

兵庫県南部地震で被災したRC杭の被害分析

茶 谷 文 雄 野 村 敦 子 高 野 真 一 郎
(本社情報システムセンター)

システム第2部)

若 松 邦 夫 秋 野 矩 之 安 井 謙

Seismic Evaluation for RC Piles Damaged due to Hyogoken-Nanbu Earthquake

Fumio Chatani Atsuko Nomura Shin-ichiro Takano
Kunio Wakamatsu Noriyuki Akino Yuzuru Yasui

Abstract

Precast concrete piles supporting RC buildings were damaged by the Hyogoken-Nanbu Earthquake, and members of the superstructure were not damaged but the buildings leaned to the south. The authors investigated the piles by excavation and found that there were great differences between the damage patterns of the south and north rows of piles. We simulated the behavior of the piles during the earthquake by dynamic and static analysis and clarified that the compressive and tensile axial forces exerted on the piles resulting from the rocking motion of the superstructure, affected the damage patterns of them.

概 要

兵庫県南部地震において、5階建ての集合住宅を支持するRC杭が被災し、上部構造は、躯体がほぼ無損傷の状態、南側へ傾斜した。掘削調査を行ったところ、建物の南側の杭列と北側の杭列の被災状況に明確な差異が認められた。さらに、上部構造～杭～地盤系のペンツェンモデルによる地震応答解析、および静的一体解析によって、系全体の地震時挙動のシミュレーションを試みた。その結果、上部構造のロッキング動に伴って、押込み側と引抜き側の杭に作用する地震時軸力が、杭の破壊形態に大きな影響を与えることが明らかになり、杭の被災状況をほぼ説明することができた。

1. はじめに

兵庫県南部地震において、RC造の集合住宅を支持する既製コンクリート杭（以下RC杭と略記する）が被災し、上部構造が大きな傾斜を生じた。本論では、これらのRC杭の掘削調査から明らかになった被災状況の特徴、上部構造～杭～地盤系の地震応答解析および静的一体解析による被災状況の再現と被災原因の推定を試みた結果について報告する。

2. 建物、杭基礎および敷地地盤の概要

建物は、Fig. 1に示すように、5階建てのRCラーメン構造であり、布基礎形式の基礎スラブ下に打設された多数の既製コンクリート杭によって支持されている。既製コンクリート杭は、直径が25cm、肉厚が5cmのプレストレスが導入されていないいわゆるRC杭であり、杭長は約5.7mである。杭頭接合部の詳細は明らかではないが、杭頭部を若干基礎スラブに吞み込ませた上、杭の主筋をスラブに定着させていると推測される。杭頭部の中詰め補強はされていない。また、敷地地盤の地層構成はFig. 2に示す通りであり、地下水位は深さ2.7m付近にある。

3. 建物および杭基礎の被災状況

建物は、屋上でのレベル測定結果によると最大183mmの不同沈下を生じており、全体がほぼ南側へ1/38の傾斜を生じている。東西方向の傾斜はほとんどない（Fig. 3参照）。建物の躯体に明確な損傷は認められなかった。また、建物の周辺地盤に液状化の痕跡は認められなかった。

建物の外周部を地表面から2.4～2.9m掘削し、RC杭の目視調査を行ったところ、建物の沈下が大きな南側と小さな北側とで、被災状況に以下のようにかなり明確な差異が認められた。なお、基礎梁および基礎スラブには損傷は認められなかった。

3.1 建物の南側に位置する杭の被災状況

南側の杭の多くは、頭部にコンクリートの圧壊と主筋の座屈を伴う曲げ破壊、またはせん断破壊による大きな損傷を受けている（Fig. 4参照）。せん断破壊は、斜めのせん断亀裂の方向から圧縮軸力下で生じたと推測される。少数ではあるが、杭頭部の主筋が破断している杭もあり、建物のロッキング動に伴う圧縮軸力と引張軸力が交互に作用したことを裏付けている。また、ほとんどの

杭は南側へ傾斜しており、杭頭から1.5m程度下方で曲げ破壊している杭と、掘削範囲内にこのような損傷は認められないものの、杭全体の傾斜から杭頭から2m程度下方に同様な損傷を受けていると推測される杭がある。

3.2 建物の北側に位置する杭の被災状況

北側の杭の多くは、杭頭部の主筋が破断しており、引張軸力下で曲げ破壊したと推測される。基礎スラブに対して、杭頭部が北側にズレている杭も少なからずある (Fig. 5 参照)。また、多くの杭は上部構造と同様南側へ傾斜しているが、傾斜角は概して小さい。特に、上部構造と逆の北側へ傾斜している杭が数本あることが注目される。北側では、掘削深さが基礎スラブ底面から1.1m程度と浅いため、杭頭部を除いて杭の損傷を確認できないが、杭全体が傾斜していることから南側の杭と同様、杭頭から1.5~2m程度下方で損傷を受けていると推測される。

4. シミュレーション解析に基づく杭基礎の被害分析

4.1 建物～杭基礎～地盤系の地震応答解析

ペンツェンモデル (多質点系モデル) による非線形地震応答解析により杭基礎の被害分析を行う。ペンツェンモデルは群杭を1本の杭に集約し、杭周の地盤を杭に接続する相互作用バネとしてモデル化し、さらに遠方の地盤をこの相互作用バネに接続する自由地盤系の質点モデルで表現するものである。ここでは、Fig. 6a, bに示す2種類のモデルを考える。Fig. 6aは薄層要素法を用いて周

波数領域で相互作用バネを算定し、これを軸バネおよびせん断バネとして評価した後、周波数依存性を考慮してこれらのバネを静的バネと履歴型減衰および付加質量として表したものである (以下、動的バネケースと呼ぶ)。ここで、せん断バネの減衰および付加質量の値は他に比較して小さいため無視する。また、軸バネは線形とし、せん断バネはR0モデルによる非線形バネとする。Table 1に動的バネケースの軸バネおよびせん断バネの値を示す。一方、Fig. 6bは、相互作用バネを杭と遠方地盤とを接続するウインクラー型の水平バネとして評価するもので、この水平バネは静的一体解析で用いるトリリニア型の非線形バネとし、減衰は10%とした (以下、静的バネケースと呼ぶ)。Table 2に静的バネケースの水平バネの値を示す。また、両モデルとも杭の曲げは非線形とし、杭の鉛直方向に建物の自重をかけたときの回転角と曲げモーメントの関係をトリリニアでモデル化した。建物は、後述する静的一体解析と同様弾性とした。

入力地震動は、本建設サイト付近の直接基礎建物底部で観測された強震記録から算定した深さ6m位置での地震波 (Fig. 7) を用い、これをペンツェンモデル自由地盤系の底部に入力した。この地震動はさらに1次元等価線形化法を用いて本建設サイトの地表面地震動 (Fig. 7) に変換され、後節で論じるSRモデルの入力に用いられる。

Fig. 8およびFig. 9に各々最大応答加速度分布および最大応答変位分布の解析結果を示す。両方の結果とも、地下2m付近から下部の杭部分ではほぼ同様の応答を示すのに対し、これより上の杭部分では静的バネケースの方が動的バネケースより大きな応答となる。この差を除けば建物における応答の差はほとんど見られない。

Fig. 10およびFig. 11に各々杭の最大せん断力分布および

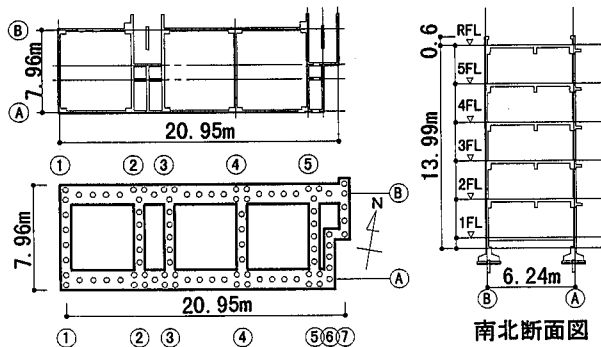


Fig. 1 建物概要

The Outline of the Building

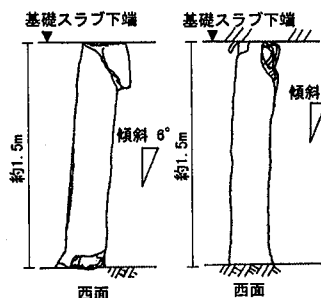


Fig. 4 杭の被災状況 (南側)
Earthquake Damage of Piles (South)

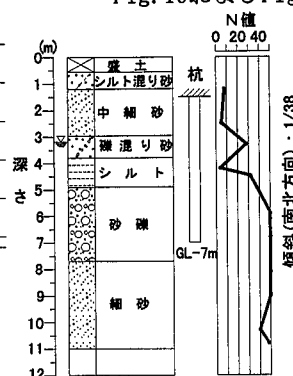


Fig. 2 土質柱状図
Soil Boring Log

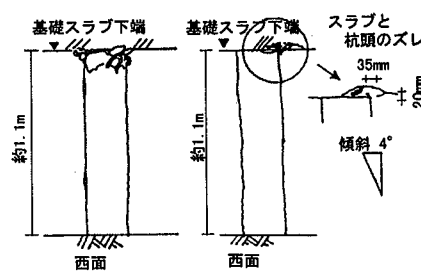


Fig. 5 杭の被災状況 (北側)
Earthquake Damage of Piles (north)

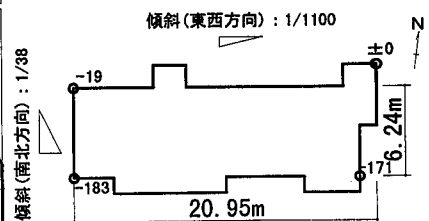


Fig. 3 レベル測定による建物の
不同沈下 単位(mm)

Differential Settlement of the
Building by Level Survey (mm)

び最大曲げモーメント分布の解析結果を示す。最大せん断力、最大曲げモーメントともに杭頭で最大となり、杭頭の被害を説明することができる。また、曲げモーメント分布において地下2mにおいてピーク値を示しており、地中部での損傷をある程度予測することができるが、その値は杭頭の値に比較すると小さく地中部の杭の損傷を説明するまでには至っていない。これはペンツェンモデルが杭を1本に集約しており、杭位置による負担せん断力の差や、建物の転倒モーメントに伴う杭への地震時軸力が杭の変形性能に与える影響を考慮することができないためと考えられる。動的バネケースと静的バネケースを比較すると、全体的に静的バネケースの方が大きな値となり、特に応答の差が生じる地下2m付近における最大曲げモーメントの差が大きくなっている。

4.2 建物～杭基礎～地盤系の静的一体解析

ペンツェンモデルでは、杭群全体を1本の杭に集約してモデル化するため、個々の杭の挙動を詳細にシミュ

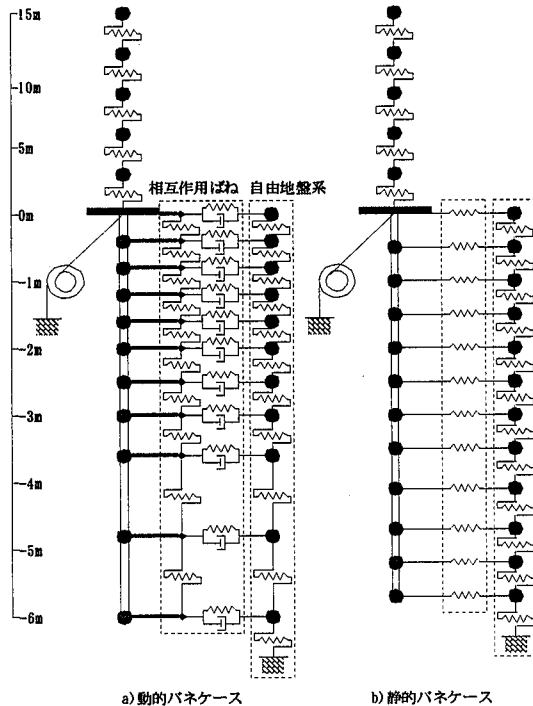


Fig. 6 ペンツェンモデル

Penzien Model

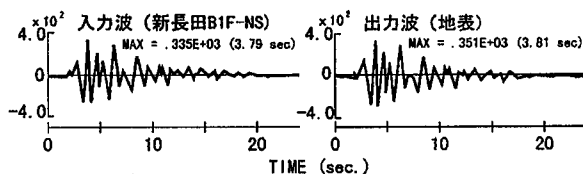


Fig. 7 建設サイト付近における入力波と地表面応答波（日本建築学会を通じて一般公開された入力地震波を使用）

The Seismic Input Wave and the Ground Surface Response Wave Near the Building Site (Using the Seismic Input Wave Opened to the Public by Architectural Institute of Japan)

レートすることができない。ここでは、以下の手順でや詳細に個々の杭の地震時挙動を推定する。

- ① 上部構造に作用した地震時せん断力の推定
- ② 静的一体解析に基づく、上記の地震時せん断力作用下における杭基礎の地震時挙動の推定

4.2.1 上部構造に作用した地震時せん断力の推定

4.1に示すペンツェンモデルによる地震応答解析に加え

Table 1 動的バネケース

Soil Springs of Dynamic Case					
番号	杭頭からの深さ (m)	静的バネ (tf/cm)	減衰 (tf/cm)	付加質量 (tf)	せん断バネ (tf/cm)
1	0.0	200	9	13	5216
2	0.4	267	11	21	6573
3	0.8	229	10	20	6092
4	1.2	235	10	19	6697
5	1.6	444	18	28	13204
6	2.0	554	21	41	10979
7	2.5	331	12	31	4607
8	3.0	276	10	18	4268
9	3.6	1620	54	48	17645
10	4.8	3840	120	68	15540
11	6.0	5890	180	55	

Table 2 静的バネケース

Soil Springs of Static Case						
番号	杭頭からの深さ (m)	初期剛性 (tf/cm)	第1折点 (tf)	第2折点 (tf)	第2剛性比	第3剛性比
1	0.0	125	86	169	0.22	0.00
2	0.5	249	174	389	0.21	0.00
3	1.0	249	174	494	0.20	0.00
4	1.5	465	326	721	0.21	0.00
5	2.0	681	477	947	0.15	0.00
6	2.5	440	308	634	0.22	0.07
7	3.0	199	140	267	0.23	0.14
8	3.6	548	384	768	0.23	0.14
9	4.1	897	628	1269	0.22	0.14
10	4.7	913	639	1292	0.22	0.14
11	5.2	930	651	1314	0.22	0.14
12	5.7	465	326	657	0.22	0.14

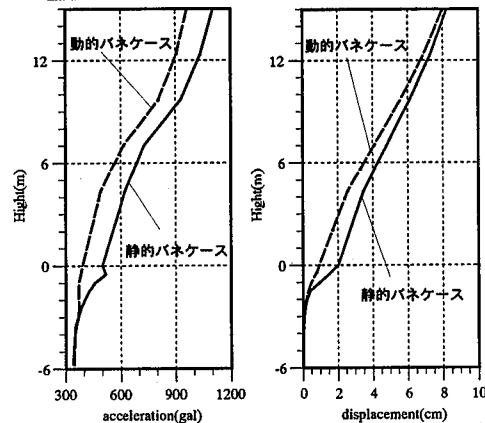


Fig. 8 最大応答加速度分布

Fig. 9 最大応答変位分布

Maximum Acceleration

Maximum Displacement

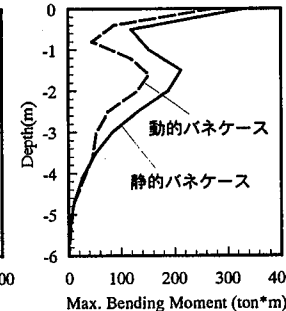
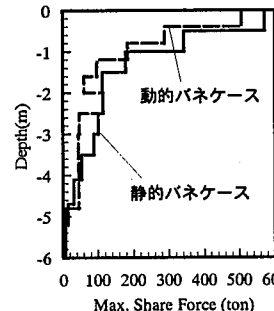


Fig. 10 最大せん断力分布 (杭93本分) Fig. 11 最大曲げモーメント分布 (杭93本分)

Maximum Shear Stress

Maximum Bending Moment

て、参考として、建物～杭～地盤系をFig. 12に示すような平面SRモデルに置換し、Fig. 7に示す地表面波を入力して地震応答解析を行った。

建物は、Fig. 1において代表的な④通りを対象とし、壁があることから梁を剛としたフレーム内に壁部分の置換柱を設置することによってモデル化した。建物には被害がないことから部材は弾性とした。

杭は、鉛直バネおよび水平バネに置換した。これらのバネは、杭～地盤系をFig. 13に示すような梁～バネモデルに置換し、杭頭における鉛直荷重～沈下量曲線、引抜き荷重～引抜き量曲線、水平荷重～水平変位量曲線を求め、さらにこれらの曲線をトリリニア型にモデル化することによって設定した。また、杭材の非線形性を考慮し、杭体の曲げモーメントと曲率の関係を求めて、これをトリリニア型にモデル化した。その際、杭への軸力は、長期荷重相当の13tfとした（Fig. 14参照）。

SRモデルおよびペンツェンモデルによる地震応答解析結果の比較をTable 3に示した。これによると、SRモデルによる杭頭部の最大応答加速度および最大応答せん断力は、静的バネを用いたペンツェンモデルによる値とほぼ同程度の値となっている。

また、両モデルによる地震応答解析結果から求めたAi分布を、建築基準法施行令によるAi分布とともにFig. 15に示した。これによると、各Ai分布にわずかな差異はあるものの、総体的に類似した性状を示している。そこで、ここでは、代表的なAi分布として、静的バネを用いたペンツェンモデルによる分布を採用し、以下の静的一体解析を行うことにした。

4. 2. 2 静的一体解析による杭基礎全体の地震時挙動の推定

Fig. 17に示す解析モデルに、4. 2. 1で求めたAi分布を満足するような漸増せん断力を作用させ、杭基礎全体の地震時挙動を推定した。杭体は、Fig. 14に示すような軸力変化にともなう曲げモーメント～曲率の変化を考慮できるよう、文献²⁾に準拠してモデル化している。地盤バネの評価に関しては、既に4. 2. 1で述べた。

④通りの杭基礎全体に作用する水平荷重～杭頭水平変位（以下、単に全水平荷重～水平変位曲線と略記する）の関係をFig. 17に、また、各杭列の塑性ヒンジ発生順序

および発生深さをFig. 18に示した。なお、本論でいう塑性ヒンジ（以下単にヒンジと略記する）とは、Fig. 16に示す杭体の曲げモーメント～曲率曲線において、第3勾配に達した部分をいう。Fig. 18によると、杭体のヒンジは初めに引抜き側の杭の頭部に発生する。水平荷重の増加に伴って引抜き側から圧縮側の杭頭に向かって順次ヒンジが発生し、さらに荷重が増大すると、引抜き側の杭頭から1.5mの深さの杭体にヒンジが発生し、圧縮側の杭体へと波及していく。これらのヒンジの発生位置は、実際の杭の損傷位置とほぼ対応している。

各杭1本当たりの杭頭せん断力～水平変位曲線をFig. 19に示した。各杭の負担せん断力は低荷重ではほぼ等しいが、引抜き側の杭頭部にヒンジが発生する荷重段階付近から、押し込み側の負担せん断力が引抜き側より大きくなり、これらの差異は、荷重増加にともない増大する傾向が認められる。これは、上部構造の転倒モーメントの作用によって、引抜き側の杭の軸力が減少し、杭の曲げ剛性が押し込み側より低下するためと考えられる。

代表的な杭列について、杭の軸力、せん断力、曲げモーメント、変形の各分布曲線をFig. 20に示した。転倒モーメントの作用により押し込み側の杭の軸力が増大し、引抜き側の杭の軸力が減少する傾向がわかる。また、この軸力の影響による曲げ剛性の差異によって、せん断力、曲げモーメントは引抜き側より押し込み側で大きくなる。

4. 2. 3 地震応答解析と静的一体解析における杭の挙動の比較

ペンツェンモデルによる地震応答解析では、既述のように、杭の挙動に対する地震時の軸力変動の影響を考慮できない。しかしながら、地震時の軸力変動が小さい建物の中央部の杭は、ペンツェンモデルの杭に類似した軸力条件となる。そこで、静的一体解析から得られたFig. 20において、軸力変動が小さい第3列の杭の曲げモーメント分布曲線および変形曲線中に、ペンツェンモデルによる地震応答解析から得られる曲線をプロットし比較した。この図によると、静的バネを用いたペンツェンモデルによる解析値は、同一水平荷重時における静的一体解析による解析値にほぼ対応している。これは、本地盤条件では、杭の挙動に支配的な影響を与えた荷重は建物の慣性力であり、地中の杭と地盤との相

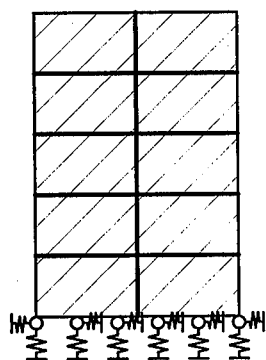


Fig. 12 地震応答解析モデル

The Seismic Response Analysis Model

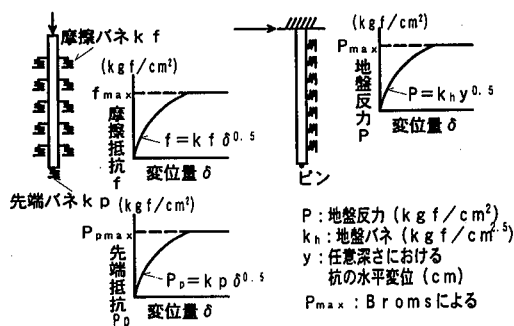


Fig. 13 杭のバネの評価

Estimation for the spring of a Pile

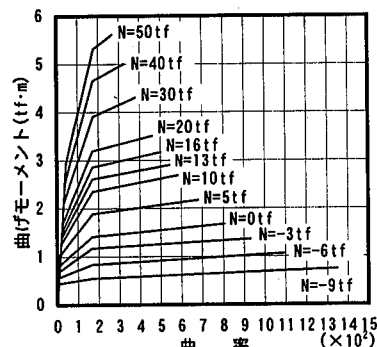


Fig. 14 杭体の曲げモーメント～曲率の関係

Moment - Curvature curves of the Pile

相互作用によって杭が受ける荷重の影響が小さかったことを示唆している (Fig. 2参照)。

4.3 被災原因の推定

4.3.1 地震時軸力下における杭体の曲げ耐力およびせん断耐力の検討 押込み側および引抜き側の杭の頭部と地中部最大曲げモーメント発生深さ付近について、全水平荷重の増加に伴う杭1本当たりの軸力(N)と曲げモーメント(M)との関係の推移をFig. 21に示した。これによると、全水平荷重が96tfで押込み側の杭頭部に塑性ヒンジが発生し、さらに全水平荷重が増大すると、地中部最大曲げモーメントが急速に増大し、141tfで塑性ヒンジ状態に達する。その後、終局時のN~M曲線に沿って軸力および曲げモーメントが上昇し、168tfで解析上の終局状態となる。一方、引抜き側の杭頭部は、水平荷重が53tfで塑性ヒンジ状態に達した後、N~M曲線に沿って軸力および曲げモーメントが減少し、押込み側の杭頭部と同様、168tfで終局状態に達する。

また、押込み側および引抜き側の杭の頭部について、全水平荷重の増加に伴う杭1本当たりの軸力(N)~せん断力(Q)の関係の推移を求め、Fig. 22に示した。なお、RC杭の終局せん断耐力は、文献³⁾中の式を準用して求めた。

Fig. 22によると、押込み側の杭頭部は、全水平荷重が130tfのとき、上記の曲げ破壊より先行してせん断破壊することになる。また、引抜き荷重下での既製コンク

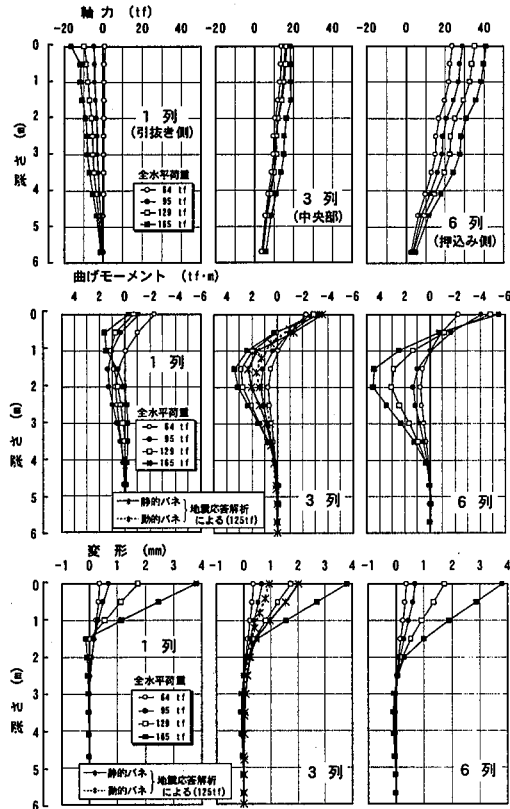


Fig. 20 各杭列の軸力、曲げモーメントおよび変位分布
Distribution Charts of Normal Stress, Bending Moment and Displacement of Each Row of Piles

Table 1 ペンツェンモデルとSRモデルによる地震応答解析結果の比較

Comparison of the Seismic Response Analysis Results between Penzien Model and SR Model

	ペンツェンモデル		SRモデル
	動的バネ	静的バネ	静的バネ
連成系固有周期(sec)	0.54	0.56	0.37
杭頭部における最大応答加速度(gal)	392	499	521
杭頭部における最大応答せん断力(tf)	109	123	127
杭頭部における最大応答変位(mm)	8.9	20	13

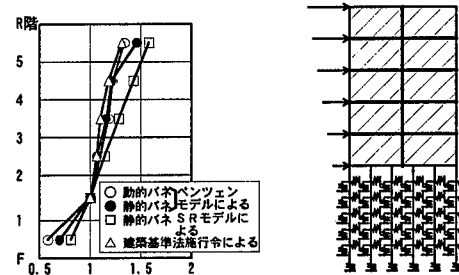


Fig. 15 A₁分布
A₁ Distribution

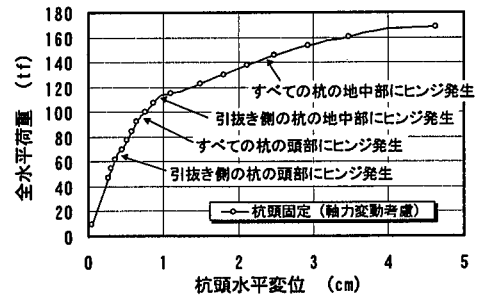


Fig. 16 静的解析モデル
The Static Analysis Model

Fig. 17 ④通りの全水平荷重~杭頭水平変位関係
Total Lateral Load - Displacement of the Pile Top Curve

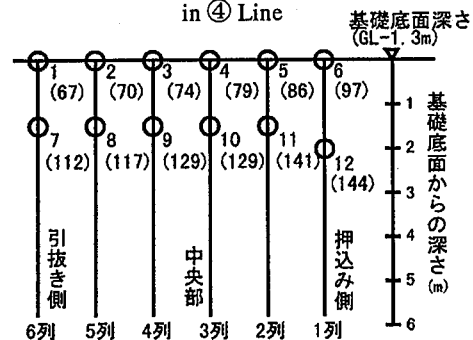


Fig. 18 杭のヒンジ発生順序および発生位置
Arising Order and Positions of Plastic Hinges of Piles

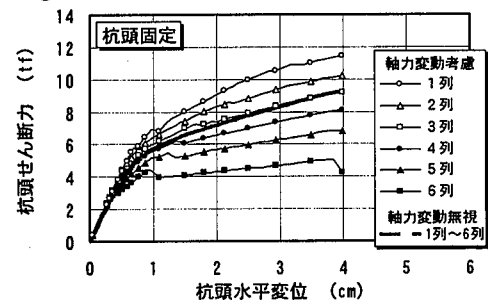


Fig. 19 杭1本当たりの杭頭せん断力~杭頭水平変位関係
Shear Stress - Displacement of the Pile Top Curves (Per Pile)

リート杭の終局せん断耐力については明らかではないが、(1)式を準用してせん断耐力を求めると、全水平荷重が78tfでせん断破壊することになる。しかしながら、既述のように、曲げモーメントによる塑性ヒンジの発生が先行しており、引抜き側の杭頭部は実際には引張り軸力下の曲げモーメントの作用で定着鉄筋が破断する破壊形態を示している。

4.3.2 被災過程の検討 建物には南側への大きな水平荷重が第1波として作用している (Fig.7参照)。この大きな水平荷重によって、押込み側の杭の頭部はせん断破壊するか、あるいは塑性ヒンジ化し、地中部曲げモーメントも急増する。なお、各杭の固定度や塑性化の程度にばらつきがあり、負担せん断力にも差異があるため、負担せん断力の大きな杭がせん断破壊したと推測される。一方、引抜き側については、杭頭部の定着鉄筋が、引張り軸力下の曲げモーメントとせん断力の作用で、抜け出し、もしくは破断したと推測される。その際、地震の上下動が影響を与えた可能性もある。

次に、北側への大きな第2波が作用し、押込み側となった北側の杭の地中部が大きな損傷を受ける。なお、杭頭部は鉄筋が破断しているため、基礎スラブと十分接合されておらず、ピン状態に近い杭や、あるいは基礎スラブとの間にずれを生じて十分せん断力が伝わらない杭もあり、さほど損傷は進展しなかったと考えられる。

さらに、南側への第3波が作用した時点では、引抜き側(北側)に位置するかなりの杭の頭部定着鉄筋が抜け出し、または破断しているため、建物の転倒モーメントによる浮上がり力とせん断力の同時作用によって、杭頭部は南側へ引きずられながらも、基礎スラブに対して北側へズレを生じる。特に、第2波の際、北側へ傾斜した杭のうち、定着筋の破断によって頭部が基礎スラブと構造的に分離している杭は、北側へ傾斜した状態で残留する。また、引抜き側(北側)の杭頭部が、上記のような損傷を受けているため杭の負担せん断力が大きく低下し、逆に押込み側(南側)の杭の負担せん断力が増加する。この圧縮軸力下の負担せん断力の増加によって杭頭部および地中部最大曲げモーメント発生位置付近の杭体の損傷が進展し、コンクリートの圧壊と主筋の座屈により杭が大きく沈下し、建物は南側へ大きく傾斜する。

以上、④通りの杭群全体の終局水平耐力を一部の杭がせん断破壊した時点と考えると約130tfとなり、建物の重量に対して0.54程度の値となる。なお、水平荷重が130tfのとき、1階の壁体のせん断応力は12.2kgf/cm²であり、上部構造のコンクリートの設計基準強度を240kgf/cm²と仮定すると、ほぼ短期許容せん断応力度に対応する。したがって、上部構造には損傷は生じない。一方、静的ばねを用いたペンツェンモデルおよびSRモデルの地震応答解析結果から得られる④通りの杭群全体に作用する全水平荷重の最大値は、Table 3に示すように、約123~137tfと上記の終局水平耐力とほぼ同等になっている。

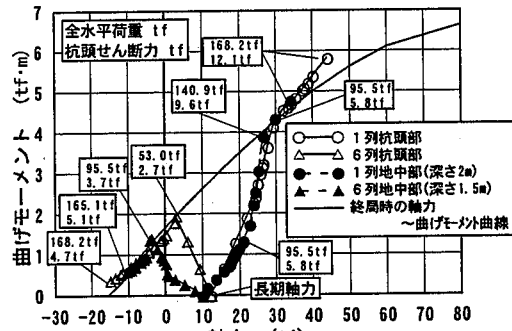


Fig. 21 N~M曲線

Moment - Normal Stress Curves in the Ultimate State

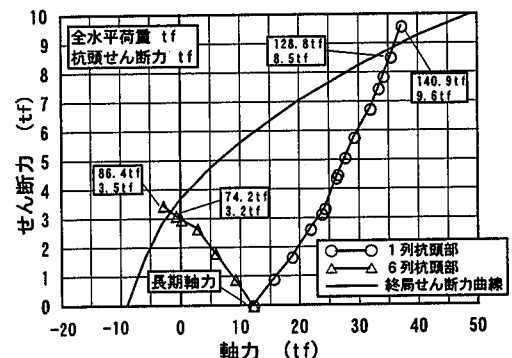


Fig. 22 N~Q曲線

Normal Stress - Shear Stress Curves in the Ultimate State

5. まとめ

建物~杭~地盤系の詳細なシミュレーション解析によって、杭の被災状況を概略再現することができた。特に、本建物のようにスレンダーな1スパン構造物については、上部構造のロッキング動に伴って、押込み側と引抜き側の杭に作用する地震時軸力が杭の被災状況に大きな影響を与えることが明らかになった。

謝 辞

この研究は、建設省建築研究所、水野二十一国際地震工学部長との共同研究の成果であることを付記し、改めて深謝致します。

参考文献

- 1) 船越, 他: 建屋一杭一基礎連成系の地震応答評価法に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, (1996)
- 2) 永原, 江戸他: 高層RC建物の終局強度型一貫設計支援システム, 立体骨組弾塑性応答解析, 日本建築学会, 第11回情報システム利用技術シンポジウム, (1989)
- 3) 日本建築センター: 地震力に対する建築物の基礎の設計指針, (1984)