

建築基礎の耐震診断と耐震補強

Seismic Evaluation and Retrofit of Foundation for Building in Japan

田 村 昌 仁 (たむら まさひと)

前独建築研究所国際地震工学センター 上席研究員

1. はじめに

日本には、耐震性に支障がある建築物が数多く存在する。住宅のストックは、戸建住宅と共同住宅と併せて約4700万戸であるが、1/4は耐震性に支障があり、その多くは木造である。また、非住宅では総数340万棟の約35%（約120万棟）に支障があるとされている¹⁾。新耐震（1981）以前の特定建築物（不特定多数が出入りする約18万棟）は耐震化率16%（多くは新築時に余裕ある設計）で耐震改修の実施率5%、民間建築物で耐震性が確認できたもの4%という調査結果もある。

現行の一次設計がなされていない古い基礎も少なくないが、上記の数字は、建築物の耐震診断が地上部分を対象としており、基礎の耐震化率は不明である。杭の引き抜きなどは、建物の崩壊形ひいては外力の設定に影響を及ぼすことから、基礎耐震の重要性は高まっているが（2章）、基礎の目標耐震性能についての議論はまだ十分ではない。基礎耐震の考え方・検討方法は、建物の種類や規模によって現在でも異なる。一例として、液状化を例にすると、一般建築物では液状化層の上部に基礎を設置することはなく、液状化層の下層を支持層とする杭や改良が採用されているが、戸建住宅では、液状化の度合いによっては、液状化層の上部を支持層とするべた基礎を液状化対策とする例もある。

基礎の耐震補強が検討されるのは、基礎に不同沈下・損傷等の被害が既に生じている場合、建築物の耐震診断・改修等に関連して基礎の耐震性に支障があることが明確になった場合、等である。しかし、基礎の耐震補強の選択肢や評価法は、上部構造と比較しても明確でなく、確立しているとはいえない。この理由には、①建築物の診断・補強は地上部分の保有耐力の評価が基本であるが、基礎耐震は短期・保有の2段階ではなく、短期にとどまっている、②増改築・大規模修繕を伴わない基礎の補強・補修は法令上の規制が少なく、設計者の判断が重要で、様々な考え方がある、③費用対効果からみて現実的な補修・補強法が少ない、④過去の経緯から、基礎に著しい損傷・不同沈下等が生じていなければ基礎の耐震性に著しい支障があるとは言にくい、などがあげられる。

本稿は、上記を鑑み、建築基礎の耐震設計・診断・補強の現状と課題を述べ、今後を展望する。

2. 建築基礎の耐震設計の変遷と最近の動向

耐震補強を必要とする場合の多くは、現行の耐震基準を満たさない基礎であるが、基礎の耐震設計が法令に基づいて明確になったのはごく最近である。基礎耐震は、『地震力に対する建築物の基礎の設計指針（1984）』（旧通達第324号）以降に急速に広まったが、これは『望ましい水準の基準』として住宅局建築指導課長から関連機関に通知されたものであり、法令に基づく明確な規定ではない。許容応力度計算を要する建築物で、杭の曲げ・せん断に対する耐震設計の必要性が明らかになったのは、2001年の国交省告示第1113号がはじまりである。

基礎耐震の変遷²⁾から眺めると、水平力によって生じるせん断力や曲げモーメントに対して杭耐力を直接検討するようになったのは20数年にすぎない。杭の水平耐力等の評価が可能となるまでは、長・短の許容支持力と杭種・杭径に応じたその上限値、杭の構造方法が耐震設計の役割を果たしていた。根入れ部分で水平力に対抗できるとする考え方、杭に引抜き抵抗力を見込まない設計、地下部分および基礎の最小根入れ深さ、建物荷重をすべて杭で支える設計なども間接的な耐震設計である。

低層建築物に対しては、最近まで鉛直支持力以外の検討を明確に求めてこなかった経緯もある。特に住宅では、構造計算を必要とする場合でも、布基礎・べた基礎の直下の鋼管杭や地盤改良は一種の地業として扱われ、液状化等によって支持能力が喪失するおそれがある場合でも一般建築物と同等の耐震設計が常になされているわけではない。しかし、地業であったとしても、住宅の耐震性を確保するための検討は必要であり、構造計算を要する住宅であれば、基礎直下の地盤が中程度の地震で著しく液状化することが予測される場合、杭等を含む基礎の短期許容応力度計算が特に重要である。

また、2007年建築基準法改正を契機として、これまで以上に基礎耐震の重要性が増している。表1は、建築基準法改正に関連する新たな規定や2007年版建築構造関係技術基準解説書³⁾に記載された内容をまとめたものである。基礎耐震に関しては、これまで短期許容応力度計算のみであり、大地震に関しては特に規定がなかったが、鉛直方向に関しては塔状比4を超える建物に対して極限押し込み・引抜きの検討が求められることになった。基礎・地盤のばねに関しても、上部構造に作用する外力の設定に影響を及ぼすことから（剛性率、偏心率なども基

表一 建築基準法改正 (H19.6) による基礎耐震の新たな規定と技術基準解説書3) における基礎に係わる記載例

極限支持力 基礎・地盤ばね 崩壊形	告示 594 号 (H19)	塔状比4を超える場合は、 C_0 が0.3以上とした時に、地盤の極限支持力、極限引き抜き抵抗力等を超えないこと。 R_t を算出する際、固有周期は基礎・基礎ぐいの変形が生じないものとして構造耐力上主要な部分の初期剛性をを用いて算出。崩壊形として転倒排除。杭ばねは統一された手法(基礎指針、道路橋示方書)。
液状化 短期許容支持力	令38条, 告示1113号(H13) 告示1457号 (H12, H19改正)	許容応力計算及び限界耐力計算。『液状化による沈下等の影響が軽微であることが確かめられない限り、地盤の短期許容応力度を設定することはできない』など 限界耐力計算における液状化の判定方法の明確化。最大加速度150galでFLが1を超える場合。350galでは液状化時地表変位 D_{cy} が5cm以下、液状化指数PLが5以下など。
擁壁の構造	令142条 告示1113号(H13)	既存擁壁の上部に擁壁を増設することもあるが、上段と下段を合わせた擁壁の壁高が2mを超える場合は、原則、本条(142条)の規定を満足する必要がある。擁壁背面の近傍を敷地とする場合は、建物荷重によって擁壁の安全性検討した上で地盤の許容支持力を設定。
表層の地盤増幅	告示1457号 (H12, H19改正)	限界耐力計算の地盤増幅特性の評価。工学的基盤(V_s 約400m/s以上、厚さ5m以上)の傾斜の影響や表層傾斜の影響等の評価方法の明確化。基盤傾斜は、表層地盤の厚さの5倍程度の範囲で5度以下など

礎・地盤ばねによって影響を受ける), 統一された方法で設定する必要性が明確になった。液状化に関しては、文献³⁾で『…液状化による沈下等の影響が軽微であることが確かめられない限り、地盤の短期許容応力度を設定することはできない』などといった解説が加えられたが、2001年告示1113号第2で既に『…液状化のおそれのある地盤の場合…建築物の自重による沈下その他の地盤の変形等を考慮して建築物又は建築物の部分に有害な損傷、変形及び沈下が生じないことを確かめなければならない。』と規定されている。また、擁壁背面近傍の住宅基礎の耐震を考えるうえで問題になりがちな増し積み擁壁に関しても、『…上段と下段を合わせた擁壁の壁高が2mを超える場合は、原則、本条(令第142条『擁壁』の意)の規定を満足する必要がある』など、地盤工学の立場からすると当たり前であるが、住宅の基礎設計に係わるものとして明記されている。

3. 促進法における基礎・地盤の診断と補強⁴⁾

建築物の耐震診断・補強に関する基準に、『建築物の耐震改修の促進に関する法律(以下、促進法)』がある。この法令は、既存不適格や施工不良の建築物に数多くの被害が認められた兵庫県南部地震を教訓とし、1995年に施行されたものであるが、2005年改正で建築物の『敷地』も診断対象となり、国交省告示第184号(2006.1)で敷地の診断・改修の考え方が明確になり、この対象が『擁壁』、『崖崩れ等』、『液状化』の三つに大別された。

一般に、建築物の耐震診断は、保有耐力と必要保有耐力の比で評価され、木造では次式によって⁵⁾。

$$\text{構造耐震指標 } I_w = P_d / Q_r \dots\dots\dots (1)$$

P_d : 各階の保有耐力, Q_r : 必要保有耐力

耐震性能は、 I_w の値から以下の3段階に区分され、1.0未満であれば改修を要している。

- ① 0.7未満であれば崩壊・倒壊するおそれが高い
- ② 0.7以上1.0未満であればおそれがある
- ③ 1.0以上であるとのおそれが低い

P_d に関しては、壁・柱だけでなく、基礎の種類に応じた低減係数が設定されている。基礎の種類は、下記に大別され、低減係数は1.0~0.2の範囲にある。

- ① 健全な鉄筋布基礎およびべた基礎

- ② 健全でない(ひび割れのある)鉄筋布基礎またはべた基礎、無筋布基礎、玉石基礎

- ③ その他の基礎

一方、地盤に関しては、軟弱地盤による必要保有耐力の割増係数が定められ、通常は1.0、一定の条件を満たす軟弱地盤では1.5となっている。

RC造でも同様に、次式の I_s と I_{s0} の比較を基本としているが、1次/2次/3次診断と分けられている⁶⁾。

$$I_s \geq I_{s0} \dots\dots\dots (2)$$

構造耐震指標 $I_s = E_0 \times S_D \times T$

E_0 : 保有性能基本指標, S_D : 形状指標, T : 経年指標

構造耐震判定指標 $I_{s0} = E_s \times Z \times G \times U$

E_s : 耐震判定基本指標, Z : 地域指標, G : 地盤指標

U : 用途指標

I_s に係わる基礎・地盤の評価に関しては、地下室の有無による形状指標の低減(低減係数は h (=地下面積/建築面積) ≥ 1.0 で1.0, $1.0 > h \geq 0.5$ で0.9, $h < 0.5$ で0.80)がある。経年指標に関しては、不同沈下や地盤等による保有耐力の低減があり、一次診断で不同沈下が生じていると0.7、埋立地や水田跡は0.9となっている。

I_{s0} に関しては、地盤指標 G や地形指標等を設定することがある。静岡県・横浜市・官庁施設の指針類には、崖地、不整合的な地層、局所的な高台、谷地低地では1.0~1.25の範囲で G を割り増すことが示されている。また、横浜市には、崖の高さや勾配、崖上端から建築物までの距離などを考慮した地盤指標 G の算定式がある(図一1参照)。

ただし、促進法は、診断・改修を義務付けるものではない。診断・改修等の指示に正当な理由なく従わない場合は公表等を可能としているが、『国民の努力義務』であることに注意を要する。また、促進法の特徴には、改修工事の際に基準法の規定が緩和できることがあげられる。

4. 基礎の耐震補強と要求性能

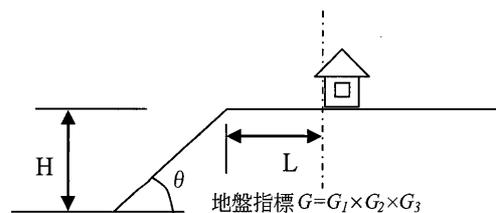
図一2は、基礎の耐震補強の現状を示したものである。診断法の提案は既に一部の機関でなされているが⁷⁾、一般に、基礎補強の大半は現状復旧であり、耐震補強となると容易ではない。表一2、表一3は、基礎の耐震補強の要求性能や重要度の考え方を例示したものであるが、

論 説

上部構造でも耐震補強が進まない現状を考えると、課題は多い。

基礎の補強法は、構造的に補強する方法、地盤改良などにより地盤支持力や液状化抵抗を高める方法、免震装置等により基礎に作用する荷重を制御する方法に大別できる。既存基礎に作用する水平力を低減させるため、新設基礎に水平力を集中させる方法も有用である。しかし、建物直下の部分であることを考えると設計施工の確実性など扱いが難しい部分もある。補強となると新築段階では評価が難しいものでも積極的に活用せざるを得ないが、補強効果が検証されていないものや評価方法が確立していないものもある。例えば、緊張型斜めアンカーは、擁壁等の復旧・補強には有用であるが、新規の建築工事では時刻歴解析等の大臣認定を要する。また、補強時に既存基礎周囲を掘削して施工品質が確認できる場合があり、既存基礎の状況と設計要求の関係にも注意を要する。

構造体だけでなく、地盤改良等による補強後の地盤の評価に関しても、効果確認の方法は必ずしも明確ではない。新規の深層混合処理工法では、コア採取率といった改良部分の均質性の評価法を含めて検査法が明確である



- G₁: 地盤種別による指標 (当面 1.0)
- G₂: 地形指標 (通常は 1.0)
大地間谷底低地 G₂=1.2 (谷幅 200m 以内の開析谷)
がけ地 (勾配 30 度以上) は次式
 $G_2 = (1-L/L_0)A + L/L_0$: L ≤ L₀ の場合
 $= 1$: L > L₀ の場合
 $A = 7 \times (\theta / 45 - 1) \cdot H/V_s + 1$: H ≥ 3m かつ θ ≥ 45 の場合
 $= 1$: H < 3m 又は θ < 45 の場合
 A: がけ上端部の増幅率
 L: 当該建物位置からがけ上端までの水平距離 (m)
 L₀: がけの影響範囲を与える距離で L₀=2H (m)
 θ: がけの勾配 (度) H: がけの高さ (m)
 V_s: がけ部分のせん断波速度 (m/sec)
 G₃: 地盤と建物の相互作用効果による指標 (当面 G₃=1.0)

図一 崖等を考慮した地盤指標 G の算定 (横浜市の場合)

が、既存建物直下の液状化対策を対象とした場合の改良等に対して検査法が十分確立しているとは言えない。また、杭の補修・補強のために、杭頭周辺を掘削して杭体を補強することもあるが、埋戻し後の水平地盤ばねの設定法など、現在でも考え方が明確でない部分がある。

現行規定を満足しない木造等の古い基礎の補強に関しては、2005年国交省告示第566号で無筋の基礎等に対する緩和措置としての補強方法が定められている³⁾。図一3は、補強法の例であるが、基礎立上り部のアンカーの定着長や間隔などの標準仕様が定められている。なお、既存不適格基礎に対する補強の考え方は、増築規模で異なり、①増築部が延べ床面積の50%以上では現行規定に適合、②50~5%では図一3の補強、③5%以下 (50 m² 以内) では補強不要、となっている。

5. おわりに

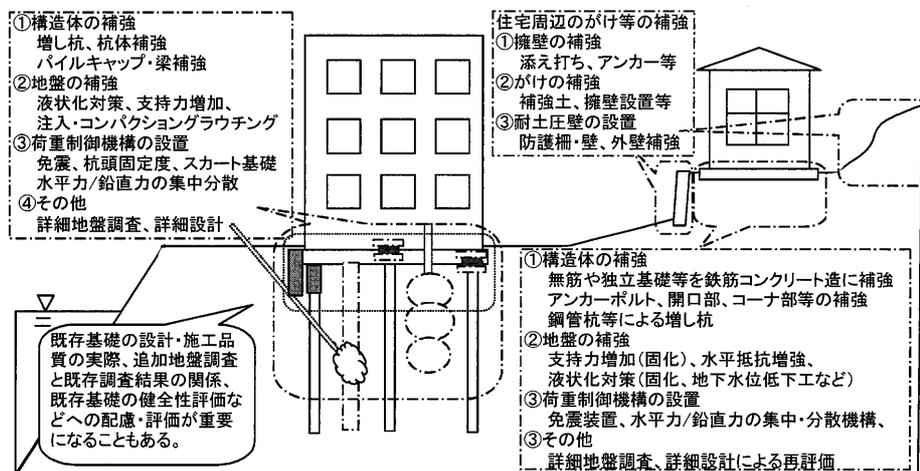
地盤変動が生じやすい崖等の近傍の古い木造基礎、現

表一 建築基礎の耐震補強における要求性能

要求性能	既存基礎の耐震性能		
	既存不適格 老朽化・損傷等	現行規定 概ね一次設計 (1984)	現行規定超
補強により大地震で崩壊しない	←	→	→
補強により地震後も再利用可	←	→	→
補強により大地震でも機能維持	←	→	→

表一 建築基礎の耐震補強の重要性と有効性

検討項目	小	大
基礎の耐震補強の重要性と有効性	短	長
残余供用期間	短	長
撤去再構築と比較した補強の有用性	低	高
基礎の補強に関する費用対効果	低	高
補強の確実性・信頼性	低	高
現状の損傷等からみた修復の必要性	無	有
地震以外の外乱による被害の可能性	低	高
社会資本等からみた施設の重要性	低	高
補強に関する保証・保険	不可	可能



図二 建築基礎の耐震補強の考え方と補強方法

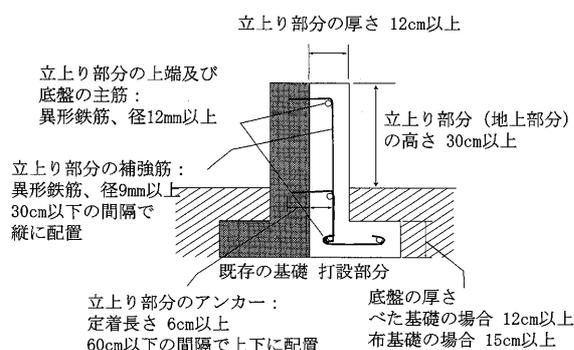


図-3 基礎の補強方法 (国交省告示566号, 2005)

行の一次設計を著しく満足しない基礎、大地震に対しても無被害が求められる重要施設の基礎が、耐震補強の対象である。基準法改正に関連し基礎耐震に係わる基準が設けられ、補強を要するケースが増える可能性もある。増改築等において、既存基礎と増築基礎の耐震性が大きく異なることもあるので、このような場合も注意が必要である。

しかし、促進法では基礎の診断を直接求めていることや上部構造でも耐震補強が進まない現状を考えると、基礎補強のハードルは高い。基礎の診断・補強を必要不可欠とすると、改修がさらに進まないおそれもある。建築主の負担による補強工事では、崩壊のおそれや補強効果を明確にすることが重要であるが、一体の基礎であれば液状化等で傾斜が生じて容易に崩壊しないとする考えもある。現在、耐震診断・改修が進みつつある建物でも、液状化を別途扱いとしている例が少なくない。基礎の診断・補強がなされるケースは、重要構造物や歴史的建造物で、増改築や上部構造の耐震補強が実施される際に、液状化の検討が重要と判断された場合等に限られ、補強法は建物外周に地震力を負担する壁等を築造する方法や建物内部から施工可能な締固め・注入等の液状化対策である(口絵写真-2)。

人命への危害を考えると、不安定な崖近傍の住宅基礎や擁壁の補強が重要である。筆者は、関係機関の協力を得て、2007年に既存擁壁の実態調査を首都圏数ヶ所で行ったが、高い増積み・空積み・塀ブロックの土留めは数多く存在する。しかし、残余供用期間や建替への期待、さらには多大な補強費を考えると、改修には限界がある。この意味からすると、最近の宅地耐震を取り巻く社会情勢の変化に注目したい。国交省の宅地耐震化事業だけでなく、地方自治体でも擁壁等の改修のための助成制度が拡充しつつある。宅地の改修は、建築主に任せても容易にはかどらないことや擁壁の崩壊は前面道路など公共施設への影響が多いためか、被災していない既存不適格擁壁に対しても住宅本体を上回る助成金制度が導入されている横浜市は、擁壁等に対する既存の助成制度を拡充・統合し、2006年に『がけ地防災工事助成金制度』を設け、個人所有の土地で居住用の建物に被害が及ぶおそれがある敷地では、擁壁等の工事費の1/3

までの助成(上限は壁高2m超5m未満で200万円、5m以上で400万円)を実施しており、類似の制度が周辺に広がっている。宅地耐震化には、合理的な擁壁の補強方法の提示や住宅建設における既存不適格擁壁の扱いとその説明責任を明確にすることが必要であるが、既存不適格に対する居住者認識を高めることも重要である。建築主が求めれば技術の進歩が期待できるのが住宅建設であり、敷地の診断・補強の事例集や建築主の視点に立った手引き等の整備が今後必要である。

一方、重要施設では、大地震でも機能を喪失しない建築物への指向も増している。この方面の技術開発は法令の規定の外にあるが、市場競争のもとで性能設計が発揮できる。建物の機能維持(事業継続等)のためには、復旧範囲と費用・工期の検討も重要であり、建物だけでなく、周囲地盤(進入路の確保等)も併せて考える必要がある。事業継続等に関連して、地盤工学会関東支部では『BCP地盤改良委員会(Business Continuity Plan)(委員長 岸田隆夫)』が平成19年度から活動しており、建物機能が維持できる対策工の考え方を事例等に基づき検討している。

基礎の耐震設計・耐震補強が上部構造ほどに重視されない背景には、法令で二次設計を求めていることもあろうが、①一般建築物では一次設計を実施していない基礎でも大きな被害を受けた報告例が少ない(中越・能登半島・中越沖では報告例がほとんどない)、②地盤に起因する建物被害は基礎耐震の問題ではなく天災として受け止められがちである、などがあげられる。基礎の耐震診断・補強を促進するには、基礎の地震被害や補強⁸⁾の事例の公表が必要であり、診断・改修の指針類の整備とともに、個々の診断・補強技術の評価システムも重要である。

参 考 文 献

- 1) 建築物の耐震改修の促進に関する法律及び施行令等の解説, 監修: 住宅局建築指導課, ぎょうせい, 2006.
- 2) 田村昌仁: 建築基礎の耐震設計(建築基準法, 学会基礎指針等)の歴史, 現状および展望, 基礎工, pp. 6~15, 2007.
- 3) 2007年版建築物の構造関係技術基準解説書, 監修: 住宅局建築指導課・国総研・建築研究所・日本建築行政会議 編集: 日本建築センターほか, 2007.
- 4) 田村昌仁: 建築物の基礎および敷地の耐震診断と耐震改修, 基礎工, pp. 19~29, 2006.
- 5) 木造住宅の耐震診断と補強方法, 監修: 住宅局建築指導課, 財団法人日本建築防災協会, 2004.
- 6) 2001年改訂版既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準耐震改修設計指針同解説, 監修: 住宅局建築指導課, 財団法人日本建築防災協会, 2001.
- 7) 例えば, 丸岡正夫・山下 清・青木雅路ほか: 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, 1999.
- 8) 例えば, 伊勢本昇昭・金子 治: 歴史的建造物の保存・再生のための液状化対策実施例(横浜税関本関), 基礎工, Vol. 34, No. 4, pp. 62~64, 2006.

(原稿受理 2007.11.26)