

基礎構造の耐震診断手法に関する研究

正会員○金子 治*¹ 同 新井寿昭*²
同 保井美敏*¹ 同 小林恒一*³
同 佐野大作*¹

耐震診断 杭基礎 水平抵抗
液状化 一体解析

1. はじめに

既存建築物の耐震診断は、たとえば(財)建築保全センター「官庁施設の総合耐震診断・改修基準及び解説」に基本事項として「耐震安全性の評価は上部構造及び基礎構造の評価を考慮して総合的に行う」とあるように、構造体全体にわたって実施すべきものであるが、この基準でも上部構造の診断手法の詳細が示されているのに対し、地盤及び基礎に関しては「耐震診断は必要に応じて実施」「耐震性能は実情を考慮して適切に評価」としているのみで、具体的な方法は示されていない。これは、基礎構造に生じる損傷が直ちに人命の安全に影響を与えることはないと考えられていることや、基礎構造の耐震性能評価の方法が確立されておらず、兵庫県南部地震の被害事例に基づく基礎構造の耐震診断手法の提案¹⁾²⁾³⁾はあるものの普及には至っていないことが、要因と考えられる。

そこで本報では、杭基礎に関して既往の耐震診断、耐震性評価手法を上部構造と対応するように整理し、1995年兵庫県南部地震において被災した建物を対象に、これらの診断手法の適用性を確認するとともに、耐震補強として液状化対策を行った場合の検討を行った。

2. 既往の基礎構造の耐震診断手法の整理

丸岡ら¹⁾および椿原ら²⁾は、兵庫県南部地震の被害事例に基づいて上部構造物に準拠した耐震診断手法を提案している。このうち椿原らの提案は、断面諸元から求めた杭の終局保有せん断力と建物重量他の指標から耐震指標 I_{sf} を導く手法で、上部構造の 1 次診断に対応する手法として有効と判断した。

また、本学会近畿支部³⁾では兵庫県南部地震の被害事例から、上部構造との連続性を考慮した杭基礎の剛性率 R_{sp} を用いて耐震性を評価することを提案している。この方法では R_{sp} と、杭の終局保有せん断力の和 Q_U と建物重量 W の比(Q_U/W)あるいは上部構造の一次固有振動応答値に

よる杭頭せん断力 Q_{rsp} との比(Q_U/Q_{rsp})を併用 (R_{sp} and (Q_U/W or Q_U/Q_{rsp}))して、上部構造も含む評価を行うもので、2次診断に適用することとした。

一方、杭基礎建物の耐震性評価のための地盤-杭-建物一体モデル⁴⁾を用いた荷重増分解析の手法が整備され、その有効性が示されており、より実際の挙動に近い評価が可能と考えられる一体解析を基礎構造の耐震診断の 3 次診断手法として用いることとした。

以上より、表 1 に示すように、基礎の耐震診断手法を上部構造と対応するよう 1-3 次診断として整理し、以下の事例についてその適用性を検討した。

3. 耐震診断事例

前節で整理した耐震診断手法の検証のため、兵庫県南部地震で被災した深江浜の建物⁵⁾(竣工 1973 年)に適用を試みた。この建物は上部構造の躯体は無被害であったものの、杭が中間部で破損したために建物が傾斜した。

建物概要を図 1 および以下に示す。

構造規模：鉄骨造 3 階、用途：事務所

平面形状：9.05m・1 スパン×5.0~5.5m・6 スパン

基礎構造：PC 杭，A 種，杭長 28m，打込み杭

隅角部φ350，常時支持力 650kN/本

一般部φ450，常時支持力 950kN/本

図 2 に地盤の概要および液状化判定結果（最大水平加速度 350gal）を示すが、表層から-8m 付近までは液状化の可能性のある礫分を含む砂質土による埋土層であり、液状化層と下部粘性土層との地盤変位の差により境界部分の杭が破損したと推定されている⁵⁾。

この建物について、構造図に基づいて建物全重量 W を 10,440kN、常時の杭頭軸力はφ350 が 550kN(支持力との比 0.85)、φ450 が 824kN(0.87)と設定し、基礎構造の耐震診断を行った。以下は、短辺方向加力時の結果を示す。

杭の終局曲げモーメントおよび靱性指標を算定用の塑

表 1 耐震診断手法の整理と上部構造との比較

	基礎構造の耐震診断手法の診断レベルの整理	文献	一般的な上部構造の診断手法
1 次診断	杭断面諸元から求めた強度、靱性と建物重量との比から各杭の耐力を評価し、上部構造と同様な耐震指標 I_{sf} により判定する。 $I_{sf} < 0.8$ は耐震性なし。	2)	柱、耐震壁の断面積、コンクリート強度により強度を評価、靱性指標は一律に与えて判定する。
2 次診断	上部構造との連続性を剛性率 R_{sp} で考慮、杭の耐力の和 Q_U と建物重量 W か上部構造の 1 次固有振動応答値 Q_{rsp} の比と併せて判定する。 $R_{sp} < 0.6$ か $Q_U/W < 0.5$ または $Q_U/Q_{rsp} < 1.0$ で杭被害あり。	3)	柱、耐震壁の断面諸元から終局強度を評価、靱性は柱・壁の形状から評価し、判定する。
3 次診断	地盤-基礎-上部構造一体モデル(弾塑性モデル)を用いた荷重増分解析により、建物全体の地震時の挙動を評価し、判定する。	4)	柱、はり、耐震壁をモデル化したフレーム解析により保有水平耐力を算定、破壊モードにより靱性を評価、判定する。

性率は断面諸元および軸力(1,2次診断では引張り側は0,圧縮側は常時の2倍)から求め、終局せん断力算定用の地盤定数は図2に示す液状化判定結果の剛性低下率 β を考慮した。また、2次診断のための建物応答値は基礎固定モデルで求めた。

3次診断のための一体解析は、構造解析プログラムRESP-F3を用い、文献4に準じてモデル化した。杭は軸力相関のあるM- ϕ モデルで杭頭は固定、杭に取り付く地盤ばねは図2のN値、変形係数に基づいて設定し、剛性低下率 β により低減している。荷重はAi分布で与え、基礎のベースシア係数 C_B は1階(2階床)の0.75倍とした。

また、この建物の耐震性に液状化が大きく影響すると考えられることから、耐震補強として液状化対策により液状化を防止した($\beta=1.0$)ケースの診断も実施した。

表2に診断結果の一覧を示す。原地盤ではいずれの診断レベルでも杭の耐震性が不足する、という診断となり、実際の被害と対応する結果となった。

一方、液状化を防止した場合でもPC杭の耐力自体が低いことから、1次診断では耐震指標 I_{sf} はそれほど増加せず($0.14 \rightarrow 0.22 < 0.8$)、「耐震性なし」との結果となった。

これに対し、上部構造との連続性を考慮した2次診断

では、図3に示すように液状化防止により杭の剛性率 R_{sp} が向上($0.51 \rightarrow 1.13 > 0.6$)し、「杭の被害なし」となった。

3次診断の一体解析結果のうち、杭頭せん断力-水平変位関係を図4に、内側の通りのメカニズム時のヒンジを図5に示す。原地盤では $C_B=0.12-0.14$ で杭頭が降伏した後に液状化層中央付近も降伏して破壊メカニズムに達したが、液状化を防止した場合は2次診断と同様に、杭の耐震性向上により上部構造の破壊が先行したことから、結果的に杭の耐震性は確保された。

以上から、基礎構造の耐震診断においては上部構造との連続性が重要であることが確認できた。ただし、師団の精度向上のためには地盤変位の影響や杭頭接合部の回転剛性評価、モデル化が今後の課題である。

4. まとめ

- (1) 既往の文献から基礎構造の耐震診断手法を上部構造と対応するよう整理した。
- (2) 兵庫県南部地震において杭基礎の破損した建物に提案する診断手法を適用し、被災状況と対応することを確認できたが、適切な診断のためには上部構造との連続性を考慮することが重要である。

【謝辞】 本報で用いた杭耐力の算出にあたっては、ジャパンパイル・熊谷裕道氏に協力いただいた。記して謝意を表します。

【参考文献】 1)丸岡他「既存建物基礎の耐震診断に関する一提案」日本建築学会技術報告集,第8号,85-90,1999,2)椿原他「杭基礎の簡易耐震診断に関する一提案」日本建築学会大会,B503-506,1999,3)日本建築学会近畿支部基礎構造部会「基礎の調査・補強・耐震設計の課題」,16-61,2000,4)渡辺他「一体解析による耐震性能評価手法の検討」日本建築学会大会,B509-516,2004,5)伊勢本他「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」第32回地盤工学研究発表会,210-217,1997

表2 診断結果

	原地盤	液状化防止
1次	$I_{sf} = 0.14 (< 0.8)$ → 耐震性なし	$I_{sf} = 0.22 (< 0.8)$ → 耐震性なし
2次	$R_{sp} = 0.51 (< 0.6)$, $\{ Q_u/W = 0.16 (< 0.5) \}$ $\{ Q_u/Q_{rsp} = 0.64 (< 1.0) \}$ → 杭被害あり	$R_{sp} = 1.13 (> 0.6)$ $\{ Q_u/W = 0.19 (< 0.5) \}$ $\{ Q_u/Q_{rsp} = 0.78 (< 1.0) \}$ → 杭被害なし
3次	$C_B = 0.188$ で全ての杭頭+地中部が降伏	$C_B = 0.372$ で全ての1階柱脚の降伏が先行

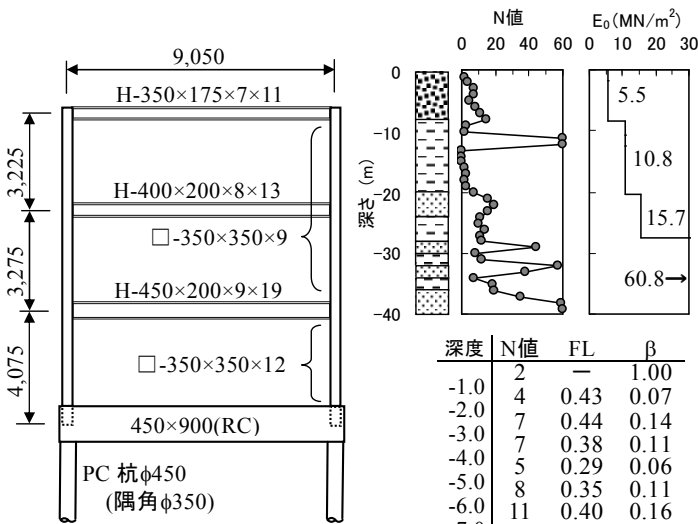


図1 建物断面(短辺方向)

図2 地盤概要および液状化判定結果

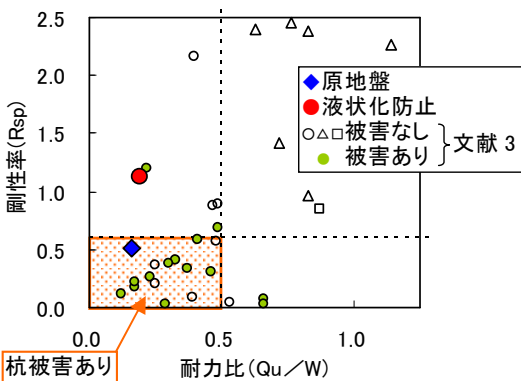


図3 2次診断結果(文献3の事例との比較)

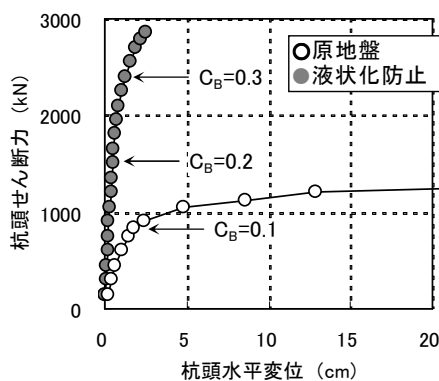


図4 杭頭せん断力-水平変位関係

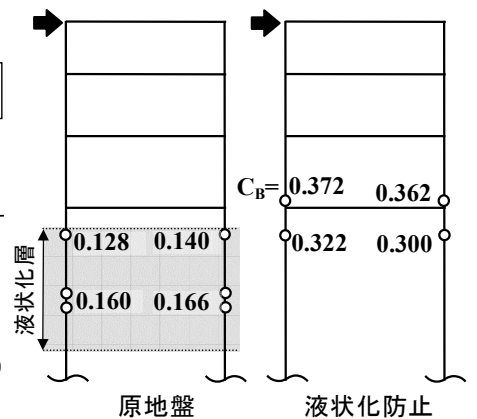


図5 内側の通りのヒンジ発生状況

*1 戸田建設
*2 西松建設
*3 ジャパンパイル

*1 Toda Corporation
*2 Nishimatsu Construction
*3 Japanpile Corporation