鉄筋コンクリートぐいの震害とその教訓

多 賀 直 恒*

概 要 過去の地震によるくい基礎構造の震害には、地盤が破壊するものと基礎構造部材が破壊するものがある。これら震害例を更に詳細に整理すると、①基礎構法上の欠陥によるもの、②地盤の液状化によるくいの被害、③斜面地形を造成した地盤でのくい被害、④軟弱地盤でのくいの被害、のような類型に分類できる。特に④は、1978年宮城県沖地震で初めて経験した、平地における成層地盤上での鉄筋コンクリート既製ぐいの被害として注目される。震害原因を明確にし、くい基礎の耐震安全設計を確立することが、これらの震害を教訓として生かすために、今後に課せられた重要な問題である。

キーワード：RCぐい、耐震性、震害、耐震設計、水平抵抗

1. はじめに

1978年宮城県沖地震は、仙台を中心に都市型の被害をもたらしたが、その震害を見ると地形・地質・土質といった構造物の支持地盤の影響が大きく関係しており、軟弱地盤・丘陵地の造成地での被害が特徴的であった。中でも基礎構造に関しては、既製の鉄筋コンクリートぐいに被害を生じたことが注目されるべき現象であった。

ここでは、最近の震害を省みて、過去の大地震における基礎構造の被害のうち特にくいに関する震害を調査し、構法・構造計画・設計法・施工法といった観点からその被害模様を概観して、被害原因・被害類型を探索し、その対策を追究して、くい基礎構造の耐震設計法確立のための基礎資料を提供する。

くい設計は、主に上部構造の鉛直力を地盤に伝えるという設計であり、地震時の水平抵抗・水平変形に対して十分な検討が行われていないのが現状である。これは、くい・地盤の地震時挙動が複雑で複雑な問題を含むため、不明な未解の事象が多いことにもよるが、現在判明している事実を十分反映させた地震時の耐力・変形状の検討が望まれる。その一つの手段として、既往大地震で生じたくい基礎の破壊が、いかなる原因に起因するものか十分吟味し、その上で、各種地盤条件・上部の構造形式に対応した構造計画に基づくくい基礎構造の耐震設計法を確立することが必要である。大地震が起これば各種の被害調査が実施されるが、一般に構造物の上部構造に限定され、くい構造震害の調査は経済的・物理的・時間的制約から非常に限られた場合にしか行われないのも事実

である。従って、ここでは既往くい震害資料を可能な限り収集し、過去のくい被害を整理検討することによってくい基礎構造に存在する耐震上の問題に関する認識を深め、今後の研究・設計・施工に震害を教訓として生かすことを期待したい。

2. 過去の地震によるくいの被害例

2.1 関東地震 (1923)

鉄筋コンクリート構造は、前世紀半ばに仏人モニエが発明し、今世紀に我が国に伝わり、関東地震により耐震構造としての試練を受けた。震災予防調査会報告¹⁾によれば、この地震によるRC構造物の被害原因が11項目にわたり指摘されているが、その中に基礎に関するものがある。当時は軟弱地盤に構造物を建設する場合木ぐいが用いられ、これは昭和30年代まで続くが、基礎構法的にもまだ揺籃期であった。基礎構造は、独立基礎の場合つなぎばりがないか、あっても比較的構造的に軽微で、その位置が基礎フーチングを連続に結合する働きをしていなかったようである。従って被害は、くい体よりはむしろフーチング上の地下柱に生じた。この報告によると、基礎版の上部、柱脚の部分における被害は、地下に埋設した部分であるから外見上は認め難いが、この種の被害は非常に多く認められた。すなわち、比較的震害が少ないと思われる建物でも、図-1のような実例がいくつもあった。この被害原因は、単独基礎・連続基礎で外壁または内部主要間仕切壁の部分を基礎の部分まで連続にできなかったためであり、その対策として、できるだけ外壁や主要間仕切壁の下部を連続基礎とし、壁体を基礎底面まで伸ばして連続にすることが指摘されている。

* 正会員 名古屋大学助教授 工学部建築学科

図—1 関東地震の基礎被害

図—2 農商務省陳列館

1) 農商務省特許陳列館：RC造3階建ての建物で、基礎はくい打ち地業が施され、被害は図—2のように大きな不同沈下を生じ、正面中央部と東西隅部とに約45cmの高低差を生じ、外壁に無数のひびわれを生じた。

図—3 福岡地震北陸配電

平面図の内部に示した独立柱はコンクリートが剥(はく)離し、鉄筋が露出する被害を生じた。これは不同沈下が原因と考えられる。

2) 中井商店：RC造5階建てで、基礎はくい打ち地業であり、外壁下部は連続フーチング基礎であった。地震力により圧縮力が増大し、基礎に不同沈下が生じた結果、上部構造は15°傾斜した。外壁には、わずかにひびわれを生じた。

以上2建物¹⁾の基礎部分の被害は報告されていない。

EARTHQUAKE DAMAGES OF REINFORCED CONCRETE PILES

By Naotsune Taga

Concrete Journal, Vol. 19, No. 5, May 1981, pp. 13~23

Synopsis Earthquake damages of a foundation by previous strong earthquake motions, are divided into the following two classes. One is caused by the failure of soil layers themselves, and the other is due to the fracture of structural members of a foundation. And systematic rearrangement of a number of foundation damages of reinforced concrete piles by seismic effect, can be classified into the following four typical groups. 1) Foundation construction method, 2) Pile damages of liquefaction, 3) Embankment of dipped topographical geology, 4) Soft soil layer. Especially in 1978 off Miyagi prefecture earthquake, the earthquake pile damages of foundation of a structure in plain soft soil layer in group 4) have attracted special interest recently. In the establishment of the aseismic safety design method of a pile foundation it is of most important subject for a future study to clarify the mechanism of pile damages by continuously learning from the earthquake damages.

Keywords : RC pile, aseismicity, earthquake damage, seismic design, lateral resistance

2.2 福井地震 (1948)²⁾

この地震は福井平野に発生した内陸直下型のもので、第二次大戦直後であったことで、戦災を受けた建物が震害を受ける特殊な状況での被害を生じた。

1) 北陸配電(株): RC造4階建ての建物で、地盤は軟弱であったため、60~80cm 間隔で松ぐいが打設された。図-3 (a) (b) に基礎伏基礎詳細図等を示す。基礎構法的には、建物外周の外壁下部は連続基礎を、内柱部分は独立基礎を用いている。図示の内柱下の9個の独立基礎のうち、7個は1階床組と基礎フーチング間の地下柱でせん断破壊を生じた。地下柱の破壊が原因となって、1階床ばり、2階柱頭部にわずかなひびわれを生じ、1階床が若干低下した。外部地盤と建物は約 30 cm の高低差を生じていた。地下柱の被害状況は、図-3 (c) に示すようにコンクリートは剝離し、フープが少なく主筋内のコンクリートが飛び出し、鉄筋が座屈して鉛直支持力を完全に失っている。

2.3 新潟地震 (1964)

飽和砂質地盤の液状化現象により地盤が破壊した結果上部構造に被害を招いたのが、この地震被害の特徴である。信濃川下流域の地盤は、粒子の均等係数が約 3、有効径 0.2~0.05mm 間にある均一な細粒の緩締め砂で地表部が構成され、地下水位も高く、液状化しやすい特性をもっていた。液状化した地層深さは 15~20 m と言われている。この地盤中のくい挙動は、地震時液状化により周面摩擦力・先端支持力を失って沈下し、上部の建物に被害を生じさせた。液状化被害の生じた地域は、信濃川の旧河道の限られた地域に限定された。岸田³⁾によれば、被害の全般的傾向を見ると、直接基礎よりくい基礎の方が若干被害が少ない。次にくい基礎の被害状況は、基礎の根入れ深さとかい先端の N 値によりその被害が特徴づけられる。被害は、根入れ深さが 5~10 m、くい先端の N 値が 15 以下のくいで支持された建物に多い。被害程度の大小は、根入れ深さよりもくい先端 N 値に深く関係しており、 N 値が 15 以下では中程度ないし大被害を生じている。逆に N 値が 25 以上になると、大きな被害はほとんどない。くい先端を N 値の大きい締まった支持層に打ち込んだ建物は被害がなかった。また、建物周辺に地盤の移動を拘束するシートパイルを施したのも被害を受けなかった¹³⁾。次に、RC ぐいの被害例を2例示す。

1) 済生会病院: RC 3階建て、くい基礎 (RC ぐい、長さ 7.2 m、径 18 cm、許容支持力 6 t/本)。旧館と新館が伸縮継手で接続しており、旧館の下を地割れが走り、基礎が外側に移動した結果、柱にせん断ひびわれを生じた。新館が 0.6~1.0 m 沈下したため約 5.6° 短辺方向に傾斜したので、伸縮継手が大きく口を開いた。くい体

図-4 新潟地震

被害の詳細は報告されていない (図-4 (a))。

2) 東警察署: RC造 2・3 階建て、くい基礎 (RC ぐい、長さ 6 m、径 30 cm、許容支持力 11 t/本)。地盤が液状化した深さは 6 m までの範囲であり、くい先端付近は液状化していない。くい体の液状化した部分では、周面の摩擦力が消失すると同時にくい先端への上載効果が低下し、先端支持力も減少する。くい先端部の方は液状化していないので、地盤としては砂の締め方が緩くなり、膨張効果によって支持力は減退した。このため、くいは全体的に支持力を失ったが、上部構造はどの方向にも傾斜せず一様に沈下したため、建物には大きな被害はなかった。フーチング下の堀出調査によると、くい体やくい体と基礎底面接続部に多くの曲げひびわれが認められた³⁾ (図-4 (b)~(c))。

2.4 十勝沖地震 (1968)

耐震性のある一体構造としてのRC構造に、地震動に基づく振動被害を生じ注目された。特に短柱のせん断破壊・不均等剛性配置によるねじれ振動被害・剛重比の急変する建物の崩壊等、構造的にも幾つかの教訓を残した。

1) 三沢商高: A・B・C 棟からなるRC造で、A 棟 3階建て、B・C 棟は2階建て、くい基礎 (RC ぐい、径 30 cm、長さ 6 m、2本継ぎぐい、許容支持力 30 t/本)。地盤は地表面から 15 m までは N 値 0~7 程度の砂質ローム、浮石ローム、火山灰等の層から成り、更に 20 m までゆくと N 値 30~40 の火山灰質砂、それ以深は N 値 40 以上の砂である。校舎は丘陵地を切盛土して地

盤を平坦にした後、B棟は盛土部分に構築された。地震時には切土地盤上のA棟が大破したが、B・C棟は比較的軽微な被害であったので補修・再使用された。しかし、年を経るごとにB・C棟でひびわれが漸増し、屋上防水の劣化の進行・家具の傾斜等の損傷を生じたため、建物の調査が行われた。床レベルの測定の結果、建物に不同沈下が生じていることが判明したので、くいの掘削調査が行われた。盛土深さが最も深く、不同沈下の大きいB棟の北東部隅柱基礎が選ばれた。図-5に示すように、

図-5 三沢商業高校

4本のくいのうち3本はくい頭で破損しており、他の1本は、くい頭部とフーチング底面で剝離していた。くい頭部の破壊状況は、斜めひびわれを生じ、主筋は座屈しており、コンクリートが剝離して不同沈下(3.3cm)を招いたものと推定された。3本のくいは、そのくい頭部が地震時に北東方向に振られたと考えられ、わずかな残留変形を生じている。地震時におけるくい破壊の原因が、盛土部分の地盤のすべりによるものか、上部構造の慣性力による柱脚せん断がくい頭部分に作用したものか、調査が地震後かなりの年月を経ているので判定するのは困難であった。なお、この敷地内で常時微動計測が行われ、切土部分と盛土部分の振動性状から振幅を比較すると、盛土地盤は切土地盤より2倍の大きさを示したと報告されている¹⁰⁾。

2) 八戸東高校: 図-6に示すように、昭和35年A・B・C棟からなる校舎として建設された。B・C棟には注目すべき被害はなかったが、A棟に被害を生じた。A棟はRC造3階建てで直接基礎であったが、図示のように、A棟は長辺方向に地盤に段差があり、約1.5mの差に合わせてフーチング底面にも高低差がつけられていた。しかも地中ばりを高い方のフーチングに合わせて同じレベルで通しているため、低い地盤の方のフーチング

図-6 八戸東高校

図一七 姉沼高架橋

は関東地震・福井地震の被害例と同様の状況を作っている。被害が大きかったのはA棟の基礎柱であり、地中ばりが基礎スラブよりかなり高い位置に設けられた基礎である。被害の詳細は、図一六に示すように、既往の被害と同様にせん断破壊を生じ、斜めひびわれが発生し、鉄筋の一部がはみ出している。この基礎部分の圧壊に伴い建物が大きく傾斜して、最大 35cm の沈下が認められた。建物の不同沈下は残留水平変形も生じ、屋階床で最大 35cm もあった。この結果、上部構造のけた行方向の柱壁に大きなせん断ひび割れを生じていた⁷⁾。

3) 姉沼高架橋：鉄道高架橋の基礎ぐいの被害（RCぐい、径 40cm、長さ 20m）。地盤条件は、20m 位まで湖沼が陸化した軟弱地盤で、この部分は N 値がほとんど 0 である。これ以深の N 値の大きい所を支持層として架橋が支持されていた。地震により、図一七に示すように、くい頭付近に曲げひびわれが認められたものである。被害状況から、くいは上部構造の慣性力や地盤の変位が強制されて生じた破壊とは見られず、近接してあった盛土がすべて生じた地盤破壊が原因として指摘されている⁸⁾。

2.5 宮城県沖地震（1978）

我が国が最近経験した都市型の被害地震であり、従来の地震で経験しなかった新しい形の被害が続出した。特にRC構造では、上部構造はこれまでの震害の再現であったが、基礎構造で特に軟弱地盤・傾斜地形での被害を中心に、くい基礎に注目すべき被害を生じた。

1) 丸吉産業：RC造3階建て、くい基礎（RCぐい、径 25cm、長さ 5m）。仙台市南西部の低湿軟弱地盤に昭和 40 年に建設された。周辺の地盤条件は、図一八に示すように、地表面から 5m 位まで腐植物を含む粘土層で、非常に軟弱で地下水位も高かった。それ以深は砂礫

(b)

(c)

図一八 丸吉産業

層で比較的固く、建物は、くいを介してここに支持された。上部構造はラーメン構造で、壁が少なくかつ偏在していたため、地震時ねじれ振動により柱が曲げせん断破壊を生じて崩壊した。特に1階の被害が著しく、落階に近い大被害を生じた。基礎構造に関する建研報告¹¹⁾によると、くいには多くの曲げひびわれを生じ、そのほとんどは円周方向のひびわれで、基礎底面より 2m 以浅に発見された。くい材長方向のひびわれ分布には明瞭な特徴は認められない。各単ぐいに発生したひびわれの方向を基礎フーチング下のくい群として観察すると、くい群を包絡する外周部に主として発生している傾向にある。この事実は、地震時基礎に作用した力が群くいとして挙動したと推定される。またくい体のひびわれ発生位置がくい軸に関して上部に集中的に発生している状況から、くい体と基礎底面の接続条件が推察され、その結果とし

図-9 朝鮮学校

ての曲げ作用によるひびわれとして理解される¹¹⁾。

2) 朝鮮学校：RC構造4階建て、くい基礎（PCぐい、径30cm、長さ10m、図-9）。仙台市街地より西方の丘陵地に建設された学校である。建物の一部が盛土部分にあり、くいの根入れ長さが9～13mで、盛土部分

斜面に従って深くなっている。これらのくいは、一部は地山に打設されたものがあるが、ほとんど盛土部分と考えられる。盛土の深さは10m前後であった。校舎周囲のコンクリートのたたき部分にひびわれが生じており、その状況から判断すると、地震時盛土部分に地盤の移動沈下が生じたと考えられる。その結果、くい頭部分に地盤の移動による強制変形が加わり、生じた応力によってくい頭が切断され、くいが谷側に約11cmずれていた、くい頭から80cmの所で折れたりした被害が発見された。また、基礎底面の捨コンクリートとフーチングの間が約5cmの隙間（げき）を生じていることは、盛土部分が沈下したことを裏付けている¹¹⁾。

3) 郡山市営住宅：SRC11階建て、くい基礎（ACぐい、径60cm、根入れ深さ12m、支持力150t/本、図-10）。仙台市南部の軟弱地盤上にくい基礎で支持されるSRC構造物で、躯体建設完了の時点で地震にあい、くいに被害を生じた。建物付近の地盤は、地表面から3mまではN値が0に近いシルト層、5～7mまでは砂層、それ以深はN値50以上の砂礫層である。基礎底面の根入れが3.1mであるので本当に地盤の軟弱な層は1～2mであった。この建物のA棟では短辺方向が南北方向であり、この方向には壁体が多くあるため、上部構造の剛性は相当に大きかった。また、基礎底面下のくいの貫入部分で実際に地盤の軟弱な部分は2m弱であり、それ以深の根入れ部分はN値が50以上の砂礫層であるから、軟弱層部分を貫通しているくい部分に着目すると、上部は剛性の高い建物、下部は固い砂礫層にはさまれた短柱的な結果を招き、地震力によりせん断破壊したと推察される。その結果、南面の柱列下のくいが、くい頭近くでせん断のため大きな斜めひびわれを生じ、コンクリートが一部剥離して、くい軸長が短縮したため内部の

図-10 郡山市営住宅

図-11 サニーハイツ

PC鋼線が露出し、くい頭部分は破壊した。くいのひびわれ状況は、くい頭部分に集中的に発見され、およそ1～1.5mの間に分布していた。また、地震時に発生したとは考えられないくい軸方向に長いひびわれがいくつか認められた。これらのくいの破壊の結果、上部構造は南側に傾斜しており、その不同沈下の模様は、屋階の最も大きい所で1階に対して水平方向に313mm/30m、すなわち100分の1南側に傾斜していた。また、上下方向に24～70mmの沈下を生じた¹⁵⁾。

4) サニーハイツ高砂：SRC造14階建て、くい基礎（ACくい、径60cm、長さ24m、支持力160t/本）。仙台市東方の軟弱地盤に、被災3年前に建設された。地震による上部構造の被害状況は、主要構造部材には被害は生じなかったが、非構造壁がせん断破壊し、特に玄関まわりの壁の破壊により建物全体の剛性が低下したためか、サッシ玄関のドアの開閉不能箇所が多く生じた。平面形はL字形をしており、その接合部は、伸縮継手が上階にいくに従って大きく開いた。本建物付近の地盤状況は、図-11のように、地表面から5m位までは泥質層、5～10m位までN値30の砂層、17～24mがシルト層で、24m以深はN値が50を超える砂礫層で、建物はくいを介してこの層に支持されていた。

建物周辺の地盤は沈下を生じており、排水管が破損している。B棟の北端部が傾斜していた。下部構造の被害が懸念されたため、くい頭部分が掘削調査された。基礎底板下のくいに発見された被害性状は、大きな斜めひびわれを伴うコンクリートが剥離し、鉄筋が縦方向に座屈したり位置がずれたりしていた。

3. くい基礎震害の特徴と類型

これまで概観してきたくい基礎の被害状況を被害の発生原因から見ると、地盤の破壊に基づくくいの被害と、

地盤中のくいの振動現象の結果起こった被害に大きく分けて考えられる。また、歴史的に建築構造は構造形式表現法が変化し、構法・施工法・くい種類も時代とともに変化し、現在では軟弱地盤に大口径の長尺のくいの施工が行われている。地震で被害を受けたくい種を見ると、工場生産された既製コンクリートくいであり、これにはくい自体の強度変形性能に関する問題、設計法上の問題、施工法上の問題、更に上部構造地盤条件を含めた構造設計上の構造計画の問題が存在する。最終的には地震時に構造物を安全に支持し、上部構造の応力を地盤に伝えるくい基礎をいかに設計し施工するか、これらの震害経験を通じてその教訓をいかに学ぶかということが重要である。いくつかある問題を検討するために、これまでの、くいを主体に見てきた震害例を整理して、次の5つの類型に分類して示す。これを根拠に今一度過去の震害例を見直して、くい基礎の耐震設計法確立の検討の端緒を探ることに役立てたい。

3.1 基礎構法上の欠陥より生じた被害

関東地震・福井地震の構造物基礎で発見された被害はくい体そのものよりも、上部構造と基礎フーチングを接続する地下柱にその被害が認められた（図-12 (a), (b)）。これは、地震力に対する基礎構法の確立されていない時代の被害であった。当時は一般に建物外周は布基礎的つなぎを有して基礎は一応連続にしてあったが、内柱の下は独立フーチングのままでつなぎばりが設けてない場合が多く、またつなぎばりがあっても、基礎フーチングのかなり上部を軽微なはりで連結されていた。このため、フーチング上部と1階スラブ間の地下柱に短柱的挙動をさせる結果となり、地震時にせん断破壊をした。地下柱の破壊により上部構造にひびわれ・沈下等の被害を及ぼしたが、この被害原因と対策については、既述のように、震災予防調査会報告¹⁾に指摘されている。

図-12 基礎構造

この震害に類似した耐震上の問題として、武藤¹²⁾は地盤沈下の対策として、支持ぐいの耐震不安と題する報告の中で警告を発している。軟弱地盤で支持ぐい上の構造物は、建物周囲の地盤が沈下すると同時に基礎底面も下がってしまい、この浮上ビルは地震のときにどうなるか？ 建物はくいで立ち上がり、南洋の水上家屋さながらとなる。この種の支持ぐい上の建物は、福井地震時の北陸配電ビルの地下柱と同様の被害を受けるのではなかろうかと示唆されている（図-12 (c)）。

十勝沖地震の八戸東高校の基礎の被害も若干趣を異にするが、建物建設地の地形に高低差があり、この地盤の段差に合わせて上部構造は構築され、基礎フーチング底面が段差のため異なり、基礎フーチング上部につなぎばりを一定のレベルで通したため、現象的には前記震害例と同様の被害を再現したとも言える（図-12 (d)）。

この被害類型は、くい自体の被害というよりは、むしろ基礎構法上に問題を有している。これより、上部構造の受ける地震力を地盤に流す構造物-基礎を一体とした構法の確立には、地形地盤条件を含めた全体的な構造計画に対する検討が必要と言える。

3.2 砂質地盤の液状化に起因したくい基礎の被害

新潟地震で信濃川流域の砂質地盤上の建物が転倒・不同沈下・傾斜等の被害を受けた。主たる原因は、砂地盤の液状化に伴う地盤の破壊が構造物に被害をもたらしたものである。この地盤の砂は中ないし細砂で、均等係数3程度の比較的緩締めで、地下水位が高く、液状化が発生しやすかった。この地盤上には多くの建物があり、くい基礎の構造物もあった。その被害状況は、地下室の有無、直接基礎かくい基礎か、摩擦ぐいか支持ぐいかといった基礎形式、くい作用により上部構造に与える様相を異にし、特にくい基礎の場合、くいの根入れ深さ及びくい

図-13 液状化地盤とくい

先端での N 値の大きさを震害を特徴づけている（図-13）。この砂地盤の N 値分布を地震の前後で比較すると、地震により N 値が増大する部分と減少する部分が実測により確認され、増減しない境界の値は深さとともに変化し、深くなるに従い増大する。これが限界 N 値分布で、以後液状化発生条件の簡便法として用いられている。液状化は、この N 値が地震後に増大する部分で発生し、緩締めの状態から締まった状態に移行する過程で不安定となって、砂が流動化すると考えられている。液状化地盤中のくいは、瞬間的に周囲の摩擦力を喪失し、同時に上載効果も失われ、くいとしての支持力を減退する。また、ある深さ以上では地震により N 値は減少し、締まった地盤が緩くなる部分が存在する。この地盤部分にくい先端が貫入されていると、先端支持力は相当に失われることが予想される。

砂質地盤中のくいの受ける地震時の挙動は、概略的には限界 N 値を基準に前述のように推定されるが、支持力の減少ないし消失により沈下を生じ、これが上部構造に種々の損傷を招く結果となる。

液状化地盤中のくいの水平方向の挙動に関しては、液状化により地盤水平反力は期待できず、くい頭付近では地盤の拘束がなくなり、3.1 で述べた地盤沈下地帯での支持ぐいと同様の現象を生ずる可能性がある。これらの対策については、地盤改良等の手段を用いるか、設計上何らかの方策を考えねばならない。これには、吉見⁹⁾の具体的提案がある。

3.3 丘陵地の傾斜地形の造成地盤上のくい被害

傾斜地形を切盛造成した地盤上は、一見平坦に見えて均一の地盤のように錯覚しやすいが、この上に構造物を建設するには、十分旧地形を考慮に入れ、更に盛土部分と切土部分では地盤の性質が異なることに留意しなければ

図-14 造成地とくい

図一15 軟弱地盤とくい

ばならない。十勝沖地震での三沢商高や宮城県沖地震の朝鮮学校等はこの類型に入る。通常こうした造成地では、盛土部分切土部分にまたがって上部構造が建設され、地盤は切盛部分の差が明瞭に現れるため、その変形状・振動性状の変化に基礎構造、特にくい体と上部構造が地震時に追従できなくて被害を受けたと考えるのが第一の要因である（図一14）。更に、こうした配慮は十分であっても、くいの設計法は、現行では上部構造の地震時水平力に十分抵抗し得るか否かの検討が行われていないために、また予想以上の地震力があつたために破壊するというのも、当然考え得る原因である。これらが単独でなく、重なって被害を受けたと推定される。

一般に丘陵地は、地形条件を除けば地質的にも概して良好な地盤であるが、これを切り取って盛土した造成地盤は、構造物の支持地盤としては非常に多くの問題を含み、たとえ旧地形までに到達させるくいをを用いたとしても、地震時の地盤の動きが非常に不明確である。これらの被害例を通じて言えることは、こうした地形での構造物の建設はできれば避けるべきであるということであろう。将来の盛土部分の沈下等を含めて、造成地盤における構造物の建設には、地形地質地盤を含めた構造物設計の構設計画を十分検討することが望まれる。

3.4 平坦地盤上のくいの被害（曲げ破壊形）

くい基礎被害の類型は、これまで基礎構造上の欠陥に起因するもの、地盤の破壊が主たる原因と考えられるものであつた。宮城県沖地震で初めて経験した水平層状地盤で、軟弱地盤中でのくいの振動挙動による被害である。

主たる被害は上部構造に主因があり、下部のくいは比較的軽微な被害のものと、くい基礎の地震時の破壊が決定的で、上部構造の被害は二次的である場合と、便宜上2つに区分した。まず、前者の類型について考察する。類型といっても被害例が沢山ある訳ではなく、この項目では、その一例として、崩壊した丸吉産業の基礎ぐいに関するくいの地震時挙動について検討してみよう（図一15 (a)）。平地上の建物で液状化以外の地盤の振動的被害は、宮城県沖地震で既製ぐいを支持ぐいとして使用した構造物に初めて出現した。しかし、この被害例と同様の地盤条件・くい支持構造物は各地に存在すると思われるので、更に震害を受けた建物全部について基礎の掘削調査を行うことは不可能であること等から、可能性のある被害類型として、以下の検討をする。

杉村¹⁷⁾は、被害性状をエネルギー的に見ると、くいが破壊すればエネルギーはそこで吸収され、上部構造へ伝達されずに上部構造の被害は軽微になるが、逆にこの場合は、くい自体の被害が軽微で、上部構造が何らかの耐震的欠陥を有して崩壊したという解釈を示している。この場合は、くい挙動ということになる。事例研究的に見ると、丸吉はRC3階建てで、壁量が少なく偏在したために崩壊したもので、地盤条件も表層5m位が軟弱であり、ここに5mの既製ぐいが打たれ、5m以深は砂礫の比較的締まった地盤であつたが、地下水位が高かつた。このくいの被害性状は、軟弱層部分の上部くい頭近辺にくい体の円周方向にひびわれが入っている、曲げによる傾向の非常に濃厚な被害であつた。同様のくい体

被害を他に求めると、十勝沖地震時の姉沼高架橋、新潟地震時の東警察署が挙げられる。これらの被害性状から、軟弱地盤中のくいを考え得る一つの挙動を知ることができる。すなわち、くい頭部の固定条件・軟弱地層の厚さ・くい径・くい長比・上部構造から受ける応力等により、この場合は、曲げによるひびわれがくい体の力学性状を示していると言える。

3.5 平地軟弱地盤のくいの被害（せん断圧壊形）

この類型も、一つの可能性のあるパターンとして宮城県沖地震の市営住宅の例を挙げたもので（図-15 (b)）、特に軟弱地盤地帯に最近よく建設される高層の集合住宅のような、剛性が比較的高い建物との関連でくい基礎構造の地震時挙動を検討してみる。集合住宅建築は通常地下室はなく、短辺方向は比較的高い剛性が高く、下部構造のくいも、軟弱層を貫入した支持層ではかなり固い地盤と考えられる。問題は、剛な構造物と固い支持層にはさまれた軟弱地層中のくいが、地震時にどのような性状を示したかである。軟弱層は基礎底から比較的薄く 1~2m の厚さで、この間でのくいの構造次元はかなり厳しいシアスパンになっていたのではなからうか。

これらの結果、高層架構なるが故に地震時の付加軸力も加わって、高圧縮力下でのせん断破壊を生じたと思われる^{17), 18)}。更に 20m 以上の軟弱層を貫通した既製の PC ぐいに支持された SRC 14 層の高層住宅の場合は、周辺の地盤は地震時沈下を生じており、ここでのくい体の被害は、建物の不同沈下傾斜から、前記要因の他に地盤の不同沈下の影響が懸念される（図-15 (c)）。

以上の 2 類型は、軟弱地盤に既製ぐいで支持された地下室のない構造物に対する基礎構造として、これらの事実に必要な注意を払う必要がある。

3.6 くい体の破壊モード

地震時にくい体の受ける応力変形状は、上部構造のベースシアがくい頭に作用するのに加えて、地盤の強制変位を受けている。その結果、くいの力学挙動は地盤条件、くい頭の固定条件により異なるが、弾性支承ばり理論等から予測されるように、くい頭からあまり深くない所に地震動の影響が集中すると考えてもよいであろう。施工がどの程度設計条件に合致して行われるかにもよるが、これまでに調査したくい体の被害状況は、ほとんどこの部分に生じている。その破壊モードは、高圧縮力下での曲げせん断破壊によるくい頭部分の斜めひびわれ・コンクリート剝離・鉄筋露出・座屈というタイプと、くい体の全体的な崩壊には至らないが、曲げによってくい体に円周方向に曲げひびわれが生じ、前者に比べくい軸長さ方向に分布する傾向のあるタイプとがある（図-16 (a), (b)）。曲げせん断破壊によるひびわれは、非常に脆(もろ)い破壊をして、その影響が上部構造に直

図-16 くいの破壊モード

接及ぶが、曲げ的作用に基づく円周方向のひびわれは、その発生時には軽微に見えても、時間の経過とともに地下水の浸透・鉄筋の腐食・プレストレスの減退・設計応力状態の変化を生じ、耐力変形性能が期待できない恐れがあるので注意が必要である。本来、既製鉄筋コンクリートぐいに地震時に弾塑性変形を許容することは是非については、十分なる検討が必要と思われる。今一つ、くい体の害震調査で発見されたひびわれの形に、くい軸方向に縦に入ったひびわれがあるが、これは地震時に発生したものとは考えにくく、むしろくい打設工事中に生じたものらしい（図-16 (c)）。いったん施工すると、くいの状況は地盤中のことでもあり検査は不可能に近いので、十分な管理下で施工されることが望まれる。

更にいくつかの例にも認められるように、くい頭が基礎底版から横ずれしたり剝離して離脱する現象をどう考えるべきであろうか（図-16 (d)）。施工上の固定条件や地盤のすべり沈下等の影響があると考えられるが、少なくとも地震時に水平力の作用を受ける部分に関しては、このような設計・施工は非常に危険な事態を招くと考えられるので、地盤条件に対応して境界条件に関する設計・施工上の十分な配慮が必要であろう。

4. くい設計の問題と対策

くい震害状況を見て一般的に挙げられる特徴、及びこれに関する設計上の問題点、考えられる対策等について若干の考察をしよう。まず被害を受けたくいについて、くい体・くい種・地形・地盤・破壊モード・構造物・地盤との対応・施工・設計法等に関して整理すると次のようになる。

- 1) 被害は基礎底盤直下のくい頭部分に集中している。
- 2) 被害を受けたくいは既製コンクリートぐいに限られる。
- 3) 平坦化丘陵地の盛土部分で被害が生じている。
- 4) 平坦地形では軟弱地盤飽和砂質地盤での被害である。
- 5) くいの破壊形は、軸圧下でのせん断曲げ的作用により終局的には圧壊している。
- 6) 上部構造は地下室をもたない建物に限られる。

- 7) 設計上水平力変形の検討は通常行われていない。
- 8) 地形地盤条件上部構造に対応して、くいを介しての支持層の考え方が不明確である。

この中で特に問題としたいのは、基礎構造を設計する際に上部構造と地形地質土質を考慮した地盤条件に対応した基礎構造の計画を全体的な枠の中で考えることが重要であり、必須の要件ということである。地震時の上部構造の力を、どのような形式で基礎を介し地盤に流すか、そのための設計法を確立するには多くの未解決の問題が存在するが、ここでは考えられる要点を指摘して、今後の設計・施工の方策・対策を考える基にしたい。

1) 地震時にくい体の受ける応力変形状を地震観測結果等から明らかにし、上部構造のベースシア、及びくい周辺の地盤の強制変形の効果の定性・定量的評価をする。

2) 地下室等の埋設部分を含めた地盤との関連で、水平力の分担性状をどのように評価するか。

3) くいの耐震設計法を弾性設計・弾塑性設計・終局強度設計で考えるか基本思想の確立。

4) くいの地震時性状を予測するために必要な地盤定数に関する資料の整備の必要性。

5) くい頭・基礎底版の固定条件に関し、設計法と施工との対応を施工状態に対して十分検討する。

6) 不確定要因の多い地盤と施工結果の確認の困難なくいを含む下部構造に対する、上部構造に対比した安全率の考え方の整理。

7) 震害を教訓として生かす、くいの耐震設計法の具体的な方策（保有耐力・ねばりの考え方）。

8) くい体自体の構造及び材料・力学特性の検討と、施工時の損傷による力学特性低下等の追究。

9) くい設計・施工上、特にくい頭部分の被害集中に着目して、その補強対策等に関する手段の追究。

以上の問題点に関して、各方面からの研究・追究を積み重ねて初めて、くい震害を教訓としたくいの耐震安全設計法が確立すると思われる。

5. おわりに

関東地震から宮城県沖地震までの震害報告の中から特にくい基礎に関する被害例を集めて、その被害性状を5つの類型に分類整理した。鉄筋コンクリート構造自身、この半世紀以上の間に構造的表現・構法上の手法も変化し、基礎構造も木ぐいをういた独立フーチング基礎が主であったのが、現在では工場生産される既製鉄筋コンクリートぐいが主流を占め、基礎構法はほぼ確立したかに見える。しかし、そこには地盤という非常に不確定要素の多いものを相手にしなければならない宿命があり、くいの被害も常にこの地盤との関わりで生じていると言っ

ても過言ではない。

歴史的にくいの被害を通して構造物の耐震安全性を考えると、重要と思われるのは地盤を含めた構造物全体のバランスである。上部構造が重要である、地盤基礎は分らないということでは、真の構造物の耐震性は保障されない。上部構造対応の上で地形・地質・土質条件に適応した基礎構造を選択し、地盤基礎構造物が一体となった系の構造計画・構造設計・施工法を常に心がけることが肝要である。過去から現在までのくい震害の類型から、その被害原因を明確にし、そのための対策は、こうした観点から検討して初めて今後に生かされる教訓と言える。特に最後に強調したいことは、従来ややもすると上部構造に耐震的配慮の中心があって、基礎地盤に対する十分な検討がなされていなかったきらいがあると思われるので、今後の構造物の耐震設計は、こうした意味において、地盤条件に対する十分な吟味をして設計を行うことこそ重要である。

参考文献

- 1) 震災予防評議会：震災予防調査会報告，第百号丙（下），1926，pp. 330～331
- 2) 北陸震災調査特別委員会：福井地震震害調査報告Ⅱ 建築部門，1951，pp. 103～105
- 3) 岸田英明：Damage to Reinforced Concrete Building in Niigata with Special Reference to Foundation Engineering, Soils and Foundations, Vol. 6, No. 1, 1966, pp. 71～88
- 4) 小泉安則：Change in Density of Sand Subsoil Caused by the Niigata Earthquake, Soils and Foundations, Vol. 6, No. 2, 1966, pp. 38～44
- 5) 吉見吉昭：地盤の液状化に対する検討，PC パイルハンドブック，コンクリートパイル協会，昭 45.9 (1970.9)
- 6) 日本建築学会：新潟地震災害調査報告，1964，pp. 547～549
- 7) 日本建築学会：1968十勝沖地震災害調査報告，1968
- 8) 田村浩一，藤原俊郎，森重龍馬：十勝沖地震（1968）における高架橋の被害，関東地震50年記念地震工学シンポジウム論文集，1973，pp. 147～153
- 9) 水野二十一：地盤と震害・建築物関係，基礎工，1978.11，pp. 37～50
- 10) 建設省建築研究所：青森県立三沢商業高校鉄筋コンクリート建物耐震診断，昭 49.2 (1974.2)
- 11) 建設省建築研究所：1978 宮城県沖地震の被害調査報告書，No. 86，1979.2
- 12) 武藤 清：支持杭の耐震不安（地盤沈下への対策），日本建築学会研究報告，31号，1955.5，pp. 117～118
- 13) 古藤田喜久男：建築における地盤と基礎工一耐震設計の考え方一，基礎工，1974.12，pp. 22～31
- 14) 岸田英明：鉄筋コンクリート建築基礎構造の耐震性能，コンクリート工学，Vol. 18, No. 3, 1980.3，pp. 46～52
- 15) 志賀敏男：宮城県沖地震におけるくいの被害とその復旧，建築技術，No. 344，1980.4，pp. 79～91
- 16) 志賀敏男：地震と杭，日本建築学会東北支部研，昭 54.11 (1979.11)，pp. 69～72
- 17) 杉村義広：杭基礎の震害に関する序論的考察，第15回土質工学研究発表会（広島），1980.6，pp. 1025～1028
- 18) 日本建築学会：1978 宮城県沖地震災害調査報告，1980.3