

令和 4 年 6 月 20 日現在

機関番号：32503

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04722

研究課題名(和文) 二次設計に対応できる直接基礎の支持力算定式の構築と設計法への展開

研究課題名(英文) Construction of bearing capacity calculation formula of spread foundation for secondary design and its development of design methods

研究代表者

金田 一広 (Kaneda, Kazuhiro)

千葉工業大学・創造工学部・教授

研究者番号：30314040

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、二次設計に対応できる直接基礎の鉛直・水平複合荷重が作用している場合の鉛直支持力の検討を行った。

1G場の実験では鉛直水平複合荷重時の直接基礎の滑動抵抗について検討した。複合荷重時において滑動後、水平荷重が増加しなくても沈下や水平変位が増加するが、鉛直荷重が極限荷重の1/2以下であれば水平抵抗がピークに達しても鉛直荷重による地盤の破壊が抑えられることが示された。剛塑性有限要素解析を実施して極限支持力の検討を行った。鉛直と水平荷重を作用させた状態で鉛直支持力解析を実施し、水平載荷履歴のあるものは鉛直支持力の低下がみられた。Novaらの支持力曲面と比較的良好な対応があることを確認できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地震の極大化により建築基礎も2次設計を考慮するように求められている。L2荷重に対する耐震設計が導入されている基礎構造設計指針は2019年に発行されている。そこでは、様々な実験や実被害の状況と整合性をとるため直接基礎の支持力に導入されている傾斜荷重式を地震荷重では導入せず偏心荷重のみ考慮することとしている。しかし、その合理的な説明は十分にされていない。本研究では地震に相当するような鉛直・水平複合荷重が作用している場合の、鉛直支持力について模型実験および数値解析の両面から検討を行い、基礎指針の考え方の学術的な裏付けを行っている。

研究成果の概要(英文)：We investigated the vertical bearing capacity when a vertical / horizontal combined load of a spread foundation that can be used for secondary design is applied.

In the 1G field experiment, the sliding resistance of the spread foundation under vertical and horizontal combined load was examined. After sliding under a combined load, settlement and horizontal displacement increase even if the horizontal load does not increase. However if the vertical load is 1/2 or less of the ultimate vertical bearing capacity, even if the horizontal resistance reaches its peak, the soil failure was suppressed due to the applying vertical load. Using Rigid-plastic finite element analysis, a vertical bearing capacity analysis was performed with vertical and horizontal loads applied. The vertical bearing capacity decreases with a horizontal loading history. It was confirmed that there is a relatively good correspondence with the bearing surface curve of Nova et al.

研究分野：建築基礎

キーワード：極限支持力 建築基礎 砂地盤 模型実験 剛塑性有限要素法 直接基礎 複合荷重

1. 研究開始当初の背景

直接基礎の極限鉛直支持力（以下支持力と称す）は、次式(1)に示す国土交通省告示第1113号第2項の地盤の支持力式を用いて算定される。

$$R_a = 1/F(q_u \cdot A) = 1/F(i_c \cdot \alpha \cdot c \cdot N_c + i_\gamma \cdot \beta \cdot \gamma_1 \cdot B \cdot \eta \cdot N_\gamma + i_q \cdot \gamma_2 \cdot D_f \cdot N_q) \cdot A \quad (1)$$

ここで、安全率 F は長期許容支持力に対して 3、短期許容支持力に対して 1.5 である。しかし、告示には、大地震を想定する二次設計に対する支持力式は規定されていない。この支持力式では、地震時の水平荷重の影響として、基礎に作用する荷重の鉛直方向に対する傾斜角 θ (θ : 基礎に作用する荷重の鉛直方向に対する傾斜角、 θ が ϕ を超える場合は、 ϕ とする。単位 度) として考慮することになっている。一般的な支持層となる砂地盤では、第2項の補正係数 $i_\gamma = (1 - \theta/\phi)^2$ が示されており、砂の内部摩擦角 $\phi = 30^\circ$ の場合、水平震度で 0.57 (=荷重の傾斜角 30°) で地盤の支持力が計算上ゼロとなる (図1)。いままでは基礎の設計として、中地震までを対象とし大地震時を対象としていなかったのが問題なかった。比較的地盤の良いところでは直接基礎で建物を建てることが多いが、東日本大震災による地震、あるいはそれ以上の極大地震が作用した場合、傾斜、モーメントが作用した場合の鉛直支持力性能はまだ明らかにされていない。現行の告示式では、極大地震に適用できず極大時の支持力評価ができない、だから実際では検討されていないのが現状である。これで安心・安全な基礎設計といえるのであろうか？

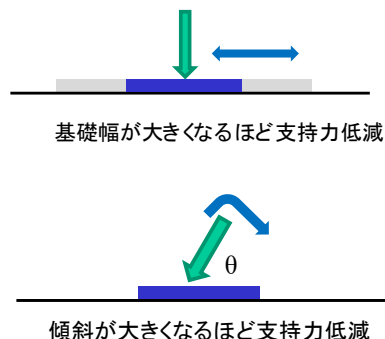


図1 基礎幅と傾斜の支持力

そこで建築学会では二次設計への対応も含めた基礎指針 (2001) の改定に着手している。基礎の要求性能として、想定する最大級の荷重 (レベル2地震荷重) に対し、建物の重要度などに応じた「性能グレード」を設定し、性能グレードごとの要求性能を設定するものである。直接基礎の地盤の支持力に対しては、鉛直荷重に対して、基礎の過大な不同沈下が生じない降伏支持力以下 (極限支持力の 2/3 を想定) を想定している。前出 (1) 式をそのまま大地震時に適用すると地盤の支持力は低下して直接基礎では安全性を確保できないことになる。一方、1995年の兵庫県南部地震、2011年東北地方太平洋沖地震を含む過去の被害調査によると、直接基礎の被害は傾斜地に建つ斜面崩壊、液状化地盤の沈下に起因するものがほとんどである。だからと言って現行のままでよい、ということでは決してなく、地震時の荷重の傾斜による支持力低下を見直し、高精度化が必要と考えられる。

極大地震に対する備えとして、基礎の二次設計の必要性が唱えられている中、告示式に代わる支持力の算定方法が必要とされている。地盤工学では例えば Terzaghi, Peck など古くから地盤の支持力が研究されてきている。1G場の模型実験での結果が多く、砂質地盤に関しては基礎幅に比例して鉛直支持力が増加しない現象いわゆる「寸法効果」が知られているが、極大地震を想定した傾斜荷重での基礎幅の寸法効果も明らかでない。さらに、根入れ基礎の支持力についての寸法効果についての検討も不十分といえる。

2. 研究の目的

本研究の目的は次の2つに集約される。①1Gおよび遠心模型実験による基礎の傾斜支持力の検討と②数値解析による妥当性の確認である。まず、1G場の実験では様々な載荷履歴を与えた場合の水平抵抗と鉛直支持力の関係について、遠心場の実験では実大規模の寸法効果が存在する基礎での傾斜支持力の検討を行う。一方、数値解析では、著者らが提案してきている剛塑性有限要素法の地盤の構成モデルを地盤種別 (粘土、砂) を問わず、さらにあらゆる強度 (せん断抵抗角 ϕ) にも対応できるように拡張し、寸法効果を数値解析で再現することを目的とする。さらに、根入れの効果、傾斜やモーメント荷重が作用している地盤の鉛直支持力について数値解析的に検討し、支持力発現メカニズムを明らかにすることである。

3. 研究の方法

研究は次の2つの方法で行っている。(1) 1G場および遠心場での支持力実験と、(2) 剛塑性有限要素法による数値解析である。実験を行って現象を把握し、数値解析によって検証を行っている。1G場の実験は小型の土槽モデルであるが、遠心場では遠心力によって実大規模の実験を模擬できる特徴がある。また、剛塑性有限要素解析は、土の構成式として応力とひずみ速度を与えて、土の破壊時のつり合いを解くものである。

4. 研究成果 1),2)

(1) 支持力実験の検討

まず 1G 場での支持力実験について示す。図 2 に 1G 場での実験モデルを示す。相対密度 74%の乾燥豊浦砂で、幅 450mm、層厚 260mm、奥行き 250mm の土槽で、基礎は幅 40mm、奥行き 145mm で地表面の中心に設置している。実験ケースは表 1 に示す。CaseV は鉛直荷重、CaseVH は 3 つの Step からなり、CaseVH0.30V などは Step1 では CaseV 得られた極限支持力 V_m の 0.30 倍の鉛直荷重を与え、Step2 では鉛直荷重一定で、水平荷重がピークになるまで載荷する。その後、Step3 では鉛直荷重が一定になるように載荷を続ける実験である。Case VH0.015 の鉛直荷重は基礎の自重(V_m の 0.015 倍)とし、水平載荷のみを行った。図 3 に水平荷重と水平変位の関係を示す。鉛直荷重一定で、水平荷重を増加させると、すべてのケースにおいて水平変位が 1~2mm 程度で極限水平抵抗に達した。その後、載荷を続けると水平抵抗は減少した。また、鉛直荷重が大きいほど、水平抵抗 $1/2 H_{peak}$ 時の水平変位は小さくなった。図 4 に H/V_m と V/V_m の関係を示す。ここに、 H と V は複合荷重時の水平力と鉛直力、 V_m は鉛直荷重のみによる極限支持力である。図中の破線は Nova らの支持力曲面である。(μ: Case VH0.015 は 0.41, Case VH0.30, 0.45, 0.60V はそれぞれ 0.26, 0.22, 0.16) 水平抵抗ピークは、Nova らの支持力曲面と良く対応することが分かる。次に基礎指針(2001)における複合荷重の低減係数 i_y 式と実験値を比較する。図 5 に H/V と V/V_m の関係を i_y 式とともに示す。水平抵抗ピークは、 i_y 式とも良く対応する。以上のように複合荷重作用時の極限水平抵抗は、既往の Nova および i_y 式と一致した。

なお、詳細には示さないが、1G 実験結果から大地震時の独立フーチング基礎の挙動については次の知見が得られている。複合荷重で基礎直下の地盤が破壊した場合、水平変位増分は沈下増分より大きくないが、水平力が他の独立フーチング基礎に再配分され、極限に達した独立フーチング基礎の水平力は減少する。フーチング基礎の水平力が小さければ、水平抵抗ピーク時の支持力は保持される。さらに地震時の鉛直力・水平力増分が直接基礎に作用する時間は、静的載荷に比べて短い。したがって、地震時の複合荷重による地盤の破壊に伴う直接基礎の沈下・傾斜は限定的と考えられる。

一方、遠心模型実験も実施している。しかし、土槽と地盤の摩擦の影響が想定以上に大きく、何度か実験をしたが再現性が確認できなかった。遠心場での支持力実験は土槽と地盤の摩擦や地盤の作成など課題があることが分かり、今後の課題として残った。

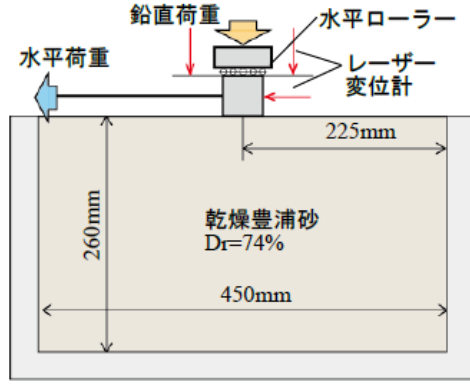


図 2 1G 実験モデル

表 1 実験ケース

ケース名	載荷計画		
	Step1	Step2	Step3
V	鉛直載荷		
VH0.30V	鉛直荷重を0.30Vmまで載荷	水平荷重をピークまで載荷	鉛直荷重が一定になるように載荷
VH0.45V	鉛直荷重を0.45Vmまで載荷		
VH0.60V	鉛直荷重を0.60Vmまで載荷		

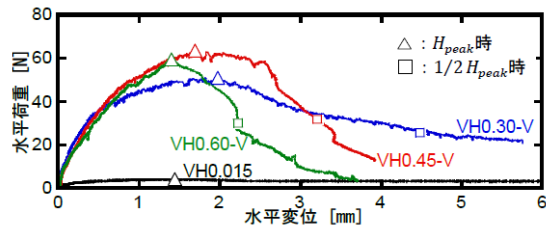


図 3 水平荷重と水平変位の関係

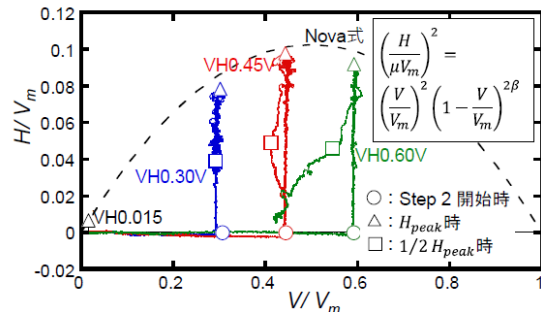


図 4 H/V_m と V/V_m の関係(Nova 比較)

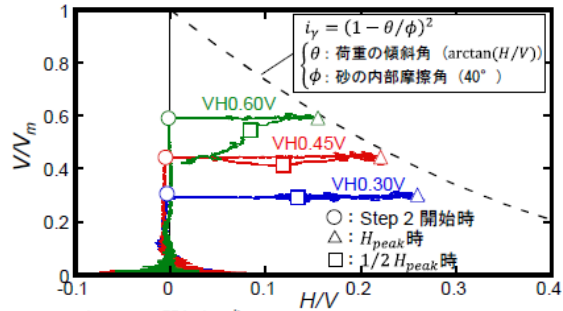


図 5 H/V_m と V/V_m の関係(i_y 比較)

(2) 剛塑性有限要素法による検討

次に剛塑性有限要素法による数値解析の成果について述べる。

土の降伏関数として次式のような非線形関数を定義する。

$$f(\sigma) = aI_1 + (J_2)^n - b = 0 \quad (2)$$

ここで a, b 及び n は材料定数とする。塑性学の諸定理を適用し剛性方程式は下記となる。

$$\sigma = \frac{1}{n} \left\{ \frac{9a^2}{2n^2} \left[\left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_v} \right)^2 - \frac{3a^2}{2n^2} \right] \right\}^{\frac{1-n}{2n-1}} \left[3a \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_v} - aI \right] + \frac{1}{3} \left[\frac{b}{a} - \frac{1}{a} \left\{ \frac{9a^2}{2n^2} \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_v} \right)^2 - \frac{3a^2}{2n^2} \right\}^{\frac{n}{2n-1}} \right] I \quad (3)$$

剛塑性有限要素法での検討として①鉛直・水平・モーメントが作用している地盤の鉛直極限支持力と、②根入れ砂地盤の支持力について述べる。

① 鉛直・水平・モーメントが作用している地盤の鉛直極限支持力³⁾

図6に検討した直接基礎建物のモデルを示す。建物は長方形の剛体とし、建物自重による鉛直荷重 V_0 とともに水平荷重 $H (=k_h \cdot V_0, k_h$: 水平震度) と、ロッキングによるモーメント $M (=H \cdot h/2)$ を基礎に初期荷重として作用させる。鉛直・水平荷重は、等分布荷重として与え、モーメントは所定のモーメント力になる鉛直荷重分布で与えた。モーメントの方向は建物固有周期の影響もあり、地震荷重と同位相となるとは限らず、逆位相の場合も考えられるため、同図 (b-1) 同位相と (b-2) 逆位相のモードを検討した。解析では、想定する水平力・モーメントを初期に加えた状態で鉛直荷重 ΔV を増加して極限鉛直支持力を求めた。解析メッシュを図7に示す。ここでは土の単位体積重量は $\gamma=18\text{kN/m}^3$ とし、土の内部摩擦角は 30 度とした。建物高さ h は $1B, 2B, 3B$, 基礎幅 $B(\text{m})$ 、建物高さ $h(\text{m})$ 、水平震度 k_h を変数とし、建物は密度 $\gamma=3\text{kN/m}^3$ を想定した。これは階高 3.3m で1階あたり 10kN/m^2 を想定しており、基礎幅は 30m とした。初期に与える水平震度は $0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4$ とした。非線形関数のパラメータとして $a=0.168, b=1.5, n=0.52$ とした。図8に各水平震度 k_h に対する極限支持力の変化を示す。縦軸はそれぞれの極限支持力を $k_h=0$ の時の極限支持力 (V_m) で正規化している。新しい基礎指針では、地震時は傾斜の影響は考慮せず偏心のみ考慮すると記載されている。そこで基礎指針に従って偏心による低下も同時に示した。なお偏心量の算定に関しては、基礎底面に作用する鉛直荷重として算定された極限支持力を用いている。また、モーメントの大きさにより偏心量が異なるためこの解析では建物高さに応じて鉛直支持力が異なる。基礎幅 30m に関して、初期として与えられている水平震度 k_h による偏心・傾斜荷重の影響を受けている。解析結果は水平震度に対しての鉛直支持力の低下は大きくなる。基礎指針の偏心を考慮した極限鉛直支持力の低下は生じるが解析結果に比べて小さい。

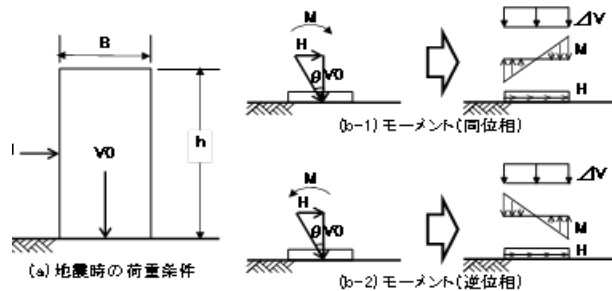


図6 建物と偏心・傾斜荷重のモデル化

一方、Novaらは、水平 (H)、鉛直 (V) およびモーメント (M) が作用する場合の支持力局面として、3次元空間における曲面として(4)式を提案している。

$$\left(\frac{H}{\mu V_m} \right)^2 + \left(\frac{M/B}{\phi V_m} \right)^2 = \left(\frac{V}{V_m} \right)^2 \left(1 - \frac{V}{V_m} \right)^{2\beta} \quad (4)$$

ここで、 $V_m : H=M=0$ の時の極限鉛直支持力、 μ, ϕ, β は定数である。図8に $\beta=1.0, \phi=0.5, \mu=0.5$ として整理した図も示す。基礎指針の偏心のみの考慮に比べて水平震度が大きくなるほど支持力が低下している。解析結果に比べて低下の程度は小さいが、解析結果に近い評価となっている。建物の荷重や水平震度に応じた水平力・モーメントを作用させた状態での鉛直支持力を調べて次の知見が得られた。地盤の内部摩擦角が 30 度の場合であるが、基礎指針(2019)で示されている地震時は偏心荷重を考慮しても、水平震度が大きくなっても鉛直支持力は低下しない。しか

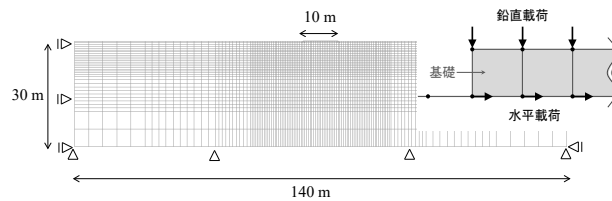


図7 解析メッシュ

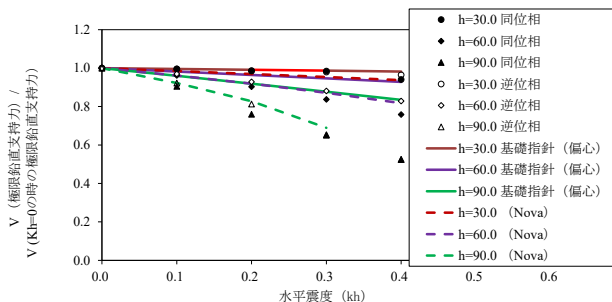


図8 鉛直支持力と水平震度の関係

し、解析では低下する結果となった。また解析結果は Nova の式とよく対応していることも分かった。

② 根入れ砂地盤の支持力⁴⁾

建築基礎構造設計指針によると、(1)式のように N_q 項に関して内部摩擦角 ϕ の拘束圧依存性等の影響として、 η という基礎の寸法効果の考慮が示されている。ただし、 N_c 項、 N_q 項の寸法効果の記載はない。砂質土の根入れ時の支持力は N_q 項と同様に基礎の寸法効果を考慮することが必要であると考えられ、この効果について検討する。地盤定数は、砂地盤を対象とし内部摩擦角 $\phi=30^\circ$ または 40° とし、地盤の密度 $\gamma=18\text{kN/m}^3$ とした。根入れ効果 (N_q 項) は支持力公式との比較を考慮し、上載圧 (γD_f : $\gamma=18\text{kN/m}^3$, $D_f=0\sim 5\text{m}$) として与えた。解析条件は、基礎幅は 1,3,10,30m, 根入れ長は 0,1,2,5m とする。また材料定数は $\phi=30,40$ 度でそれぞれ $a=0.175,0.237$, $b=1.5,1.5$, $n=0.52,0.52$ とした。根入れを考慮した ($D_f=1, 2, 5\text{m}$) 解析結果 ($q_u D_f$) から $D_f=0$ の解析結果 (q_{u0}) を引いた $q_u D_f - q_{u0}$ で整理する。図 9 に $\phi=30^\circ$ と 40° の $q_u D_f - q_{u0}$ と根入れ深さの関係図を示す。 D_f 自体による支持力増加効果は基礎指針の N_q 項の値より約半分程度小さい。これは(1)式から明らかなように基礎指針では根入れ項では寸法効果を考慮していないためである。一方道路橋示方書の N_q 項のみを示すと式(5)となる。

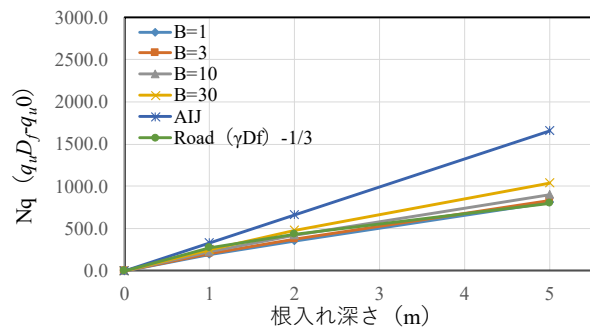
$$Q_u = A_l \kappa q N_q S_q \quad (5)$$

ここで Q_u は荷重の偏心・寸法効果を考慮した極限支持力(kN)、 A_l は有効載荷面積 (m^2)、 κ は根入れ効果に対する割増係数、 N_q は荷重の傾斜を考慮した支持力係数、 S_q は支持力係数の寸法効果に関する補正係数である。ここで補正係数は $S_q = (q/q_0) - 1/3 = (\gamma D_f/10) - 1/3$ となっている。この算定値は、 ϕ が 30, 40 度とも解析結果と比較的対応している。図 10 に $B=10\text{m}$, $D_f=0\text{m}$ と 10m の破壊時せん断ひずみ速度分布を示す。根入れ効果として基礎周囲に上載圧を加えると破壊時せん断ひずみ速度分布が大きくなるが、基礎端部の破壊時せん断ひずみ速度は小さくなる傾向となる。

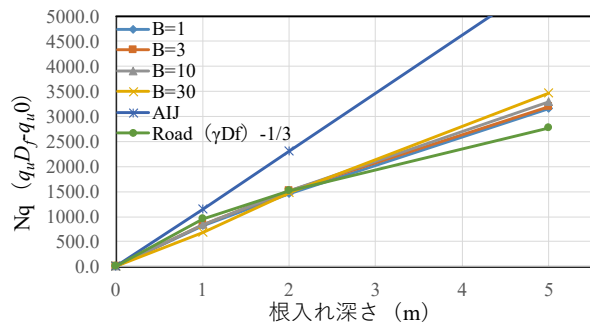
以上から根入れがある基礎の支持力 N_q 項が拘束圧依存性の影響を受けることを示し、建築学会の基礎指針では拘束圧依存性が考慮されておらず道路橋示方書の補正式の方が精度がよいことが分かった。

参考文献

- 1)大塚修平、田村修次、奥村豪悠、金田一広、青木雅路(2022)：複合荷重作用時の直接基礎の終局状態（その1）複合荷重作用時の極限水平抵抗、日本建築学会大会梗概集
- 2) 田村修次、大塚修平、奥村豪悠、金田一広、青木雅路(2022)：複合荷重作用時の直接基礎の終局状態（その2）極限水平抵抗後の挙動、日本建築学会大会梗概集
- 3)金田一広、青木雅路、奥村豪悠(2021)：鉛直・水平・モーメントが作用している地盤の鉛直極限支持力の検討、日本建築学会大会梗概集
- 4) 金田一広、青木雅路(2019)：非線形構成式を導入した剛塑性有限要素法による根入れ砂地盤の支持力解析、応用力学論文集 Vol. 22 (特集) ,p1_323-1_328.

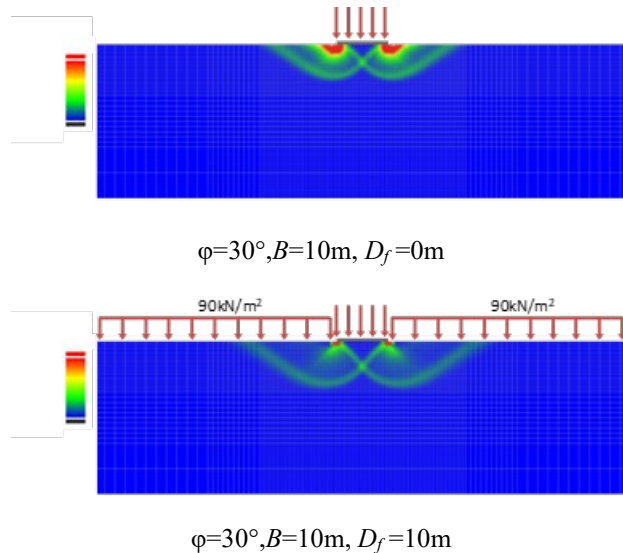


$\phi=30^\circ$



$\phi=40^\circ$

図 9 N_q と根入れ長の関係



$\phi=30^\circ, B=10\text{m}, D_f=10\text{m}$

図 10 破壊時せん断ひずみ速度分布

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 金田一広、青木雅路	4. 巻 22
2. 論文標題 非線形構成式を導入した剛塑性有限要素法による根入れ砂地盤の支持力解析	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 土木学会 応用力学論文集	6. 最初と最後の頁 323_328
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 金田一広、内田明彦	4. 巻 6
2. 論文標題 直接基礎建物の液状化による沈下評価に関する一考察	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本地震工学会論文集	6. 最初と最後の頁 116, 128
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 大塚修平、田村修次、奥村豪悠、青木雅路、金田一広
2. 発表標題 遠心載荷実験における複合荷重作用時の直接基礎の極限支持力
3. 学会等名 日本建築学会学術講演会 梗概集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 金田一広
2. 発表標題 非線形構成式を導入した剛塑性有限要素法による根入れ砂地盤の支持力解析
3. 学会等名 理論応用力学
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大塚修平、田村修次、奥村豪悠、青木雅路、金田一広
2. 発表標題 遠心載荷実験における複合荷重作用時の直接基礎の極限支持力
3. 学会等名 日本建築学会学術講演会 梗概集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 金田一広、青木雅路、奥村豪悠
2. 発表標題 鉛直・水平・モーメントが作用している地盤の鉛直極限支持力の検討
3. 学会等名 日本建築学会学術講演会 梗概集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 平野司・大塚修平・田村修次・奥村豪悠・金田一広・青木雅路
2. 発表標題 鉛直力と水平力が同時に作用する直接基礎の極限支持力 その1 粘性土地盤における検討
3. 学会等名 日本建築学会学術講演会 梗概集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大塚修平・田村修次・奥村豪悠・金田一広・青木雅路
2. 発表標題 鉛直力と水平力が同時に作用する直接基礎の極限支持力 その2 乾燥砂地盤における検討
3. 学会等名 日本建築学会学術講演会 梗概集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大塚修平・田村修次・奥村豪悠・金田一広・青木雅路
2. 発表標題 複合荷重作用時の直接基礎の終局限界状態（その1）複合荷重作用時の極限水平抵抗
3. 学会等名 日本建築学会学術講演会 梗概集
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田村修次・大塚修平・田村修次・奥村豪悠・金田一広・青木雅路
2. 発表標題 複合荷重作用時の直接基礎の終局限界状態（その1）極限水平抵抗後の挙動
3. 学会等名 日本建築学会学術講演会 梗概集
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	青木 雅路 (Aoki Masamichi) (10639628)	株式会社竹中工務店 技術研究所・その他部局等・その他 (92502)	2020年3月 削除
研究分担者	田村 修次 (Tamura Shuji) (40313837)	東京工業大学・環境・社会理工学院・准教授 (12608)	
研究分担者	奥村 豪悠 (Okumura Takehiro) (30591325)	株式会社竹中工務店 技術研究所・その他部局等・研究員 (移行) (92502)	2020年3月 追加

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------