

## 第4章 設 計

軟弱土固化処理工法の設計は、処理目的を達成するために必要な処理範囲、深さおよび改良強さを決定することである。しかしながら、対象となる軟弱土の物理的・化学的な諸性質は実にさまざまであるとともに極めて不均一である。

したがって、設計そのものも構造計算のように工学的な計算を多用するより、過去の経験・実績から類推するようなケースが多い。ここでは、処理目的別に設計の基本的な考え方について述べることにし、具体的な計算方法および計算例等の紹介はその一部にとどめた。

### 4-1 軟弱土固化処理工法の目的と考え方

#### 4-1-1 処理目的

処理目的は概ね次のように分類される。

- ① 軟弱土を運搬可能とする。
- ② 軟弱土を盛土材等に有効利用する。
- ③ 軟弱土に含まれる有害物質の封じ込めを計り、軟弱土の発生する悪臭を軽減する。
- ④ 軟弱土が堆積する地盤上に構築する構造物の安定を計る。
- ⑤ 軟弱土が堆積する地盤上の重機の作業性(トラフィカビリティ)を確保する。
- ⑥ その他

#### 4-1-2 軟弱土を運搬可能とする場合

浚渫した軟弱土を処分地まで運搬する場合、浚渫したままの状態ではダンプトラック等の荷台よりこぼれ落ちる可能性が極めて高い。ダンプトラックが舗装・未舗装の割合が8：2の道路を約3時間、平均30km/hで走行した場合の軟弱土の運搬状況は、

- ① 一軸圧縮強さ $qu=30\text{kN/m}^2$ 以上：支障なし
- ② 一軸圧縮強さ $qu=5\sim 30\text{kN/m}^2$ ：軟弱土の性状、運搬状況により異なるが極めて困難
- ③ 一軸圧縮強さ $qu=5\text{kN/m}^2$ 以下：不可

と言われている。

これより、軟弱土の改良強さを $qu=50\sim 100\text{kN/m}^2$ とすることが一般的である。ただし、軟弱土の性状、運搬状況は様々であり、試験施工により改良強さを設定することが望ましい。

#### 4-1-3 軟弱土を盛土材等に有効利用する場合

ほとんどの軟弱土は、固化処理をすることにより盛土材や埋戻し材あるいは裏込め材等に有効利用することが可能である。これらの用途に応じて目標の強度は様々に設定されるが、一例をあげれば次の通りである。

##### ① 盛土材(一般の造成盛土)

まず、軟弱土を運搬可能とすることが必要である。固化処理を行った軟弱土は、運搬・敷均し・転圧により一時的に強度が低下することが多いため、改良目標強度を大きめに設定する。一般に一軸圧縮強さ $qu=100\sim 300\text{kN/m}^2$ とした例が多い。

##### ② 道路盛土(路床材)

固化処理土を敷均し・転圧後、 $\text{CBR}=2\sim 3$ とすることが一般的である。

##### ③ 埋戻し材、裏込め材

目的とされる土圧・単位体積重量を考慮の上、設定される。

#### 4-1-4 有害物質の封じ込め、悪臭を軽減する場合

軟弱土を原位置に封じ込めて有害物質の溶出を阻止する場合に必要なとされる強度は、施工実績等より一軸圧縮強さ $qu=100\text{kN/m}^2$ 程度と考えられる。いずれにせよ、軟弱土の性状あるいは有害物質の含有の状況が様々であることより、事前に予備試験を実施することが必要である。

また、軟弱土に内包する硫化水素( $\text{H}_2\text{S}$ )、アンモニア( $\text{NH}_3$ )等の悪臭・刺激臭を固化処理により軽減させることも可能であるが、この場合は臭気ガス分析が必要となる。

#### 4-1-5 構造物の安定を計る場合

固化された軟弱土は一般に良質な地盤と考えられる。一軸圧縮強さ $q_u=100\sim 200\text{kN/m}^2$ 程度の固化処理地盤は、粘着力を有する粘性土地盤( $\phi=0^\circ$ )と考えて、通常の土質計算によって支持力・沈下等の検討を行えばよい。

#### 4-1-6 トラフィカビリティを確保する場合

全層を固化処理する場合(全層改良)について述べる。

地盤上を建設機械が走行する場合の建設機械の種類とコーン指数( $q_c$ )の関係は、表4-1に示すとおりである。

一般に、一軸圧縮強さ $q_u$ とコーン指数 $q_c$ との間には、

$$q_c = (5\sim 10) q_u \quad (\text{kN/m}^2)$$

の関係があるといわれており、堆積した軟弱土層が薄く軟弱土層全層を固化処理する場合は、表4-1より必要改良強度を求めることが可能である。ただし、軟弱土を固化処理した土は繰り返し応力を受けると泥寧化し易いため、直接、タイヤ・履帯が接触しないような措置(遮断土砂、敷鉄板等)が別途必要である。

表4-1 建設機械の走行に必要なコーン指数( $q_c$ )  
(一部、加筆)

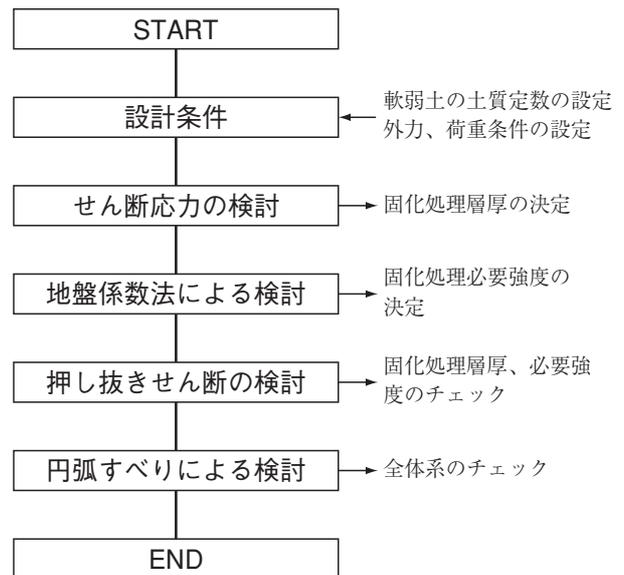
建設機械の種類	接地圧 $Q$ ( $\text{kN/m}^2$ )	コーン指数 $q_c$ ( $\text{kN/m}^2$ )
超湿地ブルドーザ	10~20	200以上
湿地ブルドーザ	20~40	300以上
中型普通ブルドーザ	40~50	500以上
大型普通ブルドーザ	60以上	700以上
スクレーブドーザ	—	600以上
被牽引式スクレーパ	—	700以上(湿地型は400以上)
モータスクレーパ	—	1000以上
ダンプトラック	—	1200以上

#### 4-2 軟弱土固化(表面処理)について

##### 4-2-1 設計手順

軟弱土堆積層が厚いときは、その表面部分のみを固化処理する場合(表面処理)が圧倒的に多いので、その設計方法について述べる。

表面処理の設計手順は、次の通りである。



##### 4-2-2 せん断応力算定

###### 1) ポストンビルディング法(2:1分布法)

この方法は、帯状荷重を受ける地盤内の応力が、ある閉合した領域内で直線的な分布をするという、クーゲラーの仮定に基づいた簡便計算法であり、深さ $Z$ なる点での垂直応力は次式で表わされる。

$$\sigma_z = \frac{qB}{B + 2Z \tan \phi_0}$$

上式において $\tan \phi_0 = \frac{1}{2}$ としたものが2:1分布法である。

$$\sigma_z = \frac{qB}{B + Z}$$

処理層の支持力 $q_{d1}$ と帯状荷重 $q$ 、および未処理の支持力 $q_{d2}$ と垂直応力 $\sigma_z$ を比較して、

$$q_{d1} > q$$

$$q_{d2} > \sigma_z$$

の条件を満足するように、改良強さあるいは処理厚を決定する(図4-1参照)。

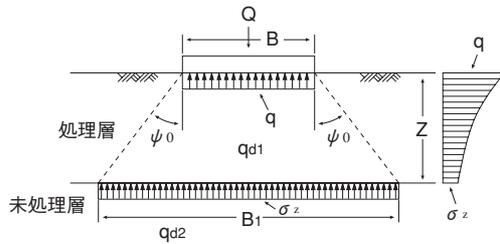


図4-1 Köglerの直線的応力分布

## 2) プーシネスクの方法

プーシネスクによれば、輪荷重のような円形分布荷重の中心下の深さ $z$ での最大せん断応力は下式により求められる。

$$\tau_{\max} = \frac{3P_0}{4} \left[ \frac{(z/a)}{\{1+(z/a)^2\}^{1/2}} - \frac{(z/a)^3}{\{1+(z/a)^2\}^{3/2}} \right]$$

$\tau_{\max}$  : 中心軸下任意の点における  
最大せん断応力

$P_0$  : 接地圧

$z$  : 深さ

$a$  : 載荷面の半径  $a = (12+P)$

$P$  : 輪荷重

これによって得られた最大せん断応力 $\tau_{\max}$ が、原地盤の粘着力よりも小さくなるように処理厚 $z$ を決めればよい(図4-2参照)。

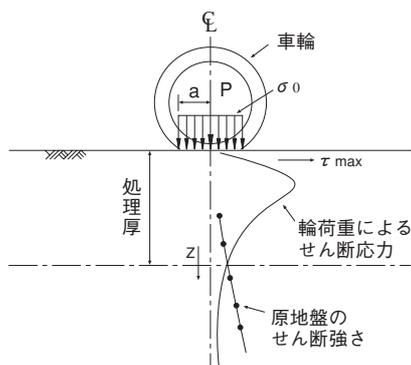


図4-2 処理厚算出方法の説明図

## 4-2-3 地盤係数法による検討

固化盤の沈下量・せん断応力・曲げ引張応力について、地盤係数法により検討を行う。地盤係数法はWinklerの仮定に基づいて、未処理層を地盤反力係数 $k$ のスプリングの集合モデルとして考えるものである(図4-3参照)。

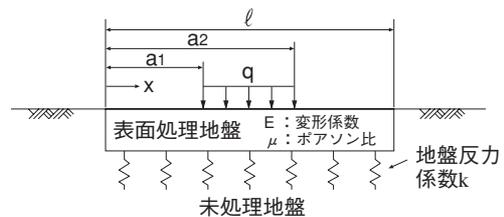


図4-3 表面処理の地盤モデル

強さ $k$ のばねで支えられた梁のたわみ方程式を適用する。

$$W^{IV}(x) + 4\alpha^4 w(x) = f(x)/D$$

$$\alpha = \sqrt[4]{bk/4D}$$

$f(x)$  : 等分布荷重 $q$ のときは $f(x)=q$

$E$  : 梁の弾性係数=表面処理地盤の変形係数

$b$  : 梁の幅=表面処理地盤の幅

$\mu$  : ポアソン比

$D$  : たわみの剛性= $EI/(1-\mu^2)$

上式の一般解は次式となる。

$$w(x) = A_1 Y_1(x) + A_2 Y_2(x) + A_3 Y_3(x) + A_4 Y_4(x)$$

ここに、 $A_1, A_2, A_3, A_4$ は境界条件から決まる任意定数であり、 $Y_1(x), Y_2(x), Y_3(x), Y_4(x)$ は、

$$Y_1(x) = \cos \alpha x \cdot \cos h \alpha x$$

$$Y_2(x) = \frac{1}{2} (\sin \alpha x \cdot \cos h \alpha x + \cos \alpha x \cdot \sin h \alpha x)$$

$$Y_3(x) = \frac{1}{2} \sin \alpha x \cdot \sin h \alpha x$$

$$Y_4(x) = \frac{1}{4} (\sin \alpha x \cdot \cos h \alpha x - \cos \alpha x \cdot \sin h \alpha x)$$

$x = 0, x = 1$ でモーメントとせん断力がゼロであるという条件で解くと、沈下量 $\omega(x)$ 、曲げモーメント $M(x)$ 、せん断力 $Q(x)$ が求まる。

以上の検討に必要な原地盤の地盤反力係数、処理地盤の変形係数・ポアソン比・一軸圧縮強さ～曲げ応力は、図4-4～図4-6および図3-11より求められる。

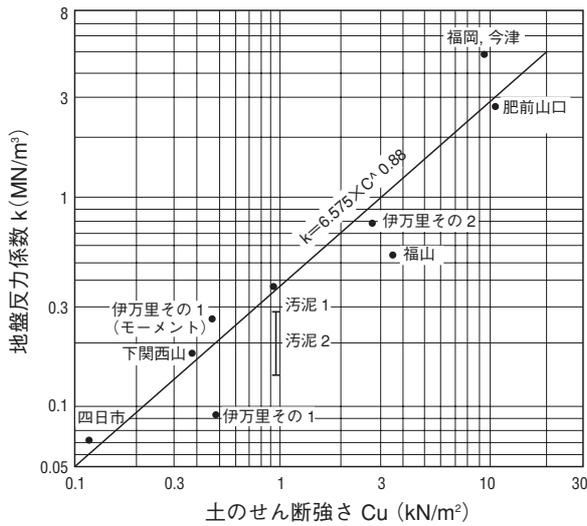


図4-4 土のせん断強度と地盤反力係数<sup>5)</sup>

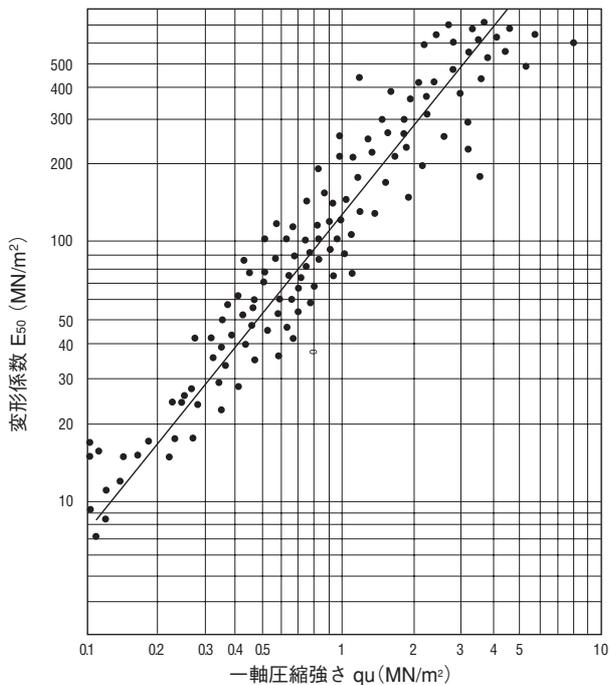


図4-5 変形係数と一軸圧縮強さの関係

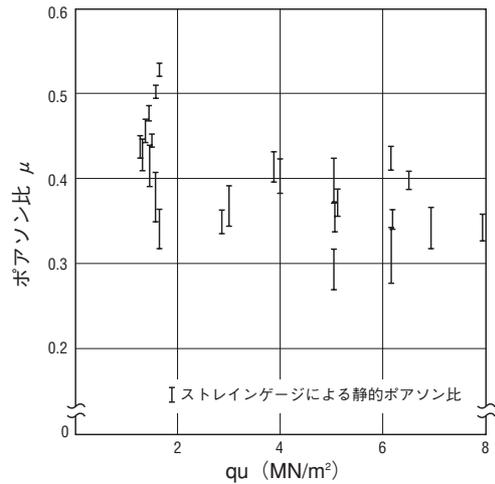


図4-6 室内改良土の $\mu$ と $qu$ の関係 (一部加筆)

#### 4-2-4 押し抜きせん断の検討

荷重による押し抜きせん断応力と処理地盤の粘着力とのつり合いを検討する。

検討は、下式によって行う(図4-7参照)。

$$\tau_p = \frac{P}{b \cdot z}$$

$\tau_p$  : 押し抜きせん断力

$P$  : 上載荷重

$b$  : せん断周長

長方形荷重の場合  $b = 2(B+L)$

円形荷重の場合  $b = 2a\pi$

$a = 12 + P$

$z$  : 処理層厚

$\tau_p < c$ となる条件を満足するように $z$ を決定する。

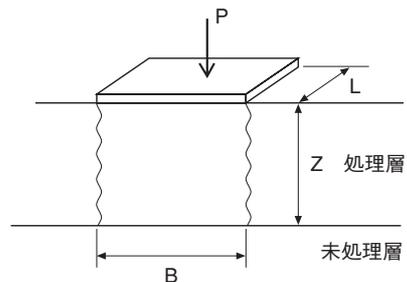


図4-7 押し抜きせん断模式図

#### 4-2-5 円弧すべりによる検討

すべり破壊に対する安全率は下式により求める(図4-8参照)。

$$F_s = \frac{R \cdot \sum (c \cdot \ell + W' \cdot \cos \alpha \cdot \tan \phi)}{\sum W \cdot x}$$

$$= \frac{\sum (c \cdot \ell + W' \cdot \cos \alpha \cdot \tan \phi)}{\sum W \cdot \sin \alpha}$$

- F<sub>s</sub> : すべり破壊に対する安全率
- R : すべり円の半径
- c : 粘着力
- ℓ : 分割片の底辺長
- W' : 分割片の有効重量
- α : 分割片で切られたすべり面の中点とすべり円の中心を結ぶ直線と鉛直線のなす角度
- φ : 土の内部摩擦角  
(固化処理土、汚泥は一般に0°)
- W : 分割片全重量
- x : 分割片の重心とすべり円中心との水平距離

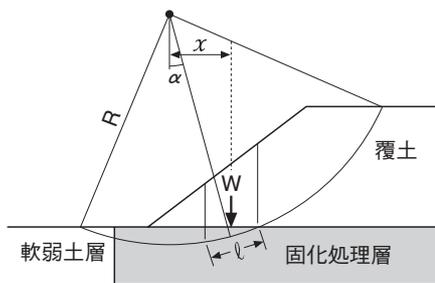
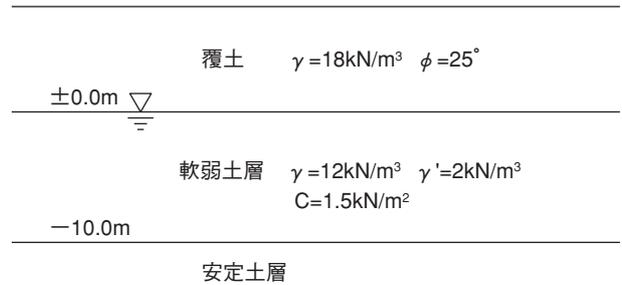


図4-8 円弧すべりによる安定計算

#### 4-2-6 計算例

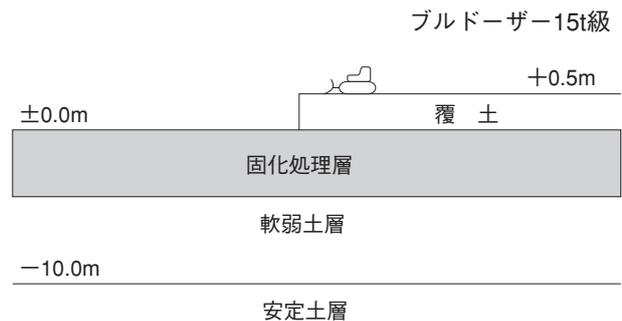
モデル地盤を使った計算例を以下に示す。

##### 1) 土質条件



##### 2) 荷重条件

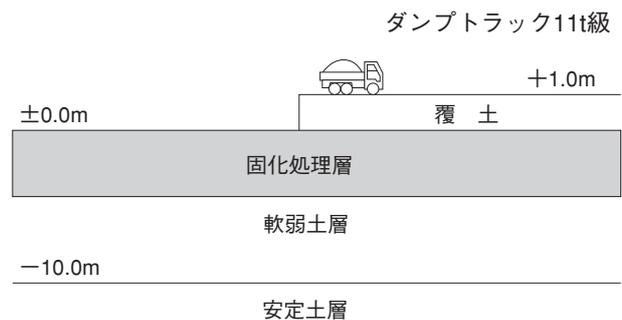
① 覆土を50cm撒き出す



ブルドーザー15t級仕様

- 全装備重量 : 15t
- 接地圧 : 28kN/m<sup>2</sup>
- 覆帯中心距離 : 2.16m
- 接地長 : 3.12m
- 覆帯幅 : 0.87m

② 覆土1.0mの上をダンプトラックが走行する



ダンプトラック11t級仕様

- 全装備重量 : 19.8 t
- 全幅 : 2.49 m
- 接地長(L) : 0.2 m
- 接地幅(B) : 0.5 m
- 前輪荷重 : 3.96 t (= 0.2 × 19.8)
- 後輪荷重 : 15.84 t (= 0.8 × 19.8)
- 軸距 : 4.69 m

### 3) せん断応力の算定

ブルドーザの載荷重の半径は、接地面積が等しい円形に換算して求めた。

- 全装備重量 : 15 t
- 換算半径 :  $(87 \times 312 / \pi)^{1/2} = 93.0 \text{ cm}$
- 接地圧 : 28 kN/m<sup>2</sup>
- 衝撃を考慮した接地圧(1.2倍の衝撃を考慮) :  $28 \times 1.2 = 34 \text{ kN/m}^2$

ダンプトラックの輪荷重の場合、接地半径a (m)は輪荷重P+12/100として求める。

- 衝撃を考慮した輪荷重(1.2倍の衝撃を考慮) :  $15.84 \times 1.2 / 2 = 9.5 \text{ t} (= 95 \text{ kN})$
- 接地半径 :  $(9.5 + 12.0) / 100 = 0.215 \text{ m}$
- 等分布荷重 :  $95 / (0.215^2 \times \pi) = 654 \text{ kN/m}^2$

計算結果を図4-9に示す。最大せん断応力と軟弱土層の粘着力が釣り合う深度が、必要な固化処理厚さである。それぞれ下記のとおりとなる。

- ブルドーザ15 t級 : 3.5 m  
(覆土厚0.5 mを除き3.0 m)
- ダンプトラック11 t級 : 4.0 m  
(覆土厚1.0 mを除き3.0 m)

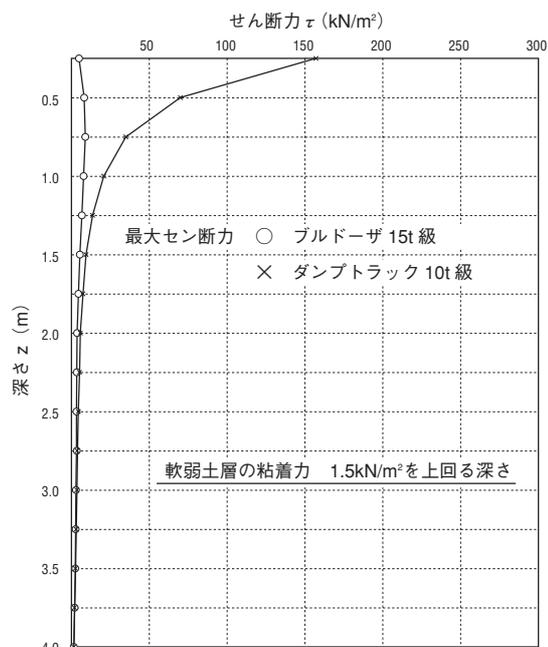


図4-9 せん断力計算結果

### 4) 地盤係数法による検討

地盤反力係数 : 吉田の提案式

$$k = 6.575 \times C^{0.88} \text{ kN/m}^3$$

(C : 未改良地盤の粘着力)

より推定する。軟弱土の粘着力  $C_u = 1.5 \text{ kN/m}^2$  より  $k = 0.542 \text{ MN/m}^3$  を得る。

固化処理層の変形係数E : 15,000 kN/m<sup>2</sup>

( $q_u = 100 \sim 300 \text{ kN/m}^2$  として)

ポアソン比 : 0.3

想定した施工条件は、ダンプトラック11 t級が図4-10のように固化処理層の端部に乗った場合である。

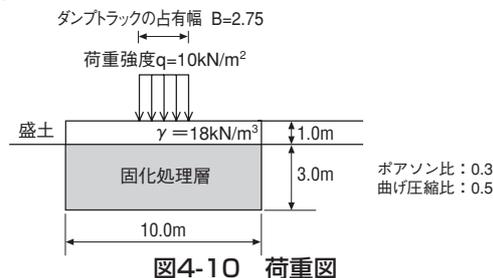


図4-10 荷重図

ダンプトラック11 t級の接地圧は、覆土内での荷重分散を考慮して下記のとおりとする。

荷重作用位置	荷重強度	摘要
x=0~10	q=18kN/m <sup>2</sup>	盛土
x 3.625~6.375	q=10kN/m <sup>2</sup>	ダンプ

計算結果は次に示すとおりである。

- 最大変位  $S_{max}$ .....4.0 cm
- 最大曲げモーメント  $M_{max}$ .....20.0 kN・m
- 最大せん断力  $\tau_{max}$ .....8.8 kN
- せん断応力度  $\tau$  .....4.4 kN/m<sup>2</sup>
- 最大曲げ応力度  $\sigma_{max}$ .....13.35 kN/m<sup>2</sup>

これらの最大値と許容曲げ応力・せん断応力を比較すると、固化処理層の一軸圧縮強さが  $qu = 200 \text{ kN/m}^2$  の場合に適用可能となる。

- 許容曲げ応力  $\sigma_b$  (kN/m<sup>2</sup>) :  
 $0.5 qu = 0.5 \times 100 = 50 > 13.35$
- 許容せん断応力  $\tau_b$  (kN/m<sup>2</sup>) :  
 $0.5 qu = 0.5 \times 100 = 100 > 4.4$   
 (0.5は図3-11より)

### 5) 押し抜きせん断の検討

ダンプトラック11t級の接地圧は覆土内での荷重分散を考慮し、3)の検討と同様とする。したがって、せん断周長は  $(1.355 + 1.655) \times 2 = 6.02$  であることより、

$$\tau = 95 / (6.02 \times 3.0) = 5.3 < 50$$

となり、押し抜きせん断に対して、十分安全である。

### 6) 円弧すべりの検討

計算結果は、図4-11に示したとおりであるが、十分に安全である。

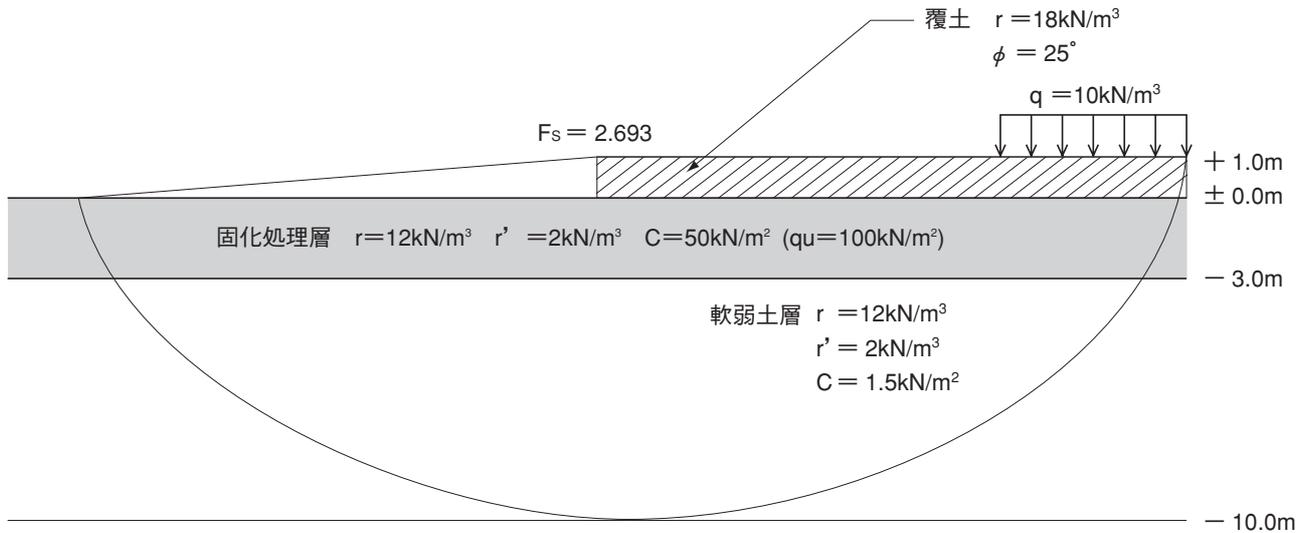


図4-11 円弧すべり計算結果

#### 【参考文献】

- 1) 喜田、久保、漆原：「軟弱泥土上のトラック運搬における固化処理の適用」 土質安定材料に関する講演会、1980
- 2) 久野、佐久間、高橋、神保：「流動化処理土を浸透した水のPH」, 第30回土質工学研究発表会等
- 3) 高橋、今泉、横山、柴田：「流動化処理された下水汚泥焼却灰の特性」, 第30回土質工学研究発表会等
- 4) 最上、福田：「現場技術者のための土質工学」, 1987 鹿島出版会、等

- 5) 吉田：「超軟弱地盤の地盤反力係数と改良土の変形係数について」, 第33回土木学会年次学術講演会概要集
- 6) 齊藤、他：「セメント系硬化剤による深層混合処理工法に関する研究(その6)ー改良土の力学的諸性質ー」, 第13回土質工学研究発表会
- 7) 新名、他：「セメント系硬化剤による深層混合処理工法に関する研究(その1)ー改良土の物理的性質および一軸圧縮特性ー」, 第13回土質工学研究発表会