

III-20 補強材等を用いた新形式基礎の支持力評価法に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 14～平 17

担当チーム：基礎チーム

研究担当者：中谷 昌一、竹口 昌弘

【要旨】

近年、湾岸地域など地盤が軟弱な箇所において道路橋の建設が行われているが、軟弱層が厚くなると基礎の根入れが深くなり基礎が大規模となるため、より合理的な基礎形式の開発が求められている。そこで、本研究では、上層部を補強材（小口径杭）で補強した地盤上に直接基礎を構築する場合を想定し、補強材の地盤補強効果やそのメカニズムについて模型載荷実験および解析により検討した。

その結果、補強材の本数や地盤条件などの違いによる定性的な支持力の増加や沈下量の低減効果とそのメカニズムを明らかにした。

キーワード：杭、直接基礎、地盤補強、支持力

1. はじめに

一般に道路橋基礎では、良質な支持層が地表面付近に存在しない場合、杭基礎やケーソン基礎などの深い基礎形式が採用される。しかしながら、良質な支持層が非常に深い位置に存在すると、基礎の工費・工期が増大することになる。このような場合、比較的簡易な方法で地盤補強を行うことにより直接基礎の支持層としての要求性能を満足することが可能となれば、大きなコスト削減効果が期待できる。

そこで、本研究では、良質な支持層の条件に満たない地盤を小口径杭（以下、補強材という）で補強して直接基礎を構築する場合を想定し、補強材による地盤の補強効果やそのメカニズムについて、模型載荷実験や解析により検討した。

2. 研究方法

2.1 模型載荷実験

補強材により地盤補強した直接基礎の支持力特性を明らかにすることを目的に、2次元土槽（幅 3000mm×奥行き 162mm×高さ 1200mm）を用いた鉛直載荷試験を実施した。

(1) 使用模型

補強材に用いた杭模型は、直径 12mm、肉厚 1mm のアルミ製パイプとし、長さは試験ケースに応じて 400mm、450mm の 2 種類を使用した。また、実験では、補強材に生じる軸力、曲げモーメントなどを確認するために、補強材表面にひずみゲージを貼り付けた。フーチング模型は L160mm×B160mm×H60mm のステン

レス製を使用した。

(2) 実験地盤

実験地盤は、乾燥状態の砂（珪砂 7 号）を使用し、空中落下方式により均一な砂地盤を作製した。目標とした地盤の相対密度は 60%と 80%の 2 種類である。地盤の作製手順は、まず、補強材先端位置まで地盤を作製し、その上に補強材を所定の位置に設置した後、残りの補強材周辺部分の地盤を空中落下方式により作製した。

(3) 試験ケース

実験ケースおよび補強材の配置例を表-1、図-1 に示す。実験は、補強材本数、フーチングの有無、地盤の相対密度をパラメータとして実施した。

(4) 実験方法

載荷実験状況を写真-1 に示す。実験は、鉛直荷重を地盤上に設置したフーチング模型の中心位置に、油圧ジャッキにより載荷した。なお、載荷は、変位制御（フーチング模型の鉛直方向変位速度が 2.0mm/sec 一定）による連続載荷方式とした。実験では、載荷荷重をロードセルにより、沈下量を変位計により測定した。また、補強材に作用する軸力、曲げモーメントなどは、補強材表面に貼り付けたひずみゲージの値により算出した。

2.2 実験のシミュレーション解析

補強材による地盤補強のメカニズムを解明するために、鉛直模型載荷実験結果に対して FEM によるシミュレーション解析を実施した。

2.2.1 FEM 解析モデル

FEM解析は、模型実験の境界条件を詳細に再現した3次元FEM解析モデルを用いて実施した(図-2)。解析の境界条件は、表裏面は板要素による平面ひずみ状態 ($e_2=0$) とし、地盤面との一定の摩擦抵抗を有する接触面要素を設定した。左右境界面については摩擦のない鉛直ローラーとした。また、補強材は弾性ばりとした。

実験に用いた砂地盤(珪砂7号)の変形係数Eの応力依存性を考慮するため、変形係数を深度方向に変化させた。変形係数の設定にあたっては、拘束圧

s_c と変形係数 E_{50} の相関関係式としてあらかじめ土質試験で求めた次式を用いた。

$$E_{50} = 2.2135 s_c \times 0.5567$$

また、地盤の弾塑性パラメータは、モール・クーロンの降伏関数 f を用いた。

$$f = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} - \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \sin \phi + \cos \phi \right) = 0$$

表-1 実験ケース

CASE No.	補強材模型(直径D:12mm, 肉厚:1.0mm)			フーチング模型 (160×160×60mm)	地盤の相対密度 Dr(%)
	長さ (mm)	配置本数 (本)	配置間隔		
1	400	0	2.5D	有り	80
		1			
		4			
		9			
		16			
		25			
2	400	0	2.5D	有り	60
		1			
		4			
		9			
		16			
		25			
3	450	0	2.5D	無し	60
		1			
		4			
		9			
		16			
		25			

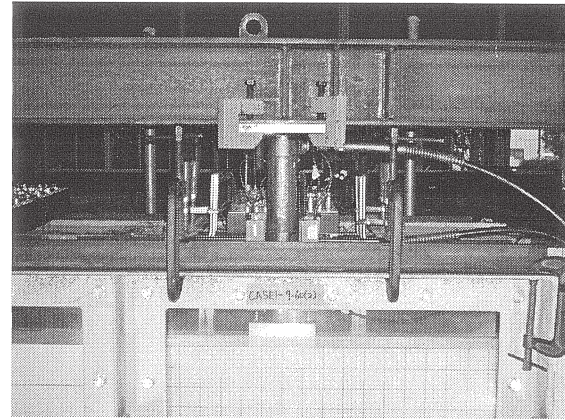


写真-1 鉛直荷重実験状況

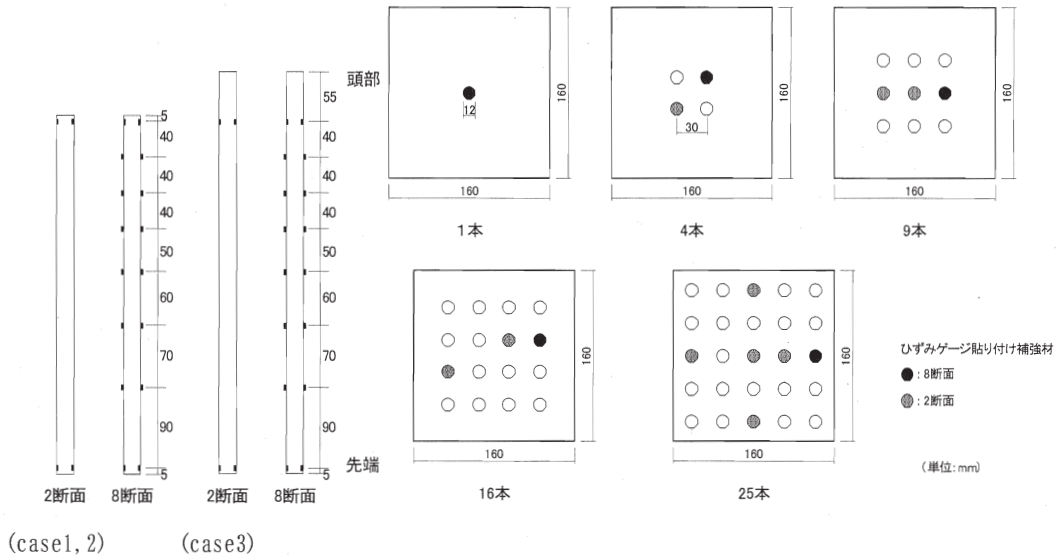


図-1 補強材の配置図

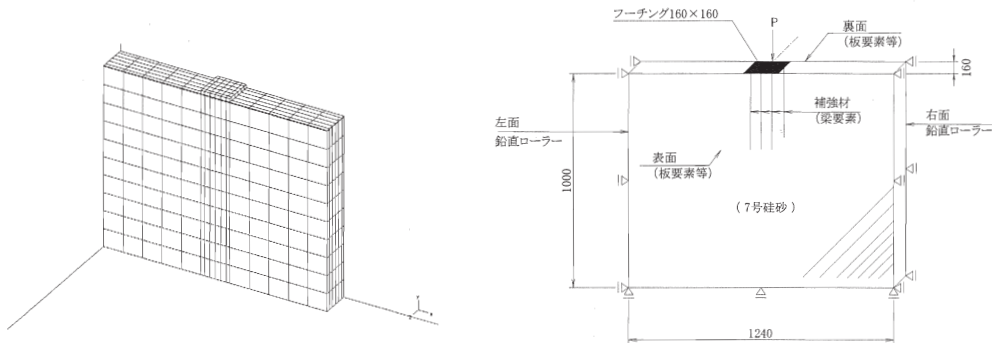


図-2 FEM 解析モデル

3. 研究結果

3.1 模型載荷実験結果

(1) 荷重－沈下量の関係

図-3, 4に Case1, 2におけるフーチングの載荷荷重－沈下量の関係を示す。また、図には実験地盤に使用した珪砂7号の三軸試験結果 ($c=0 \text{ kN/mm}^2$, $Dr=60\%$ で $\phi=38.7^\circ$, $Dr=80\%$ で $\phi=43.8^\circ$) を用いて算出したフーチング底面地盤の極限支持力の推定値を併記した。図より、載荷荷重がフーチング底面地盤の極限支持力の推定値に達する時の沈下量を比較すると、補強材の本数が少ないケースはフーチングのみのケースとあまり差はないが、補強材本数が増えると沈下量が急激に小さくなっており、補強材による沈下抑制効果が確認できた。

次に、Case2 と Case3 (補強材のみ) の実験結果を図-5に併せて示す。図より、いずれのケースにおいても補強材を配置したフーチングの載荷荷重は、沈下量がフーチング幅の1割 (16mm) 程度でフーチングのみと補強材のみの載荷荷重の和とほぼ等しくなっていることがわかる。さらに、フーチングの沈下が進むと、補強材を配置したフーチングの載荷荷重は、フーチングのみと補強材のみの載荷荷重の和より大きくなる傾向にある。

地盤条件の違いによる補強材の沈下抑制効果を比較すると、補強材25本の場合を除き、相対的に緩い地盤のCase2の方が大きな沈下抑制効果が現れている。これは、次に述べる補強材の荷重分担率がCase2の方が相対的に大きくなっていることに対応している。

(2) 補強材の荷重分担率

図-6に Case1, 2における補強材の荷重分担率－沈下量の関係を示す。ここで、補強材の荷重分担率とは、ひずみゲージを貼り付けた補強材頭部の軸力の平均値を本数倍した値を載荷荷重で除した値である。図より、補強材本数の増加により、補強材の荷重分担率は増加し、フーチングの荷重分担が低下していることがわかる。また、Case1, 2の荷重分担率を比較すると、地盤が緩いCase2の方が補強材の荷重分担率が若干大きくなっていることがわかる。

(3) 補強材の軸力および曲げモーメント

ここでは、上述した補強材によるフーチングの沈下抑制効果を、補強材に生じた軸力および曲げモーメントから分析を試みた。

1) 補強材の軸力分布

図-7に補強材の深さ方向の軸力分布を示す。ここ

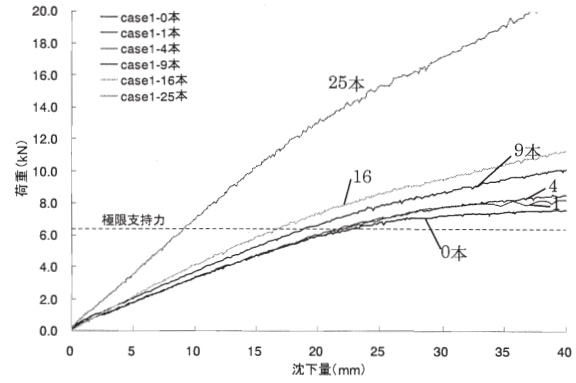


図-3 荷重－沈下量の関係 (Case1) $Dr=80\%$

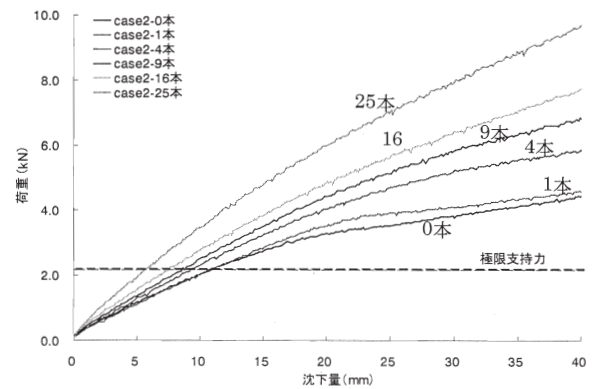


図-4 荷重－沈下量の関係 (Case2) $Dr=60\%$

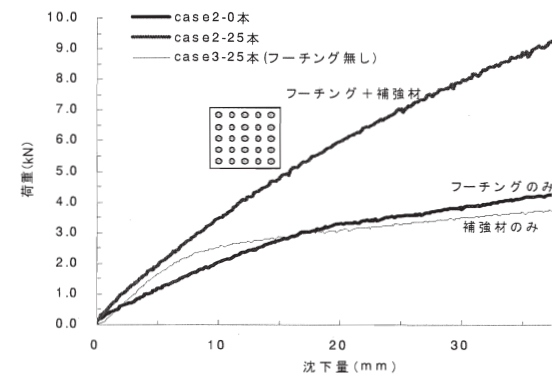
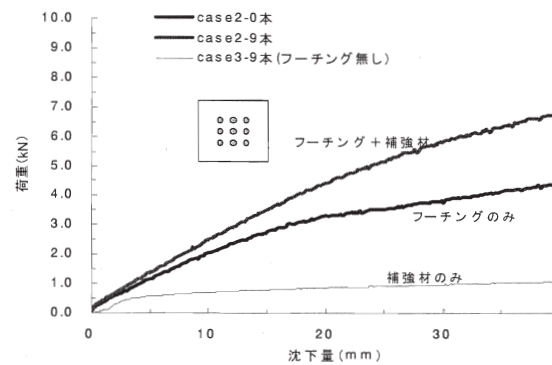


図-5 荷重－沈下量の関係 (Case2, Case3)

では補強材本数 9 本の場合を例に、フーチングの有無による軸力分布を比較しているが、いずれも補強材頭部の軸力が 150N 時のものである。図より、フーチング有りの方が補強材のみ場合に比べ先端部軸力が小さくなっており、補強材の周面摩擦力が大きく働いたことがわかる。図-8 には、同じ補強材 9 本の場合の補強材 1 本当りの周面摩擦力と沈下量の関係を示す。図より、フーチング有りの場合は、フーチングの沈下量の増加に伴い、ほぼ比例的に周面摩擦力が増大している。一方、補強材のみの場合は、沈下の初期段階で周面摩擦力がピークを迎え、その後は一定の値となった。これらの両者の違いは、フーチング直下に配置した補強材では、フーチング底面からの上載圧の増加に伴って周面摩擦力が増大したものと考えられる。このことは、(1)で示したフーチングの沈下量が増加するほど補強材による沈下抑制効果が増大することに整合している。

次に、図-9 に Case1 における補強材本数による補強材の軸力分布の比較を示す。図より、補強材本数が 9 本以上では 1 本の場合に比べて先端部の軸力が増加し、周面摩擦力が低下する。これは、補強材本数が増えるほど、群杭効果により補強材の周面摩擦力が減少したためと考えられる。

2) 補強材の曲げモーメント分布

図-10 に、1)と同様に補強材本数 9 本の補強材の曲げモーメント分布を示す。図より、フーチングの有無により曲げモーメント分布形状が大きく異なっている。フーチング有りでは、補強材頭部から $L/4$ 点 (L :補強材長) 付近で正(フーチング外向きに凸)の最大曲げモーメントが発生しており、その値は頭部軸力の増加 ($P=100\text{N}$ 時で $\delta=6\text{mm}$, $P=150\text{N}$ 時で $\delta=11\text{mm}$)

に伴い増大している。これは、フーチング底面地盤の沈下に伴う地盤のせん断変形により補強材に水平方向の力が作用したことが主因であると考えられる。このことから、補強材は、フーチングに作用する鉛直荷重を分担することに加えて、地盤のせん断変形を拘束することで、フーチングの沈下量低減に寄与しているものと考えられる。

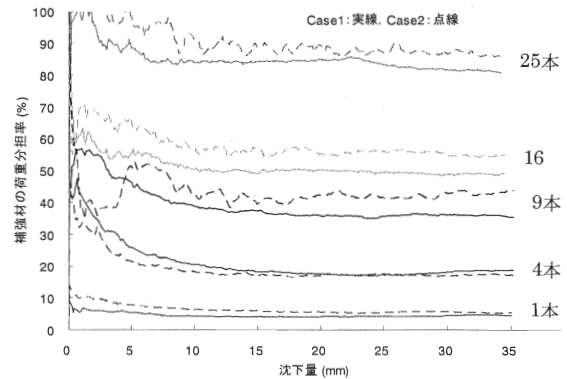


図-6 荷重-沈下量の関係 (Case1, Case2)

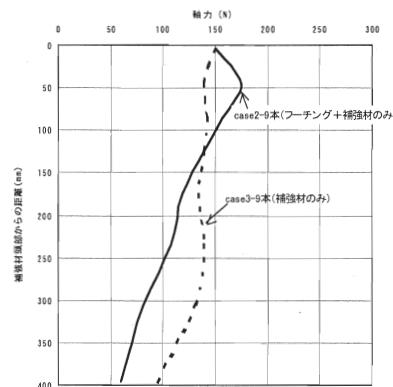


図-7 補強材の軸力分布 (Case2 と Case3 の比較)

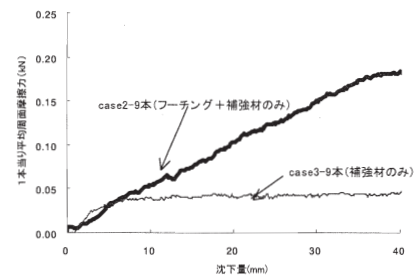


図-8 荷重-周面摩擦力の関係 (Case2 と Case3 の比較)

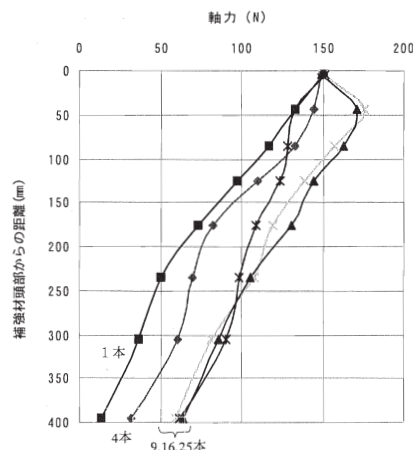


図-9 補強材の軸力分布 (Case2)

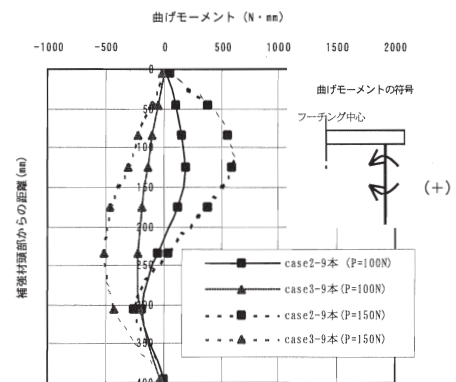


図-10 補強材の曲げモーメント分布 (Case2 と Case3 の比較)

3.2 実験のシミュレーション解析結果

(1) 解析モデルの検証

鉛直荷重とフーチングの沈下量の関係を実験値と解析値を比較して図-11 に示す。ここで、実験地盤のせん断抵抗角 ϕ は、土質試験結果では $\phi=48^\circ$ であったが、解析ではCase1-0本の実験結果に合うように $\phi=39.0^\circ$ を用いた。この差は、実験地盤では拘束圧が深度方向に変化することや、地盤作製時のばらつきによるものと考えられる。Case1-25本では10mmを超える領域で実験結果と解析結果に差が生じているものの沈下量の小さい範囲では一致しており、解析は概ね実験をシミュレーションできていることが確認された。

(2) 地盤補強のメカニズムに関する考察

模型載荷実験で確認された補強材による地盤補強のメカニズムについて、地盤内における変位と応力の分布状況から考察する。

Case1-0本とCase1-25本について、載荷荷重5kN時における地盤の鉛直方向の変位分布および応力分布を図-12～15に示す。Case1-0本ではフーチング底面直下の地盤変位が大きく、応力が集中していることがわかる。特にフーチング底面端部の地盤に大きな応力が発生している。

一方、Case1-25本ではCase1-0本の場合に比べて地盤の変位量が小さく、補強材先端部付近まで緩やかに変位が分布している。また、補強材が鉛直荷重を分担するため、フーチング底面直下の地盤応力は軽減されて、補強材先端部の地盤に応力球根が生じている。なお、これらの傾向は、補強材の本数が多い

いほど強く現れている。

次にCase1-0本とCase1-25本の載荷荷重5kN時における地盤の水平方向の変位分布を図-16, 17に示す。図より、Case1-25本の方がフーチング底面付近における地盤の水平変位が補強材により拘束されているのがわかる。

以上のことから、補強材の配置により①鉛直荷重が補強材を介して地表付近に比べ地盤内の拘束圧が大きい補強材先端部に伝達されること、②地盤のせん断変形が拘束され、基礎の支持力が増加し、沈下量が大きく低減することが考えられる。

4. まとめ

本研究では、良質な支持層の条件に満たない地盤を補強材（小口径杭）で補強して直接基礎を構築する場合を想定し、補強材による地盤の補強効果やそのメカニズムについて、模型載荷実験や解析により検討を行った。その結果、以下のことがわかった。

- 1) 補強材の本数が多いほど、基礎の支持力が増加し直接基礎の沈下量を低減することができる。
- 2) 補強材が鉛直荷重を分担するため、基礎底面直下の地盤の応力は軽減されて、補強材先端部の地盤に荷重が伝達される。
- 3) 補強材を配置することにより、地盤内のせん断変形が拘束される。
- 4) 2), 3) は、基礎の支持力の増加および沈下量の低減に大きく寄与している。

今後において、本研究成果を設計実務に活用していくためには、補強材による定量的な支持力増加の評価法や地震時の水平荷重に対する地盤の補強効果などの詳細な検討が必要であるが、直接基礎として地盤の支持力がわずかに足りない場合や基礎の沈下に対する制約が厳しい場合においては、小口径杭による地盤補強が十分に有効な方法になり得るものと考えられる。

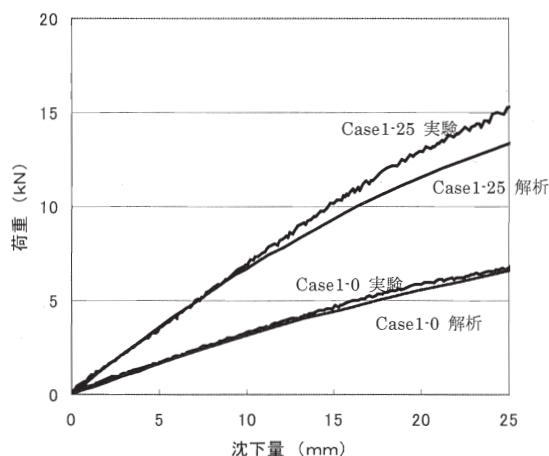


図-11 荷重-沈下量の関係
(実験値と解析値の比較)

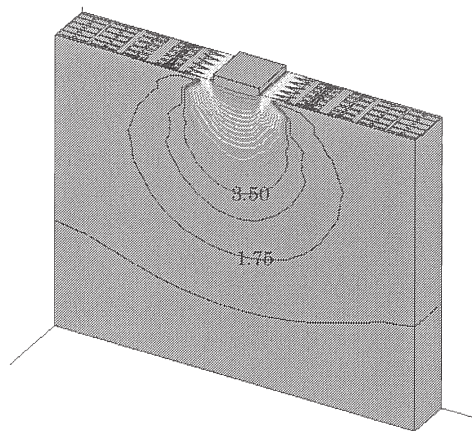


図-12 地盤の鉛直変位分布 (Case1-0 本)

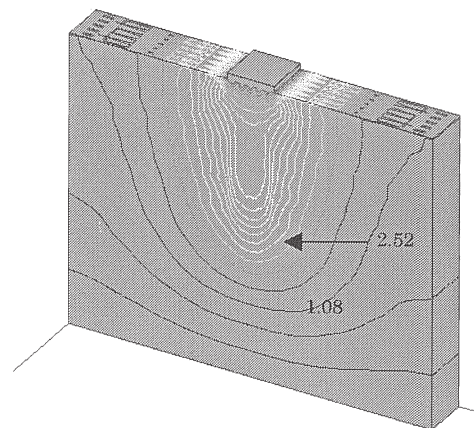


図-13 地盤の鉛直変位分布 (Case1-25 本)

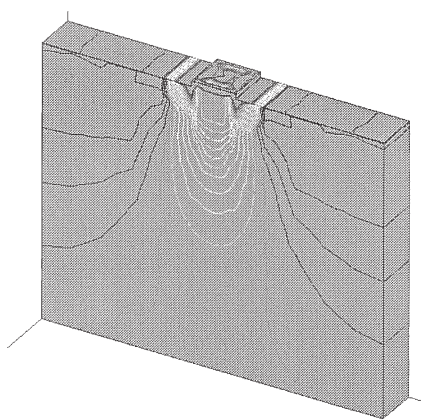


図-14 地盤の鉛直方向応力分布 (Case1-0 本)

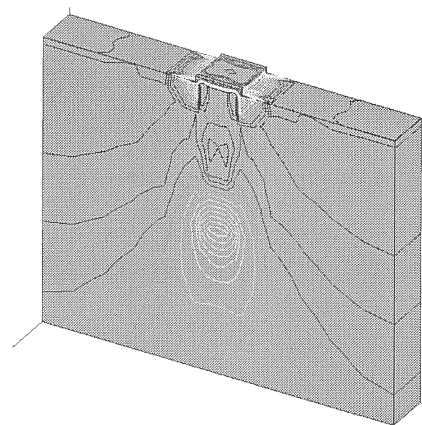


図-15 地盤の鉛直方向応力分布 (Case1-25 本)

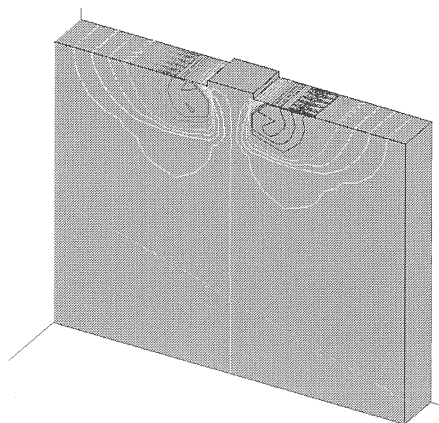


図-16 地盤の水平変位分布 (Case1-0 本)

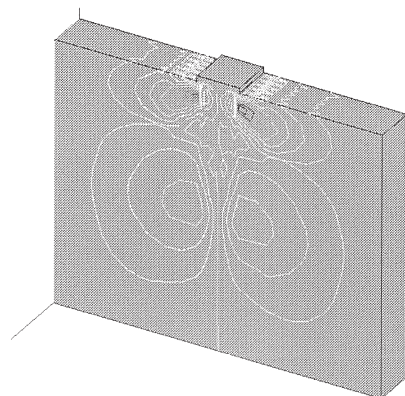


図-17 地盤の水平変位分布 (Case1-25 本)