

建物における杭基礎の耐震診断・補強に関する解析的検討

森利弘¹・二木幹夫²・青木功³・杉本三千雄⁴・大槻明⁵

¹工修 (株) 熊谷組技術研究所 (〒300-2651 茨城県つくば市鬼ヶ窪1043)

²工博 建設省建築研究所 (〒305-0802 茨城県つくば市立原1)

³住宅・都市整備公団建築技術試験場 (〒192-0032 東京都八王子市石川町2683-3)

⁴工修 (株) 竹中工務店技術研究所 (〒270-1352 千葉県印西市大塚1-5-1)

⁵正会員 工博 清水建設(株) 技術研究所 (〒135-0044 東京都江東区越中島3-4-17)

建物における耐震改修はこれまで公共建物を中心に上部構造に関する耐震診断、耐震補強が実施されてきた。しかしながら、基礎構造についてはほとんど実施されていないのが現状である。本検討では上部構造の耐震性能との関係を考慮したうえで、基礎構造の耐震改修フローを示し、その一例として大地震時における杭基礎の耐震診断・補強の解析的検討を行った。二次元のFEM解析を用いて検討した結果、杭頭にすべり支承を設置する基礎絶縁型による補強は有効な方法であることなどが判った。

Key Words : retrofitting measures, performances of retrofitted footings, FEM analysis, sliding bearing

1. はじめに

兵庫県南部地震以後、平成7年12月に既存建築物の耐震改修の促進に関する法律が施行されてから、上部構造の耐震診断が公共建築物を中心に進み、次第に耐震補強が実施に移されつつある。しかしながら、上部構造の耐震診断に合わせて基礎構造や敷地地盤の大地震時の安全性についての検証はほとんど実施されていない。上部構造単独で耐震補強を行ったとしても基礎構造を含めた建築物全体としての耐震性能が確保されていなければその補強効果は確保されたことにはならない。基礎構造についても耐震診断を行い、必要な耐震対策を実施することが大切であると考えられる。

本報告では上部構造の耐震性能との関係を考慮したうえで、基礎構造の耐震改修フローを示し、その一例として杭基礎の耐震診断・補強に関する検討例を紹介する。

2. 耐震改修のフローと改修方法

基礎構造の耐震診断・補強に関する検討フローを図-1に示す。上部構造の耐震診断を行った建築物はすべて基礎構造の耐震診断を行うが、基礎構造の診断は1次診断、2次診断の2段階とする。1次診断

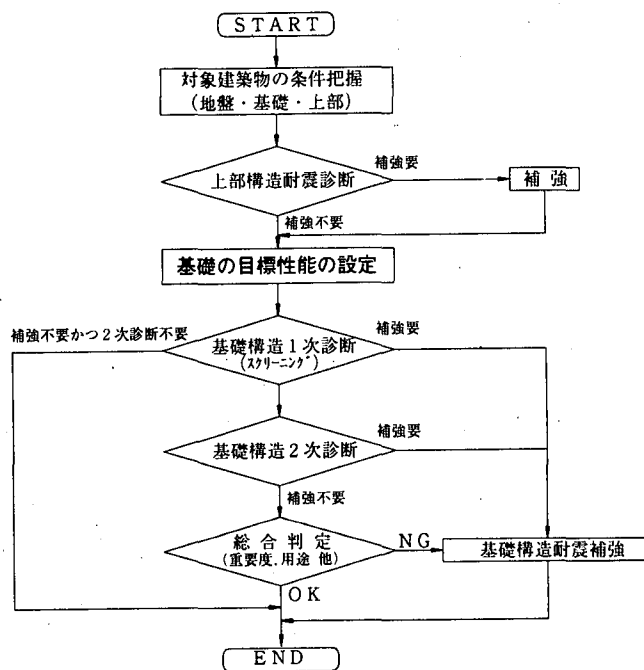


図-1 基礎構造の耐震診断・補強の検討フロー

では対象建築物の地盤条件などに基づく工学的判断および現行の1次診断レベル(例えばChang式)によるチェックを行うものである。2次診断はレベル2地震動を工学的基盤に入力する動的解析により基礎構造に加わる外力を求め、この外力に対する基礎構造の耐震性を評価し、耐震補強の必要性について

検討する。

基礎構造の診断に先だって目標性能を設定するが、建築物全体の耐震性能の確保という観点から基礎構造の目標性能は上部構造の要求性能と整合する必要がある。表-1 は上部構造への要求性能と基礎の目標性能の対応を示したものであるが、性能レベル¹⁾としてⅠあるいはⅡなのかを明確にしておく必要がある。

3. 杭基礎の耐震診断例

以下では図-1に示した検討フローのうち、基礎構造2次診断例について記述する。目標性能はレベル

表-1 上部構造への要求性能と基礎の目標性能の対応

	性能レベルⅠ	性能レベルⅡ
上部構造への要求性能	財産確保	人命確保
基礎構造の目標性能	基礎の破壊を防止する	地盤の破壊による建物の転倒・崩壊を防止する

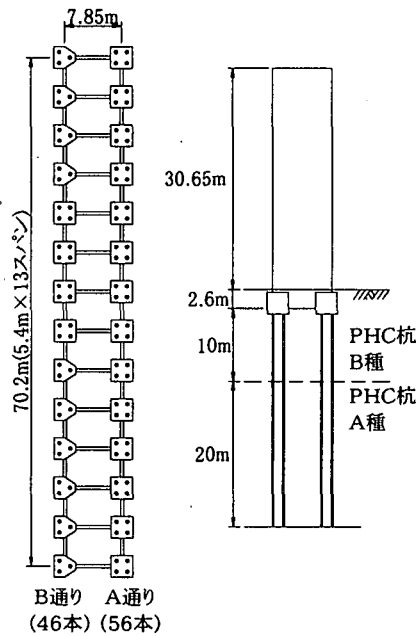


図-2 モデル建物の概要

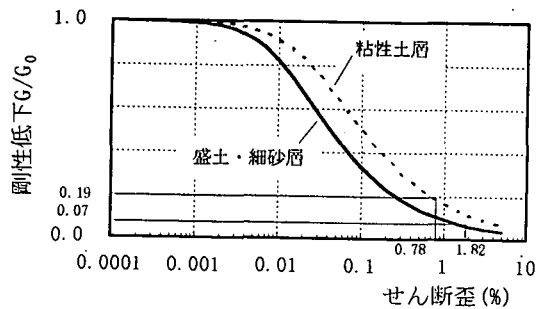


図-4 地盤の $G/G_0 \sim \gamma$

2地震動に対して性能レベルⅡとする。建物のアスペクト比が比較的大きく、基礎直下の地盤が軟弱であるため、杭が破壊された後に建物重量を支持できない恐れがあるので杭は破壊させないこととした。なお、基礎1次診断を実施したが、目標性能である性能レベルⅡを確保できていない。

(1) モデル建物と解析方法

図-2にモデル建物の概要を示す。上部構造は11階建て、耐震壁付きラーメン構造である。基礎構造はφ600の既製コンクリート杭で杭長さは30mである。

解析モデルとして2次元のFEM解析を用い、建物・基礎・地盤一体モデルによる検討を行う。ここでは条件的に厳しいと予想される建物短辺方向について検討する。解析モデルを図-3に示す。底面は固定境界、側面は繰返し境界とした。上部構造および杭基礎は線形ビーム要素、地盤は線形平面歪要素とする。減衰定数はすべての振動モードに対し20%とするが、建物が卓越するモードについては5%とした。

地盤は線形要素となるため以下の方法で地盤の非線形性を考慮した。①事前に1次元による地盤の等価線形解析(SHAKE)を行い、地盤定数として収束した等価せん断剛性を用いる。②杭近傍地盤についてはさらに地盤非線形解析²⁾における杭近傍地盤の最大せん断歪の値を0.65倍し、図-4に示した地盤の $G/G_0 - \gamma$ からそのせん断歪に対する剛性低下量を算出し、入力用地盤定数とした。表-2に地盤定数の値

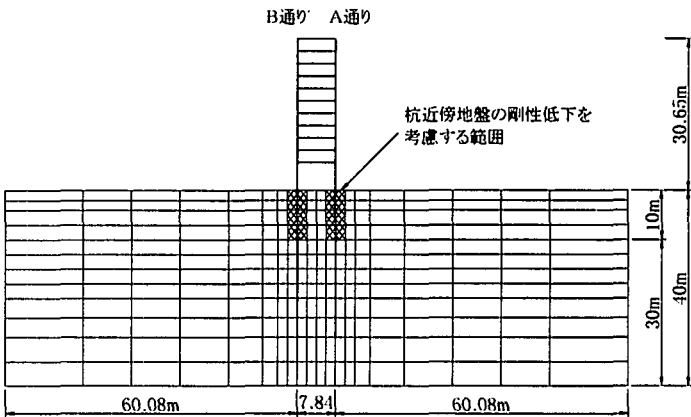


図-3 解析モデル

表-2 入力用地盤定数

地盤種類	層厚 (m)	質量密度 (tf/m ³)	ν	V_s (m/sec)	G (tf/m ²)	G_0 (tf/m ²)
盛土	2.0	1.8	0.45	115(35)	2429(225)	3104
粘土	14.0	1.55	0.47	85(57)	1143(508)	2673
シルト混じり細砂	6.0	1.75	0.45	55	540.2	5160
細砂	8.0	1.9	0.45	80	1241	7755
砂礫	10.0	2.0	0.45	400	32653	32653

注：()内数値は杭近傍地盤の定数を示す。

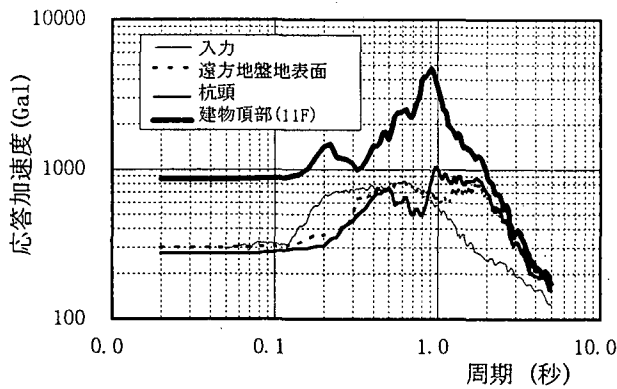


図-5 加速度応答スペクトル(h=5%)

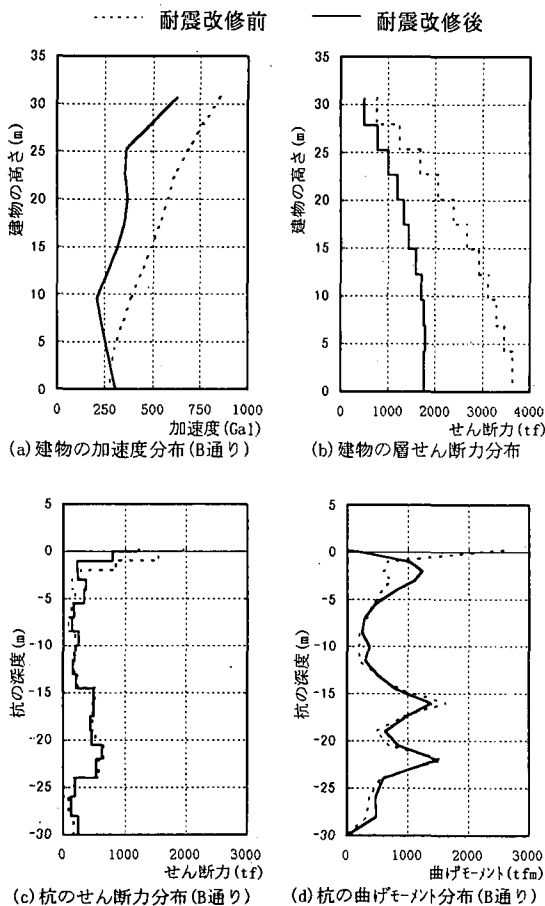
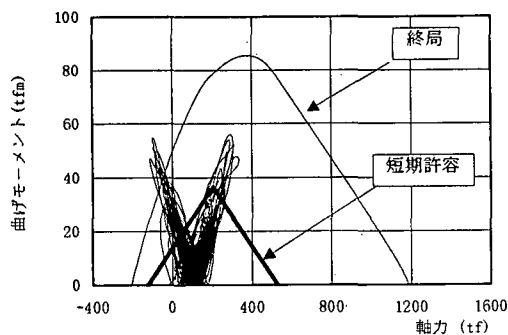
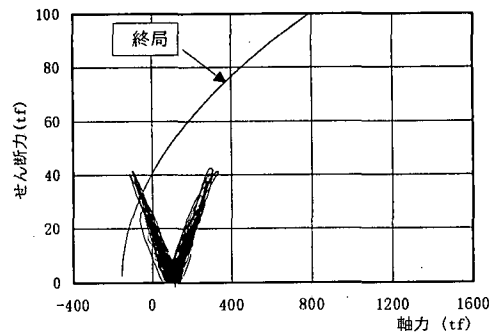


図-6 最大値分布



(a) B通り杭 (杭頭)



(b) B通り杭 (杭頭)

図-7 杭のMNおよびQN曲線 (耐震改修前)

を示す。

解析に用いた入力波は建築センター波で地盤の等価線形解析時にE+F波を求め、工学的基盤に入力した。連成系の1次周期は1.68秒、2次周期は0.90秒であり、建物基礎固定モデルでは0.49秒である。

(2) 解析結果と耐震診断結果

図-5に主な位置での加速度波形から算定した加速度応答スペクトルを示す。建物頂部では0.9秒付近にピークが見られ、建物上部構造の振動が卓越する2次モードの周期と一致している。杭頭においても同じく1秒付近にピークが見られる。

建物の応答加速度、層せん断力および杭断面力についてその最大値分布を図-6に示した。杭のせん断力および曲げモーメントともに杭頭において最大となっている。また、曲げモーメントについては地盤の層境界位置においても大きな値となっている。

杭頭位置での杭1本当当たりの断面力を算出し、軸力を考慮した杭の終局耐力との比較を行った。比較図を図-7に示す。杭のせん断力および曲げモーメントともに杭軸力の引張り側において杭の終局耐力を上回っているため、耐震改修が必要と判断される。

4. 杭基礎の耐震改修例

(1) 耐震改修方法

杭基礎の耐震改修方法には表-3に示すような方法が考えられるが、ここでは杭頭にすべり支承を設置する基礎絶縁工法を想定する。上部構造への地震入力の低減を図るとともに杭頭ピン構造としている。

表-3 杭基礎の主な耐震改修方法

耐震改修の補強形式	対策例
①地震入力低減型	・基礎絶縁工法 ・地盤改良工法
②強度志向型	・鋼管による補強 ・増し杭、連続地中壁の設置
③靱性志向型	・炭素繊維による補強

すべり支承を用いた従来の免震構法では復元力としての積層ゴム支承を併用しているが、ここでは残留変位を許容することとし、すべり支承のみとする。

(2) 改修後の安全性検討結果

耐震改修後における耐震性について前述した2次元FEM解析により検討を行った。検討モデルは図-3と同じであるが、杭頭にすべり支承を設置する。図-8にすべり支承のモデル化を示す。

前掲した図-6に改修前と比較して耐震改修後の最大値分布を示した。改修前と比べ、建物の応答加速度が小さくなり、層せん断力は約半分程度となっている。杭断面力について見るとせん断力および曲げ

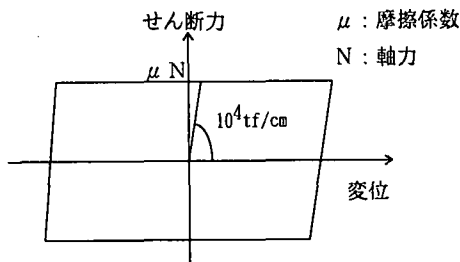
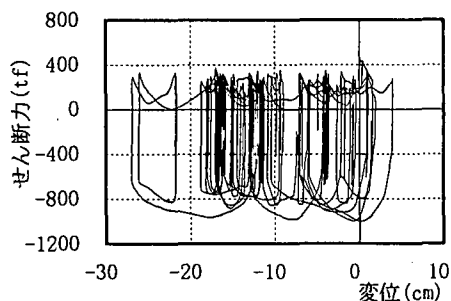
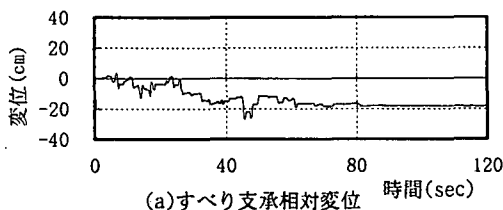
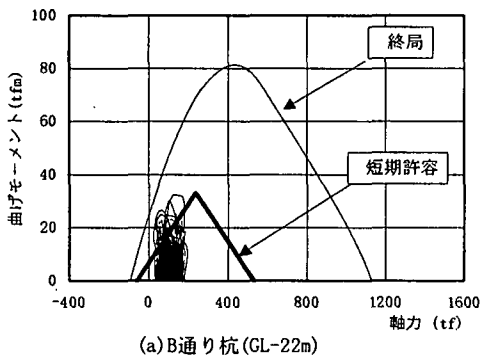


図-8 すべり支承のモデル化



(b) すべり支承の荷重変位関係

図-9 すべり支承の挙動



モーメントともに地表面付近で減少している。建物慣性力の低減効果に加え、曲げモーメントに関しては杭頭ピン構造になっている効果が窺える。

図-9にはすべり支承相対変位の時刻歴結果およびすべり支承の荷重と変位の関係を示した。相対変位には振動成分に加え、徐々にシフトする漸増成分が確認され、地震後には約20cm程度の残留変位が発生している。最大変位は30cm程度となっている。

杭断面力の最大値分布から、曲げモーメントおよびせん断力が最大となる位置において杭1本当たりの断面力を求め、杭の終局耐力と比較した。図-10に示した比較から、耐震改修後には曲げモーメントおよびせん断力ともに軸力を考慮した杭の終局耐力以内となっている。

5. まとめ

基礎構造に関する最近の知見をふまえ、基礎構造の耐震改修フローを示し、その検討例としてモデル建物に関する基礎構造二次診断ならびに基礎絶縁型補強による改修例についての解析的検討を行った。

基礎絶縁型補強は新しい耐震改修方法であり、残留変位に対する詳細検討などが必要であるが、有効な方法であることが確認できた。

今後、建物の耐震改修は上部構造・基礎構造全体系としての安全性の確保という観点から実施する必要があると思われる。

おわりに：本報告は「新技術による既存建築物の耐震性向上技術の開発／基礎・地盤分科会（主査 松島豊 筑波大学教授）」の活動の一貫として行ったものである。関係各位に深謝いたします。

参考文献

- 1) 杉本、二木、青木、小林、金子、真野：基礎・地盤の耐震性向上技術に関する研究（その1）耐震性評価手法に関する検討、日本建築学会大会学術講演梗概集、1999。
- 2) 大槻、小林、杉本、青木、二木：変動軸力を受ける建物杭基礎の耐震性に関する解析検討（その1）二次元動的FEM解析による検討、第34回地盤工学研究発表会、1999。

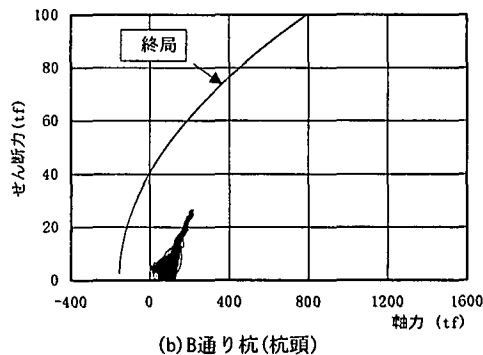


図-10 杭のMNおよびQN曲線（耐震改修後）