建築基礎耐震設計の現状と問題点

杉 村 義 広*

概 要 基礎構造の震害が主因となる建物の被害形態は、多くの場合、不同沈下となって現れる。これを避けるには、地盤条件を適切に把握した耐震設計を行うことはもちろんであるが、十分に注意した施工を行うことも重要である。基礎構造の耐震設計上の問題点は多岐にわたるが、これを分類してみると、耐震目標の設定という一般的問題をはじめとして、地震入力、崩壊形、構造計画、地盤の評価法、設計算法、くい材の構造性能、くい頭接合部等のそれぞれに関する問題が存在する。基礎構造の耐震設計を体系化するには、これら一つ一つの問題を解決し、積み重ねていくことが重要である。

キーワード：くい基礎、耐震設計、終局耐力、靱性、せん断破壊、不同沈下、液状化

1. ま え が き

地震時に、基礎構造および地盤が被害を受けることによって生ずる建物の被害は、多くの場合、不同沈下という形態になって現れる。その原因としては、くい、基礎ばり、基礎フーチング等の破壊という構造部分の被害要因の一面と、液状化、斜面崩壊、大規模な沈下など、地盤の変状要因の一面とがある。これら2つの要因類は、地盤の変状が伴わなくても構造部分の被害はあり得るが、地盤の変状が伴うと、さらに被害程度が大きくなるという相互関係にある。とくに、地すべりなど大規模な地盤変状が伴うと、建物は流失、圧壊、倒壊といった被害形態を示すこともある。したがって、基礎構造の耐震性を考える場合、構造部分の耐力および被害回避の問題と、地盤変状に関する対策の問題とを区別して扱っておくことが便利である。ここでは、主として前者を中心として、問題点等について述べてみたい。

2. いくつかの震害事例

はじめに、いくつかの震害事例をみてみよう。ただしこれらはすべて、くい基礎支持の建物の場合である。

2.1 事例 1

建物は鉄骨造1階建てであり、図-1に示すような平面形をもっている。この建物は、日本海中部地震(1983)の際に土間コンクリートの床部分および架構体に不同沈下が認められた(図-2)。架構の不同沈下の直接の原因は、PCぐい(図-3)のくい頭部が破損したことによると考えられる(写真-1)。この敷地は、約20年前には沼沢地であり、これを砂質土によって埋め立て造成され

たものである。地層断面は図-4に示すとおりであるが、地震時にこの表層盛土が液状化しており、これが第2の原因に数えられる。さらに、盛土の下部には旧沼底であった腐植土層が厚層約1.5mにわたって存在しており、これが地震以前から沈下を生じさせる原因になっていた可能性も考えられる。この事例は、単に地震動の

図-1 建物(事例1)のはりおよび床伏図

写真-1 くい頭付近の破損状況(事例1)

* 建設省建築研究所基礎研究室長

図-2 不同沈下測定結果(事例1)

影響だけでなく、腐植土層の存在などの地盤条件そのものが複合的に関係して不同沈下という被害形態につながったと考えられる典型的な例であると言える。

2.2 事例 2

建物は鉄筋コンクリート造3階建て一部地下1階であり、十勝沖地震(1968)の際に不同沈下による被害が認められたものである。代表的な架構面の被害状況を図-5に示す。この事例では、地下室のない側の隅角部で最大約9cmの不同沈下を生じており、そのため、基礎ばりにもかなり大きなひびわれが発生している。この被害形態の原因の第1は、くい打ち時の心ずれが考えられる。地下室のない側のくいの現況位置を図-6に示す。当初は1柱当り5本のP Cぐいが設計されていたが、柱心の

誤認から約2m外側にくいが打設され、このうち2本は捨てぐいとされ、フーチングを側方に増打ちして3本だけを使用したため、偏心荷重となった。このため、地震時の軸力に対処できず、不同沈下につながったと考えられる。なお、各4本の鋼管ぐいは、後に補強のため増設されたものである。第2の原因としては、くい頭の接合不良が考えられる(写真-2)。くい頭部ではつり出されたP C材がフーチング内に埋め込まれていない例とか、くい頭とフーチングとの間に隙間が生じている例などが散見されている。この事例は、くいの極端な心ずれやくい頭の接合不良が不同沈下の誘因になることを示す典型例であると言える。

2.3 事例 3

Present Situation and Problems on Aseismic Design of Building Foundation

By Yoshihiro Sugimura

Concrete Journal, Vol. 22, No. 10, pp. 4~11, Oct. 1984

Synopsis Differential settlement occurs frequently as typical seismic damage of building mainly caused by its foundation damage. In order to avoid this type of damage, it is important to do carefully construction work as well as to make aseismic design of foundation by grasping ground condition rightly. Problems on aseismic design of foundation are classified into several groups as follows: general problem, earthquake input problem, assumption of collapse form, structural plan of foundation, evaluation method of soil condition, design calculation, structural properties of pile and boundary condition of pile head. It is necessary to solve these problems one by one, to systematize aseismic design of building foundation.

Keywords: pile foundation, aseismic design, ultimate strength, ductility, shearing failure, differential settlement, liquefaction

図-3 基礎詳細図 (事例 1)

建物は鉄骨鉄筋コンクリート造 11 階建てで、宮城県沖地震(1978)の際に不同沈下が認められた例である。この建物は、建設中で仕上げ工事にかかる直前に地震に遭遇したもので、生活上の支障は皆無である。また、上部階の構造的被害もほとんどなく、全体的な傾斜という被害

写真-2 くい頭の状態 (事例 2)——フーチングとの間に隙間がある

害形態を示している (図-7)。この被害形態の原因は、1 通り側のくいがくい頭から 1.4~2.9 m の範囲で破壊し、支持力を失ったことによる。くいは高強度プレストレストコンクリート (PHC) くい A 種、直径 60 cm であり、その破壊タイプは、もっとも程度の大きいもので完全な圧壊現象を示し、一部に圧壊を伴っているものは斜めひびわれ (縦ひびわれに近いものも含まれる)

図-4 地層想定断面図 (事例 1)

図—5 断面図とびびわれ状況図 (事例 2)

図—6 くの現況図 (事例 2)

で、せん断または曲げせん断破壊と呼べる種類のものである(図—8)。この事例は、くいの場合には曲げに関する問題が重要視され、せん断に関しては問題がなかろうと考えられていた従来の慣習に注意を喚起するきっかけとなり、以後、コンクリート系くいのせん断に関する問題が多く論じられるようになってきたのは周知のとおりである。

以上のように、この事例では、不同沈下の直接の原因は、くいが破壊して支持力を失ったことにあるが、そのような状況を生じさせる間接的な遠因も同時に考えられる。たとえば、この敷地の地盤条件は、図—9 に示すように地表から数mが軟弱粘土層で、その下は砂層、砂れき層が続いており、くい打ち時にこれらの層に深く貫入させるために(設計くい長 12 m)、たたき過ぎの傾向

があったことを否めない。事実、くい打ち時に破損が確認されたくいが数本あり、それに代わって増設ぐいが用いられたという報告がある。したがって、施工時にくいがかなり痛めつけられ、地震時に被害を受けやすい状態になっていたと推定される要因も複合的に含まれている事例であると言える。

2.4 事例における問題点のまとめ

くい支持建物の地震時における不同沈下発生の原因調査結果を、以上に示したような事例として蓄積していけば、

建築基礎構造の耐震設計として、当然なこととはいいながら、次にあげる点がいかに大切であるかがはっきりしてこよう。

- 1) 地盤条件を適確に把握すること
- 2) 適切な構造計画、設計計算を行うこと
- 3) 十分に注意深い施工をすること

前述した被害の事例では、いずれも直接的な原因は、くい基礎に異常が生じたことにあるが、その遠因には、腐植土層の存在や砂質土層の液状化の可能性に対する配慮不足といった地盤条件に対する設計時のミス

とか、くい打ち時のたたき過ぎや心ずれといった施工時におけるミスが、複合的に関係しているように思われる。そして、これらのミスがいくつか重なった場合に大きな被害が生じているという印象がある。一般に、基礎構造の設計・施工は経済性が優先する現状にあると言われているが、少なくとも単純なミスは避けるように努力したいものである。

3. 基礎構造の耐震設計上の問題点

従来から、基礎構造に関しては、地盤の中のことですから、くいと関係する事情もあって、耐震性に関しては必ずしも十分に配慮がゆき届いていないという現状にある。したがって、基礎構造の耐震設計に関しても非常に多くの難問が山積している。表—1 には、現状で考えられる

図-7 建物の沈下・傾斜測定結果 (事例 3)

図-8 くい被害スケッチ (事例 3)

問題点を可能な限りで整理分類し、代表的なものについては具体的な問題として示した。なお、この表は、昭和56年6月に日本建築学会から発行された「建築耐震設計における保有耐力と変形性能」の基礎構造編を担当した基礎構造分科会ワーキンググループのメンバーが、その後集まって、今後長期的な問題として残されている諸点を討議した内容に基づき筆者がまとめたものである。

以下には、主要な問題点としてどのようなものがあるか述べてみよう。

3.1 一般的な問題点(2次設計の目標を中心として)

まず全体としては、基礎構造の耐震性能の目標として上部構造と同等に設定すべきか、それ以上か、またはそれ以下でよいかという問題がある。これに関しては、人命に対する安全性確保はもちろんとして財産保持の目標まで考えるかによって考え方が異なってくる。もし財産保持まで含めるならば、基礎構造は一度被害を受けると補修が困難であり、費用も高額となるので、始めから耐震性能の目標を上部構造より多少高めに設定しておくことが望ましいことになる。もし、そこまでは必

要なしとするならば、基礎構造の被害が直接に人命安全性に影響する度合は上部構造の場合より小さいと考えられるので、多少低めに設定しておくことも可能である。この点に関しては、まだ考え方が固まっているとは言えないので、可能な限り早くコンセンサスが得られることが期待される。

3.2 地震入力に関する問題点

図-9 地層想定断面図 (事例 3)

表-1 基礎構造の耐震設計における問題点

分 類	主 要 項 目	具 体 的 な 問 題 等
1. 一 般	a. 基礎構造と上部構造の耐震性能の関係	基礎構造は上部構造より先に壊れてよいのか？ 基礎構造の耐震保有性能をいかに設定すべきか？
2. 地 震 入 力	a. 基礎（地下室）の根入れ効果 b. 液状化等の地盤変状による入力の変化 c. 基礎構造部材の靱性による入力の変化 d. 杭に作用する外力の深さ分布 e. 回転動の影響	受動土圧、側面摩擦力、くい基礎の水平力分担率 液状化による入力低減は？ 直接基礎、くい基礎（くいの種別）ごとに入力は変化しないか？ くい頭集中水平力のみでよいのか？ 中間層の影響は？ 回転中心位置をどこにとるか？
3. 崩 壊 形 (破壊形式)	a. 崩壊形の設定と分類 b. 地盤崩壊と基礎構造の関連	直接基礎の崩壊形、くい基礎の崩壊形の定義 液状化、斜面崩壊など地盤変状の取扱いは？
4. 構 造 計 画	a. くいの配置計画 b. 基礎スラブの剛性と各くいの水平力分担率 c. 隅角部の応力集中	建物図心とくい基礎の図心のずれによるねじれ くい径、くい長の差異による水平ばねの評価 2軸方向外力問題、浮上りの制限量
5. 地 盤 の 評 価 法	a. 水平地盤反力係数の評価 b. くい先端支持力および周面摩擦力の評価 c. 液状化層の影響 d. 傾斜地の影響	非線型性の影響は？ 互層地盤の取扱いは？ 施工法の差異による変化は？ 上向きと下向きのばね（とくに摩擦力）に差異はないか？ NF地盤の場合は？ 地震動レベルによる液状化層厚の変化は？ 液状化層の水平ばね、減衰の評価は？ 地形の影響、盛土の場合は？
6. 設 計 計 算 法	a. 地盤-基礎-建物全体系の解析法 b. 複合荷重に対する計算法 c. 群ぐいに対する計算法	全体系としての解析法の確立 鉛直荷重、水平荷重、回転力の同時作用の場合の計算法の確立 群ぐい効果
7. くい材の構造性能	a. くい材の終局耐力と靱性 b. くい材の塑性化過程の影響 c. セン断力の変形、応力に及ぼす影響 d. 局部座屈性状の検討 e. くい材の構造特性係数の設定	各種くい材の軸力-曲げモーメント、軸力-せん断力関係の整備 塑性化の度合いによる終局耐力の変化は？ せん断応力の存在による軸力、曲げモーメントの変化は？ 複合荷重下における座屈性状 くい種別、施工法別で係数は変わるのか？
8. くい頭接合部	a. くい頭接合部の詳細と固定度 b. くい、基礎ばり、柱の剛比の相関性状 c. くい頭カットオフの影響と補強詳細 d. 中詰めコンクリートの影響 e. フーチングの複合力	くい種別、工法別の固定度、くい頭のピンまたはローラー接合の開発 各部の曲げ耐力、せん断耐力およびその相関関係は？ プレストレスの減少の影響 中詰めコンクリートとくい本体の挙動に差異はないか？ 支圧、引抜き力、せん断力、曲げモーメントに対する設計
9. そ の 他	a. 震害破壊形式の分類判別法 b. 保有耐力の検討を要しない条件の設定 c. 連続壁型のくいの取扱い	不同沈下につながる破壊形式にはどのようなタイプがあるか？ 地下室の深さ、くい長、くい総断面積、水平変位量の制限など 通常のくいと異なった取扱いが必要ではないか？

基礎構造は、地震動の影響を上部構造へ伝える役割と上部構造からの影響を地盤へ伝える役割（いわゆる動的相互作用）とを同時に持っている。換言すれば、入力要素と抵抗要素とを同時にっており、そのメカニズムについては必ずしも解明されていないため、耐震設計上の難問の一つになっている。

地下室など根入れのある場合の入力の増減、根入れ部分とくいの水平力分担率などは、とくに解決されるべき問題点である。また、液状化、斜面崩壊などの地盤変状による入力の変化の問題、基礎構造部材の靱性による入力の変化の問題も重要である。

設計用水平外力の形状としては、地下壁、くいなどに対して床レベルまたはくい頭の集中水平力としてのみで十分か、分布荷重として与える必要はないかという問題がある。多層地盤の場合で動的解析等を行うと、下部の地層境界でくいに大きな曲げモーメントを生ずることが最近になって指摘されるようになり、より実際に近い荷重分布形を考える必要性が認識されている。このほか、回転動に対する回転中心をどの位置に考えて基礎に対する軸力変動を算定するかなどの問題もある。

3.3 崩壊形に関する問題点

基礎構造の分野では、土圧や支持力問題など、本来地盤の崩壊形（すべり面）を考慮した土の塑性平衡理論で扱われているものが多い。この場合、構造物は剛体として挙動すると考えられている。直接基礎、とくに独立フーチング基礎のような場合には、この考え方を適用できよう。しかし、べた基礎であるとか、くい基礎など、たわみ性のある基礎の場合には、崩壊形を設定することにはかなりの困難を伴う。さらに、上部構造を含んだ全体系で破壊箇所の時間的推移を考えると、液状化や斜面崩壊など地盤の変状を伴う場合まで含めると、各ケースに応じて崩壊形を仮定することが必要になると予想される。いま、地盤の変状を別にして考えれば、一般には崩壊に達するまでの変位（変形）は、基礎部材よりも周辺地盤のほうが十分に大きいので、周辺地盤の崩壊以前に基礎部材の終局状態が生ずると考えるか、または上部構造への影響を考えてある限界変位（変形）を考慮し、設計することが現実的な対応と言えるであろう。後者の場合には、基礎の水平変位量、沈下量、浮上り量（または、くいの拔上り量）などの限界値の設定が必要となる。

3.4 構造計画に関する問題点

くい配置、くい径選択等は、上部構造から伝達される軸力に応じて決定されることが多いが、水平力等に対しては、上部構造の平面図心とくい基礎の図心とのずれによるねじれの影響を検討する必要性が生ずる場合がある。また、最下階の床および基礎ばりの剛性と各くいの

水平力分担との関係、とくにくい径やくい長の差による水平力分担率の評価法は、現在確立されていない。さらに、建物の隅角部の応力集中は鉛直方向、水平方向ともに現れるはずであり、これをいかに扱うかは重要な問題である。

3.5 地盤の評価法に関する問題点

くいおよび地下壁等に対する水平地盤反力係数、受動土圧および摩擦力は、その非線形性ととともに、一様地盤ばかりでなく、互層地盤の場合について評価する必要がある。この場合の取扱い方については、適切な評価法が確立しているとは言えない。また、該当する地層に液状化の可能性がある地層が含まれている場合、1次設計で想定している地震レベルに対して、2次設計で想定している地震レベルでは、液状化の可能性のある地層の、主として層厚の増大の可能性があること、および液状化層の地盤反力はゼロなのか、またはある程度の反力が期待できるのかという問題は、入力の増減と同時に、今後解明されるべき重要な問題である。負の摩擦力が生ずる軟弱地盤では、地震時にはどのような力の伝達メカニズムを示すのかが明確にされていない。このほか、水平地盤反力係数、受動土圧、摩擦力の動的効果はどの程度かといった問題点もある。

3.6 設計計算法に関する問題点

地盤—建物連成系、とくにくい基礎の場合の地盤—くい—建物系の総合的な解析法が確立されることが第一に望まれる。この場合、外力は鉛直力、水平力などの複合荷重であり、さらに必要なら深さ方向に変化する分布荷重であるべきであり、地盤およびくい材の非線形効果も考慮されるべきである。このような総合的な解析法の確立がさしあたって困難であるならば、その前段階として、現状の鉛直方向、水平方向を別々に解析する「分解法」において、地盤の評価法とも関連して次のような諸点が問題点としてあげられる。

- 1) とくにくい基礎の場合で、上向き（支持力側）と下向き（引抜き側）とで、ばねまたは耐力は変化するのか？ その場合、動的と静的の差異はあるのか？
- 2) 極限支持力（地耐力およびくいの支持力）が発揮されときの沈下量はどの程度になるのか？ 上部構造への影響の回避の観点から、ある限界沈下量以内で（したがって極限支持力に対してはある安全率を考えて）設計するのが妥当であるのか？ とくに場所打ちくいの先端支持力と中間摩擦力の取り方には、これに関連する問題点が多いと思われる。
- 3) くいの拔上り量と関連して、その極限引抜き抵抗力まで期待できるか？ 拔上り量の制限値が必要であるか？ この点に関しては、くいの施工法によっ

てかなり大幅な相違があることが予想されるが、実験的な検証が不足しているので、とくに重要な問題であると言える。

- 4) くい水平抵抗に関して、くい頭の固定度(自由度)をいかに考えるか? また、群ぐいの取扱い方をいかにするかといった問題も含まれている。

3.7 くい材の構造性能に関する問題点

くい材の終局耐力に関し、軸力-曲げモーメント、軸力-せん断力関係の整備をしておくことが必要である。この場合、繰返し効果を考慮することが重要であると同時に、各種くい材の靱性(したがって構造特性係数)を明確にしておく必要がある。また、コンクリート系くい材に関しては、最近になって、せん断力の作用が終局耐力に及ぼす影響についてとくに重要な問題が含まれていると指摘されだしており、せん断スパン比の考え方、材の塑性化過程、円筒状の断面性状等、これに関連して解決されるべき問題点もかなり多い。いま、この種の問題点を指摘する具体的な一例をあげてみよう。過去に行われた単純ばり曲げ方式または大野式加力による高強度PCぐいの曲げ・せん断試験結果を整理すると、A種(有効プレストレス 40 kg/cm^2)のくいではシアスパン比がおおよそ1程度、B、C種(有効プレストレス 80 kg/cm^2 および 100 kg/cm^2)のくいではシアスパン比がおおよそ3程度を境界として、最終破壊形式が、それ以上では曲げ破壊型、以下ではせん断破壊型を示すという結論が得られ、シアスパン比3程度では、PC鋼材の量の増大により曲げ破壊型からせん断破壊型に移行するという傾向が認められる。また、最終状況に至る以前に円周方向曲げモーメントによるひびわれの発生が認められ、これが、せん断耐力の減少に影響している傾向が認められているものもある。これらの点は、くい基礎の耐震性を考えるうえで重要な問題点であると言える。

3.8 くい頭接合部に関する問題点

くい頭接合部については、くいの水平抵抗の設計計算時に仮定する境界条件と実際の接合詳細との間に大きなギャップがあるのが現状である。くい頭の接合固定度は、基礎ばり等への応力再配分を考慮する必要があるか否かに対し重要な影響要素である。くいに引抜き抵抗力を期待する場合には、接合部もそれに応じた検討が必要となり、場合によっては基礎フーチングの配筋等も、従来考えられていたものと変える必要があることもある。したがって、くい種別、施工法別による種々の接合法に対する力学的解明が急務であると言える。くい頭の中詰めコンクリートが有利な役割をするか不利な役割をするかについては、この解明に含まれて検討されるべきことは当然である。また、くい頭切断法や補強法も整備される必要がある。さらに、くい頭接合条件がピンまたはロ

ーラーとなるような設計詳細が可能であるか否かの検討も、今後重要な課題の一つになろう。

3.9 その他の問題点

その他の問題としては、以下の諸点があげられる。

- 1) 震害を受けた基礎の調査法の確立および震害形式の分類判別法の整備
- 2) 保有耐力の検討を要しない条件の設定
- 3) 連続壁をくいとして使用する場合の設計法の確立
- 4) 液状化対策として地盤改良された地盤の再液状化可能性の判定基準の確立

4. あとがき

以上には、建築基礎構造の耐震設計における問題点をその現状とともに述べてみた。この分野では、山積する問題点が、分類し整理すること自体が至難の業と言えるほど多岐にわたっており、中には拾い忘れた重要な問題点があるかもしれない。このような状況にあるので、基礎構造の耐震性については、いつの日か全体を体系的にまとめることができるようにすることを目指とし、小さな問題の一つ一つからでも解決し、それらを積み重ねていく努力をする以外に方法はないように思える。しかし一方において、筆者の知る限りにおいて、耐震性を意識した最近の研究の動向として、少なくとも次のようなテーマに基づいた研究がなされているのも事実である。

- 1) とくに、くい基礎の(または地下室も含めた)設計資料を収集することを意図した地盤—くい基礎—上部構造系の地震観測または模型振動実験による研究
- 2) くい材の終局耐力、靱性の評価を目的とした構造性能実験、または地盤中におけるくい基礎の大変形水平載荷実験による研究
- 3) くい頭接合部の接合詳細と固定度(または自由度)の関係を求めることを目的とした接合部構造性能実験による研究
- 4) 地盤の塑性化およびくい材の塑性化過程を考慮したくい基礎の水平抵抗に関する解析的研究
- 5) 変位量との関係を重視した、くいの周面摩擦力に関する実験または解析的研究
- 6) 液状化の判定基準の改良を目的とした研究
- 7) 掘削による基礎構造の震害に関する調査研究

これらの研究成果は、精粗の差はあるが、今後順次発表されると思われるので、基礎構造の耐震性の分野も意外に早い時期に急激に進展すると期待していいかもしれない。

参 考 文 献

- 1) 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, No. 340, 昭 59.6.