

「地震力に対する建築物の基礎の設計指針」について再考する

(一社) 基礎構造研究会代表理事 杉村義広

旧建設省「地震力に対する建築物の基礎の設計指針」〔以下「指針」と記述とする。日本建築学会から「建築基礎構造設計指針」と同じ文字を用いた学術書が出ているが、それとは違った行政基準よりも格下の行政指針であることに注意〕は、周知と普及に努めるという観点からかなり慎重に作成されたという経緯がある。すなわち、1)最初ガリ刷り版で作成され、関連 5 団体〔日本建築士会連合会、日本建築士事務所協会連合会、構造家懇談会（現日本建築構造技術者協会）、日本基礎建設協会、鋼管杭協会、コンクリートポールパイル協会〕から意見を求めた〔1982.3〕、2)それらの意見を検討して印刷版が作成され、建築指導課長通達〔指指第 324 号（1984.9）別添として特定行政庁に配布された〔1984.9〕、3)それと同時に、設計例題を補足した印刷版が日本建築センターから発行された〔1984.9〕、4)日本建築センターから質問と回答を追加した第 2 版が発行された〔1985.1〕、5)さらに、第 3 版が日本建築センターから発行された〔1989.11〕などの過程をたどったのである。

これには、以下のような背景もある。新耐震設計法として建築基準法施行令改正（1981）の下敷きとなった建設省の総プロ「新耐震設計法の開発」研究の段階〔1972~1977〕では、一度は基礎も含めて検討されたのではあるが、上部構造と比較して格段に遅れているということで「基礎は資料を収集することに徹する」との理由で見送られていた。しかし、宮城県沖地震（1978）の際に仙台市で PC 杭〔したがってその後に開発された PHC 杭も含めて考えることにしたが〕の杭頭せん断破壊で支持力を失うほどの損傷例が生じたことが行政的にも見過ごせないとなって、急遽基礎の耐震設計についても検討することになり、建築技術審査委員会建築基礎検討小委員会が設置され〔1979、筆者はその下部組織の作業部会のまとめ役を担当した〕、指針の作成作業が開始されることになった。その結果、1 次設計ならば可能であるということで指針作成に至ったのである。この間の歴史的流れを主要な地震との関係などととも表 1 に示す。

指針の背景と根拠を明確に残すために、雑誌建築技術に解説文 2 編〔杉村義広：地震力に対する建築物の基礎の設計指針-その背景と根拠-その 1、建築技術、No. 402、pp. 135-142、1985.2 と、杉村義広：地震力に対する建築物の基礎の設計指針-その背景と根拠-その 2、建築技術、

表 1：指針作成の歴史的背景

地震および主要な被害	くいの JIS	告示、通達、規準等
	R C ぐい (1955) S P ぐい (1963)	学会鋼杭規準 (1963)
新潟地震 (1964) 液状化、ぐい破損		
十勝沖地震 (1968) 盛土崩壊、ぐい破損	P C ぐい (1968)	
伊豆半島沖地震 (1974) 地すべり、断層 伊豆大島近海地震 (1978) 地すべり、断層		杭体の許容応力度通達 (1969) オートクレーブ杭通達 (1969) 大臣告示第 111 号 (1971) 学会基礎規準 (1974) 負の摩擦力通達 (1975)
宮城県沖地震 (1978) ぐい破壊、盛土崩壊		
		基礎検討小委員会発足 (1979) 新耐震設計基準 (1981)
浦河沖地震 (1982) ぐい破損	PHC ぐい (1982)	耐震設計指針案 (1982)
日本海中部地震 (1983) 液状化、ぐい破損		
		耐震設計指針 (1984)

No. 403, pp. 143-152, 1985. 3] を書くとともに、日経アーキテクチャから依頼のあった主旨や内情を明らかにするための対談にも快諾することにした〔久徳敏治、杉村義広：基礎の耐震強化をどう図る、建設省「設計指針」の狙いとは…、日経アーキテクチャ、1985年1月14日号（No. 230）、pp. 14～21〕。

また、指針の補足の意味で重要な論文を2編発表した〔杉村義広：杭頭回転拘束度および杭長を考慮した杭の水平抵抗理論解、日本建築学会構造系論文報告集、第365号、pp. 132-143, 1986. 7と、杉村義広、平出 務：高強度プレストレストコンクリート杭とフーチング接合部の回転拘束度および破壊耐力に関する実験的研究、日本建築学会構造系論文報告集、第373号、pp. 111-120, 1987. 3〕。第1の論文は、指針が地盤反力係数一様な地盤で長い杭〔 $BL \geq 3.0$ 〕の理論解を示しているのに対して、将来的にはより一般的な場合の理論解も必要になるだろうことを想定して提案したものである。杭長は有限の場合を考えて、杭先端の境界条件は固定（打込み杭を想定）、ピン（場所打ちコンクリート杭や埋込み杭を想定）、自由（摩擦杭を想定）の3ケースとした。杭先端までの全長に対しての解を求めることになると、慣用的に使っていた曲げモーメントに対する“杭頭固定度”はもはや適切な言い方ではなくなるので、構造力学上正当な“杭頭回転拘束度”に換えている。これにより指針ではカバーしきれないケースに対しても対応出来る機会を多くした。

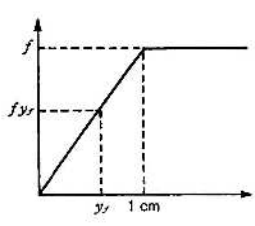
第2の論文は、現状で使われることの多い3種類の杭頭接合法を用いたPC（PHC）杭に対して、曲げせん断を与える載荷方式による実験〔杭径と軸力条件を変えた多数の試験体とした〕を行い、宮城県沖地震（1978）による被害様相を考察するとともに、杭体の短期の許容応力度レベルに達した時の杭頭回転拘束度を求めて設計への支援資料としてまとめた。

指針は最終的に日本建築センターから発行されたので“センター指針”と誤解されてしまったが、かなり多くの人々から参照されたようである。そうした時に、本省住宅局建築指導課に呼ばれて指針を行政基準に格上げすることについて意見を求められたことがある。その際に、ほかの所はそれなりに検討してあるので問題はないが、地下根入れによる杭頭の水平力の低減については設計上必要に迫られて作ったけれども学術的には問題点が残っていることと、設計に関わる事柄は設計者の自由裁量に任せるべきであるとのそもそも論を併せて述べ、基準への格上げは反対であるとの意思表示をした〔この点については反対しておいてよかったと今でも思っているが、一方で“あるいは賛成して技術基準にしておいた方がよかったか”との思いも生じることがあるようになったことは後述する〕。

この水平力の低減については、前述した建築技術の解説文に詳しく書いたが、震度法では地下がある場合は地下への地震力が累加されるので、地下がない〔すなわち1階で支持する〕場合よりも大きな水平力が杭に作用することになってしまう。それは矛盾ではないかという点が作業部会で問題となり、かなり長い間議論された。地下部分と地盤との動的相互作用が考慮されていないための矛盾だという点は委員の誰もが気づいているが、ではどうするかになると未解明で解決策がないということで袋小路に入り込んでしまったのである。そうした中で大木紀通委員〔当時竹中技研主任研究員〕が手を上げ、何か方法を考えてみると言ってくれたのである。その主旨は表3に示すように、沈下を検討する際の式を縦にすれば根入れ部分の前面受働抵抗の評価に準用できるのではないかという点にある。かなり大胆な発想であり、委員の中には不満もあったのであるが、ほかにうまい方法もないということで全員が納得するに至り、

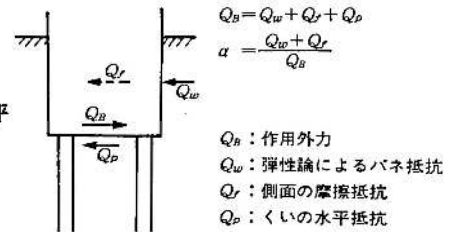
地下部分はその前面受働抵抗と地下側面の摩擦抵抗〔当時、地盤沈下による負の摩擦力も問題とされており、基礎スラブ底面には隙間が生じるという点が指摘されていたので、この指針でも地下ではあるが隙間が生じるおそれを考慮し

表3：根入れ部分の各抵抗要素の設定条件

前面受働抵抗 Q_w	側面摩擦抵抗 Q_f	くいの水平抵抗 Q_p
$Q_w = k_w A_w y_w$ $= \frac{\pi E A_w y_w}{2L(1-\mu^2)}$ $\times \left[m \cdot \log_e \frac{1+\sqrt{m^2+1}}{m} + \log_e(m+\sqrt{m^2+1}) \right]^{-1}$ <p> A_w：根入れ前面の面積 y_w：変位量 E：地盤の変形係数 砂：$E=7.7(N+26)\text{kg/cm}^2$ N：平均 N 値 粘土：$E=105q_u\text{kg/cm}^2$ q_u：一軸圧縮強さ L：根入れ前面の短辺 μ：ポアソン比 m：根入れ前面の長辺/短辺比 なお、最大受働抵抗土圧 $Q_{w\max}$ は下記の値とする 砂：$Q_{w\max}=Kp\gamma z$ $Kp=(1+\sin\phi)/(1-\sin\phi)$ 粘土：$Q_{w\max}=q_u+\gamma z$ ϕ：内部摩擦角 γ：単位体積重量 z：深さ </p>	$Q_f = 2A_f f y_f \quad (y_f \leq 1\text{cm})$ $Q_f = 2A_f f \quad (y_f > 1\text{cm})$ <p> A_f：根入れ側面の面積 y_f：変位量 f：側面最大の摩擦力度の80%とする 砂：$f=0.8 \times N/50\text{kg/cm}^2$ 粘土：$f=0.8 \times q_u/2\text{kg/cm}^2$ N：N 値 q_u：一軸圧縮強さ </p> 	$Q_w < Q_{w\max}$ の範囲内において、 $Q_p = \frac{Q_B}{1 + \frac{\beta A_w(2f+k_w)}{nk_h B}} \quad (y_w \leq 1\text{cm})$ $Q_p = \frac{Q_B - 2fA_w}{1 + \frac{\beta A_w k_w}{nk_h B}} \quad (y_w > 1\text{cm})$ <p> ただし、くい頭固定とした場合のくい頭変位 $y_p = \frac{\beta Q_p}{nk_h B}, \quad \beta = \sqrt{\frac{k_h B}{4EI}}$ n：くい本数 B：くいの直径 k_h：水平地盤反力係数 EI：くいの曲げ剛性を算出し、 $y_w = y_f = y_p, A_w = A_f$ の条件で解いたもの </p>

て底面の摩擦は無視することにした〕からなり、それに杭の水平抵抗分を加えたものが抵抗力として設計水平外力と釣り合っているとしたのである〔図5参照〕。すなわち、根入れ部の水平力分担率を α とすれば図5

図5 根入れによる水平力低減の根拠



に示したように $\alpha = (Q_w + Q_f)/Q_B$ で表される値となる。この分担率は、それぞれの力成分を独立に評価しているの、同時性や変位の適合性は確保されていない欠点があることは承知の上で行った提案と言える。

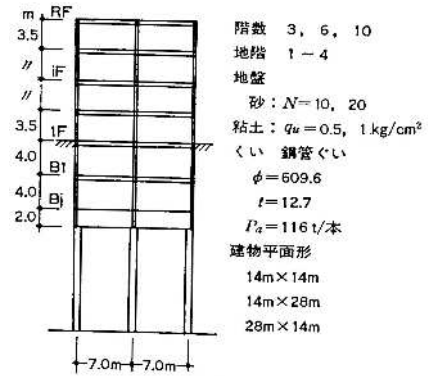


図6 試算例題

計算例としては、図6に示すように N 値 10 と 20 の砂地盤 2 種類と $q_u = 0.5, 1\text{kg/cm}^2$ の粘土地盤 2 種類で平面形を 14m×14m、14m×28m、28m×14m の 3 種類、階数を 3、6、10、地階 1~4 を持つ建物が、直径 609.6mm、肉厚 12.7mm の鋼管杭 (116t/本) の支持杭で支える場合を想定している。

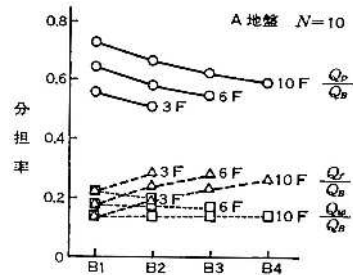


図7 数値計算結果の一例 (平面形 14m×14m の場合)

したがって根入れ部の分担率 α は増加するが、前面受働抵抗の変化が少ないことから側面の摩擦抵抗の効果が大きいくともわかる。

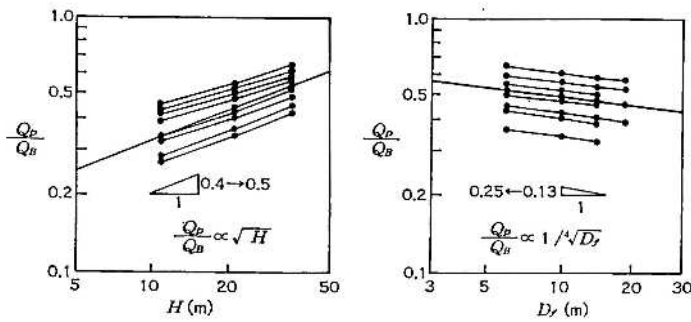


図8 くい分担率 $\frac{Q_p}{Q_B}$ と H または D_f との関係

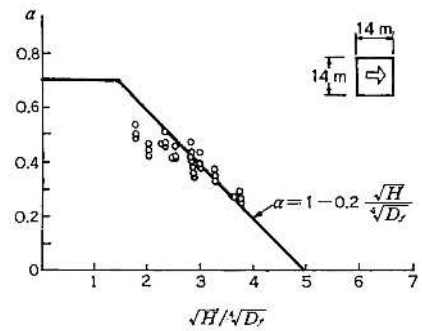


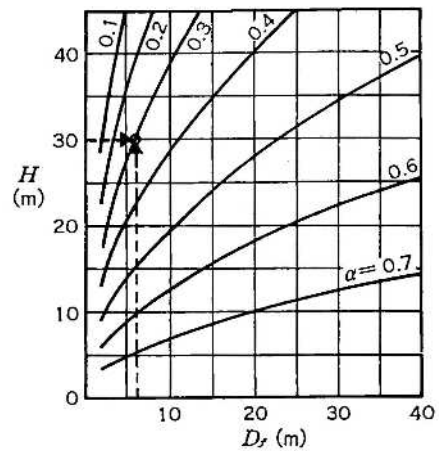
図9 根入れ部の水平分担率 α

次に、杭の分担率 Q_p/Q_B が上部構造の高さ H と根入れ深さ D_f に対してどのような関係にあるかを調べた結果を図8に示す。高さ H に対しては \sqrt{H} に比例、根入れ深さ D_f に対しては $\sqrt{D_f}$ に逆比例の関係に近似できそうであることから、これらの関係を組み合わせて根入れ部の水平分担率 α との関係を調べてみると、図9に示すような式（指針では本文(1)式と表現し、 $D_f \geq 2m$ の場合に適用出来るとしている）で表されることがわかった〔右下がり勾配0.2の線が杭の分担率であるので、根入れ部の分担率は全体の1から杭の分担率を引いたものになる。ここでは、根入れ部の分担率は最大でも0.7までで頭打ちとし、杭には少なくとも3割は負担して計算することにし

た〕。

高さ H と根入れ深さ D_f の組み合わせに対して、この式による根入れ部の分担率がどのようになるかを図4に示す。図では10階建てで地下1階を有する建物〔高さ H は30m程度、根入れ深さ D_f は6m程度〕を想定して黒点で示しているが、 α は0.3となり、杭頭の水平力はそれを低減した7割の水

図4 根入れによる水平力低減率 α の値



平力を杭に作用させて設計すればよいという関係になっている。これは親委員会（建築技術審査委員会建築基礎検討委員会）で審議した時に大崎順彦委員長が「地下室1階あたり〇〇割低減するといった表現でもよいのではないかと発言したことに対する回答でもあり、単にそう書くよりは何かの検討結果として示したいとの作業部会意思表示でもあったのである。

計算例は10階までであったが、図4は高さ、根入れ深さとも40mまで示している。これは超高層まで広げるのは行き過ぎであるが、14～15階建てまでなら適用してもよいのではないかと考えたからである。根入れ深さについては、地下階はなるべく多くしたいとの考えが作業部会の意向であった現れである。

以上のように地下の根入れによる杭への水平力低減については、学術的には未解明である点を承知の上で、地盤と地下室の動的相互作用を心に浮かべながら種々の仮定を組み合わせ作り上げたこと、その一方で現実の建物を想像しながら適用のサジ加減にも気をつかったことがおわかりいただけたらう。しかし、学術的には未解明という点は最後までついてまわり、とくに液状化が起こった場合はどうなるのかが作業部会で最大の問題点とされた。液状化が起きれば、むしろ地盤が地下階に対して外力側に作用するのではないかの疑問が多かったのである。また、根入れによる杭水平力低減だけでなく、指針で提案している杭の水平抵抗計算式も使えなくなる心配があることが指摘されていたものである。そのことがあったので、1次設計に適用することのほかに「液状化、地すべり、地盤面の沈下等、地震時に地盤変動が生じるおそれのある場合には、これらについての安全性の検討を別途に行い、かつ必要に応じて対策を講ずることとする」という内容を1

表2：1章 総則

<p>構造安全性：上部構造と同等もしくはそれ以上の安全性を保持 地盤変動は、別途に検討かつ対策（液状化、地すべり、沈下）</p> <p>適用範囲：1次設計の基礎の対応に適用</p> <p>適用除外：1) 小規模な建物（個人住宅） 2) 特別な実験・解析</p>

章総則に明記することにした〔表2参照〕。ここで使われている「地盤変動」については、少し説明しておきたい点がある。地盤が崩壊することなどが起こった後の状態を表す場合は「地盤変状」が適切であるが、被害が生じている最中の現象としては「地盤変動」の言葉の方が適切であるという点である。指針作成作業時点では、この違いについてかなり慎重に考えていたので厳密に使い分けていたことが思い出される。

この地盤変動が生じた場合は別途に検討とした構造安全性についての記述は重要であり、これを読み落として〔あるいは無視したのかも知れないが〕、“指針の(1)式は液状化地盤では使えない”と日本建築学会の席で声だかに主張する人がいたと聞いたことがある。研究者の中にも不注意な人がいるのかと改めて驚くとともに、この程度の表現では周知には不足でもっとあからさまに書かないと効果は期待できないのかと反省したものである。その観点からも前述の“指針を行政基準にした方がよかったのか”との思いが沸き起こって来るのである。指針を基準にしなかったことで問題点を暗闇の中に曖昧のまま残してしまったが、基準に格上げして明記しておいた方が〔当然ながら、地盤変状が生じる場合は適用外であり、それ以外に適用する場合の(1)式は“未解明な学術的内容ではあるが、設計上の工夫として示した”と特記されるので〕、学术界、実務界の両方へ意識の喚起、すなわち根入れ部と地盤の動的相互作用の早期解明への努力を促すことになったのではないかと思われるからである。この稿を書いてきた主旨はこの点にある。