

# 荷重と地盤の傾斜を考慮した直接基礎の支持力式 —地震時支持力特性の検討—

前田良刀<sup>1</sup>・落合英俊<sup>2</sup>・横田康行<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 九州共立大学教授 工学部土木工学科(〒807-8585北九州市八幡西区自由が丘1-8)

E-mail:maeda@kyukyo-u.ac.jp

<sup>2</sup>フェロー会員 工博 九州大学大学院教授 建設デザイン部門(〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

<sup>3</sup>正会員 工修 大分県宇佐土木事務所(〒879-0454 大分県宇佐市法鏡寺235-1)

本文は、震度法による力学モデルと塑性論の上界定理に基礎をおく速度場法を用いて、直接基礎の支持力特性を検討したものである。本文で想定した破壊メカニズムをもとに、荷重と地盤の傾斜を同時に考慮できる汎用性のある直接基礎の支持力式を提案した。そして、荷重の傾斜と地盤の傾斜が支持力に与える影響について考察した。これから、荷重傾斜角が支持力に与える影響は従来の研究と同様の傾向を示すが、水平震度が大きくなると荷重傾斜角の影響が無視できなくなることを示した。このため、現行の設計実務で用いられている直接基礎の支持力式は水平震度が小さい領域では問題とならないが、水平震度が大きくなると支持力を過大評価する可能性を指摘した。

**Key Words** : spread foundation ,shallow foundation, bearing capacity, seismic coefficient method, inclined load, admissible velocity field method ,limit analysis, upper-bound

## 1. まえがき

地震時に発生する慣性力は一般に時間と場所により変化するが、基礎の支持地盤中に地震時慣性力が一様に作用していると仮定すると、地盤を慣性力の程度(震度法では震度)に対応して傾斜させることにより、等価な力学モデルを作り出せることが知られている。物部・岡部<sup>1)2)</sup>の地震時土圧公式はその代表的なものである。さらに近年では大地震時の主働土圧にもこの考え方を発展的に利用することが研究されている<sup>3)</sup>。

一方、直接基礎の地震時支持力問題は上部構造による慣性力の影響のみを考慮して荷重を傾斜させたものが一般的である。これは、支持力に与える慣性力の影響は上部構造によるものが支配的で支持地盤の影響は比較的小さいとされていることによる<sup>4)</sup>。ただし、これは地震時水平震度が、 $K_H=0.2$ 程度の比較的小さい震度法<sup>5)</sup>レベルの領域であると考えられ、支持地盤の影響が実務的に無視できる水平震度の適用範囲は検討されていない。近年の大地震の経験から基礎の耐震設計の流れは、従来からの中小地震と極めて稀に生じる大地震に対する二段階の安全性を照査する性能規定型設計法へと移行しつつある。このため、上部構造の慣性力のほかに支持地盤が受ける慣性力が基礎の支持力に与える影響に関する検討は非常

に重要なテーマと考えられる。

支持地盤に慣性力を考慮すると斜面中の直接基礎の支持力問題となり、これに関する既往の理論的研究として、応力曲線特性法による山口ら<sup>6)</sup>、極限釣合法による勝見・森本<sup>7)</sup>および覆ら<sup>8)</sup>の研究があるが、荷重は鉛直方向か、または斜面に垂直方向に限定されている。

本文では、極めて稀に生じるような大地震時においても現行の支持地盤の傾斜の影響を無視する考え方が適用できるかどうかを検討するため、震度法による力学モデルを利用して、荷重と地盤の傾斜を考慮した汎用性のある支持力式を提案し、それらが支持力に与える影響について考察するとともに既存の実務に適用されている方法と比較する。ただし、ここでは水平震度の影響のみ考慮し、鉛直震度の影響は無視している。

なお、本文では支持力式の導入に塑性論の上界定理に基礎をおく速度場法を用いる。一般の極限釣合法では荷重や地盤の傾斜および地盤自重の有無と想定するすべり面が合理的に対応せず、本文のような複数の境界条件下の支持力問題を検討するには限界がある。一方、速度場法では作用荷重と地盤自重による外力仕事と地盤内部での消散エネルギーを等値して支持力が得られるが、運動学的に可容な速度場が得られると様々な境界条件を反映したすべり面の変化に対応して支持力が得られるため

この種の計算には有利な方法と考えられる。なお、本文での速度場法では土の降伏条件をモール・クーロンの破壊基準、塑性流れの適合性として関連流れ則 ( $v = \phi$ ) を仮定する。

## 2. 速度場法による直接基礎の支持力式

### (1) 荷重と地盤の傾斜を考慮した破壊メカニズムと支持力式

支持地盤中の慣性力が一様で、かつ地盤の破壊は上部構造の慣性力が最大となる時点における水平震度で地盤の破壊が支配される場合の等価な力学モデルを図-1に示す。地盤は地震動の入力方向と反対に慣性力を受ける傾斜地盤として扱うことができる。このような条件下では、図-2に示す直接基礎の破壊メカニズムが得られる。ここで、 $ab, cd$ 間は直線、 $bc$ 間是对数らせんと仮定している。これにより、荷重と地盤の傾斜を同時に考慮した支持力が求められる。

ここで、上部構造による荷重傾斜角  $\theta$  と地盤傾斜角  $\beta$  は入力地震動に対する応答の程度 (振動モード、応答倍率、など) により異なる。重力加速度を  $g$ 、上部構造と地盤の応答加速度をそれぞれ、 $\alpha_s, \alpha_f$  とすると、荷重と地盤の傾斜は次式で示される。

$$\tan \theta = \alpha_s / g \quad (1)$$

$$\tan \beta = \alpha_f / g \quad (2)$$

なお、上式で  $\alpha_s = \alpha_f$  の場合は、上部構造と支持地盤の応答が等しく、 $\theta = \beta$  となる。

図-2の破壊メカニズムにおいて、内部消散エネルギーと外力仕事を等値として支持力の上界値を求めるが、荷重の極小値を与える主働くさび角  $\psi$  および遷移領域角  $\omega_j$  が得られれば、そのときの支持力が上界値を与える。

#### a) 可容速度場の条件

傾斜外力と主働くさび  $oab$  の関係は、傾斜外力と外力作用方向の変位ベクトル  $V_0$  により外力仕事がなされるものの、基礎の変位方向は外力の作用方向に支配されず、 $V_\delta$  の方向に変位可能である。ここで、 $V_0$  と  $V_\delta$  の関係は式(3)で示される。なお、図-2における各速度の定義は以下のとおりである。

$V_0$  : 外力作用方向の変位速度

$V_\delta$  : 基礎の変位速度

$V_1$  :  $oab$  領域における変位速度

$V$  :  $obc$  領域における変位速度

$V_2$  :  $ocd$  領域における変位速度

$$V_0 = V_\delta \cos(\delta - \theta) \quad (3)$$

ここで、基礎底面と  $oa$  面は重ならず常に接している必

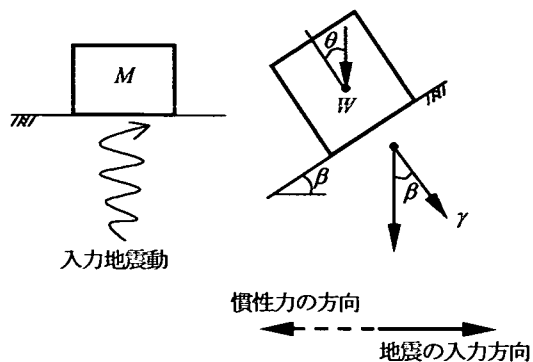
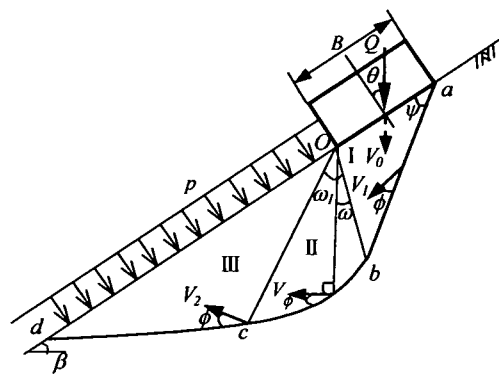
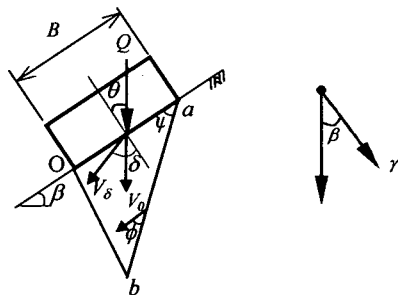


図-1 地震動の入力と等価な力学モデル



(a) 全体破壊メカニズム



(b) 傾斜外力と主働くさび  $oab$  の関係

図-2 荷重と地盤の傾斜を考慮した破壊メカニズム ( $\theta \neq 0, \beta \neq 0$ )

要があるので、次の2式が成立しなければならない。

$$V_\delta \cos \delta = V_1 \sin(\psi - \phi) \quad (4)$$

$$V_\delta \sin \delta \geq V_1 \cos(\psi - \phi) \quad (5)$$

式(4)を(5)に代入して次式が得られる。

$$\tan \delta \cdot \tan(\psi - \phi) \geq 1 \quad (6)$$

本文では、基礎が滑動せず地盤と一体的に挙動すると仮

定すると次式となる。

$$\tan \delta \cdot \tan(\psi - \phi) = 1 \quad (7)$$

$$V_1 = V_\delta \cdot \frac{\cos \delta}{\sin(\psi - \phi)} \quad (8)$$

これにより、式(7)、(8)からある主働さび角 $\psi$ のとき基礎の変位方向ベクトル $V_\delta$ が知れる。

遷移領域(abc: II領域)における連続条件は、図-2を参考に、次式で表される。

$$V = \frac{\cos \delta \exp(\omega \tan \phi)}{\sin(\psi - \phi)} V_\delta \quad (9)$$

受働土圧領域(III領域)における連続条件についても、図-2を参考に、次式で表される。

$$V_2 = \frac{\cos \delta \exp(\omega_1 \tan \phi)}{\sin(\psi - \phi)} V_\delta \quad (10)$$

#### b) 内部消散エネルギーの計算

内部消散エネルギーは、図-2において直線部については粘着力に速度の不連続量を乗じて、遷移領域についてはさらに内部領域での消散エネルギーを加えることで計算できる<sup>9)</sup>。式(11)~(13)にそれぞれ ab 間、abc 間、cd 間の内部消散エネルギーを、式(14)に全内部消散エネルギーを示す。

$$E_{ab} = cBV_\delta \frac{\cos \delta}{\tan(\psi - \phi)} \quad (11)$$

$$E_{abc} = cBV_\delta \frac{\sin \psi \cos \delta}{\sin \phi \sin(\psi - \phi)} \{ \exp(2\omega_1 \tan \phi) - 1 \} \quad (12)$$

$$E_{cd} = cBV_\delta \frac{\sin \psi \cos \delta \exp(2\omega_1 \tan \phi)}{\sin(\psi - \phi)} \quad (13)$$

$$E_{total} = E_{ab} + E_{abc} + E_{cd} \quad (14)$$

#### c) 外力仕事の計算

外力仕事は、外力作用方向の仕事と地盤自身が重力方向になす仕事を合計して得られる。以下に、地盤自重による仕事と傾斜外力による仕事を示す。

地盤自重による仕事は、主働さび領域(I領域)、遷移領域(II領域)および受働土圧領域(III領域)に対して、それぞれ式(15)~(17)のように表される。

$$W_I = \frac{1}{2} \gamma B^2 V_\delta \frac{\sin \psi \cos \delta \sin(\beta + \psi - \phi)}{\cos \beta \cos \phi \tan(\psi - \phi)} \quad (15)$$

$$W_{II} = \frac{1}{2} \gamma B^2 V_\delta \frac{\sin^2 \psi \cos \delta}{\cos \beta \cos^2 \phi \sin(\psi - \phi)} I \quad (16)$$

$$I = \frac{1}{9 \tan^2 \phi + 1} \left[ \exp(3\omega_1 \tan \phi) \{ 3 \tan \phi \sin(\phi - \psi - \beta + \omega_1) - \cos(\phi - \psi - \beta + \omega_1) \} - \{ 3 \tan \phi \sin(\phi - \psi - \beta) - \cos(\phi - \psi - \beta) \} \right]$$

$$W_{III} = \frac{1}{2} \gamma B^2 V_\delta \cdot \exp(3\omega_1 \tan \phi) \frac{\sin^2 \psi \cos \delta \sin\left(\frac{\pi}{4} - \beta + \frac{\phi}{2}\right)}{\cos \beta \cos \phi \sin(\psi - \phi)} \quad (17)$$

傾斜荷重 $Q(q=Q/B)$ による外力仕事は外力の作用方向 $V_0$ に対して求められるが基礎の変位方向を考慮して次式で示す。

$$W_q = qBV_\delta \cos(\delta - \theta) \quad (18)$$

サーチャージ荷重 $p$ による外力仕事は外力の作用方向 $V_2$ に対して次式にて求められる。

$$W_p = -pV_\delta \frac{2B \exp(2\omega_1 \tan \phi) \sin \psi \cos \delta \cos^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}\right)}{\cos \phi \sin(\psi - \phi)} \quad (19)$$

式(15)~(19)より、全外力仕事は次式のように表される。

$$W_{total} = W_I + W_{II} + W_{III} + W_q + W_p \quad (20)$$

#### d) 支持力式

傾斜荷重 $q$ は、式(14)と(20)を等値として、以下のような支持力式として表される。

$$q = cN_c + pN_q + \frac{1}{2} \gamma BN_\gamma \quad (21)$$

$$N_c = \frac{1}{\cos(\delta - \theta)} \times \left( \frac{\cos \delta}{\tan(\psi - \phi)} + \frac{\sin \psi \cos \delta \{ \exp(2\omega_1 \tan \phi) - 1 \}}{\sin \phi \sin(\psi - \phi)} + \frac{\sin \psi \cos \delta \exp(2\omega_1 \tan \phi)}{\sin(\psi - \phi)} \right) \quad (22)$$

$$N_q = \frac{1}{\cos(\delta - \theta)} \times \frac{2 \exp(2\omega_1 \tan \phi) \sin \psi \cos \delta \cos^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}\right)}{\cos \phi \sin(\psi - \phi)} \quad (23)$$

$$N_r = \eta \cdot \frac{1}{\cos(\delta - \theta)} \times \left( \frac{\sin \psi \cos \delta \sin(\beta + \psi - \phi)}{\cos \beta \cos \phi \tan(\psi - \phi)} - \frac{\sin^2 \psi \cos \delta}{\cos \beta \cos^2 \phi \sin(\psi - \phi)} I \frac{\sin^2 \psi \cos \delta \sin\left(\frac{\pi}{4} - \beta + \frac{\phi}{2}\right) \exp(3\omega_1 \tan \phi)}{\cos \beta \cos \phi \sin(\psi - \phi)} \right) \quad (24)$$

ここに、 $\eta$  : 地盤自重項に対する補正係数で、 $\eta=1/2$ とする。

このとき、地表面に垂直な支持力成分は

$$q_v = q \cdot \cos \theta \quad (25)$$

で表される。

なお、地盤自重のない場合に正解を与えるブランドルの破壊メカニズムを基本とした一般の支持力式では、支持力係数のうち、地盤自重項  $N_r$  がそれを精度よく考慮できる応力特性曲線法等と比較して過大な値を与えることが知られている<sup>10)</sup>。このような事情は、 $\beta=0$ とした場合にブランドルの破壊メカニズムに一致する本文においても同様であり、ここでは既往の研究成果<sup>10)</sup>にあわせて式(24)に、補正係数 $\eta$ を適用することとする。

## (2) 荷重の傾斜のみを考慮した場合の破壊メカニズムと支持力式

図-3 は、一般の実務で取り扱われているように上部構造の慣性力の影響による荷重の傾斜のみを考慮した場合の破壊メカニズムである。図-2 に示した汎用性のある破壊メカニズムにおいて、 $\theta \neq 0, \beta = 0$  とすればこのメカニズムが得られる。したがって、式(22)~(24)に、 $\beta=0$  を代入すると、この条件下での支持力係数  $N_o, N_q, N_r$  が次式で得られる。

$$N_{c(\beta=0)} = \frac{1}{\cos(\delta - \theta)} \left[ \frac{\cos \delta}{\tan(\psi - \phi)} + \frac{\sin \psi \cos \delta \{ \exp(2\omega_1 \tan \phi) - 1 \}}{\sin \phi \sin(\psi - \phi)} + \frac{\sin \psi \cos \delta \exp(2\omega_1 \tan \phi)}{\sin(\psi - \phi)} \right] \quad (26)$$

$$N_{q(\beta=0)} = \frac{2 \exp(2\omega_1 \tan \phi) \sin \psi \cos \delta \cos^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}\right)}{\cos(\delta - \theta) \cos \phi \sin(\psi - \phi)} \quad (27)$$

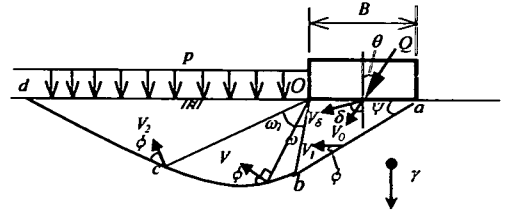


図-3 荷重の傾斜を考慮した破壊メカニズム ( $\theta \neq 0, \beta = 0$ )

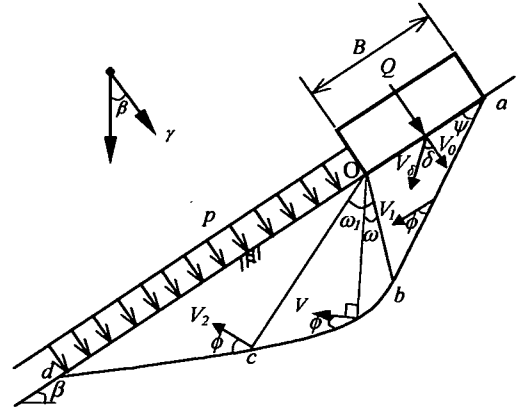


図-4 地盤の傾斜を考慮した破壊メカニズム ( $\theta = 0, \beta \neq 0$ )

$$N_{r(\beta=0)} = \eta \cdot \frac{1}{\cos(\delta - \theta)} \left[ \frac{\sin \psi \cos \delta \sin(\beta + \psi - \phi)}{\cos \phi \tan(\psi - \phi)} - \frac{\sin^2 \psi \cos \delta}{\cos^2 \phi \sin(\psi - \phi)} I \frac{\sin^2 \psi \cos \delta \sin\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right) \exp(3\omega_1 \tan \phi)}{\cos \phi \sin(\psi - \phi)} \right] \quad (28)$$

## (3) 地盤の傾斜のみを考慮した破壊メカニズムと支持力式

図-4 は、支持地盤の傾斜のみを考慮した場合の破壊メカニズムである。このような条件下での研究例はあまり多くないが、榎ら<sup>9)</sup>は一般化された極限約合法により支持力を求めている。本文での速度場法では、図-2 において、 $\theta=0, \beta \neq 0$  とおけばこの条件下での破壊メカニズムが得られる。したがって、支持力は式(22)~(24)に、 $\theta=0$  を代入して求められる。以下に支持力係数  $N_o, N_q, N_r$  を示す。

$$N_{c(\theta=0)} = \frac{1}{\cos \delta} \left[ \frac{\cos \delta}{\tan(\psi - \phi)} + \frac{\sin \psi \cos \delta \{\exp(2\omega_1 \tan \phi) - 1\}}{\sin \phi \sin(\psi - \phi)} + \frac{\sin \psi \cos \delta \exp(2\omega_1 \tan \phi)}{\sin(\psi - \phi)} \right] \quad (29)$$

$$N_{q(\theta=0)} = \frac{2 \exp(2\omega_1 \tan \phi) \sin \psi \cos \delta \cos^2(\pi/4 - \phi/2)}{\cos \delta \cos \phi \sin(\psi - \phi)} \quad (30)$$

$$N_{\gamma(\theta=0)} = \eta \cdot \frac{1}{\cos \delta} \left[ \frac{\sin \psi \cos \delta \sin(\beta + \psi - \phi)}{\cos \beta \cos \phi \tan(\psi - \phi)} - \frac{\sin^2 \psi \cos \delta}{\cos \beta \cos^2 \phi \sin(\psi - \phi)} I + \frac{\sin^2 \psi \cos \delta \sin(\pi/4 - \beta + \phi/2) \exp(3\omega_1 \tan \phi)}{\cos \beta \cos \phi \sin(\psi - \phi)} \right] \quad (31)$$

### 3. 支持力計算結果とその考察

#### (1) 荷重と地盤の傾斜を考慮した支持力曲線

ここでは、前述の2. で提案した支持力式を用いて支持力の上界値を求める。具体的な計算方法は、式(21)の支持力  $q$  が最小となるような主働くさび角  $\psi$  と遷移領域角  $\omega_1$  を求めることになる。ただし、図-2 より、 $\psi$  と  $\omega_1$  との間には、次式が成り立つ。

$$\omega_1 = \psi + \pi/4 - \phi/2 \quad (32)$$

したがって、式(32)の関係を利用して  $\psi$ 、 $\omega_1$  の組み合わせに対する支持力を式(21)から求めるが、得られる支持力の最小値が上界値となる。

図-5 に支持力係数計算結果の一例を示す。図は、横軸に主働くさび角  $\psi$  を、縦軸にそれぞれの  $\psi$  に対する支持力係数  $N_c$  を示している。ただし、ある  $\psi$  に対する  $\omega_1$  は式(32)を満たしている。計算の条件は、内部摩擦角  $\phi=30^\circ$ 、地盤傾斜角  $\beta=0^\circ$ 、荷重傾斜角  $\theta=0, 10, 20^\circ$  である。ここで、 $\theta=0^\circ$  での  $\psi$  はプラントルの主働くさび角（この例では、 $\psi=60^\circ$ ）に一致し、支持力係数は  $N_c=30.14$  となる。また、荷重傾斜角  $\theta$  が大きくなると  $\psi$  が小さくなり、全体の破壊領域も小さくなるため、支持力が小さくなるのが分かる。

なお、支持力に与える地盤傾斜角  $\beta$  の影響であるが、式(22)~(24)から地盤自重項  $N_{\gamma}$  のみはその影響を受けることになるが、これに関しては後述する。

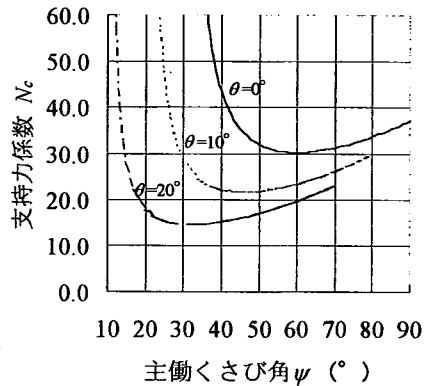


図-5 支持力係数と主働くさび角の関係( $N_c$ ;  $\beta=0$ )

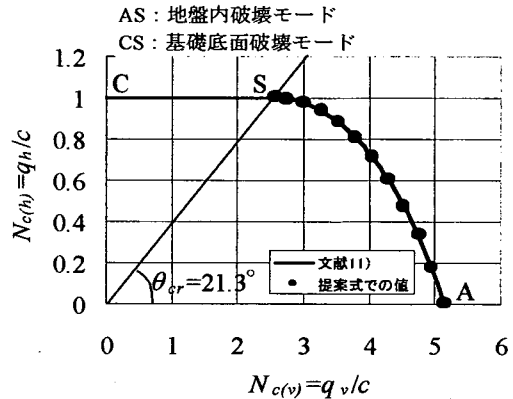


図-6 傾斜荷重を受ける直接基礎の支持力曲線の比較<sup>1)</sup>

図-6 は、本文での提案式の妥当性を検証するために、既往の研究成果<sup>11)</sup>と比較したものである。図の縦軸は水平支持力成分  $q_h$ 、横軸は鉛直支持力成分  $q_v$  をそれぞれ粘着力  $c$  で除して正規化してある。ここで、計算条件は、斜面傾斜角  $\beta=0$ 、内部摩擦角  $\phi=0$  である。なお、図中、地盤内破壊モードが生じる限界の荷重傾斜角  $\theta_c$  は、図-2 に示すべり面  $ab$  が基礎底面と平衡になる時 ( $\psi=0$ ) の荷重傾斜角であり、一般の塑性論を利用して容易に求めることができる。図より、地盤内破壊モードとなる AS 間では、両者は完全に一致することがわかる。

#### (2) 荷重と地盤の傾斜を考慮した支持力計算値

図-7 は、荷重と地盤が同時に傾斜した場合の支持力係数の変化を示したものである。ここで想定する破壊メカニズムは、図-2 に対応する。図-7 では横軸に荷重傾斜角  $\theta$  を、縦軸は各傾斜角における支持力係数を荷重傾斜角  $\theta=0^\circ$  のときの支持力係数で除して無次元化したものを示している。なお、ここでは地盤傾斜角  $\beta$  は荷重傾斜角  $\theta$  と同じ値としている。

図-7(a), (b), (c) は、それぞれ支持力係数の粘着力項  $N_c$ 、上載圧項  $N_q$ 、および地盤自重項  $N_{\gamma}$  と荷重傾斜角  $\theta$  と

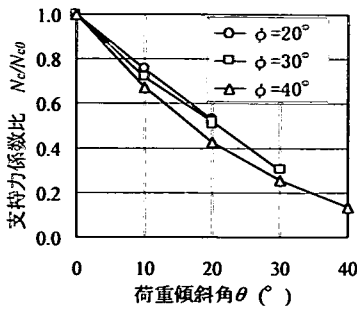


図-7(a) 支持力係数  $N_c$  の変化( $\theta = \beta$ )

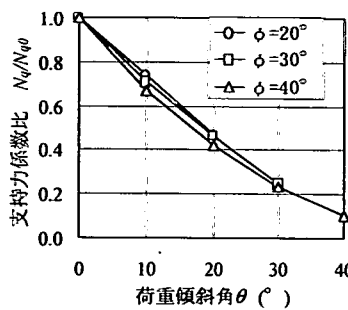


図-7(b) 支持力係数  $N_q$  の変化( $\theta = \beta$ )

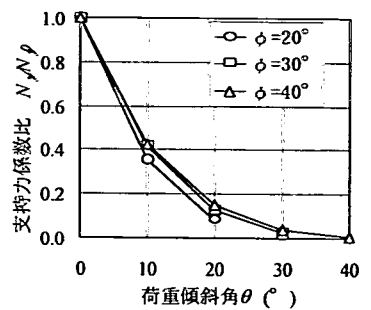


図-7(c) 支持力係数  $N_r$  の変化( $\theta = \beta$ )

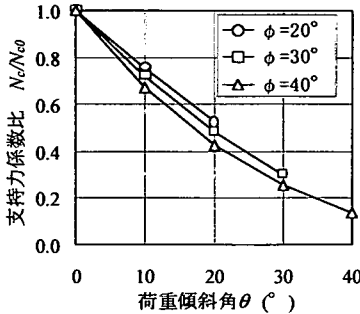


図-9(a) 支持力係数  $N_c$  の変化( $\beta = 0$ )

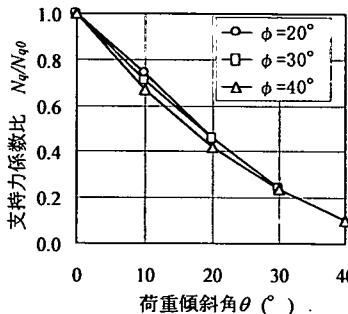


図-9(b) 支持力係数  $N_q$  の変化( $\beta = 0$ )

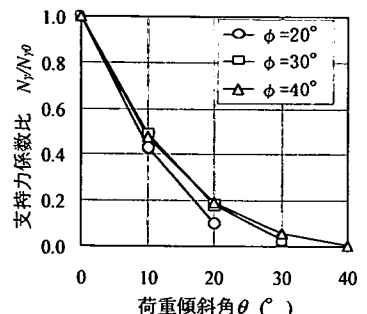


図-9(c) 支持力係数  $N_r$  の変化( $\beta = 0$ )

の関係である。同図より、 $\theta$ が大きくなるとともに支持力係数は小さくなり、支持力が減少することがわかる。この結果は、勝見らの研究における結果<sup>7)</sup>とほぼ同様である。支持力係数の減少率は  $N_r$  が最も大きく  $N_q$ 、 $N_c$  の順で小さくなる。支持力係数比は  $\theta = 20^\circ$  の場合、 $N_r$  は 0.1、 $N_q$  は 0.4、 $N_c$  は 0.5 程度の値となる。これより、荷重と地盤の傾斜により、支持力係数のうち地盤自重項  $N_r$  が最も影響を受けるといえる。内部摩擦角  $\phi$  と支持力係数の関係であるが、図より、支持力係数は内部摩擦角の大きさによらず、ほぼ一定の割合で減少することがわかる。

図-8 は、山口ら<sup>9)</sup>による、砂地盤での遠心载荷による支持力実験結果と応力特性曲線法としての Kötter 式の数値解の結果に、本文での計算結果を加えて示したものである。ここで、計算条件を文献と一致させるために荷重傾斜角と地盤傾斜角は等しく ( $\theta = \beta$ )、地盤の内部摩擦角は  $\phi = 46^\circ$  としている。これから、本文で提案した支持方式は支持力係数のうち  $N_r$  のみが対象となるが、実験結果や数値解と良い一致を示すことがわかる。

### (3) 荷重の傾斜と支持力計算値

#### a) 計算結果とその考察

図-9 は、図-3 に示す破壊メカニズムのように水平地盤(地盤傾斜角  $\beta = 0$ )のもとで、荷重傾斜角  $\theta$  を変化させた場合の支持力係数比の変化を示したものである。現行

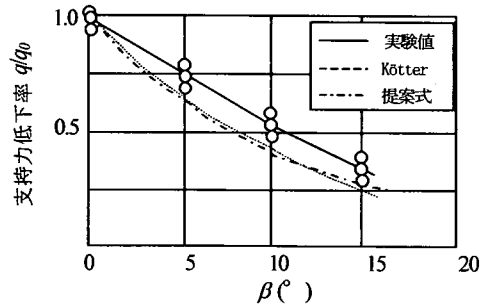


図-8 支持力低下率と傾斜角の関係  
(山口ら<sup>9)</sup>) : 文献に加筆

の設計実務で用いられている支持力係数はこのケースに対応している。図-7 と比較すると、 $N_q$ 、 $N_c$  は、荷重傾斜角  $\theta$ 、内部摩擦角  $\phi$  の影響に関してほぼ同様の減少傾向であるが、 $N_r$  に関しては荷重傾斜角  $\theta$  の影響による低減率が小さく、図-7 に比較して過大な支持力係数を与える。これは、荷重傾斜に対して地盤傾斜の影響を無視していることによると考えられる。

#### b) 現行実務式との比較

現行の設計実務で用いられている支持力係数は、荷重の傾斜のみを考慮している。ここでは、本文で提案した支持方式による計算結果と道路橋<sup>12)</sup>および鉄道<sup>13)</sup>の各基準と比較する。

道路橋示方書<sup>12)</sup>では、駒田<sup>14)</sup>の研究成果をもとに荷重傾斜の影響を考慮した支持力係数を示しているが、支持

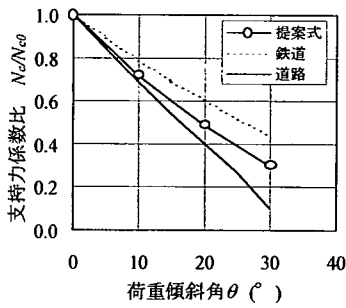


図-10(a) 設計基準との比較  
( $N_c: \phi=30^\circ$ )

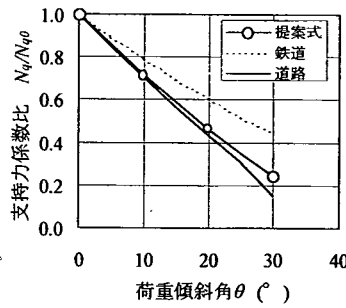


図-10(b) 設計基準との比較  
( $N_q: \phi=30^\circ$ )

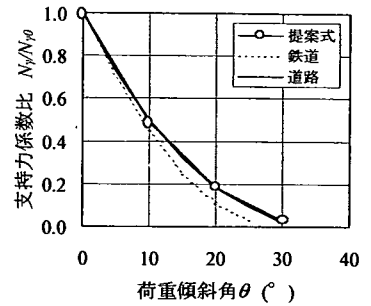


図-10(c) 設計基準との比較  
( $N_p: \phi=30^\circ$ )

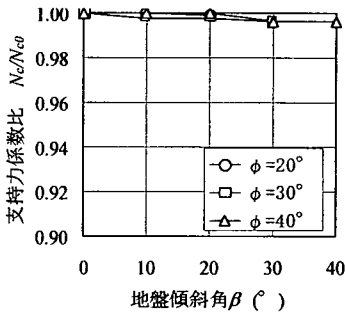


図-11(a) 支持力係数  $N_c$  の変化 ( $\theta=0$ )

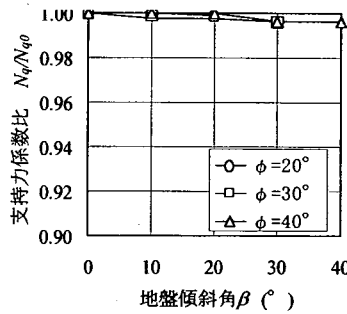


図-11(b) 支持力係数  $N_q$  の変化 ( $\theta=0$ )

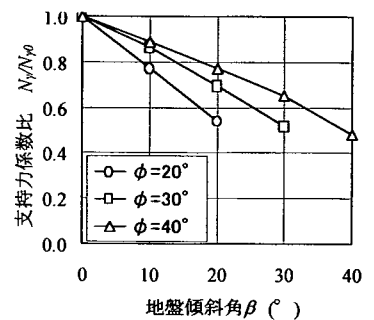


図-11(c) 支持力係数  $N_p$  の変化 ( $\theta=0$ )

力係数を陽な形で求められないため図表化している。一方、鉄道<sup>13)</sup>では、Meyerhof<sup>15)</sup>による研究成果を適用している。鉄道基準の支持力評価としては、一般の支持力係数に、傾斜荷重に対する補正係数を乗じて求めることとしている。

図-10は、内部摩擦角 $\phi=30^\circ$ のもとで荷重傾斜角 $\theta$ を $0\sim 30^\circ$ の範囲に変化させた場合の支持力係数比を示したものである。図-10(a)の粘着力項 $N_c$ の比較では、提案式は道路と鉄道基準の減少率の中間程度の値を示している。また、図-10(b)は、上載圧項 $N_q$ を比較したものであるが、ここでは、提案式と道路橋とは概ね一致しているのに対し、鉄道基準と比較すると低減率は低くなっている。一方、図-10(c)は地盤自重項 $N_p$ の比較である。これをみると、荷重傾斜角 $\theta=20^\circ$ までは三つの方法による支持力係数は比較的良く一致しているが、 $\theta>20^\circ$ ではやや差が生じてくる。

以上の結果から、本文で提案した支持力式において、荷重の傾斜のみを考慮した条件では、概ね現行の実務基準と同程度に支持力係数が低減することがわかる。ただし、この条件では支持地盤に慣性力の影響は考慮されていない。

#### (4) 地盤の傾斜と支持力計算値

図-11は、荷重傾斜角のない場合( $\theta=0$ )で、地盤傾斜角 $\beta$ を変化させたときの支持力係数比の変化を示したも

のである。図-4に示す破壊メカニズムに対応する。図より、 $N_c$ 、 $N_q$ は $\beta$ に関わらずほとんど変化せず、 $\beta$ の影響は少ないことがわかる。一方、当然のことながら地盤自重項 $N_p$ は地盤傾斜角 $\beta$ の増加とともに減少し、 $\beta$ の影響を強く受ける。榎ら<sup>8)</sup>は、地盤を傾斜させた条件下での室内模型実験を行っているが、それによると、地盤傾斜角の増加に伴い、支持力が低下する結果が得られている。実験が気乾状態の鳥取砂丘砂であることを考えると、支持力の低下は主として地盤自重項 $N_p$ の低下と考えることができる。本文で計算した結果である図-9からも、 $\beta$ の増加に伴い支持力係数 $N_p$ が低下することが確認される。

一連の計算結果を示した図-7~9, 10の比較から図-7と図-9における差異は、図-11で検討した要因によって生じていると考えられる。これは、次のように解釈することができる。支持力係数 $N_c$ および $N_q$ については荷重傾斜の影響を強く受け、支持力係数は低減するものの、地盤の傾斜による影響はほとんどないといえる。一方、 $N_p$ については、荷重傾斜の影響に加えて、地盤の傾斜による影響によっても支持力係数が低減する。特に、地盤傾斜角が大きくなるほどその影響は顕著となる。前述のとおり、現行の設計実務に用いられている支持力係数は荷重傾斜の影響のみを考慮しているが、上記の結果からそのことを考察すると、 $N_c$ および $N_q$ については地盤傾斜の影響を無視してもそれほど違いはみられず、お

むね妥当な値を求められるといえる。しかしながら、 $N_p$ については地盤傾斜の影響を大きく受けるため、これを無視した場合、支持力係数は過大に評価されることになる。本文での計算結果では、支持地盤の傾斜による支持力係数  $N_p$  の低減係数は、図-11(c)から評価できる。すなわち、震度法での一般的な震度  $K_H=0.2$  ( $\beta=11^\circ$  に相当) 程度では、 $N_p$  は約 20% 程度低減するが、仮に、大地震時に震度  $K_H=0.5$  ( $\beta=27^\circ$  に相当) を考慮した場合には、内部摩擦角により異なるが、約 30~60% の  $N_p$  の低減が生じることになる。このため、地盤自重項  $N_p$  については地震の影響を合理的に評価するためには、荷重傾斜のみならず、地盤傾斜の影響も考慮する必要があると考えられる。

#### 4. まとめ

本文では、地震時における直接基礎の支持力特性を検討するため、震度法による力学モデルと速度場法による破壊メカニズムから支持力式を導いた。そして、地震時支持力評価法として現行の設計実務に用いられている震度法を、極めてまれに生じるような大地震時にも適用する場合について支持力の変化を検討した。結果を要約すると以下ようになる。

- ① 荷重と地盤の傾斜を考慮した破壊メカニズムを仮定し、速度場法を用いて汎用性のある直接基礎の支持力式を提案した。これにより、上部構造および支持地盤が受ける慣性力の程度を反映した支持力評価が可能となる。
- ② 提案した支持力式による試算の結果、荷重の傾斜と地盤の傾斜が等しい場合、および荷重の傾斜のみ考慮した場合において既存の研究での結果と同様な支持力の低下を表現することができた。また、現行の実務基準との比較でも提案式での結果は良好な対応を示した。
- ③ 地盤の傾斜のみ考慮した場合、支持力係数  $N_c$ 、 $N_q$  については影響をほとんど受けないのに対し、 $N_p$  については、地盤傾斜角が小さい場合には支持力係数の低下率は小さいが、地盤傾斜角が大きくなるに従い、急激に低下することが明らかになった。このことは、現行の荷重傾斜のみを考慮する方法は震度法での一般的な震度ではあまり問題とならないが、水平震度が大きくなる大地震のレベルでは支持力を過大評価する可能性があることを示している。

なお、本文での支持力特性に関する考察は、主に理論的な側面からに限定されているが、今後は種々の条件下での室内模型実験などを通じて提案式の適用性を検証していく予定である。また、本文をまとめるにあたり日下部治 東工大教授から有益な御助言を頂きました。ここに感謝します。

#### 参考文献

- 1) Mononobe, N. and Matsuo, H.: On determination of earth pressure during earthquake, Proc. World Engineering Congress, Tokyo, Vol. 9, pp. 177-185, 1929.
- 2) Okabe, S.: General theory on earth pressure and seismic stability of retaining wall and dam, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Vol. 10, No. 6, pp. 1277-1323, 1924.
- 3) Koseki, J., Tatsuka, F., Muraf, Y., Tateyama, M., and Kojima, K.: A modified procedure to evaluate active earth pressure at high seismic loads, Soils and Foundations, Special Issue on Geotechnical Aspect of the January 17 1995, Hyogoken-Nambu Earthquake No. 2, pp. 209-216, 1998.
- 4) 山口柏樹: 土質力学 (全改訂), 技報堂出版, p.390, 1984.
- 5) 例えば, 日本道路協会: 道路橋示方書IV下部構造編, V耐震設計編, 1996.
- 6) 塩入正敏, 山口柏樹, 木村孟: 遠心載荷装置による斜面上の支持力について, 土木学会第3 1 回年次学術講演会概要集, III-205, pp.365-366, 1975.
- 7) 勝見雅, 森本正和: 斜面地盤における剛基礎の支持力, 土質工学会論文報告集, Vol.20, No.4, pp.161-169, 1980.
- 8) 村上功一, 木越健二, 榎明潔, 吉野修: 震度法の再評価, 第35回地盤工学会発表講演集, pp.1727-1728, 2000.
- 9) 山口柏樹: 土の力学, 共立出版, pp.96-97, 1976.
- 10) 建設省土木研究所: 浅い剛体基礎の極限支持力に関する研究, 土木研究所資料第1611号, 1981.
- 11) 柴田徹, 関口秀雄: 地盤の支持力, pp.53-59, 鹿島出版会, 1995.
- 12) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説IV下部構造編, 1996.
- 13) 運輸省鉄道局監修, 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説, 基礎構造物・坑土圧構造物, 2000.
- 14) 駒田敬一: 二次元傾斜荷重に対する地盤支持力の計算図用, 土木研究所報告第135号, 1969.
- 15) Meyerhof, G. G.: The Bearing Capacity of Foundation under Eccentric and Inclined Loads, Proc. 3<sup>rd</sup> Int. Conf. Soil Mech. & Found. Eng., pp.4-24, 1953.

(2001. 4. 12受付)



# BEARING CAPACITY FORMULA OF SHALLOW FOUNDATIONS CONSIDERING EFFECTS OF LOAD INCLINATIONS AND SUBSOIL STRATUM

Yoshito MAEDA, Hidetoshi OCHIAI and Yasuyuki YOKOTA

This paper proposes a formula widely applicable for calculating bearing capacity of shallow foundations, which can evaluate inclined load action from superstructure and inclined bearing stratum at the same time. The formula is derived using seismic coefficient method and admissible velocity field method. In practice, most bearing capacity formulas assume only influence of load inclination. Then, it was found from the newly proposed formula that in case of strong earthquake level, most of the present formulas might have risk to over-evaluate bearing capacity.