

6 地盤変位を受ける埋設管の浮き上がりに対する理論的検討

大きな地盤変位が発生する地盤中に埋設管があるとき、埋設管は地盤から側方に移動する力を受ける。この際、埋設管はいつまでも水平方向に力を受け、変位するわけではなく、ある程度の変位を受けると地表に浮き上がってくる。ここでは、このことを理論的に明らかにするとともに、その際に埋設管が受ける力について検討する。

地盤が側方に移動する問題は、地盤を座表系にとれば、図6.1(a)に示すように埋設管が側方に移動する問題となる。この問題を、さらに、図6.1(b)に示すような剛体が水平方向に力 F で押される問題に置換する。

ここでは、上界定理に基づき、この問題を解析する。上界定理とは変形の適合状態を満たすような変位の系があるとすれば、その系により計算される力は真の力より多きということである。すなわち、この解析により求められる力 F は実際に埋設管を浮き上がらせるのに必要な力と等しいかこれより大きいことを意味している。これは設計にとって安全側の評価となっている。本論ではメカニズムを理解するために非常に簡単な過程から順次実情に近い問題に移行する。

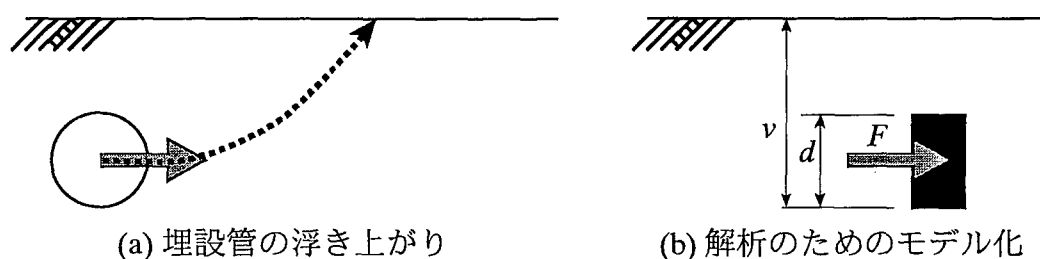


図6.1 地盤変位を受ける埋設管のモデル化

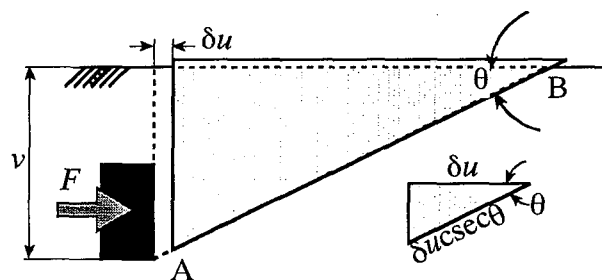


図6.2 直線すべりのメカニズム

6.1 直線すべり

6.1.1 自重を無視したケース

一番簡単なケースとして、図6.2に示すように三角形のブロックが斜面に沿って浮き上がるメカニズムを考える。なお、土の引っ張り抵抗は無視し、滑り面におけるせん断強度を一定値 τ_f とする。

変形の適合条件は図中に示すとおりである。従って，土の重力の影響を無視すれば，仮想仕事式は次のようになる。

$$F \delta u = \int_A^B \frac{\delta u \tau_f}{\cos \theta} ds = \frac{v \delta u \tau_f}{\cos \theta \sin \theta} \quad (6.1)$$

すなわち，

$$F = \frac{2v\tau_f}{\sin 2\theta} \quad (6.2)$$

従って， F の最小値は $\theta=45$ 度で発生し，その際の荷重は次式で与えられる。

$$F = 2v\tau_f \quad (6.3)$$

これより，ガスを浮き上がらせるに必要な力は下端深さ v に比例することがわかる。

6.1.2 直線すべり，自重考慮

前項の計算では土塊ブロックの自重は考慮しなかった。これを考慮すると，仮想仕事式は次のようになる。

$$F \delta u = \frac{v \delta u \tau_f}{\cos \theta \sin \theta} + \frac{1}{2} v \cdot \frac{v}{\tan \theta} \cdot \gamma_t \cdot \delta u \tan \theta \quad (6.1)$$

従って，浮き上がり荷重は次のようになる。

$$F = \frac{2v\tau_f}{\sin 2\theta} + \frac{1}{2} v^2 \gamma_t \quad (6.2)$$

この最小値も $\theta=45$ 度で発生する。その値は次のようになる。

$$F = 2v\tau_f + \frac{1}{2} v^2 \gamma_t \quad (6.3)$$

6.2 抜け出し型の直線すべり

6.2.1 基礎式

前節の方法では，深さが深くなると，式(6.5)の第二項（重力項）が急激に大きくなり，浮き上がるための荷重は急激に大きくなる。そこで，図6.1の抜け出し型を考える。すべりによる抵抗量は上下二つのすべりを考えたので大きくなるが，重力項は小さくなる。

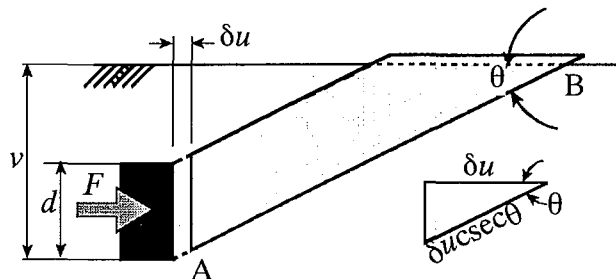


図6.1 抜け出し型のメカニズム

これまでと同様の検討により、次の式が得られる。

$$F\delta u = \frac{2v\delta u}{\sin 2\theta}\tau_f + \frac{2(v-d)\delta u}{\sin 2\theta}\tau_f + \frac{1}{2}\left\{\frac{v^2}{\tan \theta} - \frac{(v-d)^2}{\tan \theta}\right\}\gamma_t\delta u \tan \theta \quad (6.1)$$

整理すると、次のようになる。

$$F = \frac{2(2v-d)}{\sin 2\theta}\tau_f + \frac{2vd-d^2}{2}\gamma_t \quad (6.2)$$

6.2.2 例題

$v=2\text{m}$, $d=0.5\text{m}$, $\gamma_t=1.8\text{tf/m}^3$, $\tau_f=1\text{tf/m}^2$ を考える。結果を図6.1に示す。ここで slope および slope /w gravity として示したのは前節の全体滑りのケースである。いずれの場合でも滑り面の角度 $\theta=45$ 度の際に荷重が最小値になることは式からも明らかであるが、図からも改めて実証されている。

バンド幅を考えた場合の荷重は常に全体滑りのメカニズムによる荷重より大きい。すなわち、抜け出し型の崩壊は発生せず、常に全体型の崩壊が起こることが分かる。また、前項の全体型のメカニズムでは土の重量を考慮することが重要であることが分かる。

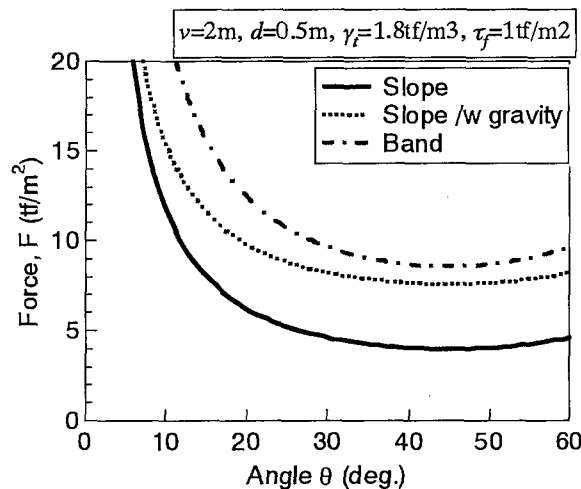


図6.1 解析結果

6.2.3 構造物幅の影響

構造物の幅 d が小さくなったり、深さ v が大きくなると、重力の効果が相対的に小さくなることは式から明らかであるので、次に、 d をパラメータとして最小の荷重を与える F を求める。式から、最小の荷重は45度の時に起こることは明らかであるので、二つのケースはそれぞれ次のように書くことができる。

$$F_2 = 2v\tau_f + \frac{1}{2}v^2\gamma_t$$

$$F_3 = 2(2\nu - d)\tau_f + \frac{2\nu d - d^2}{2}\gamma_t$$

その差をとると、次のようになる。

$$F_3 - F_2 = 2(\nu - d)\tau_f + \frac{2\nu d - d^2 - \nu^2}{2}\gamma_t = 2(\nu - d)\tau_f - \frac{(\nu - d)^2}{2}\gamma_t \quad (6.1)$$

これが負になるときが抜け出し型が支配的になる条件である。極端なときとして $d=0$ を代入すると

$$F_3 - F_2 = 2\nu\tau_f - \frac{\nu^2}{2}\gamma_t$$

従って、ここで与えた条件ではこの式が負になる事はなく、常に斜面型が発生する

6.3 摩擦材料

6.3.1 強度の上載圧依存性

これまでの検討では、せん断強度は一定と考えた。粘性土ではこの仮定は妥当であるかもしれないが、砂のように拘束圧に依存する様な材料では誤差が大きくなる。そこで、摩擦材料について検討する。これまでの経緯から全体滑りが卓越する。また、自重の考慮は摩擦材料について考える際には必須である。

図6.1に斜面の法線方向の力を示す。これは、次のように表される。

$$\sigma_n = \frac{\sigma_v + \sigma_h}{2} + \frac{\sigma_v - \sigma_h}{2} \cos \theta = \gamma_t \nu \left(\frac{1+K_0}{2} + \frac{1-K_0}{2} \cos 2\theta \right) \quad (6.1)$$

ここで、 $\sigma_v = \gamma_t \nu$ であるので、仮想仕事式は次のように表される。

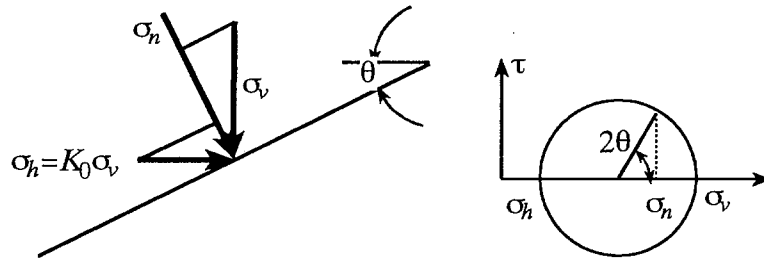


図6.1 斜面の法線方向の力

$$F \delta u = \int_A^B \frac{\delta u \sigma_n \tan \phi}{\cos \theta} ds + \frac{1}{2} \nu^2 \gamma_t \delta u \quad (6.2)$$

ここで、 ϕ は内部摩擦角である。これを積分すると次式が得られる。

$$\begin{aligned} F &= \int_A^B \frac{\gamma_t \nu \left(\frac{1+K_0}{2} + \frac{1-K_0}{2} \cos 2\theta \right) \tan \phi}{\cos \theta} \frac{d\nu}{\sin \theta} + \frac{1}{2} \nu^2 \gamma_t \\ &= \frac{\gamma_t \nu^2}{\sin 2\theta} \left(\frac{1+K_0}{2} + \frac{1-K_0}{2} \cos 2\theta \right) + \frac{1}{2} \nu^2 \gamma_t \end{aligned} \quad (6.3)$$

$K_0=1$ の時には最小値はこれまでと同様 $\theta=45$ 度で発生するが、それ以外の場合には45度とはならない。

6.3.2 ダイレタンシーの効果

ダイレタンシーがあると滑り面におけるせん断応力の作用方向は滑り面ではなく、これとダイレタンシー角 (ν) だけずれることになる。簡単のため、内部摩擦角 (ϕ) とダイレタンシー角が等しいとする。これまでと同じ計算により、次の式が得られる。

$$F = \frac{2c\nu \cos \nu}{\sin(\theta) \cos(\theta + \nu)} + \frac{1}{2} \gamma_t \nu^2 \cot \theta \tan(\theta + \phi) \quad (6.1)$$

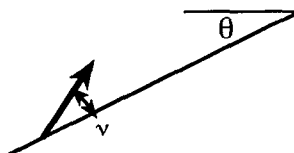


図6.1 ダイレタンシーによる変形の方角

また、両者が異なるときには次式となる。

$$F = \frac{2c\nu \cos \nu}{\sin(\theta) \cos(\theta + \nu)} + \frac{\gamma_t^2 \cos \theta \tan \phi \cos \nu - \sin \nu}{2 \tan^2 \theta} + \frac{1}{2} \gamma_t \nu^2 \cot \theta \tan(\theta + \phi) \quad (6.2)$$

これを、これまでと同じに図化すると、次のようになる。なお、これまでの例題では滑り面の発生する角度は45度であったが、ダイレタンシーを考慮すると最小の荷重を与える勾配はより変化する。

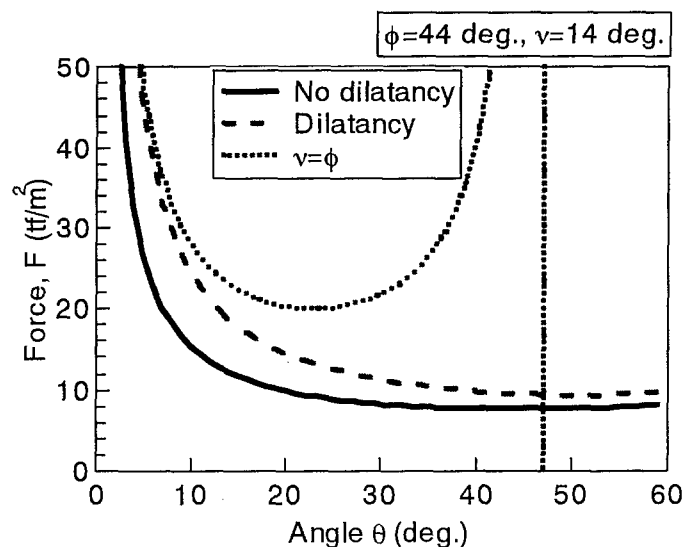


図6.2 ダイレタンシーのあるケース