

名古屋大学工学部 正員 工博 松尾 稔

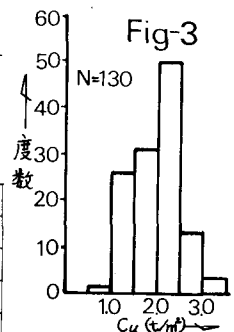
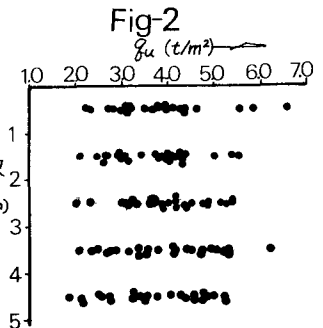
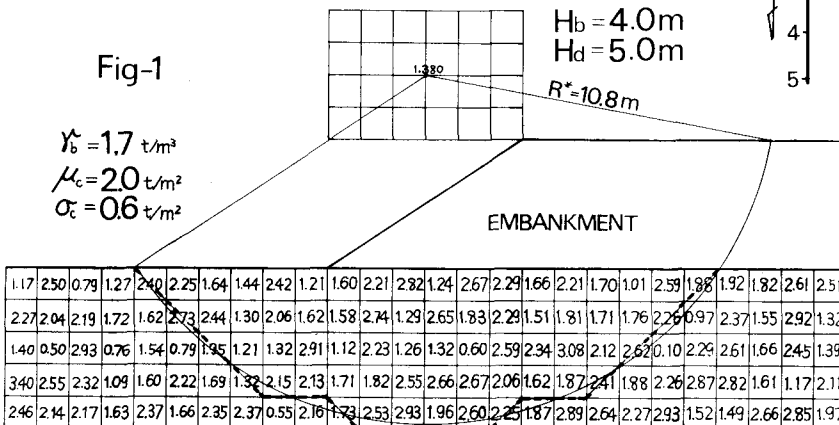
京都大学工学部 正員 工修 黒田勝彦

1. はじめに

実際のすべり面の形状や位置が、計算上予想したそれらとかなりかけ離れてきた経験をわれわれはもっている。この相違は、力学的な信頼度と費用函数を結合するような場合に重要な問題となるが、同時に、この問題の解明は、土質力学における破壊や変形のメカニズムの解明そのものへの接近となりうると考えられる。このような期待のもとに、筆者の一人は、数年前に砂層の^{(1)~(3)}掘き比の位置的なばらつきを考慮して、二、三の試みを行なったが、結果は不満足なものに終わっていた。その後、やや短絡の感もぬかれないが、すべり面の形状は固定し、位置の相違だけに着目して考察を進めてきたところ、この種の問題に対する一つの接近になりうると考えられるに至ったので、ここに成果の一部を報告する。さて、土質諸係数は種々の原因によってばらつく。それには、地盤の不均一性に起因する本来的なばらつきと、試験時の偶然的なばらつきとがある。これらのばらつきの性質を検討した結果ほとんどの場合、正規分布で近似できることを発表^{(4), (5), (6)}した。ここでは、盛土を例に、強度の位置的分布と $\phi_u=0$ 法による円弧すべり面の位置的なばらつきとを結びつけ、すべり面の生起確率について考察する。

2. 地盤中の強度の分布

筆者らは、盛土の急速施工による破壊を考え、工学的に一樣として取扱わざるをえない粘土層の規定法について以前に発表⁽⁵⁾した。また、これらの一樣粘土層内の一軸圧縮強度 q_u 、および単位体積重量 γ_u 、さらに盛土の単位体積重量 γ_s は正規分布に従い、かつこれらが互いに独立であることもすでに示⁽⁷⁾した。この結果に基づき、ここでは一樣粘土層内の非排水せん断強度 $C_u (= \frac{q_u}{2})$ を正規確率変数と考え、粘土層を図-1のように分割したメッシュに C_u を割り振った。それらの中からランダムに一例を抜き出し q_u の深度方向分布および C_u の度数分布の形に整理したのが図-2、3である。計算の対象は、図-1に示すように厚さ5mの粘土層上に高さ H_b



で斜面欠配が1.5の盛土を建設する場合とし、メッシュの大きさは1m正方形にとり、対象領域を130個に分割した。強度の位置的分布を得るためには、電子計算機で正規乱数を発生させ、図-1の左上部のメッシュから右側へ順次割り振っていった。このような割り振り方は、以前、面積比の分布を作り出す場合に用いているが、乱数の発生回数を多数回繰り返せば、各メッシュごとの強度分布はすべて同一の分布形になり、割り振り方法自体の問題は解決される。

3. 円弧すべり計算法について

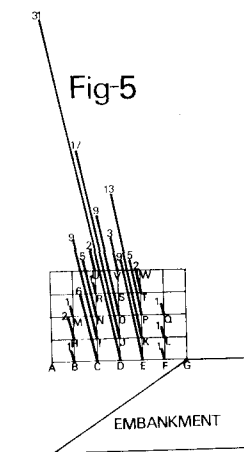
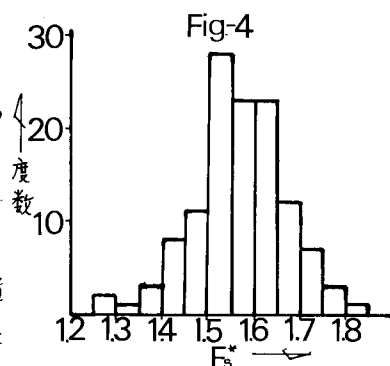
強度が位置的にランダムな場合には、従来の計算結果にみられるような顕著な傾向を持つ安全率 F_s のコンターが得られないため、図-1に示すような格子点を限定して F_s を求めた。格子点の範囲を広げて計算した結果によるとコンターの形状は複雑になるが最小安全率 F_s は1つだけ求まることが確認できた。ただし、 F_s を与える格子点ばかりの範囲でばらつくことはいくまでもない。すべり円弧は図-1に示すような疑似すべり面で置き換えて計算した。このような置換法の精度には若干問題があるが、同様の置換法で計算された結果についての報告によると従来の方法と大差がないということであるから、ここでは一応、疑似すべり面による計算法を用いた。

4. 最小安全率 F_s の分布

図-4は、上に述べた方法により最小安全率を合計122回求めた結果である。図から明らかのように、 F_s は正規分布している。すなわち、地盤内の強度が位置的にばらついていると、 $\phi_u=0$ 法で算出される F_s も本来的に図-4のようにばらついてくる。したがって数多くのサンプリング、土質試験を通して地盤内の強度の位置的ばらつきを求め、その結果算出された F_s がたとえ1.7であったとしても、それは絶対的なものではなく、偶然性を容認したある信頼度をもって評価されるべきである。なぜなら、得られた一組の土質試験結果は偶然その値を示したに通じないと考えられるからである。また、強度が位置的にばらつくとした場合の破壊確率 P_f は、筆者らが従来定義してきた P_f と異なってくることが予想されるが、この差異等については紙数の都合上、割愛し、別の機会に発表する。

5. 最小安全率を与える格子点の分布

前述したように、 F_s を与える格子点はばらついてくる。図-5は、格子点ごとに F_s が算出された回数を棒グラフの形で示したものである。この例によると最小安全率を与える格子点はD点か最も頻度が高く、ついで、J、K、E、I、G等の順になっている。ちなみに、 $C_u=25\text{ t/m}^2$ (一定)として、慣用の方法で求めた最小安全率は1.57で算出格子点はJ点である。このことから慣用の方法で求めたすべり円弧の位置が決定的なものではなく、偶然、算出された結果に通じないことがわかる。また、この例のような盛土では、従来の方法で計算すると底部破壊となり、その場合、 F_s を与える点は、D、J、O、S、Vを結ぶ線上、すなわち中実円となることが知られている。この傾向は図-5においても一応保たれている。すなわち、この例の場合は50%以上がこの線上にある。これまで、破壊後のすべり



面に当てはめた場合の最小安全率と当初設計でのそれとが一致しない例がよくあるが、その原因としては、強度試験の精度、個数も乏ることなから、強度が位置的にばらついている事実も含まれていることに注目すべきであろう。

6. 格子状での最小安全率とすべり円弧の半径との関係

図-5に示したように、 R^* を与える又は各格子ごとにばらついているが、ある格子状に着目した場合、その状の最小安全率 R^* とそれに対応するすべり円弧の半径 R^* との関係はどうなっているであろうか。これを調べる目的で、格子状ごとに R^* と R^* の相関を描いたのが図-6である。図中、●印はB, C, D, E, Fの名状での R^* 、×印はH, I, J, K, Lの名状での R^* 、○印はM, N, O, P, Qの名状での R^* を表わしている。注目すべきことは、B~F名状では $R^*=8.1m$ 、H~L名状では $R^*=9.4m$ 、M~Q名状では $R^*=10.8m$ に集中的に現れ、格子状が左右にずれても R^* はほとんど変化していないことである。また、格子状が1m上に移動するとそれにもとない R^* は1.3~1.5m程度増加している。このことは、潜在すべり面の深さが、ほぼ一定であることを示唆するもので、深度方向に強度が著しく変化しない限り、すべり面の深さはあまり変動しないと考えてよい。逆に言えば、すべり破壊を対象とするとき、強度が深さ方向に一様であるとして取扱う深さの判定を誤ると、破壊面の位置が大きく変わってくることを意味している。さて、図-6のよう、各格子状の水平レベルに対し、算出される R^* がほぼ一定値となることは、すべり面の位置的な生起確率を考察する上で非常に都合がよい。これについては次節で述べるが、さきに、ある格子状に着目した場合の R^* の分布を検討しておく。分布形を検討するには少数が少ないが、一応D状における31個の計算結果を用いて R^* の頻度分布を描くと図-7のようになる。この結果をみると、格子状Dでの R^* の分布も正規分布することになる。また、図-4と比較すると、全体としての R^* の分散も、格子状の R^* の分散に近似している。このことは格子状Dでの R^* が現れる頻度が非常に高い（いまの場合D状での頻度が25.4%）ことから、全体の R^* の分布がD状での R^* の分布に支配されることで説明される。

7. すべり面の位置的生起確率について

前節まで明らかになつてきたように、すべり面の位置的な生起確率については、図-5, 6をもとに考察することが出来る。まず、才一歩は、すべり面の位置を数量的に表現しなければならない。そのための手順を述べると以下のとおりである。(1). すべり面の深さの規定：上述した例でわかるように、すべり面の深度方向の位置は、一様粘土層の厚さ H_0 、盛土の高さ H_0 および斜面の勾配 m および粘土層の平均強度で決定される。(2). 最小安全率を与える状：格子状ごとに(1)で求めた深度に達する円弧を描き、格子状の番号をその状での円弧に附し、すべり面の位置を表わす。以上のことから、ある粘土層上のある盛土についてのすべり面の生起確率は、最小安全率 R_1 とこの状で、ある半径 R^* が出現する確率 P_2 との積 $P=P_1 \times P_2$ で与えられる。なぜなら、図-6の結果をみてもわかるように、ある格子状での R^* も一般的に求めるのではなく、 R^* の大きさ自身も確率変量と考えられるからである。この状をも考慮に入れると厳密にすべり面の生起確率が算出されるが、このすべり面の生

Fig-6

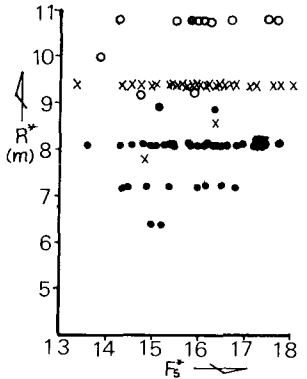
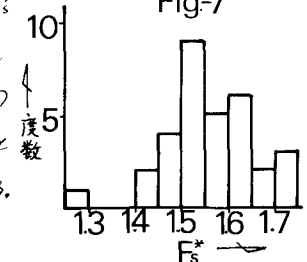
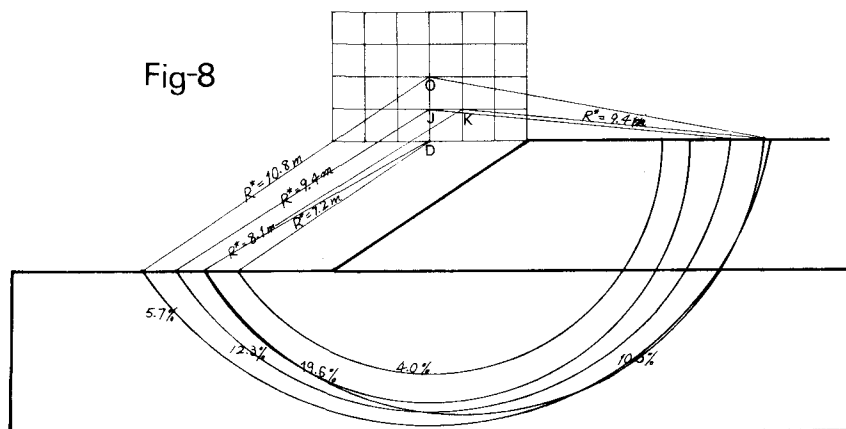


Fig-7



起確率を定式化することは非常に困難である。これについては今後の課題である。さて、計算例を中心として考察すると以下のとおりである。再び、格子点Dについて考察する。この盛土の場合、格子点Dが最小安全率を与える確率は25.4%である。また、格子点Dですべり円弧の半径 R^* が $R^*=8.1\text{m}$ となる確率は77%である。したがって、この円弧ですべり面が生起する確率は、ベイズ(Bays)の理論により、格子点Dが出現する確率と、その点で R^* なる半径が出現する条件付確率の積で与えられるから、 $P=P_1 \times P_2 = 0.254 \times 0.77 = 0.196$ となる。このようにして、求めたすべり面ごとの生起確率とそのすべり面の位置を図-8に示した。この結果によると、D点で半径 $R^*=8.1\text{m}$ のすべり面に最も生起確率が高く(19.6%)、次にJ点で $R^*=9.4\text{m}$ のすべり面(12.3%)、次にK点で $R^*=9.4\text{m}$ のすべり面(10.6%)となり、残りの種々のすべり面の生起確率は1~5%前後でかなり低くなっている。以上のような、すべり面の位置的生起確率は、さらに進んで、4.で述べた破壊確率と関係づけられる。すなわち、ある盛土について、どのすべり面で破壊する可能性がいくらかあるかという予測が可能である。この点については、別の機会に発表したいと考えている。なお、本研究における計算は、すべて京都大学大型計算機FACOM-230-60を使用した。参考のため、ここで発表し一連の安定計算(合計122個)に要した計算時間の合計は30分程度であったことを附記しておく。



参考文献

- 1) 松尾, 駒田, 高橋: 砂層の変形に関するモンテカルロ法的研究, 土木学会20回全国学会年次学術講演概要集, 1965
- 2) 松尾, 駒田: 砂層の変形に関するモンテカルロ法的研究, 土木学会21回全国学会年次学術講演概要集, 1966
- 3) 松尾, 駒田, 野宮: 砂層の変形に関するモンテカルロ法的研究, 土木学会22回全国学会年次学術講演概要集, 1967
- 4) 松尾, 黒田: 土壌調査結果のほつれと盛土の破壊確率との関係について, 土木学会26回全国学会年次学術講演概要集, 1971
- 5) 松尾, 黒田: 盛土建設のための土壌調査と盛土の安定性に関する研究, 土木学会論文報告集, 第196号, pp.75~86, 1971
- 6) 松尾, 黒田: 盛土の破壊確率を考慮した土壌調査規模決定法について, 土木学会論文報告集, 第198号, pp.69~81, 1972
- 7) 松尾, 黒田: 不飽和土の土壌諸係数と破壊確率に関する一考察, 土木学会論文報告集, 投稿中
- 8) 都: 量子化による斜面の安定解析, 第7回土壌工学研究発表会講演集, pp.523~526, 1972