

MITでの話題(応力経路法)

奥村 樹 郎*

筆者は昨年 から今年にかけてアメリカ・マサチューセッツ工科大学 (MIT) Lambe 教授の下に学ぶ機会を得たが、ここでの最大課題の一つに Stress Path Method があった。Stress Path Method と名付けると何か独特の方法であるかのように思われ、これだけで多くの問題点が一挙に解決するような印象も受けるが、Lambe 教授自身が指摘しているように¹⁾、この方法自体は決して魔術めいたものではなく、土の応力とヒズミに関するこれまでの断片的な知識を整理統一し、現場の問題に役立てる一手段であるに過ぎない。とはいえ実際にこれを活用してみると至極便利であり、これまで何となくもややしていたものがすっきりするという点では非常に有効な方法である。このことは筆者が MIT で講義を聞いたり、研究実験を行ったりしているうちに痛感し、あらためて眼を開かれる思いがした。この機会にその概要を紹介し、その問題点や今後の方向などについても筆者の主観を混じえながら若干触れてみよう。

Stress path 自体は Rendulic に端を発し、Henkel によってその有用性が例示されて以来多くの研究者に活用されており²⁾、Rendulic の応力経路図が一般的なゆえんとなっている。表示方法こそ違え、Casagrande のベクトルカーブも前者と同様にセン断試験における応力変化の様態をグラフ化し、理解に便ならしめようとしたものである。Lambe 教授の提唱する Stress Path Method ではこれをさらに一歩進め、現場のあらゆる問題すなわち応力とヒズミとの関係を応力経路図を仲立ちに表示し、現場の状況を忠実にトレースして実験室などで再現させようとするものである。

Rendulic が主応力そのものを座標軸にとり、Casagrande がスベリ面における 2 成分をプロットしているのに反し、Lambe の Stress Path Method では図-1 に示すようにモール円の頂点、すなわち主応力軸と 45° をなす面における応力の 2 成分をプロットしている。したがって点 A で表わされる応力点 (Stress Point) から 45° に引いた線の p 軸と交わる点 B, C が水平主応力 σ_h および鉛直主応力 σ_v の大きさを表わすことになる。ここで応力点についての約束事を述べておかなければならない。一般に縦横両軸に用いる応力は最大主応力 σ_1 、最

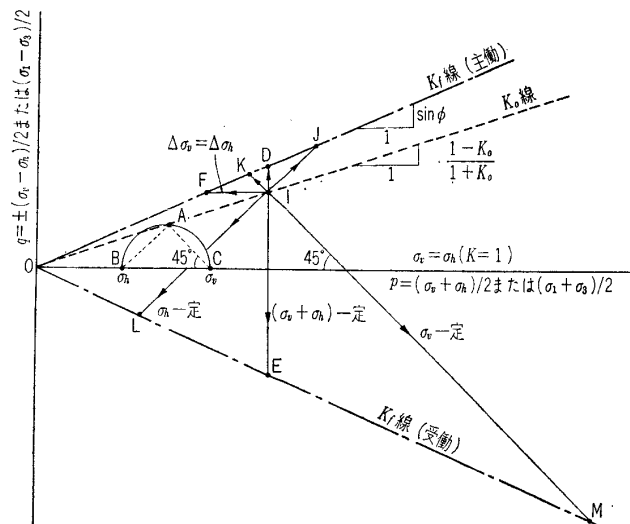


図-1

小主応力 σ_3 にもとづくことにしており、中間主応力 σ_2 は σ_1 , σ_3 のいずれかに等しい場合を想定している。この時 σ_1 軸が鉛直に対して 45° 以内の傾きならば q の値を正とし、 45° 以上の場合には負の値をとることにしている。主応力軸が鉛直および水平の場合は一層わかりやすく $(\sigma_v - \sigma_h)$ の符号がそのまま q の符号となる。通常の三軸圧縮試験は後者の場合であり¹⁾、元来三軸試験の整理を対象に生み出された表示法であるために一般化すると面倒な約束事が必要になった訳である。

応力経路図における p 軸は鉛直主応力 σ_v と水平主応力 σ_h が等しい条件を表わし、 K_0 線は水平変位の無い静止状態を表わす。図に示された例では K_0 が一定でしかも正規圧密粘土のように $K_0 < 1$ の場合であるが過圧密状態では K_0 が変わるので一般には曲線となる。なお K_0 は有効応力に基づいて定義されたものであり後述の全応力でプロットする時には無意味なものとなる。破壊包絡線 (K_f 線) は主動状態と受働状態との二とおりがあり、粘着力のない場合には図のように $\sin \phi$ のコウ配を持つ。応力経路が両包絡線に囲まれた範囲外にはみ出すことはない。

典型的な応力経路図が同じく図-1 に示されている。静止状態にある初期位置 I 点から鉛直主応力を増加させ水平主応力を一定に保つと 45° の傾きを持つ IJ 線に沿って破壊に達する。同様に鉛直主応力を減少させた場合が IL であり受働状態の破壊に至る。これを現場の問題に

* 運輸省港湾技術研究所土質試験課長

ひろば

関連させると前者は載荷、後者は掘削を行なった場合の破壊に相当する。一方鉛直応力を一定に保ち、水平応力を増加させると IM、同様に減少させると IK となり、それぞれ受働および主働状態の土圧を表わすことになる。図からわかるように両方の応力経路の長さの違いからも受働の変位が大きく、主働の変位の小さいことがうなずかれる。また受働土圧が大きく、主働土圧の小さいことも明瞭である。なお両主応力の増分の和が 0 のとき、すなわち鉛直応力の増加分だけ水平応力が減少するときあるいは水平応力の増加分だけ鉛直応力が減少する時は q 軸に沿う経路をたどり、両主応力の増加または減少量が等しいときは p 軸に沿う経路をたどる。

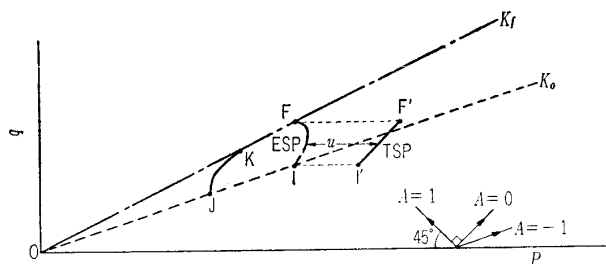


図-2

Stress path には有効応力による表示と全応力による表示が考えられ、図-2 に示すように有効応力経路 (effective stress path, ESP) IF には全応力経路 (total stress path, TSP) I'F' が対応する。この場合間ゲキ水圧は等方であることから q の値に影響を及ぼさないで両方の応力点は p 軸に沿って 1:1 に対応し両者の水平距離は間ゲキ水圧 u を示すことになる。なお T.S.P. が E.S.P. の左にある場合は負の間ゲキ水圧を右にある場合には正の間ゲキ水圧を表わす。間ゲキ水圧 u は静水圧 u_s と過剰水圧 u_e の和であり、全応力から静水圧を差し引いた応力経路 $[(T-u_s)SP]$ が両者の中間に引かれ、現場の問題などには便利に使用できる。

圧密非排水三軸試験で間ゲキ圧係数 B が 1 である場合有効応力経路は間ゲキ圧係数 A によって定まる。図-2 にその例を示したが $A=0$ の場合は間ゲキ水圧が増えないので水平有効応力は変わらず、図-1 の IJ と同じ経路をたどり、全応力経路と平行になる。 $A=1$ の場合は図-1 の IK と同じで鉛直有効応力に変化がない。典型的な粘土について非排水試験を行なってみると図-2 の IF で示されるように正規圧密粘土では初めに $A=0$ に近く、終りに $A=1$ に近くなって円弧状の応力経路を描く。これに対し過圧密粘土や乱された試料の非圧密試験では同図の JK で表わされるような逆方向に曲った放物線状の経路となる。

ここまでに応力経路図の概要と特徴を述べてきたが、Stress Path Method ではこれらの特徴を 100% 活用し、現場の問題をこのパターンに当てはめて考察し、必要な試験・解析方法を見出して構造物の安定と変形の間

題に応用しようとするものである。土の微細構造と土粒子間に働く電気化学的な力について鋭い洞察力を発揮した Lambe 教授も最近では現場の土質工学に非常な努力を注いでおり、コンサルタントとしてもまた有名で、世界をまたに活躍しているが、このような彼の立場と過去の経歴とから生れ出たものが Stress Path Method であるといえよう。

現在までのところ試験に使われる機械はおもに三軸試験機であり、解析点数もあまり多くはないが、すでに実際の問題に活用してかなりの効果を挙げた例も多い。とくに石油タンクのような軸対称荷重に対しては三軸試験の方法がそのまま適用できる。またこれまであまり手のつけられなかった即時沈下、側方流動あるいはせん断変形による沈下などの問題に対してはこの方法と考え方が有用であろう。現在 Lambe 教授とそのスタッフ達はこれら現場の諸問題に関連して Stress Path Method の活用と発展に鋭意努力しているので今後の成果が期待される。

しかし Stress Path Method の現状と将来に問題がない訳ではない。たとえば現在の応力経路図では軸対称の 3 次元応力しか表現できないが、この方法を発展させるためには一般の 3 次元応力を簡単にわかりやすい方法で表わす工夫も必要であろう。現在までにかなり普及し、もっとも手軽でしかも多目的に使える三軸試験機は軸対称の応力しか適用できないが、現場の問題には 2 次元のケースが多いので、平面せん断試験機、あるいは三主応力を自由に変えられる試験機の改良普及も不可欠の事項となろう。Stress Path Method はおもに実験室内で現場の状況を再現し、この時の土の挙動から類推と解析によって現場での挙動を推定しようとするのが大体の主旨であるが、現場からの採取と運搬による試料のカク乱と応力変化にも問題が残る。すなわち応力、ヒズミともに現位置と同一の状態には再現し得ないのであるからこれをどう補正するかが重要な一つのポイントとなる。

一般に土に関する問題は斜面の安定や基礎の支持力にしても土圧や沈下の問題にしても土の応力とヒズミとの関係を解明することに尽きるといってよいであろう。しかし一口に応力とヒズミの関係とはいっても、これを支配し、いまだに解明されていない影響因子が数多くある。たとえば振動やクリープを含めた時間効果の問題、土の異方性の問題、試験の縮尺の問題、あるいは自然地盤の不均一性の問題、および上に述べた 2 次元問題や試料のカク乱等々である。Stress Path Method の究極における主旨は現場で行なわれる変改をそのままシミュレートする方法を見出し、変改にともなう現象を予測することであり、もっとも厳密な意味では現場の本工事を行なうこと以外にはあり得ないことになってこの方法自

体の意味を失うことになる。したがって実際に Stress Path Method を活用するにはいかに誤差の少ない方法で、容易に速やかにシュミレートするか、またこれにともなう誤差をどう補正するかが重要なポイントとなる。このように見てくると問題は結局土質力学全般のレベルアップに帰着され、MIT においても解析と総合の両面で意欲的な研究がなされてはいるものの、解決への道は前途リョウ遠である。とはいえ、Stress Path Method がこれら諸問題の在りかを示唆し、解決への道を方向づける上で非常に有用な手段であることに変わりなく、またこれまでの知識を整理・統一し、新しく土質

工学に携わる人達の指導理念として果たす役割は今後ともますます大きくなって行くであろう。

筆者の問題意識と表現力の不足のため Stress Path Method の内容と真意を十分に説明できなかったかもしれないが、読者諸賢に何らかの参考になれば幸いである。

参 考 文 献

- 1) Lambe, T.W. : Stress Path Method, Proc. ASCE Vol. 93, No. SM 6, pp. 309~331 (1967)
- 2) 中瀬, 星埜 : 土質工学ハンドブック—土のセン断—, pp. 185~187 (土質工学会) (1965)

(原稿受付 1968.10.21)

英文雑誌「Soils and Foundations」論文募集と投稿規定

英文雑誌「Soils and Foundations」の原稿を以下の要領で募集いたします。

英文雑誌「Soils and Foundations」論文投稿規定

1. 原稿は英文で書き、本文は白いタイプ用紙 (A 4 判) にダブルスペースでタイプする。ただし、天地、両側に約 2.5 cm の余白を残すこと。
2. 原稿は本文・図・表・写真とも **3 部** (オリジナルおよび写し 2 部) 提出すること。
3. 原稿は図・表・写真などを含めて **30 枚** を越えないことが望ましい。内容によってこれ以上となる場合でも 45 枚を限度とする。
4. 第 1 ページには著者の氏名および勤務先を記すこと。
5. 記号および用語は標準的なものを用い、記号のアルファベット順リストをつけること。
6. 論文の文献引用は、カッコ内に著者名および発行年を示し、別に著者名のアルファベット順の文献リストをつけること。

[例] BISHOP, A.W., I. ALPAN, C.E. BLIGHT, and I.B. DONALD, 1960.

Factors controlling the strength of partially saturated soils. Res. Conf. Shear Strength Soils, Colorad, pp. 503-532.

SKEMPTON, A.W., 1954. The pore-pressure coefficients A and B. Géotechnique, 4 : 4 : 143-147.

TERZAGHI, KARL, 1943. Theoretical soil mechanics. Wiley, New York, 510 pp.

7. 図は A 4 判の上質トレーシングペーパーに黒インクでかくこと。1/2 程度に縮小される場合を考えて、十分太い線を用い、数字は高さ **3 mm** 以上、文字は高さ **2 mm** 以上とすること。
8. 論文には **150 語以内**の英文要約をつけ「土と基礎」用に 400 字づつ原稿用紙 **5 枚程度** (図・表こみ) の和文要約をつける。