

主成分分析による変位の分析 -乾燥砂の圧縮試験時の変位を対象として-

電力中央研究所 正会員 ○ 小早川博亮

1. はじめに

斜面の挙動把握は、崩壊を事前に予知・予測し、設備被害や公衆災害を軽減するための基礎データとして重要である。この斜面の変位計測結果に対し、主成分分析によって変位を分析する方法を提案し、冬季の切取り斜面の挙動の分析を行い、斜面の冬季の動きのモードを分離可能であることを示した¹⁾。しかしながら、実際の斜面の動きを把握することが難しいことから、分析から得られた変位モードと実際の挙動が整合しているかについては、必ずしも明確でなかった。

近年では、変位計測に関連して、室内レベルでは CCD センサーを利用したひずみ計測方法²⁾や、デジタルカメラで撮影した画像を用いた計測方法³⁾が、また、現位置では写真測量技術を用いた変位計測技術⁴⁾などが開発されている。これらの技術によって、対象とする供試体や斜面の変位挙動を多点で、連続的に取得することが可能となってきた。

そこで本研究では、実際の挙動が把握しやすい室内の圧縮試験を対象として、そこから得られる変位情報に主成分分析を適用し、実際の挙動と分析によって得られる挙動の整合性について検討する。変位情報は、デジタルカメラで撮影した供試体写真の画像処理によって取得した。

2. 乾燥砂を用いた圧縮試験

(1) 試験方法

試験には、乾燥状態の豊浦砂（土粒子の密度： 2.640g/cm^3 ）を用いて、直径 10cm 高さ 20cm の円柱供試体（相対密度 90 %）を作成した。試験は図-1 に示すように、メンブレンで覆われた供試体内部を負圧（ -17kPa ）で吸引（メンブレン外部は大気圧）した状態で、変位制御（載荷速度： 1mm/min ）で行った。

(2) 計測方法

計測は、外部変位計による変位、ロードセルによる軸荷重に加え、デジタルカメラで撮影した画像を用いて変位を算定した。メンブレンには、画像による変位を求めるために、直径 3mm の赤丸を 2cm 間隔でマーキングした（図-1）。一定条件の画像を得るために、試験の最中は、供試体をライトで照らした。画像は 2448×3264 ピクセルの解像度で、20 秒に 1 枚の割合で撮影した。

圧縮試験によって生じる供試体側面の変位は 3 次元的であるが、今回取得する変位は、写真で撮影した 2 次元の変位で、なおかつその変位は投影されたものである。今回は、変位のモードが異なるものが混在した変位の計測結果を取得することが主な目的である。したがって、以下では写真で撮影した 2 次元の投影変位を実際の変位と仮定して分析に用いる。変位の分析に用いた画像は 70 枚であり、一枚の画像には 60 点の変位の標点がマーキングされている。これらの画像を用いて、変位を算定した。



図-1 供試体の外観

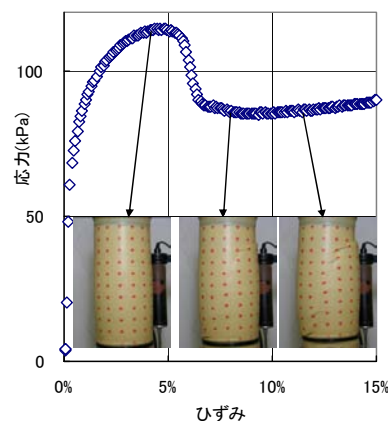


図-2 応力ひずみ関係

3. 試験結果

試験によって得られた応力ひずみ関係と、試験中の代表的な変形状態を図-2 に示す。図より、軸応力の増加に伴って、供試体全体が圧縮されるとともに樽型に変形し荷重のピークを迎える。ピーク後には、せん断帯が明瞭に発達し、最終的には供試体を横断する 60 度程度のせん断面を持つ破壊が生じている。これらの結果から、変形は、全体が樽型に圧縮変形するモードと、変形の局所化が進行してせん断帯が生じ、領域が 2 分されるモードの 2 つがあることが判る。

4. 計測結果に対する主成分分析の方法

変位を求める座標の原点は供試体の左上部とし、そこから鉛直下向き、水平右向きをそれぞれ変位の正とした。分析は、樽型の変形とせん断の変形が、変位挙動によく現れている鉛直変位に対し、分散・共分散行列 **V** を用いた場合と相関行列 **R** を用いた場合の 2 ケースに対して行った。分散・共分散行列 **V** による分析は算定された変位をそのまま用いて行うことを意味し、相関行列 **R** による分析は各点の変位を平均を 0 分散を 1 になるように標準化して行うことを意味する。**R** による分析

キーワード：主成分分析，変位，圧縮試験，斜面

〒270-1194 我孫子市我孫子 1646 E-mail:h-koba@criepi.denken.or.jp

は、変量の物理的な意味が異なる場合などに用いる。分析方法の詳細は、文献¹⁾を参照されたい。

5. 分析結果と考察

分析によって得られた主成分の寄与率を表-1に示す。いずれの場合にも、第一主成分の寄与率は90%を超えており、さらに、第二主成分の累積寄与率がほぼ99%であることから、第二主成分までを分析の対象とする。

各々の主成分をコンターで表示したものを図-3,4に、それぞれの主成分得点の推移表示したものを図-5,6に示す。図-3,4に示した長方形の4隅は、図-1にのメンブレンに記された4隅の標点を示している。

Vを用いた場合には、第一主成分は領域の右上の箇所を除いて、すべての領域で正の値を示し、かつ、右下に行くほど絶対値は大きくなっている。このことから、右上の領域のみがそれ以外の領域とは異なるような変動を示している。一方、第二主成分では、領域の右上から左下にかけて、正負の逆転する境界が存在し、それよりも右側では正、左側では負となっている。このことから、第二主成分は、この境界を軸とした回転を示す変動を表している。

この場合の主成分得点の推移(図-5)は、第一主成分得点はほぼ一定して減少している。領域の右上を除いてほぼ全域で正の第一主成分によって算定される得点が、一定して減少しているということは、ほぼ全域で負方向へ変位していること、さらに、圧縮の程度は右下の箇所で大いことを示している。一方、第二主成分では、12分経過までは増加し、それ以降減少に転じている。最初の増加は、主成分が負の領域は上向き、正の領域は下向き、つまり境界を境とした時計回りの変位を示している。12分以降は、逆に反時計回りに変位しており、この動きはまさに、変位の局所化によるせん断帯の発達に関連した動きを示している。

Sを用いた場合には、**V**を用いた場合の分析に比べて、第二主成分の寄与率が5倍程度あり、また、主成分においては、第一主成分の正の領域に値の大小がほとんどないこと、第二主成分の正負の境界が、左下から右上に連続していることの2点で異なる。しかし、主成分の正負の領域の傾向及び得点の推移は類似していることから、変動のモードは同様と考えられる。**S**を用いた場合には、各々の変位の大小でなく、どの時期にどちらの方向に変位しているか、つまり変位の正負に基づく分析をしていることになるため、第一主成分では全域でほぼ一定値を示しており領域全体が一様に負方向へ変位しているモードを、また、第二主成分では変位の局所化によるせん断帯の変形をより確実に捉えたものと考えられる。また、第二主成分で表されるせん断帯の発達は、図-6の第二主成分得点の折れ曲がり点(経過時間12分程度)で、生じておりこれは、応力ひずみ関係の応力が急激に低下し始める時期と一致している。

6. まとめ

変位挙動の明確な円柱供試体の圧縮試験に対し、メンブレンに記された標点のデジタル写真の画像解析によって多点の変位情報を取得し、主成分分析を適用した。主成分分析によって、圧縮に伴って樽型に変形するモードと、せん断帯が生じて領域が2分されるモードの2つを分離可能であること、さらに、せん断破壊に対応する主成分の得点の推移から、せん断帯の発達し始める時点は応力が急激に低下し始める時期と一致していることがわかった。主成分分析による変位の分析によって対象の変位モードを分離可能である。

参考文献

- 1) 小早川博亮, 岸裕和, 坪野孝樹 (2000): 寒冷地の切り取り斜面の挙動, 第21回西日本岩盤工学シンポジウム論文集, pp.137-142, 2000.
- 2) 岸雅文, 谷和夫 (2003): 三軸試験における CCD センサーを利用した軸ひずみと側方ひずみの分布を計測する方法の開発, 第32回岩盤力学に関するシンポジウム, pp.73-80.
- 3) 酒井理哉, 佐藤博, 高橋秀明, 藤井克博 (2002): 引き抜き力を受ける杭周辺地盤の挙動(その2: 画像ソフトの開発), 土木学会第57回年次学術講演会 III-649, pp.1297-1298.
- 4) 大西有三, 西山哲, 矢野隆夫, 緒方健治, 松山裕幸 (2004): 精密写真測量技術の斜面監視システムへの適用に関する研究, 土木学会論文集 No.771 / III-68, pp.187-197.

表-1 固有値と寄与率

行列	主成分	固有値	寄与率(累積) %
V	第一	960.0	98.2(98.2)
	第二	16.8	1.7(99.9)
R	第一	54.3	90.5(90.5)
	第二	5.0	8.3(98.8)

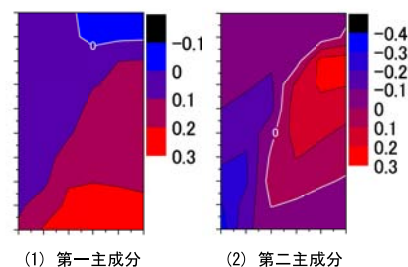


図-3 分散・共分散行列 **V** による主成分

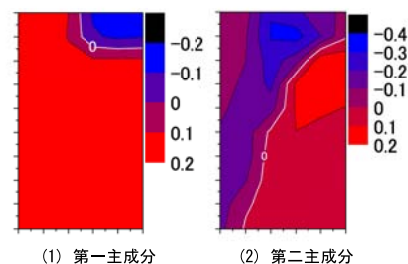


図-4 相関行列 **R** による主成分

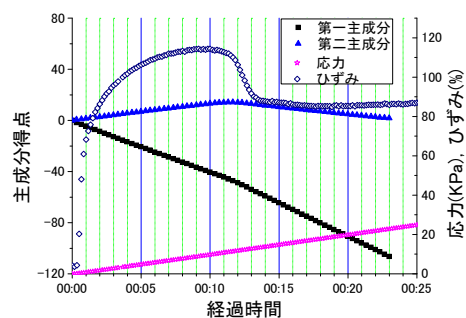


図-5 分散・共分散行列 **V** による主成分得点

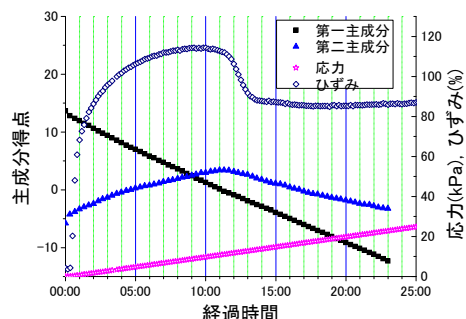


図-6 相関行列 **R** による主成分得点