

随想

建築基礎構造の設計支持力に関する雑感

広島大学 名誉教授 富永 晃司



1. はじめに

わが国の建築基礎構造の設計に関する最初の図書「建築基礎構造設計規準」(以降、学会規準と呼称)が、1952年に日本建築学会から発刊されて約65年が経過する。

初版の学会規準は、“当時わが国の建築界では基礎構造の研究者はきわめて限られており、地盤の科学的調査や土質力学の普及も微々たるものであったので、その規準も主として諸外国のそれを基とし、それまでのわが国の慣習や経験とさらに若干の結果を加味した程度”(学会規準1960年版「序」¹⁾より)の背景により作成されている。その後、“研究者の急増、わが国独自の研究成果の蓄積、地盤調査法の進歩、それに基づく基礎構造理論のとり入れ”など、わが国の建築基礎構造の急速な進歩に伴う2回の改定が、1960年²⁾と1974年³⁾になされている。

一方、1988年には“地盤に関する設計は、設計者の考へに委ねられる要素が多く、機械的計算法を示す「規準」より、工学的判断のよりどころとなる「指針」が求められている”との主旨により「建築基礎構造設計指針」⁴⁾(以降、旧指針と呼称)と書名を変えた改訂がなされている。さらに、2001年に“安全率を使用していた仕様設計から、要求性能を満足させる性能設計”を目指し、限界状態を取り入れた設計法—すなわち、『各基礎の設計においては、沈下(変形)を求めることを原則とする』⁵⁾—へと大改訂(以降、現指針と呼称)され、現在に至っている。そして、日本建築学会では、次の改訂に向けた作業を現在鋭意進めていると聞いている。

本誌の「随想」として、上記図書の変遷を踏まえながら、建築基礎構造における設計法について、直接基礎の設計法を例として日頃から抱いている雑感を紹介する。筆者の雑感であるので、読まれた方からお叱りを受けるような記述や思い違いの記述などがあることをご容赦願いたい。

2. 直接基礎の支持力式

前述した学会規準や指針の直接基礎における鉛直支持力度、あるいは国交告示第1113号⁶⁾(以降、国交告示と呼称)における地盤の許容応力度の基となる極限支持力度 q_d は、無限の長さをもつ連続基礎(平面問題)を想定した、式(1)に示すTerzaghiの支持力式が基本²⁾となる。

$$q_d = c \cdot N_c + p_v \cdot N_q + (1/2) \cdot \gamma \cdot B \cdot N_\gamma \quad (1)$$

ここに、 c = 地盤の粘着力、 p_v = 基礎底面より上部の土被り圧(図-1参照)、 γ = 地盤の単位体積重量、 B = 基礎幅、 N_c 、 N_q 、 N_γ = 支持力係数(内部摩擦角 ϕ の関数)

すなわち、学会規準や指針あるいは国交告示における直接基礎の支持力式の違いは、支持力係数が異なることにある。したがって、教科書的になるが、改めて支持力係数の誘導過程を以下に示す。ただし紙面の都合上、記号の説明は省略したので、各図を参照されたい。

Mohr-Coulombの破壊基準に基づき土の自重を無視したモデルとして、図-1に示す圧縮弾性域(領域I)、中心点Dの対数ら線域(領域II)およびRankine受働域(領域III)を考える。なお、領域Iの基礎底面と滑り面との角度を ω とし、後述の支持力係数の違いを説明する。

支持力係数 N_c 、 N_q に関しては、まず領域Iにおける鉛直方向力の釣り合いから、次式が導かれる(図-2参照)。

$$q_d = p_v \cdot \cos(\omega - \phi) / \cos \omega + c \cdot \tan \omega \quad (2)$$

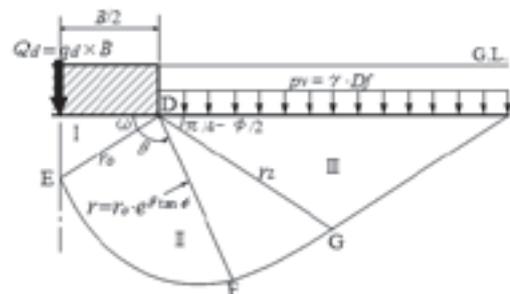


図-1 直接基礎の極限支持力算定用モデル

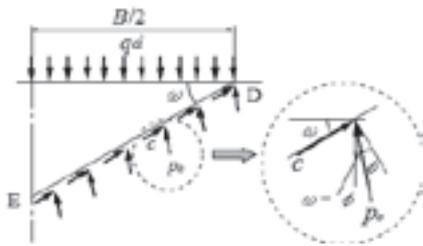


図-2 領域Iにおける力の釣り合い

$$q_d = \frac{\cos(\omega - \phi)}{\sin \phi \cdot \cos \omega} \cdot \left\{ (1 + \sin \phi) \cdot e^{(3\pi/2 + \phi - 2\omega) \tan \phi} - 1 + \frac{\sin \phi \cdot \sin \omega}{\cos(\omega - \phi)} \right\} \cdot c + \frac{\cos(\omega - \phi) \cdot \cos \phi}{(1 - \sin \phi) \cdot \cos \omega} \cdot e^{(3\pi/2 + \phi - 2\omega) \tan \phi} \cdot p_v \quad (6)$$

上式の p_v 、 c の係数項が式(1)の N_q 、 N_c に対応し、それぞれ式(7)および式(8)で表される。

$$N_q = \frac{\cos(\omega - \phi) \cdot \cos \phi}{(1 - \sin \phi) \cdot \cos \omega} \cdot e^{(3\pi/2 + \phi - 2\omega) \tan \phi} \quad (7)$$

$$N_c = (N_q - 1) \cdot \cot \phi \quad (8)$$

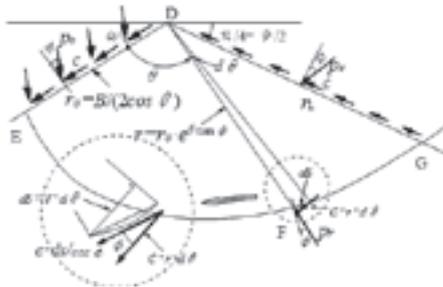


図-3 領域IIにおける点D回りのモーメント

一方、式(1)の N_γ は、図-1の領域II、IIIにおける土自重の抵抗により領域Iに作用する p_o の最小合力で決まる。この最小値を直接求める解析解は無く、数値解による対数ら線の最適中心を求める方法がある。 N_γ の式としては、Meyerhofによる次式が一般に採用されている⁵⁾。

$$N_\gamma = (N_q - 1) \cdot \cot(1.4\phi) \quad (9)$$

なお、上述の支持力係数は、図-1の滑り面が一気に発生する全般せん断破壊を想定したものである。これに対して応力～ひずみ関係に明確なピークが得られない地盤では、局部せん断破壊が想定される。この状態に対して、Terzaghi & Peckは $\tan \phi' \approx \tan(2/3 \cdot \phi)$ および $c' \approx 2/3 \cdot c$ を仮定することによって、支持力が得られる⁷⁾としている。

最後に、上述のように各支持力係数は、土の自重を「無視」、あるいは「考慮」と相違するモデルで誘導されている。したがって、支持力式(1)は「重畳の理」を仮定した近似的算定法と、Terzaghi & Peckは記述している⁷⁾。

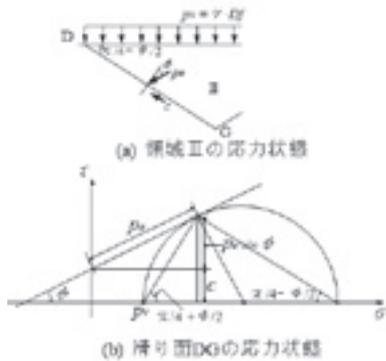


図-4 領域IIIの滑り面DGにおける応力状態

ついで、図-3に示す領域IIでは、滑り面DEから角度 θ 進んだ半径 r を図中の対数ら線式で表わせば、線上の合応力 p_r は点Dに向うので、点D回りモーメントの釣合は式(3)となる。積分を実行して $r_L = r_o \cdot e^{3\pi/4 + \phi/2 - \omega}$ とおけば、反力 p_o は式(4)で表される。

$$r_o^2 \cdot p_o \cos \phi / 2 = \int_0^{3\pi/4 + \phi/2 - \omega} c \cdot r_o^2 \cdot e^{2\theta \tan \phi} d\theta + p_e \cdot \cos \phi \cdot r_L^2 / 2 \quad (3)$$

$$p_o = c \cdot (e^{(3\pi/2 + \phi - 2\omega) \tan \phi} - 1) / \sin \phi + p_e \cdot e^{(3\pi/2 + \phi - 2\omega) \tan \phi} \quad (4)$$

さらに、領域IIIの滑り面DG上はRankineの受働せん断応力状態にあるので、次式が成立する(図-4参照)。

$$p_e = \frac{\cos \phi}{1 - \sin \phi} \cdot p_v + c \quad (5)$$

上式の p_e を式(4)に代入した p_o を式(2)に与えれば、極限支持力 q_d は、次式で表される。

3. 旧指針までと現指針での支持力式の相違

前章の支持力係数は、基礎底面と滑り面との角度を ω (図-1) とした結果であり、設計ではこの角度を規定する必要がある。Terzaghiは、基礎底面の状態を考慮して $\omega = \phi$ とおき、領域Iの p_o が q_d と同じ鉛直を向くことより、式(7)に対して次式の N_q を示している⁸⁾。

$$N_q = \frac{1}{(1 - \sin \phi)} \cdot e^{(3\pi/2 - \phi) \tan \phi} \quad (10)$$

ここに、Terzaghiによる全般せん断破壊と局部せん断破壊を想定した ϕ に対する各支持力係数として、式(8)～式(10)の計算値を表-1中に示しておく。

学会規準から旧指針までの各支持力係数は、全般と局部せん断破壊とを考慮した式が採用されている(表-1参照)。ただし、両せん断破壊を取り入れるため、下記の修正を行っていることが、文献2)～4)から推測できる。

表-1 支持力係数の比較

φ (度)	Terzaghiの全般せん断破壊			Terzaghiの局部せん断破壊			日本建築学会規準と旧指針			日本建築学会現指針・告示		
	N _c	N _q	N _r	N _c	N _q	N _r	N _c	N _q	N _r	N _c	N _q	N _r
0	5.7	1.0	0.0	5.7	1.0	0.0	5.3	3.0	0.0	5.1	1.0	0.0
5	7.3	1.6	0.1	6.7	1.4	0.0	5.3	3.4	0.0	6.5	1.6	0.1
10	9.6	2.7	0.4	8.0	1.9	0.2	5.3	3.9	0.0	8.3	2.5	0.4
15	12.9	4.4	1.3	9.7	2.7	0.4	6.5	4.7	1.2	11.0	3.9	1.1
20	17.7	7.4	3.4	11.8	3.9	1.0	7.9	5.9	2.0	14.8	6.4	2.9
25	25.1	12.7	8.2	14.8	5.6	2.1	9.9	7.6	3.3	20.7	10.7	6.8
28	31.6	17.8	13.7	17.1	7.1	3.1	11.4	9.1	4.4	25.8	14.7	11.2
32	44.0	28.5	27.3	21.2	9.8	5.4	20.9	16.1	10.6	35.5	23.2	22.0
36	63.5	47.2	55.8	26.8	14.0	9.5	42.2	33.6	30.5	50.6	37.8	44.4
40	95.7	81.3	119.0	34.9	20.5	16.9	95.7	83.2	114.0	75.3	64.2	93.7

- 1) N_c, N_q, N_r : φに対して局部から全般に至るせん断破壊を1つの曲線で表すために、φ ≤ 28°で局部せん断破壊およびφ = 40°で全般せん断破壊とおき、その間を補間した1本の曲線で表す。
- 2) N_c, N_q, N_r : φ ≥ 40°ではφの微増により支持力係数が急増するため、φ ≥ 40°で一定値とする。
- 3) N_c, N_r : 小さなφに関して、φ ≤ 13°でN_r = 0、および純粋粘土 (φ = 0°) の载荷試験や理論でq_d = 5.14c ~ 5.70cとなるためφ ≤ 10°でN_c = 5.3とする。
- 4) N_q : 基礎底面までの排土重量は建物荷重から低減できるので、土被り圧p_vの係数は長期安全率3を考慮したN_q = (TerzaghiのN_q) + 2²⁾とする(表-1薄墨部)。一方、現指針ではωを主働せん断角 (π/4 + φ/2) とおき、式(7)に対するN_qとして式(11)を採用している⁵⁾。

$$N_q = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \cdot c \cdot e^{\pi \cdot \tan \phi} \quad (11)$$

ここに、式(8)、式(9)および式(11)による各支持力係数値を表-1に、また各支持力係数の現指針値を旧指針値で除算した比(以降、現旧比と呼称)を図-5に示す。この図から、以下の現指針と旧指針との相違が読み取れる。

- 1) φ ≥ 40°で、現旧比 ≒ 0.8倍
- 2) φ < 37°で、N_c, N_rの現旧比 > 1.0倍
- 3) 18° < φ < 37°で、N_qの現旧比 > 1.0倍
- 4) 旧指針の局部せん断破壊からの変化点であるφ = 28°で、現旧比N_c = 2.3倍、N_q = 1.6倍、N_r = 2.5倍

4. おわりに

直接基礎の支持力式について、日本建築学会の旧指針までと現指針の基本的な相違について説明した。その相違の一つは、“はじめに”で書いたように、「安全率を使用していた仕様設計から限界状態を取り入れた性能設計へ」と設計思想を変更したことにある。これらのことを踏まえ、筆者の抱いている雑感(疑念)を以下に記す。

- 1) 直接基礎のせん断破壊理論に基づく極限支持力式は、大規模建築物のベタ基礎に適用可能だろうか？

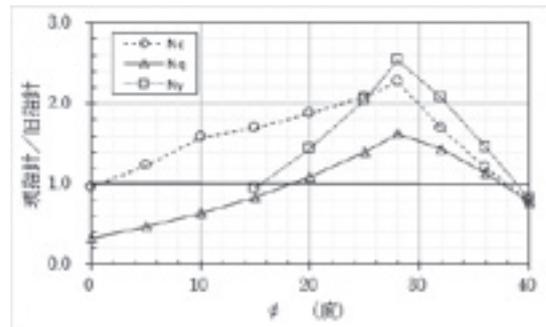


図-5 支持力係数比(現指針/旧指針)

- 2) 最大寸法が幾らまでの基礎盤で载荷試験の極限支持力が確認されているのだろうか？また、試験による極限支持力をどのような基準で判定しているのだろうか？
- 3) 前章4) N_qの考えに立つと、許容応力度法による国交告示の支持力係数値⁶⁾が、限界状態設計法を取り入れた現指針の係数値⁵⁾と同じ(表-1)で良いだろうか？
上記の筆者の雑感(疑念)に対して、現指針の“各基礎の設計においては、沈下(変形)を求めることを原則とした”を“沈下計算ができる基礎では、必ず沈下(変形)を求める”へと改定することが必要ではと思っている。

[参考文献] (学会規準・指針の日本建築学会編は省略)

- 1) 「建築基礎構造設計規準・同解説」序, 1960.
- 2) 「建築基礎構造設計規準・同解説」pp.99-108, 1960.
- 3) 「建築基礎構造設計規準・同解説」pp.111-119, 1974.
- 4) 「建築基礎構造設計指針」pp.119-123, 1988.
- 5) 「建築基礎構造設計指針」pp.105-116, 2001.
- 6) 国土交通省国土技術政策総合研究所、国立研究開発法人建築研究所監修「2015年版建築物の構造関係技術基準解説書」pp.558-562, 2015.
- 7) K.Terzaghi & R.B.Peck “Soil Mechanics in Engineering Practice 2nd Edition”, pp.161-173, 1967.
- 8) 山口柏樹:「土質力学」, 技報堂, pp.267-271, 1982.