげられるが, いずれも前述の被害推定イメージ図のような表示はないけれども, 同様な被害形態にあることは容易に推察できる。さらに詳細さはやや欠けるが, 一般的被害タイプを示した文献^{13), 14)}や, 個別の被害事例を示した文献^{15)~21)}があり, これらの中にも前述した典型的な被害様相とほぼ同様な被害形態を示したものが含まれていると推定できる。

なお, この種の被害は杭が液状化時に受けた損傷と側方流動後に受けた損傷とが混在しているものと思われるが, 観察できるのは最終状況のみであり, 両者を明確に区別するのはほとんど不可能に近い。したがって, ここでは「液状化による被害」とのみ表現されている論文は省くことにし, 液状化時にも何らかの損傷を受けた可能性はあるが, 最終的には明らかに側方流動の影響を受けていると考えられる被

* 東北大学大学院都市・建築学専攻 教授・工博
** 秋田県立大学建築環境システム学科 教授・工博
*** 東北大学大学院都市・建築学専攻 助手・工修

Prof., Dept. of Architecture and Building Science, Tohoku Univ., Dr. Eng.
Prof., Dept. of Architecture and Environment Systems, Akita Pref. Univ., Dr. Eng.
Res. Assoc., Dept. of Architecture and Building Science, Tohoku Univ., M. Eng.

害事例に限ってあげている。逆に、筆者らの判断ではあげておくのが適当と思われるが、側方流動の影響は受けていないと明記されているためにあえてはしなかった文献²²⁾や、側方流動を経験しているが杭種が場所打ちコンクリート杭や鋼管杭であるために本論文の目的にはそぐわないためにはしなかった文献²³⁾もあることを断っておきたい。

以上に示した被害事例に対して、そのメカニズムを解明するための解析的研究も精力的に行われている。その包括的なまとめと位置づけられるものとして、ここでは地盤工学会が1998年5月に行ったシンポジウムの委員会報告をあげたい²⁴⁾。それによれば、側方流動後の状態として流動地盤から杭に伝わる影響の評価法には、1)土圧法、2)流体圧法、3)応答変位法があり、各機関による構造物の設計法としてこれらのうちいずれかが採用されているとしている。地震応答解析による検討は当然ながら解釈法の一つであるので、それを加えれば既往の解析的研究はすべてこれら4つのうちのどれか、あるいは複合的に用いている例が多い。例えば、土圧法と流体圧法は媒質をどう考えるかの違いで、ある意味では通じるものがあるため小林他²⁵⁾は両者のメカニズムを想定して比較検討することで被害の様相の解釈を試みている。佐藤他²⁶⁾は土圧法を用いているが(論文中では場所打ちコンクリート杭を念頭において杭諸元を設定したとあるが解析法一般であるのであえておく)、比較のために後述の応答変位法の適用も試みている。また、流体圧法を用いた例としては難波他^{27),28)}、藤木他²⁹⁾があげられる。応答変位法を用いた例は最も多く、山口他³⁰⁾、石坂他³¹⁾、伊勢本他^{32)~36)}、時松他^{37),38)}、淵本他³⁹⁾、有木他⁴⁰⁾や個別の被害事例でも示した永野他³¹⁾をあげることができる(ただし、事例が非常に多いので研究グループごとに類似のものは省くとともに代表的と思われる文献のみに絞っている)。

以上の3つの評価法には共通している点がある。それは流動地盤が杭を「押す」すなわち背後から外力として作用するという考え方である。これに対して田蔵他⁴¹⁾は橋脚基礎の端部から斜め後方に伸びた地盤の亀裂に注目し、土層実験と数値解析に基づいて護岸背後の地盤が前方移動することで、すなわち橋脚前方に存在していた地盤が失われることで生じたもので、流動地盤が背後から押す力となって作用したのではないと主張している。この解釈は根切り工事における「除荷の力学」を指摘した野尻の研究⁴²⁾に通じるものがあり、極めてユニークな考え方として注目に値しよう。

地震応答解析に基づいて側方流動による被害のメカニズムの解釈を試みた研究も多く、応答変位法の場合と同様に研究グループごとに類似のものは省くとともに代表的と思われる文献のみに絞って拾い出すと藤井他⁴³⁾、松村他⁴⁴⁾、石坂他⁴⁵⁾、八幡他⁴⁶⁾、船原他⁴⁷⁾、仙頭他⁴⁸⁾、渦岡他⁴⁹⁾、淵本他⁵⁰⁾、時松他⁵¹⁾をあげることができる。なお、護岸近傍に建つ仮想の建物を対象とし、場所打ちコンクリート杭支持を想定して詳細な検討を行った古山田他⁵²⁾の研究があり、本論文の目的には直接にはそぐわないものの間接的には参考となる点が多く指摘されているので、あえてあげておく。すなわち、護岸からの距離に応じて応答変形モードが異なり、近いと大きく遠いと小さくなること、地盤流動が始まる以前に杭の塑性化が始まっていると推定されること、海側の杭は杭頭部での変位が陸側の杭の存在によって抑えられる傾向にあり、地中部では側方流動で地盤が海側にせりだす深さで塑性化すること、逆に陸側の杭では杭頭部で海側の杭に引かれて塑性化が進むとともに地中部では液化化により塑性化が進むことなどである。

図-1 a) スランプ、および b) 「く」の字型損傷の発生メカニズムのイメージ図

3. 「く」の字型損傷の発生に対する想定メカニズムの構築

杭の地震被害、とくに側方流動による杭中間での損傷など過去においての経験が少ない被害の原因を究明するためには、どのような荷重作用があったかを合わせて考えることが重要である。以下には、代表例として文献5)に示された「く」の字型損傷を取り上げ、荷重条件もあわせてその発生の想定メカニズムの構築を試みる。

まず、筆者らの考えに符合するものとして田蔵他⁴¹⁾と中澤他⁵³⁾の研究をあげたい。すなわち、一つは前者の結論、流動地盤は杭の背後から押す形で作用したのではなく、前方から離れていくとの見解であり、ほかの一つは後者に被害イメージとして示されている滑り面の考え方である。これらの符合は、側方流動が地滑りの分野で言うスランプ(図-1a)に似た結果となって現れたのではないかと筆者らが考えていたことによる。次に、該当建物とその周辺状況に注目すると、南側の護岸が長く(写真-1)、波を打つように孕み出している状況がみられ、その影響を受けてA棟寄りの西側護岸にも開きが生じている(写真-2)。また、西側駐車場やフェンスには南側の護岸の移動に誘発されたと思われる幾重かのひび割れが生じており(写真-3)、C棟寄りの東側護岸にも同様に複数のひび割れが確認できる(写真-4)。A棟の北側面では道路下の地盤に隙間が生じているとともに、5m程度手前(北)側に建物面と平行する地割れが走り、その影響でコンクリートスラブが割れて段差が出来ている(写真-5)。写真-3や写真-4などでは大きな地割れは建物長手方向と平行に5-7m(ほぼ建物短辺の半分に相当する)幅で生じているともみられる。これらの状況と先の二つの文献から得たヒントを組み合わせて、被害発生について以下のような単純化した想定メカニズムを構築する。

1) 今、「く」の字型損傷を被った南側基礎F2の杭群(文献5)の図2)を対象として図-1b)に示すようなメカニズムを想定する。まず、護岸が海側に移動したことに誘発されて、海側に存在していた地盤

写真-1 南東側からみた建物の全景
(左手前側から右へA, B, C棟。南側前面の護岸がみえる)

写真-2 南側護岸の孕み出しと西側護岸の開き

写真-4 東側護岸にみられるひび割れ

写真-3 西側駐車場とフェンス基礎にみられるひび割れ

写真-5 A棟北側の状況

(通路下に隙間が生じているとともに5m程度手前側に建物と平行する地割れが見える)

がブロック状に滑りを生じて杭群から離れたと推定する。このことによって杭両側の水平応力のバランスが崩れるが、この状況は根切り時に山留め壁の前面側が掘削される場合に類似させて考えられるので、背後側の地盤からの主働土圧と類似させて分布荷重を仮定する。ただし、水圧との区別が付きにくい流動地盤となっていることを想定して一体的な側圧で考えることにし、側圧係数は建築基礎構造設計規準・同解説(1974改)49条⁵³⁾に示された $k=0.7$ を仮定する。この値は砂地盤で地下水位が浅い場合として提案されているものであるが、比較的通常の地盤の場合に想定される $k=0.5$ と、今回のような液状化地盤など特殊な場合にはむしろ $k=1.0$ と想定される値の中間値であり、被害原因のための想定値としては控えめの値と考えられる。

2)次に、水平応力のバランスが崩れたことに誘発されて、引き続いて中央部の杭群位置までの地盤内に滑りが生じ、その滑り力が基礎F2の杭群に作用したと推定する。その位置は、多くの文献によれば埋立て層下境界面付近であるとも考えられるが、文献5)では埋立て層内で滑りが起きたとの推定が明記されているので、ここではそれにならってGL-4.1m程度の深さで生じたものとする。滑り面の形状は曲面であったことも考えられるが、ここでは簡単のために平面と仮定し、滑り面での摩擦抵抗力以上の力が作用したときに滑りが生じるとの条件で滑り力を求めることにし、集中荷重として作用させる(ただし、この位置でも滑りはブロック状に起こった可能性を考慮して、解析では滑り長さを2m, 4m, 建物の半幅に相当

する6.7mと段階的に変えて比較する)。この荷重は、杭群より内側の地盤内に新たに生じる滑りを評価しているものであるから、上記の側圧とは別に滑り面での集中荷重として示すのが相応しい外力であると考えられる。

なお、この建物については、その後さらに詳細な調査結果が文献8)で示されており、文献5)では触れられていなかった事実、すなわち中通りの杭7本にはやや深いGL-4.7m付近で破断していることが追加報告されている。ただし、杭頭の傾斜方向や杭頭付近の損傷などの状況から、杭頭に作用した東西方向の繰り返し外力(上部構造の慣性力と考えられる)がその主因であると推定されている。このことから、南側杭の「く」の字型損傷との異質性が多分に想像できるので、ここでは基礎F2の杭群の「く」の字型損傷に限定して原因追究を行う視点に立ち、この損傷は考察の対象には含めないことにする。

以上のように、対象とした杭群より海側地盤内での滑りが発生し、それによる水平応力のバランスの崩れが生じるとともに、杭群より内側の地盤の新たな滑りを引き起こす誘因となっているとの波状的な滑りを想定している点が本論の想定メカニズムの根幹である。この考えは、例えば擁壁に対する主働土圧を求める過程、あるいは地滑り抑止杭の安全性を検討するメカニズムとは異なった新しい考え方に基づくもので、護岸からの距離によって地盤の水平変位の大きさに変化が生じたと言われていることにも通じるであろう。また、これらの荷重作用は引き続いて起こったが時間的な遅れ

はそれほど大きくはなく、水平応力のバランスが崩れている状態では背後からの滑り力を受けたと推定しているので、後述する簡便な静的解析法ではこれらを同時に作用させることにする。

なお、この解析法では基本的に杭の全長にわたって地盤反力が作用するものと扱っており、上記1)に示した南側地盤が杭から離開しているとの仮定とは矛盾することになる。したがって、解析においては地盤反力がない場合のアナロジーとして滑り面以浅の地盤反力係数を非常に小さくした場合の計算も追加して考察することにする。

4. 荷重分布法の適用

筆者らは以前から応答変位法に対して荷重分布法なる解析法を提案し^{54),55)}、地盤の応答が杭応力に与える影響を機会あるごとに解析例として示してきた^{56)~60)}。ここでは、この方法を解析に適用することを試みる。

荷重分布法は応答変位法と呼ばれている次の基本式から出発する。

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + k_h B \{y - f(x)\} = 0 \quad (1)$$

ここで、 EI は杭の曲げ剛性、 k_h は水平地盤反力係数、 B は杭幅、 y は杭の水平変位、 $f(x)$ は地盤の水平変位、 x は深さである(単位はKN, cm系を用いるのが普通)。 $f(x)=0$ と置けば通常の杭頭に集中水平力を受ける杭の水平抵抗問題の基本式と一致することが分かる。今、(1)式を変形すると次式になる。

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + k_h B y = k_h B f(x) \quad (2)$$

すなわち、右辺の $k_h B f(x)$ は見かけ上外力とみることができるので、任意外力分布 $p(x)$ で置き換えてみると次式が得られる。

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + k_h B y = p(x) \quad (3)$$

(2)式は外力分布が $k_h B f(x)$ で規定されているのに対し、(3)式は $p(x)$ が任意に与えられる形になっていることが特徴的である。すなわち、(2)式の応答変位法が地盤変位分布に規定されているのに対し、(3)式の荷重分布法は任意形状の荷重分布を与えられる点が異なっている。さらに言えば、荷重分布法は本論文で対象としている滑りなど、地盤破壊の問題への応用も可能と考えられる。そこで、前章で示した集中荷重や分布荷重への対応を試みることができる。

今、簡単のために無限長杭の場合を考えれば、集中荷重、等分布荷重、三角形分布荷重などの任意荷重に対する杭の変位や応力の一般解はすでに Hetenyi⁶¹⁾によって求められているが、同様の解を求める手順は文献55)に比較的详细に示したのであわせて参照されたい。ここでは、得られた結果のみを表-1に示す。同表では三角形と逆三角形分布荷重の場合とも解を示したが、両者を加算すると等分布荷重の解に一致していることが確かめられよう。これらの分布荷重の組合わせを適用した解析例を次章に示す。なお、本論文に先立って同様の応用を試みたことがあるので^{62),63)}、あわせて示しておく。

5. 数値解析例

構造諸元などは最終的なまとめである文献8)の記述を参考にする。基礎スラブは $0.4\text{m} \times 1.8\text{m}$ (そのうち地中への根入れは 1.5m)、杭

表-1 各種荷重タイプに対する無限長杭の水平抵抗理論解

集中荷重に対する解

$x_c \leq x_a$	$x_c \leq x_r$	Explanations	
	$y_c = \frac{P}{8EI\beta^3}$	β_{2a}	β_{2a}	$\beta = \sqrt[4]{\frac{k_h B}{4EI}}$ $a = x_c - x_a $ $b = x_c - x_b $
	$\theta_c = \frac{P}{4EI\beta^2}$	β_{1a}	$-\beta_{2a}$	$\beta_{1a} = e^{-\beta a} \cos \beta a$ $\beta_{1b} = e^{-\beta b} \cos \beta b$
	$M_c = \frac{P}{4\beta}$	β_{1a}	β_{1a}	$\beta_{2a} = e^{-\beta a} \sin \beta a$ $\beta_{2b} = e^{-\beta b} \sin \beta b$
	$Q_c = \frac{P}{2}$	β_{1a}	$-\beta_{1a}$	$\beta_{3a} = e^{-\beta a} (\cos \beta a + \sin \beta a)$ $\beta_{3b} = e^{-\beta b} (\cos \beta b + \sin \beta b)$ $\beta_{4a} = e^{-\beta a} (\cos \beta a - \sin \beta a)$ $\beta_{4b} = e^{-\beta b} (\cos \beta b - \sin \beta b)$

等分布荷重に対する解

$x_c \leq x_a$	$x_a \leq x_c \leq x_b$	$x_b \leq x_c$	
	$y_c = \frac{p}{8EI\beta^3}$	$\beta_{1a} - \beta_{1b}$	$2 - \beta_{1a} - \beta_{1b}$	$\beta_{1b} - \beta_{1a}$
	$\theta_c = \frac{p}{4EI\beta^2}$	$\beta_{1a} - \beta_{1b}$	$\beta_{1a} - \beta_{1b}$	$\beta_{1b} - \beta_{1a}$
	$M_c = \frac{p}{4\beta}$	$\beta_{1a} - \beta_{1b}$	$\beta_{1a} + \beta_{1b}$	$\beta_{1b} - \beta_{1a}$
	$Q_c = \frac{p}{4\beta}$	$\beta_{1a} - \beta_{1b}$	$\beta_{1a} - \beta_{1b}$	$\beta_{1b} - \beta_{1a}$

逆三角形分布荷重に対する解

y	$x_c \leq x_a$	$x_a \leq x_c \leq x_b$	$x_b \leq x_c$
	$y_c = \frac{p_0}{16EI\beta^3 h}$	$\beta_{1a} - \beta_{1b} - 2\beta h \beta_{1a}$	$\beta_{1a} - \beta_{1b} - 2\beta h \beta_{1a} + 4\beta h$	$\beta_{1b} - \beta_{1a} - 2\beta h \beta_{1a}$
	$\theta_c = \frac{p_0}{8EI\beta^2 h}$	$\beta_{1a} - \beta_{1b} + \beta h \beta_{1a}$	$\beta_{1a} + \beta_{1b} + \beta h \beta_{1a} - 2$	$\beta_{1b} - \beta_{1a} + \beta h \beta_{1a}$
	$M_c = \frac{p_0}{8\beta h}$	$\beta_{1a} - \beta_{1b} - 2\beta h \beta_{1a}$	$\beta_{1a} - \beta_{1b} + 2\beta h \beta_{1a}$	$\beta_{1b} - \beta_{1a} + 2\beta h \beta_{1a}$
	$Q_c = \frac{p_0}{4\beta h}$	$\beta_{1a} - \beta_{1b} + \beta h \beta_{1a}$	$-\beta_{1a} - \beta_{1b} + \beta h \beta_{1a}$	$\beta_{1b} - \beta_{1a} + \beta h \beta_{1a}$

三角形分布荷重に対する解

$x_c \leq x_a$	$x_a \leq x_c \leq x_b$	$x_b \leq x_c$	
	$y_c = \frac{p_0}{16EI\beta^3 h}$	$\beta_{1a} - \beta_{1b} - 2\beta h\beta_{1a}$	$\beta_{1a} - \beta_{1b} - 2\beta h\beta_{1a} + 4\beta h$	$\beta_{1a} - \beta_{1b} + 2\beta h\beta_{1a}$
	$\theta_c = \frac{p_0}{8EI\beta^2 h}$	$\beta_{1a} - \beta_{1b} - \beta h\beta_{1a}$	$2 - \beta_{1a} - \beta_{1b} - \beta h\beta_{1a}$	$\beta_{1b} - \beta_{1a} + \beta h\beta_{1a}$
	$M_c = \frac{p_0}{8\beta h}$	$\beta_{1a} - \beta_{1b} - 2\beta h\beta_{1a}$	$\beta_{1a} - \beta_{1b} + 2\beta h\beta_{1a}$	$\beta_{1b} - \beta_{1a} + 2\beta h\beta_{1a}$
	$Q_c = \frac{p_0}{4\beta h}$	$\beta_{1a} - \beta_{1b} + \beta h\beta_{1a}$	$\beta_{1a} + \beta_{1b} - \beta h\beta_{1a}$	$\beta_{1b} - \beta_{1a} + \beta h\beta_{1a}$

はPC杭A種($\phi=50\text{cm}$, $l=9\text{cm}$, $L=13+13=26\text{m}$, 長期許容支持力 $L R_a=764\text{kN/本}$)であり、南側の杭がGL-3.8~4.2mで水平に破断しているとの事。したがって、問題を単純化してここでは損傷箇所はGL-4.1mであったものとして固定する。また、対象とする流動地盤の幅は南側の杭が6本で支持する基礎F2の柱心からスパンの半分ずつをとった6.3mを単位に考えることにする。

埋立て層の土性については礫を含んだ砂質主体という以外、ほとんど情報がないので単位重量は $\gamma=18\text{kN/m}^3$ と仮定する。 N 値は、文献8)の図からは大きな値が読み取れるが、通常、埋立て土では中に含まれる礫などの影響で局部的に N 値が大きく出る傾向があることを考慮して、ここでは埋立て層全体に対してやや小さめに $N \approx 15$ と推定する。滑り力を評価するためのせん断強さは砂質土の摩擦力度としてよく使われる $s=10 N/3(\text{kN/m}^2)$ を適用する。水平地盤反力係数については、文献64)に示された次式を適用する。

$$k_{h0} = \alpha \xi E_0 B^{-3/4} \quad (4)$$

ここで、 k_{h0} は基準水平地盤反力係数 (kN/m^3)、 E_0 は変形係数 (kN/m^2) で N 値に対し $E_0=700$ (このとき係数 α は80) で表される。 ξ は群杭による影響係数で杭中心間隔/杭径比 (κ) が6以下の場合に $\xi=0.15\kappa+0.10$ で表される。今回の解析例では、 κ は文献8)の図から通常設計される2.5であることが読み取れるので、南側基礎F2の6本の場合、 $\xi=0.475$ となる。 B は無次元化係数で杭径を cm で表した場合の数値を使うことになっているので、この場合は50が対応する。これらの数値を(4)式に代入すると最終的に $k_{h0}=2.122 \times 10^4 (\text{kN/m}^3)$ が得られるので、この値を用いることにする。

以上の条件で滑り面以浅での側圧と滑り面における滑り力を求め、杭1本当たり換算すると、図-2に示したような台形分布荷重と集

図-2 典型的な被害形式と想定する荷重分布

中荷重の組み合わせで表せる。台形分布荷重は、図示したように19.8kN/mの等分布荷重とGL-1.5mで0kN/m、GL-4.1mで34.4kN/mとなる三角形分布荷重に分解して解けばよい。実際の数値計算では、杭頭位置(GL-1.5m)からGL-10mまでを0.1m間隔で86点についての応答値を求めることにする。

6. 数値解析結果に対する考察

解析結果として図-3には滑り長さを2, 4, 6, 7m(滑り力は105, 210, 351.8kNに相当)に変えた時の杭の変位, 曲げモーメント, セン断力の変化状況を示す。また図-4には、前述した地盤反力がない場合のアナロジーとして図-3における滑り力351.8kNの場合に対し、滑り面以浅の地盤反力係数を0.1倍と0.01倍した場合の計算例を示す。

以上の曲げモーメント図には杭体の終局曲げモーメント M_u (kNm) を、せん断力図には終局せん断耐力 Q_u (kN) を比較して示しているが、 M_u は杭体に関する破壊の軸力-曲げモーメント関係 ($M-N$ インタラクションカーブ) から杭の長期許容支持力(764kN/本)に対応する値を求めたものである。また、 Q_u は文献(65)に示された(5)式と、岸田ら⁶⁶⁾による(6)式(ただし、本論文のケースに該当するものだけに単純化して表示)を比較検討することで求めている。

$$Q_u = \frac{2fl}{S_0} \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_g + 2\phi\sigma_t)^2 - \sigma_g^2} \quad (5)$$

$$\sigma_g = \sigma_c + \frac{N}{A_c}$$

図-3 滑り長さの差異による杭の応答量の変化

ここで、 t 、 I 、 S_0 は杭の肉厚、断面2次モーメント、断面1次モーメントであり、 σ_e 、 σ_t は有効プレストレス、コンクリートの引張り強度(圧縮強度の7%程度といわれている)、 N 、 A_c は軸力、コンクリートの換算断面積である。単位は計算途中はkN、cm系を用いるなど任意であるが、最終的にkNにまとめるのが普通である。 ϕ は、文献65)ではせん断破壊時の斜張応力度とコンクリートの引張り強度の比と定義されているが、事実上は(5)式が弾性論に基づいた式であるので、実験結果と比較したときの調整係数で、0.5程度とすると対応がよいと言われている。

$$Q_u = \tau_{\max} b_e j \quad (6)$$

$$b_e = \{-1.24(t/D) + 1.19\} A_c / D$$

$$j = 7d/8 = 7(D-t)/8$$

$$\tau_{\max} = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 \quad (\text{杭本体の設計時})$$

$$\tau_1 = \frac{0.115 k_u k_p (\sigma_B + 17.7)}{(M/Qd) + 0.115}$$

$$\tau_2 = 0.657 (0.785 p_w \cdot w \sigma_y) \quad (0.785 p_w \cdot w \sigma_y \leq 7.4) \quad (\text{N/mm}^2)$$

$$\tau_3 = 0.102 (\sigma_e + \sigma'_0) = 0.102 \left(\sigma_e + \frac{N'}{b_e j} \right) \quad (\sigma_e + \sigma'_0 \leq 27.4 \text{ N/mm}^2)$$

ここで、 t 、 D 、 A_c [$A_c = \pi t(D-t)$]は、杭の肉厚(mm)、外径(mm)、実断面積(mm²)、 τ_1 、 τ_2 、 τ_3 はコンクリート負担分、らせん筋負担分、軸力負担分のせん断応力(N/mm²)である。 σ_B 、 σ_e 、 N' はコンクリートの圧縮強度(N/mm²)、有効プレストレス(N/mm²)、軸力(N)であり、 d 、 $w \sigma_y$ は有効せい(mm)、らせん筋の降伏点強度(N/mm²)である。 k_u は

断面寸法による補正係数で、今回の場合は $k_u = 0.72$ が該当する(単位は原論文にならって表示している)。 k_p は引張り鉄筋 p_t による補正係数で次式で表せる。

$$k_p = 0.82 (100 p_t)^{0.23}, \quad p_t = p_g / 4 \quad (7)$$

p_g は主筋比($p_g = A_s / b_e j$)、 p_w はらせん筋比($p_w = a_w / b_e s$)であり、 A_s 、 a_w 、 s は主筋全断面積(mm²)、らせん筋の面積(mm²)および間隔(mm)である。 M/Qd はせん断スパン比であるが、筆者らの経験でもPHC杭A種の場合には、せん断破壊と曲げ破壊の境界はせん断スパン比が1.0程度であることが知られているので⁶⁾、ここでは1.0を仮定して算出することにした。

以上の計算条件で、軸力として杭の長期許容支持力(764kN/本)を考慮して Q_u を求めてみると(5)式からは277kN(ただし $\phi = 0.5$ とした場合)、(6)式からは340kNが得られ、(5)式をせん断ひび割れ耐力、(6)式を終局せん断耐力と使い別ける最近の傾向(例えば、建築基礎構造設計指針⁶⁾やJISなど)と対応する結果が得られた。この使い分けは、最近の知見としてせん断ひび割れが生じるまで杭体は線形的な挙動をし、その後の最大耐力までの伸びもこれらの計算結果に対応する程度であることが知られるようになってきていることを考えれば妥当なものと思われるので、ここでは(6)式の結果を終局せん断耐力 Q_u として採用することにする。

図-3では、側圧を固定しているので滑り長さの増大とともに最大値がGL-4.1mで生じ曲げモーメント、せん断力にみられるとおり、当然ながら滑り力として評価した集中荷重の影響が支配的になる状況が読み取れる。その値は滑り長さ6.7mの場合、それぞれの終局耐力に対しては曲げモーメントで8割程度、せん断力では6割程度の計算結果となっている。

一方、図-4では様相が一変する。地盤反力係数を0.1倍とした場合に

図-4 滑り面以浅の地盤反力係数の低減による杭の応答量の変化

は、図-3の滑り長さ6.7mの場合と比較して、せん断力については最大値がやや大きくなり、滑り面以浅の分布形状がやや異なるものの総じて変化は少ないのに対し、曲げモーメントは分布形状自体が滑り面付近で一層突出する形状となっており、最大値も急増し終局耐力を超えている。また、変位も滑り面付近で極端に折れ曲がる形状を示し、全く異なった変形となっていることが特徴的である。地盤反力係数を0.01倍とした場合には、さらにその傾向が一層強調される関係になっている。この計算結果に基づけば、アナロジー的には杭の被害様相を以下のように説明できるように思われる。「滑り面付近での曲げモーメントが優に終局耐力を超えてダメージを受けている上にせん断（それも直接せん断型）の要因も受けることによってその位置で折れ曲がるような変形を強いられた。」ただし、荷重の設定には多くの仮定が含まれているためより精度を高める余地が残されていることなどを考慮すると、ここでは、終局耐力を超えたか否かの定量的な議論よりも、この種の被害様相を究明するには、少なくとも以上に示した分布荷重や集中荷重のような比較的特殊な荷重作用を想定するのが有効かつ重要であるという点を強調したい。逆に、応答変位法を用いる場合には、該当する位置で極端に折れ曲がるような変形を適用することが必要になるであろうとも言え換えられる。

7. 結論と今後の課題

以上には、兵庫県南部地震の際にみられた既製コンクリート杭の地中部での「く」の字型損傷に注目し文献調査を行うとともに、地盤の側方流動による変状を地滑りの分野でのスランプに似た結果となって現れたとの推論に基づいて新しい考え方による想定メカニズムを構築し、筆者らが提案してきた荷重分布法を適用することで被害様相の解析的解釈を試みた。すなわち、側方流動によって杭の両側に作用していた水平応力の一方が失われることの影響を、見かけ上根切りと類似と考えて背後地盤からの側圧と仮定した台形分布荷重と、背後地盤自体も滑っていることの影響を滑り面における滑り力として仮定した集中荷重が無限長仮定の杭に作用するものとして解析を行った。また、滑り面以浅においては地盤反力がないことのアナロジーとして地盤反力係数を非常に小さくした場合の計算も追加して考察した。その結果、滑り力を作用させた位置付近でとくに曲げモーメントが終局耐力を超え、さらにせん断力の効果も加わって折れ曲がるような変形を強いられることが認められ、この種の被害様相の原因を追究するためにはこれら比較的特殊な荷重の組み合わせ作用を想定することが有効かつ重要であるとの結論を得た。

なお、より実状に近い解釈を得るためには、杭頭の境界条件や軸力の影響、流動していることによる地盤の強度低下さらには杭体自身の大変形破壊問題でもあるので、大変形理論や弾塑性の性質の導入も必要となることは言うまでもない。これらの点については今後の課題としたい。

謝辞

本論文で用いた写真は、たまたま共同で被害調査を行うことになった(株)ジオトップのスタッフに提供いただいたものである。これらの方々に調査にあたってのご協力に感謝するとともに、とくに写真撮影に携わり提供いただいた上紺屋好行氏と山下啓明氏(当時)には格別謝意を表したい。また、文献5)の著者である中澤明夫、難波伸介の両氏には私信での問い合わせにも応じていただいた。こ

こに心よりの謝意を表したい。

参考文献

- 1) 例えば、日本建築学会近畿支部基礎構造部会、兵庫県南部地震建築基礎被害調査委員会：兵庫県南部地震による建築基礎の被害調査事例報告書、400p., 1996.7
- 2) 杉村義広、佐々木建一、佐藤宏和、佐々木達夫：耐震継手を持つPHC杭の軸力変動下における水平交番裁荷試験、日本建築学会構造系論文集、第513号、pp.105-111、1998.11
- 3) 石井清、稲田裕、杉村義広：炭素繊維束センサの開発と性能評価、杭の健全性モニタリング手法の開発(その1)日本建築学会構造系論文集、第557号、pp.129-136、2002.7
- 4) 鈴木康嗣：第4章杭基礎の被害、4.3埋立て地の被害、4.3.1既製コンクリート杭基礎、阪神・淡路大震災調査報告、建築編-4、建築基礎構造、日本建築学会、地盤工学会、土木学会、日本機械学会、日本地震学会、pp.346-356、1998.1
- 5) 中澤明夫、蘇鉄盛史、難波伸介、中澤瑠子：兵庫県南部地震による建物杭基礎の被害調査報告(芦屋市の事例)、日本建築学会技術報告集、第3号、pp.77-82、1996.12
- 6) 中澤明夫、蘇鉄盛史、中澤瑠子、山肩邦男：液状化地盤における建物杭基礎の終局水平抵抗(その1.被害状況の考察)、第32回地盤工学研究発表会、pp.1517-1518、1997.7
- 7) 中澤瑠子、中澤明夫、難波伸介、山肩邦男：液状化地盤における建物杭基礎の終局水平抵抗(その2.解析)、第32回地盤工学研究発表会、pp.1519-1520、1997.7
- 8) 中澤明夫、難波伸介、蘇鉄盛史、時松孝次、大岡弘、社本康広、中澤瑠子：兵庫県南部地震において大きく傾斜した高層建物の杭基礎の被害調査、日本建築学会構造系論文集、第520号、pp.69-76、1999.6
- 9) 時松孝次、大岡弘、社本康広、浅香美治：兵庫県南部地震の側方流動による杭の破壊・変形モード、日本建築学会構造系論文集、第495号、pp.96-100、1997.5
- 10) 鈴木康嗣、安達直人、笹尾光、二木幹夫、嶋津伸一：埋立て地における地盤と杭基礎の地震被害調査、日本建築学会技術報告集、第4号、pp.45-49、1997.3
- 11) 山田正人、小池浩和、河野富夫、松井雅明、八次精一、江田田保：基礎杭が破損した建物の復旧事例、建築技術、No.563、pp.220-225、1997.1
- 12) 松村孝夫、石坂功、山路忠男、真島正人：兵庫県南部地震により被災した杭基礎の被害調査と破壊メカニズムの検討、日本建築学会技術報告集、第8号、pp.79-84、1999.6
- 13) 水野二十一、平出務：兵庫県南部地震における杭基礎の被害(その1)被害のパターンと被害事例、日本建築学会大会、B-1、pp.1127-1128、1995.8
- 14) 山肩邦男：兵庫県南部地震による基礎構造の被害と地盤変状との関係、日本建築学会大会、B-1、pp.583-584、1996.9
- 15) 田中伸治、水野二十一、飯場正紀：兵庫県南部地震における杭基礎の被害(その2)側方流動による事例と非破壊検査の適用性、日本建築学会大会、B-1、pp.1129-1130、1995.8
- 16) 若松加寿江：兵庫県南部地震における地盤の側方流動による建造物の被害・無被害に関する一考察、日本建築学会大会、B-1、pp.585-586、1996.9
- 17) 松村孝夫、森田一宏、山田淳、前田昇、後藤洋三、伊藤浩二：兵庫県南部地震で被災した杭基礎建造物の解析的検討(その1)-屋外機械基礎の被害と解析方針、日本建築学会大会、B-1、pp.635-636、1996.9
- 18) 伊勢本昇昭、金子治、佐藤靖彦、新井寿昭：兵庫県南部地震における液状化で被災した杭基礎建物の調査と解析(その1：被害調査)、第32回地盤工学研究発表会、pp.919-920、1997.7
- 19) 飯場正紀、難波伸介、中澤明夫、田中伸治：兵庫県南部地震で被災した杭基礎の調査結果とその検討(その1：杭体の被害状況)、第32回地盤工学研究発表会、pp.1527-1528、1997.7
- 20) 難波伸介、中澤明夫、飯場正紀、田中伸治：兵庫県南部地震で被災した杭基礎の調査結果とその検討(その2：杭体の変形分布)、第32回地盤工学研究発表会、pp.1529-1530、1997.7
- 21) 永野浩一、内田明彦、土屋富男、山本博、笹木浩：兵庫県南部地震における側方流動によるPC杭の被害調査と被災メカニズム、日本建築学会大会、B-1、pp.437-438、2002.8
- 22) 例えば、大西靖和ほか：ポートアイランド内陸部における建物基礎杭の全長にわたる破壊・変形状態調査、土と基礎、Vol.45、No.3、pp.24-26、1997.3など

23)例えば、桑原文夫ほか：兵庫県南部地震において液状化した地盤中の建物杭基礎の被害調査，日本建築学会構造系論文集，第507号，pp.95-100，1998.5(ただし，一部に扱っている既製コンクリート杭は対象となる)，佐竹啓一ほか：埋立て地盤の側方流動によって生じた鋼管杭の変形調査，第32回地盤工学研究発表会，pp.927-928，1997.7，大岡弘ほか：側方流動により変形した鋼管杭基礎の損傷調査，第32回地盤工学研究発表会，pp.929-930，1997.7，大岡弘ほか：兵庫県南部地震において被害を免れた建物基礎の健全調査(その2)4階建S造建物を支持する鋼管杭基礎の変形調査，日本建築学会大会，B-1，pp.737-738，1997.9など

24)委員会報告：4.地盤の流動を考慮した設計の考え方，地震時の地盤・土構造物の流動性と永久変形に関するシンポジウム，pp.87-131，地盤工学会，平成10年5月

25)小林恒一，八尾眞太郎：液状化に伴う地盤の側方流動に起因した杭基礎被害の検討，日本建築学会大会，B-1，pp.619-620，1996.9

26)佐藤博，井合進，沢田俊一，平山光信，松谷正憲，森崎啓：地盤流動を考慮した杭の設計法に関する考察，第32回地盤工学研究発表会，pp.967-968，1997.7

27)難波伸介，中澤明夫，飯場正紀，田中伸治：地震によって基礎杭に作用した液状化流動圧の試算，日本建築学会大会，B-1，pp.719-720，1997.9

28)難波伸介，中澤明夫：液状化した埋立地における杭基礎に作用した側方流動圧の検討，日本建築学会大会，B-1，pp.577-578，1998.9

29)藤木広一，仙頭紀明，柳澤栄司：護岸近傍の杭に作用する側方流動力の評価手法，第32回地盤工学研究発表会，pp.959-960，1997.7

30)山口順子，藤井俊二，チェブリノフスキーミシェンコ，林理，嶋津伸一，時松孝次：兵庫県南部地震における官庁施設の杭基礎の被害，その4応答変位法による杭の応力解析，日本建築学会大会，B-1，pp.607-608，1996.9

31)石坂功，田中弘章，佐伯宏重，橋詰尚慶，真島正人，石井善一：兵庫県南部地震における杭基礎の被害事例と破壊メカニズムの推定(その4応答変位法による杭の応力解析)，日本建築学会大会，B-1，pp.717-718，1997.9

32)伊勢本昇昭，金子治，藤井俊二，藤原達夫，佐藤靖彦，新井寿昭：兵庫県南部地震における液状化で被災した深江浜の杭基礎の解析(その4応答変位法による杭の応力解析1)，日本建築学会大会，B-1，pp.745-746，1997.9

33)佐藤靖彦，新井寿昭，伊勢本昇昭，金子治，藤井俊二，白濱正芳：兵庫県南部地震における液状化で被災した深江浜の杭基礎の解析(その5応答変位法による杭の応力解析2)，日本建築学会大会，B-1，pp.747-748，1997.9

34)伊勢本昇昭，金子治，藤原達夫，尻無濱昭三，佐藤靖彦，新井寿昭：兵庫県南部地震において液状化で被災した杭の応答変位法による解析(その1：原仕様の杭の場合)，日本建築学会大会，B-1，pp.525-526，1998.9

35)佐藤靖彦，新井寿昭，伊勢本昇昭，金子治，藤原達夫，尻無濱昭三：兵庫県南部地震において液状化で被災した杭の応答変位法による解析(その2：杭の仕様を変更した場合)，日本建築学会大会，B-1，pp.527-528，1998.9

36)金子治，伊勢本昇昭，佐藤靖彦，新井寿昭，藤原達夫，尻無濱昭三：兵庫県南部地震において液状化で被災した杭の応答変位法による解析(その3：杭頭拘束条件および地盤変形の評価方法の影響)，日本建築学会大会，B-1，pp.529-530，1998.9

37)浅香美治，時松孝次，大岡弘：地盤変形を考慮した杭基礎の破壊・変形モード解析，日本建築学会大会，B-1，pp.765-766，1997.9

38)時松孝次，石崎定幸：液状化に伴う側方流動が杭基礎被害に及ぼす影響，日本建築学会大会，B-1，pp.581-582，1998.9

39)淵本正樹，社本康広：杭支持構造物の被害事例に対するポスト液状化を考慮したシミュレーション解析，日本建築学会大会，B-1，pp.587-588，1998.9

40)有木寛江，難波伸介，徐挺，富永晃司：液状化発生域における杭基礎の被災事例に関する解析的検討，日本建築学会大会，B-1，pp.435-436，2002.8

41)田蔵隆，佐藤正義，真野英之：1995年阪神大震災によって生じた橋脚基礎から斜め後方に伸びる地盤亀裂の発生原因について，日本建築学会技術報告集，第9号，pp.255-260，1999.12

42)野尻明美：山留め仮構の構造計算法に関する研究，仮想支点法の提案と実工事での検証，東北大学博士論文，117p.，平成8年2月，あるいは野尻明美：仮想支点法の提案と実工事での検証，構造工学論文集，Vol.43B，pp.561-572，1997.3

43)藤井俊二，チェブリノフスキーミシェンコ，林理，嶋津伸一，時松孝次：兵庫県南部地震における官庁施設の杭基礎の被害，その3有効応力FEMによる地盤・杭・建物系の地震応答解析，日本建築学会大会，B-1，pp.605-606，1996.9

44)松村孝夫，森田一宏，山田淳，前田昇，後藤洋三，伊藤浩二：兵庫県南部地震で被災した杭基礎構造物の解析的検討(その2)・屋外機械基礎の有効応

力解析，日本建築学会大会，B-1，pp.637-638，1996.9

45)石坂功，田中弘章，山田淳，佐伯宏重，藤井俊二，長尾俊昌：兵庫県南部地震における杭基礎の被害事例と破壊メカニズムの推定(その3有効応力法による地震応答解析)，日本建築学会大会，B-1，pp.715-716，1997.9

46)八幡夏恵子，鈴木康嗣：兵庫県南部地震における液状化で被災した深江浜の杭基礎の解析(その2二方向入力の有効応力による地震応答解析)，日本建築学会大会，B-1，pp.741-742，1997.9

47)船原英樹，藤井俊二：兵庫県南部地震における液状化で被災した深江浜の杭基礎の解析(その3有効応力FEMによる杭の応力解析)，日本建築学会大会，B-1，pp.743-744，1997.9

48)仙頭紀明，大岡弘：側方流動により被害を受けた護岸近傍の建物基礎杭に関する解析的検討，日本建築学会大会，B-1，pp.585-586，1998.9

49)渦岡良介，久保哲夫，三原正哉，矢嶋厚：兵庫県南部地震で被災した杭基礎の挙動に関する解析的検討，第34回地盤工学研究発表会，pp.2035-2036，1999.7

50)淵本正樹，田蔵隆，大槻明：護岸近傍に建つ杭支持構造物の基礎の被災原因究明のための数値シミュレーション，日本建築学会大会，B-1，pp.519-520，1999.9

51)時松孝次，宮崎政信，石崎定幸：液状化地盤において被害形態を異にした杭基礎建物の有効応力解析，日本建築学会大会，B-1，pp.785-786，1999.9

52)古山田排司，宮本裕司，酒向裕司，古江守：1995年兵庫県南部地震における側方流動地盤での杭基礎の地震応答に関する解析的検討，日本建築学会構造系論文集，第521号，pp.49-56，1999.7

53)日本建築学会：建築基礎構造設計規準・同解説，49条山止め，1974.11

54)杉村義広：荷重分布法による杭の水平抵抗計算の提案，第27回土質工学研究発表会，pp.1637-1640，1992.6

55)杉村義広：応答変位法と荷重分布法，1998年度大会基調講演資料，日本建築学会構造委員会基礎構造運営委員会，29p，1998.9

56)横井義彦，三辻和弥，杉村義広：動的解析に基づく杭の水平荷重評価，(その1)解析結果の検討，第28回土質工学研究発表会，pp.1843-1846，1993.6

57)三辻和弥，横井義彦，杉村義広：動的解析に基づく杭の水平荷重評価，(その2)水平荷重の提案，第28回土質工学研究発表会，pp.1847-1848，1993.6

58)三辻和弥，杉村義広，横井義彦：地震時杭応力に及ぼす地盤応答の影響についての考察，日本建築学会大会，B-1，pp.1687-1688，1993.9

59)Y. Sugimura, K. Fujiwara, T. Ohgi and Madan B. Karkee: Seismic Behavior of Piles Supporting Tall Buildings and the Consideration of Ground Response Effects in Design, Proc. of 4th Conf. on Tall Buildings in Seismic Regions, Los Angeles Tall Buildings Structural Design Council and the Council on Tall Buildings and Urban Habitat, pp. 303-317, 1997.5

60)Madan B. Karkee, Yoshihiro Sugimura and Kaoru Fujiwara: Significance of ground response effect in piles under earthquake loading, 2nd International Conf. on Earthquake Geotechnical Engineering, Lisbon, Vol.1, pp.441-448, 1999.6

61)M. Hetenyi: Beams on Elastic Foundation, Ann Arbor: The University of Michigan Press, 255p., 1946

62)Y. Sugimura and M.B. Karkee: Nature of Damage to Pile Foundation of Buildings in Recent Earthquakes and Some Proposals for Seismic Design, Proc. of the 2nd U.S.-Japan Workshop on Soil-Structure Interaction, Tsukuba, BRI, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Government of Japan, pp.441-455, 2001.3

63)Madan B. Karkee and Y. Sugimura: Analytical Investigation of Pile Foundation for Buildings Subjected to Large Lateral Ground Movement, 7th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Boston, Paper No. GS-2d, 2002.7

64)日本建築学会：建築基礎構造設計指針，6.6節水平抵抗力および水平変位，2001.10

65)基礎構造耐震設計小委員会：基礎構造，建築耐震設計における保有耐力と変形性能，日本建築学会，pp.142，1990.10

66)岸田慎司，堀井昌博，桑原文夫，林静雄：大口徑PHC杭のせん断終局強度の計算方法に関する研究，日本建築学会構造系論文集，第532号，pp.103-110，2000.6

67)杉村義広，中田慎介，川島俊一，阿部道彦：高強度プレストレストコンクリートぐいの地震被害とその再現実験，日本建築学会論文報告集，第340号，pp.40-50，1984.6

68)日本建築学会：建築基礎構造設計指針，6.7節杭体の断面設計，2001.10

(2003年6月9日原稿受理，2003年9月11日採用決定)