

地盤との接触条件を考慮した基礎の偏心支持力

長岡技術科学大学 (正) 大塚 悟
名古屋大学大学院 (学) 山田英司
名古屋大学大学院 (学) 笥 哲志
(株)フジタ (正) 船橋 修
(株)中部復建 (正) 河合伸之

1. はじめに

従来基礎の支持力は、基礎の剛性を 0 (たわみ性基礎) または無限大 (剛基礎) に理想化して求められてきた。しかし、本来基礎の剛性は有限であり、基礎の剛性を考慮した支持力の算出が必要である。特に、基礎に偏心荷重が載荷する場合には、従来のように基礎の剛性を考慮しない方法を用いて支持力解析を行うと、基礎と地盤間の相互作用力を考慮できないために解析結果の有効性に対して問題がある。その一方で、偏心荷重を載荷すると基礎の剛性が大きい場合に基礎と地盤間に引張力が発生して、基礎が地盤から離れる現象が起きる。本論文では基礎の曲げ剛性や強度を考慮するとともに、基礎と地盤間の接触条件を制約条件として支持力解析に取り込み、不連続面の発生を含む問題を連続体の枠組みの中で解析する方法を提案する。

2. 基礎の剛性を考慮した基礎の支持力解析

2.1 解析方法

本論文では地盤・基礎間の相互作用を考慮した極限支持力の評価にシェイクダウン解析 (Koiter, 1960) の下界定理 (Melan の定理) を適用する。シェイクダウン解析は通常繰り返し荷重に対する安定性評価に用いるが、本論文では地盤・基礎間の相互作用力の評価に応用する。地盤と基礎では、外荷重 F に対する変形に応じて基礎と地盤間の相互作用力が次々と再配分される。シェイクダウン解析では外荷重 F につり合う弾性応力の他に塑性変形に対応する残留応力を考慮することから、塑性変形に伴う応力再配分について考慮することができる。地盤内応力を σ 、基礎の曲げモーメントを m とすると、降伏関数を破る弾性応力 σ^E 、弾性曲げモーメント m^E が発生する場合に、残留応力 $\bar{\sigma}^R$ 、残留曲げモーメント \bar{m}^R が発生し、降伏関数を満たすように応力、曲げモーメントが再配分される。地盤および基礎の構成式には弾・完全塑性仮定を用いる。本論文では基礎は曲げ剛性 EI および極限曲げモーメント M_p を持ったはり要素としてモデル化する。降伏関数には線形降伏関数を用いると、Melan の定理 (下界定理) に基づく全体安定性評価は次式を満たす荷重係数 α の最大値を求める線形計画問題となる。

$$s = \max \left\{ \alpha \left| \begin{array}{l} N^T \left(\alpha \begin{Bmatrix} \sigma^E \\ m^E \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \bar{\sigma}^R \\ \bar{m}^R \end{Bmatrix} \right) - K \leq \mathbf{0} \\ B^T \begin{Bmatrix} \sigma^E \\ m^E \end{Bmatrix} = F, \quad B^T \begin{Bmatrix} \bar{\sigma}^R \\ \bar{m}^R \end{Bmatrix} = \mathbf{0} \end{array} \right. \right\} \quad (1)$$

ここに、 N : 線形降伏関数の外向き法線ベクトルの集合マトリックス、 K : せん断力の大きさを表すベクトル、である。上式に基づく本解析手法は、外荷重 F に対して全体安定性を表わす荷重係数 α から極限支持力を算出すると同時に残留応力の算出から破壊時の相互作用力分布を求めることができる。

Bearing Capacity Analysis of Foundations Against Eccentric Load. S.Ohtsuka(Nagaoka University of Technology), E.Yamada, S.Kakehi(Nagoya University), O.Funahashi(Fujita Co.) and N.Kawai(Chubu Fukken Engineering INC.).

2.2 等分布荷重に対する基礎の支持力と破壊時接地圧分布

図.1に示す有限要素メッシュ及び境界条件の直接基礎について等分布荷重(載荷幅=基礎幅)に対する支持力解析を行い、基礎の曲げ剛性 EI ・極限曲げモーメント M_p が極限支持力 q_f に及ぼす影響について示す。地盤は Mises 材料(粘性土)と仮定し、表.1に示す解析定数を用いた。

図.2は基礎の極限曲げモーメント M_p を変化させたときの極限支持力～曲げ剛性関係である。極限曲げモーメントが大・小の場合について破壊時接地圧分布を用いて考察する。

表.1 解析定数(地盤:Mises材)

E	1000.0 kN/m ²
ν	0.33333
c_u	10.0 kN/m ²
	$\sigma_0 = \sqrt{2}c_u$

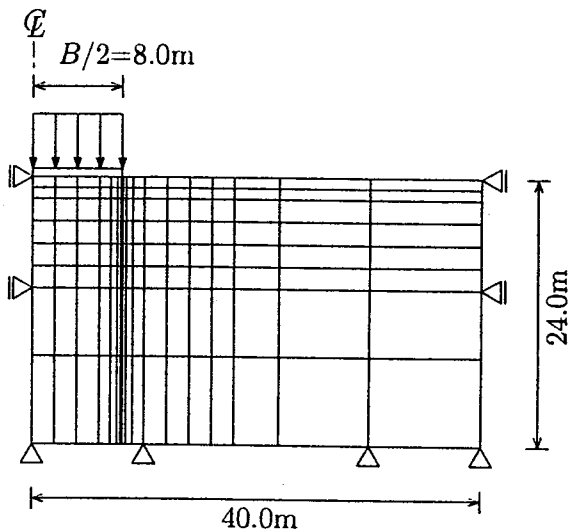


図.1 有限要素メッシュと境界条件

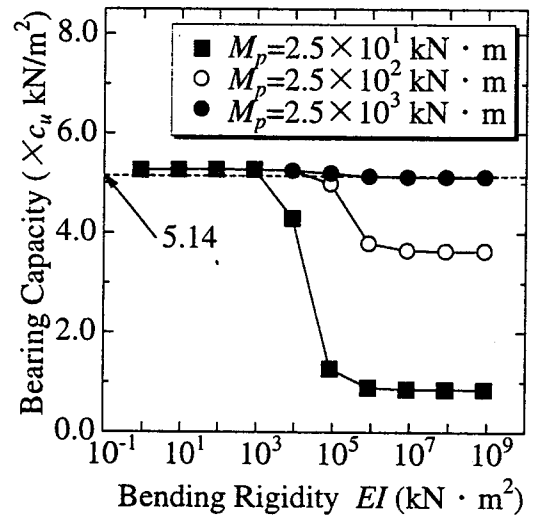


図.2 極限支持力～曲げ剛性関係

(1) 極限曲げモーメントが大きいとき ($M_p = 2.5 \times 10^3$ kN·m)

極限支持力は基礎の曲げ剛性によらず一定値 ($5.24c_u$ kN/m²) が得られている。この値は Prandtl の解 $(\pi+2)c_u$ kN/m² にほぼ一致することから本解析手法は十分な精度を有している。図.3(a), (b)にはそれぞれ $EI = 8.3 \times 10^0$ kN·m² (たわみ性基礎に対応), $EI = 8.3 \times 10^8$ kN·m² (剛基礎に対応) の場合の接地圧分布を示す。図中の●は上載荷重とつり合う弾性接地圧分布, ○は破壊時の接地圧分布を示している。両者の差は相互作用力の再配分を表している。図からわかるように弾性接地圧分布は基礎の剛性に応じた形となるが、破壊時には応力の再配分により基礎の剛性に関係なく同じ分布形となる。したがって $M_p \geq 2.5 \times 10^3$ kN·m とすると、等分布荷重に対する極限支持力は基礎の剛性に依存しない。

(2) 極限曲げモーメントが小さいとき ($M_p = 2.5 \times 10^2$ kN·m)

曲げ剛性が小さいたわみ性基礎の場合 ($EI \leq 10^4$ kN·m²) には極限支持力は $5.24c_u$ kN/m² が得られる。 $EI = 8.3 \times 10^0$ kN·m² のときの接地圧分布を図.3(c)に示すが、(a)の場合と同じ接地圧分布になっている。しかし、曲げ剛性が $EI > 10^4$ kN·m² になると極限支持力は $3.64c_u$ kN/m² まで低下する。この時は極限曲げモーメント M_p が小さく、曲げ剛性 EI が大きいため基礎に発生する曲げモーメントが M_p に達しやすくなる。すなわち基礎が降伏状態に達しやすくなり、応力再配分のメカニズムが変化して極限支持力が低下している。図.3(d)に $EI = 8.3 \times 10^8$ kN·m² の場合の接地圧分布を示す。(b)と比べると接地圧分布が変化していることから、応力再配分のメカニズムが変化して極限支持力が低下することが推測できる。

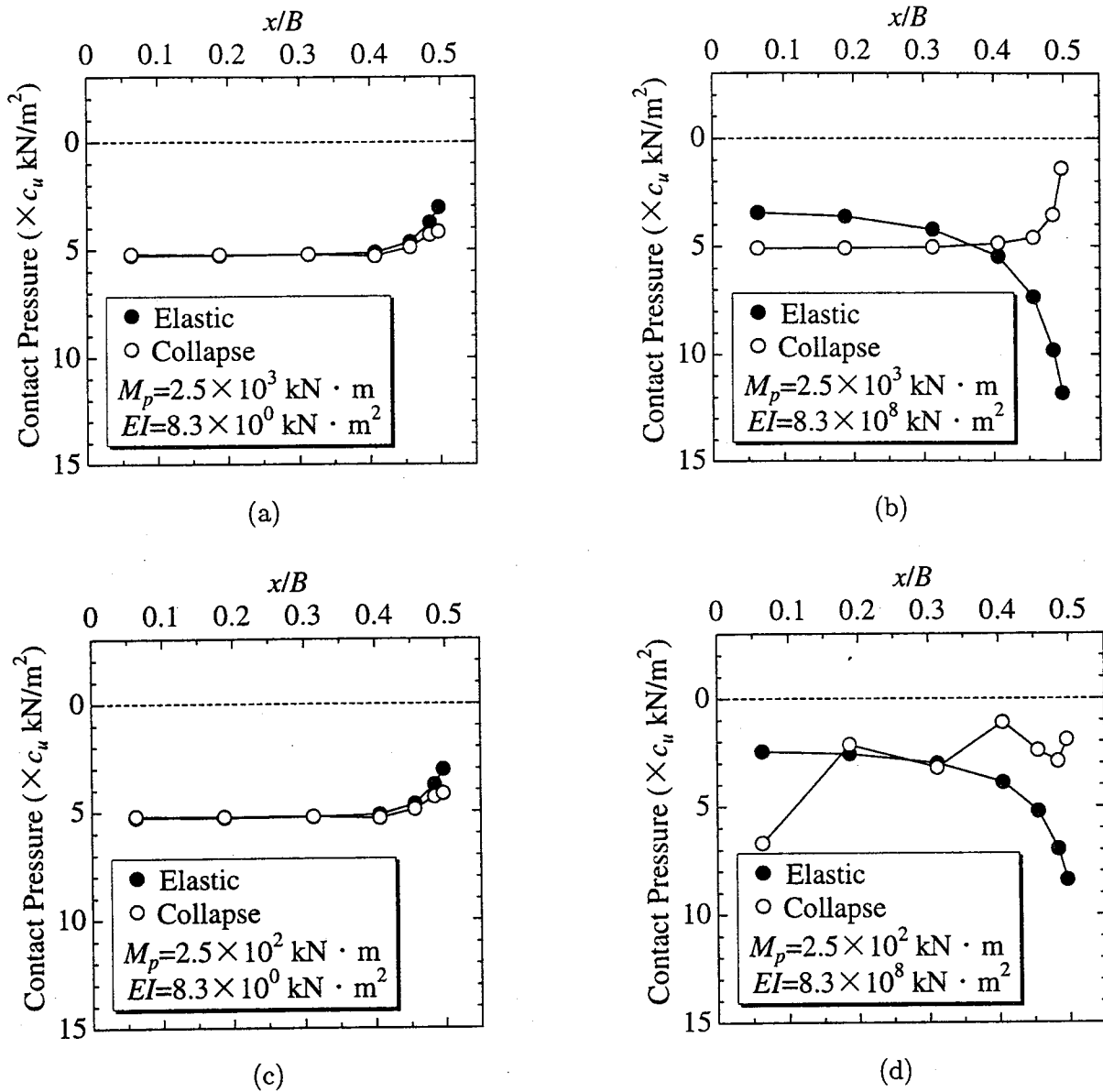


図.3 接地圧分布

2.3 偏心荷重を受ける基礎の支持力解析への適用

偏心荷重を受ける基礎の支持力問題に関する正解は求められていない。実用上は Meyerhof の有効幅 B' の概念 (Meyerhof, 1953) を用いて支持力評価が行われている。Meyerhof の有効幅の概念は、基礎中心から e だけ偏心した載荷重 V を幅 $B' = B - 2e$ (B は基礎幅) の部分で支持すると考えるものである。有効幅における接地圧は等分布と仮定されている。本論文では等分布荷重に対する支持力解析に用いた方法を図.4 に示す偏心荷重を受ける直接基礎の支持力評価に適用し、その解析結果について検討・考察する。地盤は Mises 材料 (粘性土) を仮定し、解析定数を表.1 に示す。基礎の極限曲げモーメントは支持力に影響しないように $M_p = 2.5 \times 10^{10}$ kN·m に設定している。

(1) 基礎の剛性の影響

図.5 に基礎中心に集中荷重を受ける基礎の極限支持力～曲げ剛性関係を示す。図.2 の等分布荷重 (載荷幅＝基礎幅) を受ける場合と異なり、集中荷重を受ける場合は基礎の曲げ剛性 EI によって極限支持力は変化している。 $EI = 10^4 \sim 10^5$ kN·m² において急激に支持力が変化し、 $EI \geq 10^5$ kN·m² では極限支持力は $5.56c_u$

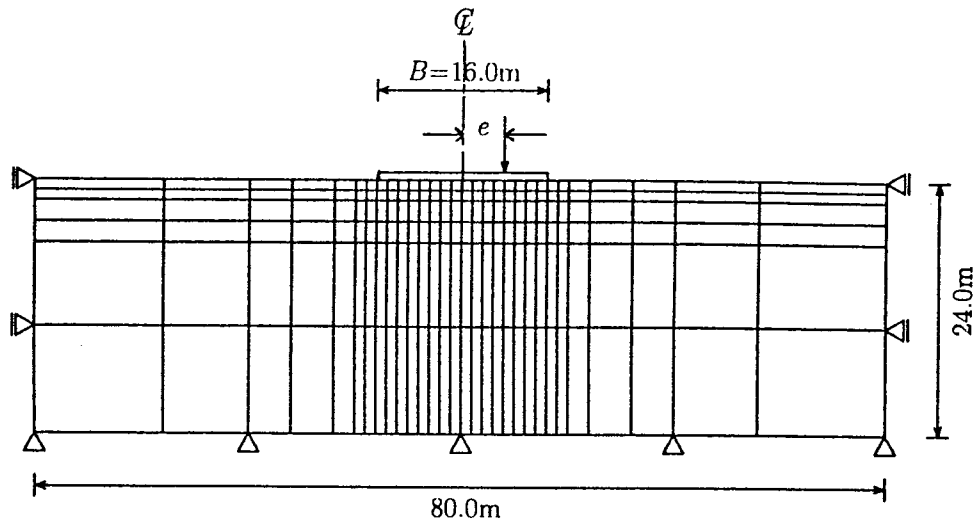


図.4 有限要素メッシュと境界条件

kN/m^2 (一定値)となるが, $EI \leq 10^4 \text{ kN}\cdot\text{m}^2$ では $1.85c_u$ kN/m^2 まで低下している。

(2) 荷重の偏心の影響

図.6は偏心荷重に対する極限支持力～偏心量関係である。図には Meyerhof の有効幅法による支持力値も同時に示す。偏心量が $e/B < 0.3$ の範囲では基礎の曲げ剛性 EI に応じて極限支持力は変化する。偏心量が $e/B > 0.3$ になると, 極限支持力は基礎の剛性によらず有効幅法の支持力値とほぼ一致する傾向を示す。図.7に偏心量 $e/B = 0.1875$ における曲げ剛性 $EI = 4.2 \times 10^4 \text{ kN}\cdot\text{m}^2$ の時の接地圧分布を示す。ある程度の剛性を有する基礎に偏心荷重が作用すると基礎が地盤から離れる現象が起きる。ここでは基礎と地盤間の接触条件を考慮していないので, 基礎が地盤から離れる際の応力の再配分が表現できない。そのために荷重の偏心方向と反対

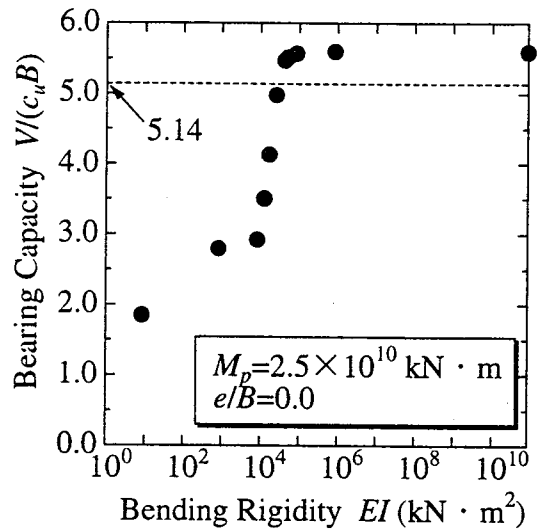


図.5 極限支持力～曲げ剛性関係 (集中荷重)

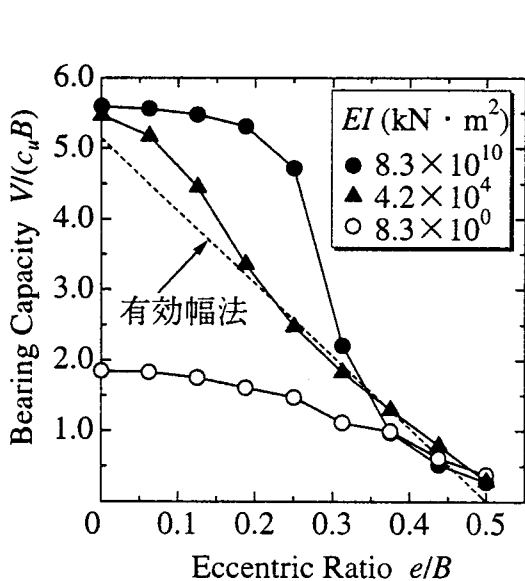


図.6 極限支持力～偏心量関係

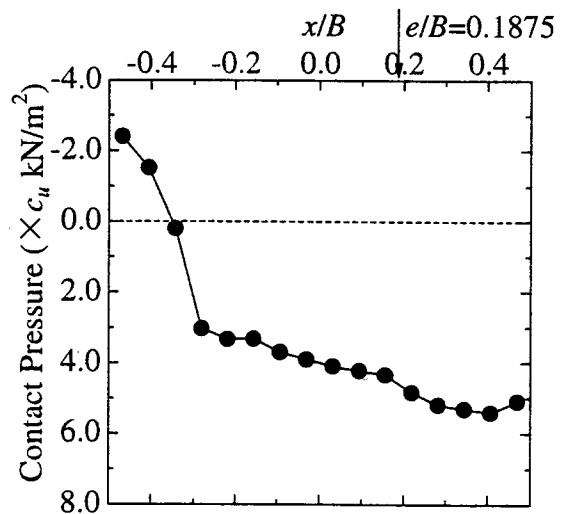


図.7 接地圧分布

側の基礎端部において図.7に示すように引張力が発生し、非現実的な接地圧分布となっている。すなわちこの事例は、偏心荷重に対しては基礎と地盤間の接触条件を考慮する必要性を示している。

3. 地盤との接触条件を考慮した基礎の偏心支持力

3.1 基礎と地盤の接触条件と支持力解析への適用

基礎と地盤間の力の伝達は接触面における応力ベクトル t による。この応力ベクトルの垂直成分 t_n 、せん断成分 t_s に接触条件を付加する。基礎が地盤から離れる現象は接触力の垂直成分 t_n に引張力が働く場合であり、引張力を正とすると接触条件は $t_n \leq 0$ と表わされる。他方、基礎と地盤間ですべりが生じる場合は接触力のせん断成分がある限界抵抗力 S_s を超えて作用する場合であり、接触条件は $-S_s \leq t_s \leq S_s$ と表わされる。せん断成分に関する限界抵抗力については現象に応じて、粘着力モデルと摩擦力モデルを用いる。これらの接触力に関する条件を $g(t) \leq 0$ と表わすことにする。

2.1で示したように基礎をはり要素、地盤を Mises 材料に従う連続体にモデル化し、弾・完全塑性材料とするとシェイクダウン解析の下界定理によって地盤の支持力を求めることができる。下界定理では力のつり合い式と共に、基礎及び地盤に関する降伏関数 $f(\sigma) \leq 0$ を制約条件として上載荷重の最大化問題を解いて支持力を求める。本論文では基礎と地盤間の接触条件 $g(t) \leq 0$ を新たに制約条件として加えて、支持力解析を行う。基礎と地盤間で接触条件が満たされる場合には基礎が地盤から離れることを表わし、不連続化の挙動があたかも塑性変形のように表わされる。シェイクダウン解析においては荷重の載荷に伴う弾性応力に対して塑性変形に対応する残留応力の再配分を考慮して支持力を求める。基礎と地盤間の接触条件においても同様に、荷重載荷による弾性接触力と共に残留接触力を用いて制約条件を満足させて、基礎及び地盤の応力再配分を考慮する。定式化については山田ら (1995) に概要を示す。

3.2 接触条件が偏心支持力に及ぼす影響

基礎と地盤間の接触条件を考慮して、偏心荷重を受ける直接基礎の支持力解析を行う。2.3で用いたものと同じ有限要素メッシュおよび境界条件 (図.3)、解析定数 (表.1) を用いる。基礎と地盤間の接触条件は接触力の垂直成分に関しては $t_n \leq 10.0 \text{ kN/m}^2$ 、せん断成分に関しては $-S_s \leq t_s \leq S_s$, $S_s = 10.0 \text{ kN/m}^2$ (粘着力モデル) を設定している。ここでは計算を安定させるために基礎と地盤間に若干の引張力を与えている。

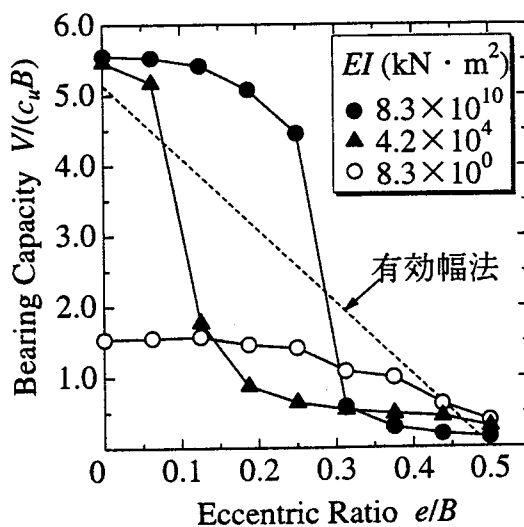


図.8 極限支持力～偏心量関係

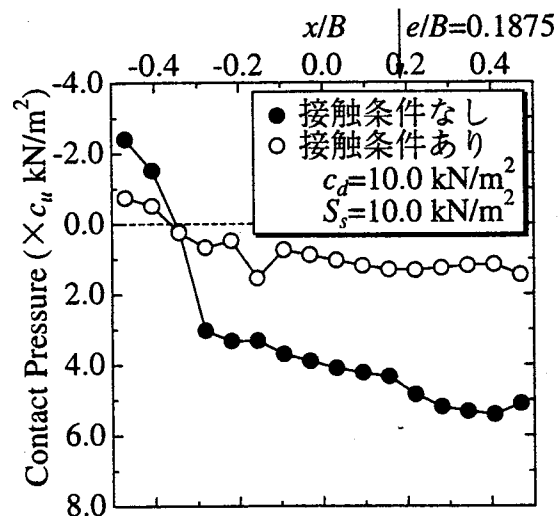


図.9 接地圧分布

図.8に接触条件を考慮した場合の極限支持力～偏心量関係を示す。剛基礎の場合($EI = 8.3 \times 10^{10}$ kN·m², 図中●), 偏心量が $e/B < 0.3$ の範囲では, 接触条件を考慮していない時(図.6)と極限支持力はほとんど変わらない。しかし, $e/B > 0.3$ では接触条件を考慮した効果により支持力は低下している。これは偏心量が大きくなると基礎が地盤から離れる現象を生じるためである。ある程度有限な剛性を有する基礎の場合, 極限支持力に及ばず接触条件の効果が発現する偏心量は基礎の曲げ剛性 EI によって決まり, 剛性が低下するにしたがってその偏心量も小さくなる傾向を示す。しかし, 曲げ剛性が小さいたわみ性基礎の場合($EI = 8.3 \times 10^0$ kN·m², 図中○)は, 基礎が自由に変形できるために基礎と地盤が離れることはない。したがって接触条件によって極限支持力はほとんど変わらない。

図.9は基礎の曲げ剛性 $EI = 4.2 \times 10^4$ kN·m², 偏心率 $e/B = 0.1875$ の時の接地圧分布である。接触条件を考慮すると基礎が地盤から離れる際に応力が再配分されて, 接地圧分布は○に示すような分布になる。接触条件を考慮しない場合(●)に荷重の偏心方向と反対側の基礎端部に発生していた大きな引張力は, 接触条件を考慮することにより減少している。以上より接触条件を考慮することによって基礎が地盤から離れる現象を適切に評価できることを示している。

4. おわりに

本論文で得られた結論を箇条書きにする。

- 1) 粘性土地盤上の直接基礎が基礎幅と同じ載荷幅の等分布荷重を受けるとき, 基礎の極限曲げモーメントが大きい場合には極限支持力は基礎の剛性の影響を受けず, $5.24c_u$ kN/m² が得られた。この値は Prandtl の解 $(\pi + 2)c_u$ kN/m² に近く, 本解析手法は十分な精度を有している。
- 2) 基礎の極限曲げモーメントが大きいとき, 上載荷重とつり合う弾性接地圧分布は基礎の剛性によって変化しているが, 破壊時には残留応力の発生によって相互作用力が再配分されて基礎の剛性に関係なく一定の分布になる。この事によって1)を説明できる。
- 3) 偏心荷重を受ける直接基礎の支持力解析に適用した場合, 基礎中心からの偏心量が大きくなると接地圧分布に引張力が発生する。荷重の偏心により基礎が地盤から離れる現象が生じる場合は, 接触条件を考慮する必要がある。
- 4) 基礎と地盤間の接触条件を考慮することにより, 偏心荷重を受ける直接基礎の接地圧分布に生じていた引張力は解消され, 基礎が地盤から離れる現象を適切に評価できることを示した。

参考文献

- 1) W.T.Koiter(1960) : General theorems for elastic plastic solids, Progress of solid mechanics, Vol.2, North Holland Press.
- 2) G.Maier(1969) : Shakedown theory in perfect elastoplasticity with associated and nonassociated flow-laws:a finite element linear programming approach, Meccanica Vol.4, No.3, pp.1-11.
- 3) Meyerhof,G.G(1953) : The bearing capacity of foundation under eccentric and inclined loads, Proc. 3rd Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Zurich, Vol.1, pp.440-445.
- 4) 山田英司, 中川雅之, 大塚悟, 松尾稔(1995) : 深礎基礎の押し込み・引き揚げ支持力, 第30回地盤工学会研究発表会概要集, pp.1511-1514.
- 5) 笈哲志, 山田英司, 大塚悟, 松尾稔(1996) : 接触条件を考慮した偏心荷重を受ける直接基礎の支持力解析, 第31回地盤工学会研究発表会(投稿中).