

BSSを用いた不連続性岩盤の計測と岩盤評価

The Measurement and Estimation of Jointed Rock Mass by Bore-hole Scanning System

吉田秀典*, 堀井秀之**, 林明華†, 宇野晴彦††

Hidenori YOSHIDA, Hideyuki HORII, Ming-Hua LIN and Haruhiko UNO

It is necessary to understand the behavior of jointed rock mass when we establish an analytical method for a rational and economical design and construction management. Hence, a method, in which the governing mechanism of the mechanical behaviors of jointed rock mass can be grasped is needed. In this study, a new system to compute the displacement field of the jointed rock mass to understand the governing mechanism during the process of underground excavation by the usage of the BSS (Bore-hole Scanning System) is developed. Some numerical results by the developed system are compared with measured data. They show a good agreement. the jointed rock mass.

1 はじめに

岩盤構造物を建設するにあたっては、事前に構造物の安全性や安定性を議論する必要がある。その事前予測手段として解析手法が必要となることは言うまでもない。近年、岩盤構造物の建設においても、他の土木構造物と同様、より合理的かつ経済的な設計・施工が要求されてきており、こうした要求に応えるには、解析手法も岩盤挙動の支配的メカニズムを反映できることが必須である。ここで問題となるのは、いかにして岩盤挙動のメカニズムを抽出するかということであるが、それには信頼性が高くかつ精度の高い試験・計測が必要となろう。

これまでトンネル、斜面、橋梁基礎、地下発電所・地下備蓄タンクをはじめ、多くの岩盤構造物が建設されているが、こうした構造物の建設にあたっては施工管理を目的とした計測が種々行われている。その計測方法および計測技術も改良・改善が繰り返され加えられ、目覚しい進歩を遂げてきた。リアルタイムで計測される項目はダイレクトに設計・施工にフィードバックされ、情報化施工という新しい施工の領域を生み出した。

一方、解析手法も計測から得られる実挙動を再現すべく、多くの手法が提案されかつ改良を重ねることで、それなりに成果を出すようになってきた。しかしながら、こうした手法が実際の岩盤構造物の設計・施工に用いられるようになるには改善すべき点がないわけではなく、多くの計測データと照らし合わせてより完成度の高いものに仕上げる必要性がある。

そこで本研究では、解析手法の発展には、試験・計測技術の進歩が必須であるという観点に立ち、大規模地下空洞掘削時における不連続性岩盤の挙動を捉えるための新しい岩盤変位計測手法の提案を行い、現場の変位計測に適用することを試みる。

2 ボアホール・スキニング・システム

不連続性岩盤の力学的挙動は、その中に内在する節理（ジョイント）などの不連続面によって特徴づけられることが知られており、大規模地下空洞を掘削する際には、こうした不連続面の変形が岩盤挙動の支配的なメカニ

*正会員 博士（工学） 東京大学助教授 大学院工学系研究科 社会基盤工学専攻

**正会員 Ph.D 東京大学教授 大学院工学系研究科 社会基盤工学専攻

†Geotechnical Research Center (台湾)

††正会員 東電設計課長 技術開発本部

ズムになると考えられる。しかしながら、岩盤の変形を計測するにあたって、こうした不連続面の変形を同時捉えた計測手法はなく、不連続面の変形と岩盤の変形のメカニズムの関係は全てが明らかにされているとはいえない。そこで本研究では BSS (Bore-hole Scanning System : (株) コア) を用いた岩盤変位の計測手法を提案し、それを現場の変位計測に適用することを試みる。

BSS 観測は、光センサーを用い、プリズムを介して 3,200 rpm でボーリング孔壁をスキャンし、微小移動することによりスパイラル状に RGB の画素データを記録し、孔壁の画像データを再構成するものである。これよりボアホール壁面の画像が得られ、画像上の各点の位置はプローブに取り付けたリニアスケールにより計測する。本観測では、プローブの移動量を精度良く計測するため、高精度のリニアエンコーダー（分解能 0.1 mm、精度 $\pm 0.01\%$ ）を使用した [1]。

3 マッチング法

3.1 マッチング法の概要

岩盤および岩盤に含まれる不連続面（主としてジョイント）の変形を捉えるために、画像解析手法の一つであるマッチング法 [2] を用いて計測を行った。この手法は画像解析手法のひとつであるテンプレートマッチング [3] を拡張した、非接触の二次元変位場解析手法である。供試体表面の画像を撮るだけで変位を計測でき、さらに変位場よりひずみを求めることもできるため、非常に適応範囲が広い。

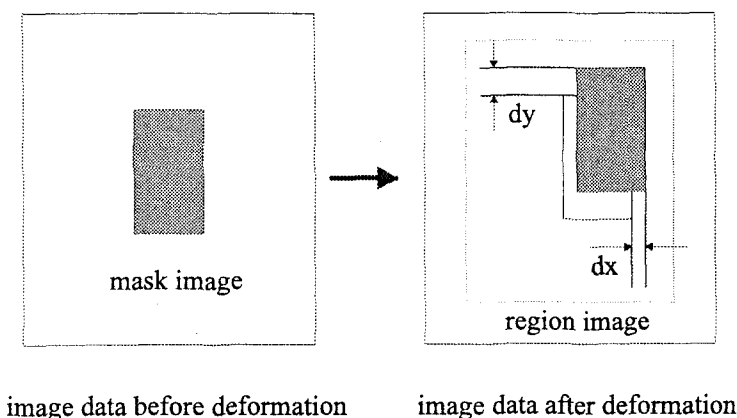


図-1 マッチング法の概要

3.2 マッチング法のアルゴリズム

ここでは、マッチング解析の手順を簡単な例を用いて具体的に示す [4][5]。BSS より得られる画像データは、RGB 各色が 0（暗）～ 255（明）の数値にデジタル化されている。本解析では、こうして得られた画像データに対してマッチング法を適用するため、RGB 各 256 階調を白黒 256 階調に変換する。簡単に一画素における RGB 各 256 階調から白黒 256 階調への変換例を示す。今、RGB 各 256 階調の画像データが $[R:127] [G:51] [B:200]$ であるとする。この RGB 3つの輝度の値の平均値は $(127 + 51 + 200) / 3 = 126$ であり、この値を白黒 256 階調における輝度 126 とする。マッチング法は、得られた 2 枚の画像データにおいてある領域がどの程度移動したかを算出する手法である。そのため、図-1 のように変形前の画像データと変形後の画像データというような 2 枚の画像データを用意し、変形前の画像データにおいてマスク (mask) と呼ばれる比較基準領域を設定する。本解析においては、図-1 の左図に示すような矩形領域をその領域として設定した。

そして、2枚の画像データを用いた変位量算出には以下に示すような手法を用いる。まず、変形前の画像全体から平均画素値 PIC_{ave}^{pre} を求める。同様にして、変形後の画像全体から平均画素値 PIC_{ave}^{aft} を求め、 $n(\text{dot}) \times m(\text{dot})$ のマスクについて、次式のような誤差をとる。

ここで、 $\text{Error}(dx, dy)$ は (dx, dy) (図-1 参照) ずれた箇所での誤差の自乗和を、 $P_{mask}(i, j)$ はマスクにおける任意の位置 (i, j) での画素値を、また $P_{region}(i + dx, j + dy)$ はリージョンにおける任意の位置 $(i + dx, j + dy)$ での画素値をそれぞれ示している。この式における誤差 ($\text{Error}(dx, dy)$) が最小となるときの (dx, dy) を、そのマスクに対する変位量と定める。

10,000 (11,111) 760 12,111 10,000

BS-2(C断面)
BS-5(G断面)

BS-1(C断面)
BS-4(G断面)

BS-3(C断面)
BS-6(G断面)

BS-8(C断面)
BS-10(C断面)

取水路側

排水路側

EL 10,000

A' 断面別日程

~ 11/18

11/18 ~ 11/25

11/25 ~ 11/2

11/2 ~ 11/10

11/10 ~ 11/18

11/18 ~ 11/25

11/25 ~ 12/2

12/2 ~ 12/10

12/10 ~ 12/18

12/18 ~ 12/25

12/25 ~ 1/2

1/2 ~ 1/10

1/10 ~ 1/18

1/18 ~ 1/25

1/25 ~ 2/2

2/2 ~ 2/10

2/10 ~ 2/18

2/18 ~ 2/25

2/25 ~ 3/2

3/2 ~ 3/10

3/10 ~ 3/18

3/18 ~ 3/25

3/25 ~ 4/2

4/2 ~ 4/10

4/10 ~ 4/18

4/18 ~ 4/25

4/25 ~ 5/2

5/2 ~ 5/10

5/10 ~ 5/18

5/18 ~ 5/25

5/25 ~ 6/2

6/2 ~ 6/10

6/10 ~ 6/18

6/18 ~ 6/25

6/25 ~ 7/2

7/2 ~ 7/10

7/10 ~ 7/18

7/18 ~ 7/25

7/25 ~ 8/2

8/2 ~ 8/10

8/10 ~ 8/18

8/18 ~ 8/25

8/25 ~ 9/2

9/2 ~ 9/10

9/10 ~ 9/18

9/18 ~ 9/25

9/25 ~ 10/2

10/2 ~ 10/10

10/10 ~ 10/18

10/18 ~ 10/25

10/25 ~ 11/2

11/2 ~ 11/10

11/10 ~ 11/18

11/18 ~ 11/25

11/25 ~ 12/2

12/2 ~ 12/10

12/10 ~ 12/18

12/18 ~ 12/25

12/25 ~ 1/2

1/2 ~ 1/10

1/10 ~ 1/18

1/18 ~ 1/25

1/25 ~ 2/2

2/2 ~ 2/10

2/10 ~ 2/18

2/18 ~ 2/25

2/25 ~ 3/2

3/2 ~ 3/10

3/10 ~ 3/18

3/18 ~ 3/25

3/25 ~ 4/2

4/2 ~ 4/10

4/10 ~ 4/18

4/18 ~ 4/25

4/25 ~ 5/2

5/2 ~ 5/10

5/10 ~ 5/18

5/18 ~ 5/25

5/25 ~ 6/2

6/2 ~ 6/10

6/10 ~ 6/18

6/18 ~ 6/25

6/25 ~ 7/2

7/2 ~ 7/10

7/10 ~ 7/18

7/18 ~ 7/25

7/25 ~ 8/2

8/2 ~ 8/10

8/10 ~ 8/18

8/18 ~ 8/25

8/25 ~ 9/2

9/2 ~ 9/10

9/10 ~ 9/18

9/18 ~ 9/25

9/25 ~ 10/2

10/2 ~ 10/10

10/10 ~ 10/18

10/18 ~ 10/25

10/25 ~ 11/2

11/2 ~ 11/10

11/10 ~ 11/18

11/18 ~ 11/25

11/25 ~ 12/2

12/2 ~ 12/10

12/10 ~ 12/18

12/18 ~ 12/25

12/25 ~ 1/2

1/2 ~ 1/10

1/10 ~ 1/18

1/18 ~ 1/25

1/25 ~ 2/2

2/2 ~ 2/10

2/10 ~ 2/18

2/18 ~ 2/25

2/25 ~ 3/2

3/2 ~ 3/10

3/10 ~ 3/18

3/18 ~ 3/25

3/25 ~ 4/2

4/2 ~ 4/10

4/10 ~ 4/18

4/18 ~ 4/25

4/25 ~ 5/2

5/2 ~ 5/10

5/10 ~ 5/18

5/18 ~ 5/25

5/25 ~ 6/2

6/2 ~ 6/10

6/10 ~ 6/18

6/18 ~ 6/25

6/25 ~ 7/2

7/2 ~ 7/10

7/10 ~ 7/18

7/18 ~ 7/25

7/25 ~ 8/2

8/2 ~ 8/10

8/10 ~ 8/18

8/18 ~ 8/25

8/25 ~ 9/2

9/2 ~ 9/10

9/10 ~ 9/18

9/18 ~ 9/25

9/25 ~ 10/2

10/2 ~ 10/10

10/10 ~ 10/18

10/18 ~ 10/25

10/25 ~ 11/2

11/2 ~ 11/10

11/10 ~ 11/18

11/18 ~ 11/25

11/25 ~ 12/2

12/2 ~ 12/10

12/10 ~ 12/18

12/18 ~ 12/25

12/25 ~ 1/2

1/2 ~ 1/10

1/10 ~ 1/18

1/18 ~ 1/25

1/25 ~ 2/2

2/2 ~ 2/10

2/10 ~ 2/18

2/18 ~ 2/25

2/25 ~ 3/2

3/2 ~ 3/10

3/10 ~ 3/18

3/18 ~ 3/25

3/25 ~ 4/2

4/2 ~ 4/10

4/10 ~ 4/18

4/18 ~ 4/25

4/25 ~ 5/2

5/2 ~ 5/10

5/10 ~ 5/18

5/18 ~ 5/25

5/25 ~ 6/2

6/2 ~ 6/10

6/10 ~ 6/18

6/18 ~ 6/25

6/25 ~ 7/2

7/2 ~ 7/10

7/10 ~ 7/18

7/18 ~ 7/25

7/25 ~ 8/2

8/2 ~ 8/10

8/10 ~ 8/18

8/18 ~ 8/25

8/25 ~ 9/2

9/2 ~ 9/10

9/10 ~ 9/18

9/18 ~ 9/25

9/25 ~ 10/2

10/2 ~ 10/10

10/10 ~ 10/18

10/18 ~ 10/25

10/25 ~ 11/2

11/2 ~ 11/10

11/10 ~ 11/18

11/18 ~ 11/25

11/25 ~ 12/2

12/2 ~ 12/10

12/10 ~ 12/18

12/18 ~ 12/25

12/25 ~ 1/2

1/2 ~ 1/10

1/10 ~ 1/18

1/18 ~ 1/25

1/25 ~ 2/2

2/2 ~ 2/10

2/10 ~ 2/18

2/18 ~ 2/25

2/25 ~ 3/2

3/2 ~ 3/10

3/10 ~ 3/18

3/18 ~ 3/25

3/25 ~ 4/2

4/2 ~ 4/10

4/10 ~ 4/18

4/18 ~ 4/25

4/25 ~ 5/2

5/2 ~ 5/10

5/10 ~ 5/18

5/18 ~ 5/25

5/25 ~ 6/2

6/2 ~ 6/10

6/10 ~ 6/18

6/18 ~ 6/25

6/25 ~ 7/2

7/2 ~ 7/10

7/10 ~ 7/18

7/18 ~ 7/25

7/25 ~ 8/2

8/2 ~ 8/10

8/10 ~ 8/18

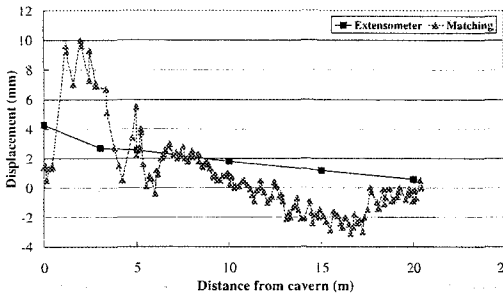
8/1

図一2 葛野川発電所地点における BSS 観測配置断面図

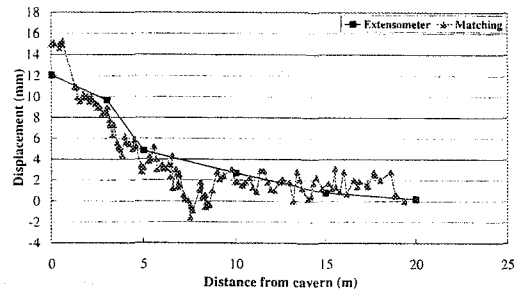
- 243 -

電所建設地点での BSS 観測は、空洞 11 箇所（天端 2 断面各 3 箇所、側壁 2 断面各 2 箇所、図－2 参照）で実施されたが、高精度計測は、空洞周辺坑から地下発電所空洞の左右 2 箇所（BS-7（C 断面、放水路側）と BS-8（C 断面、鉄管路側））において、観測線ベンチ掘削前の初期状態、6 ベンチ掘削終了時（当該ベンチ）、12 ベンチ掘削終了時および最終掘削終了時にそれぞれ 4 回行った [1]。本論文では、高精度計測が行われたこの 2 計測地点において、当該ベンチ掘削後および全断面掘削後の相対変位量について比較検討を行った。

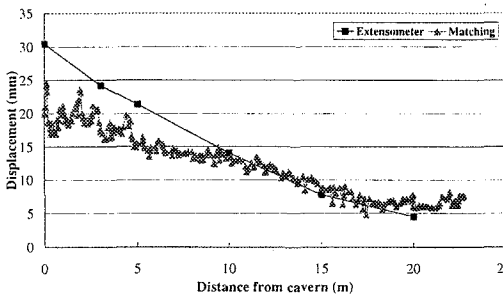
今回の観測で取得した画像データは、横 1,000 dot（1 回転）、縦 0.1 mm / dot の精度であり、これが観測長分だけあるため、非常に膨大な情報となっている。これだと全区間を通してマッチング解析を施すことは非常に困難なので、比較する変形前と変形後の 2 つの画像データにおいて、100 dot × 100 dot（画像上では 27 mm × 10 mm）の比較基準領域（mask）と 150 dot × 150 dot（画像上では 40 mm × 15 mm）の検索領域（region）を設定し、一連の解析を適当な幅の間隔（約 10 cm 間隔で、1 つの計測線につき計約 200 の解析数）を設けて解析を行った。多段式の岩盤変位計は壁面から 20 m の点を基準点としているため、解析もこれに合わせ、壁面より 20 m の箇所を基準点としてそこからの相対変位を求めた。図－3～図－6 に、多段式岩盤変位計による計測結果（図中では、Extensometer）とマッチング解析により求めた結果（図中では、Matching）を併せて示した。



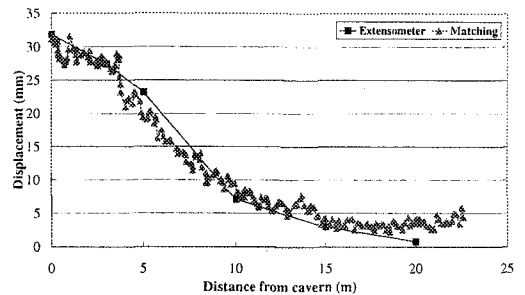
図－3 岩盤内変位（BS-7 孔、6 ベンチ掘削後）



図－4 岩盤内変位（BS-8 孔、6 ベンチ掘削後）



図－5 岩盤内変位（BS-7 孔、全断面掘削後）



図－6 岩盤内変位（BS-8 孔、全断面掘削後）

まず、6 ベンチ掘削後（当該ベンチ掘削後）の岩盤内変位について考察を加える。この時点では、BS-7 における岩盤の変形量は小さく、不連続面の変形もあまり認められない。計測による相対変位と解析による相対変位を比較すると、壁面近傍でマッチング解析による変位の値がやや大きいのが、両者に大きな差は認められない。不連続的な変形も顕著でなく、包含される不連続面の影響はそれほど大きくないと言えよう。実際の BSS 画像を見ても、明確な不連続面の変形は確認されなかった。一方 BS-8 では、壁面から深度 5 m の辺りで不連続的な変形が認め

られており、マッチング解析もこれを捉えている。計測とマッチング解析より求まる変位量もかなりよく一致しており、マッチング解析が岩盤の変形をよく表現できていることが分かる。この時の BSS 画像は壁面近傍における不連続面の変形（主として開口）を良く捉えているが、単純にこれを累積（つまり累積開口量）しても、岩盤全体の変形量と比べると、それほど大きな量ではない。これは、BSS 観測がそこを横切る不連続面の開口のみしか捉えられず、例えば密着節理がせん断挙動を生ずることによって岩盤が膨れるような挙動は捉えられないことに原因があると類推される。実際、葛野川地点では傾斜角が大きく、鉛直方向に切り立った節理系が発達しており、掘削に伴う応力解放によって、これらがせん断変形を生じた可能性は十分に考えられる。その場合は鉛直に切り立った節理系は水平方向には膨らむ現象を伴う。したがって、BSS 観測において不連続面の変形が認められないからと言って、変形成分のほとんどが母岩（岩盤基質部）の変形に起因するものとなるとは限らないと言えよう。

次に、全断面掘削後の岩盤内変位について考察を加える。6 ベンチ掘削後では変形の小さかった BS-7 においても大きな変形が認められ、地下空洞壁面近傍で約 30 mm の相対変位が生じた。この場合も、マッチング解析から求まった相対変位は、岩盤変位計より計測されたそれに比べると、地下空洞壁面近傍で若干異なるものの、近い値を示している。特に BS-7 では、当該ベンチを掘削してから下盤を掘っているにも関わらず大きな岩盤変形が生じており、地下空洞壁面においては、当該ベンチ掘削後に 10 mm であった変位が全断面掘削後では 30 mm にも及んでいる。マッチング解析もこの傾向は捉えていると言えよう。また、全断面掘削後でも 6 ベンチ掘削後と同様、変位分布に顕著な不連続性は認められていないが、壁面から深度 15 m 付近でやや不連続的な変化が現れている。一方 BS-8 では、壁面から深度 10 m の辺りで明確に不連続的な変形が現れており、BSS 画像からも不連続面による変形が認められている。この場合も、基準点（壁面から深度 20 m）から地下空洞壁面まで、マッチング解析の結果は計測結果とよく一致している。これら一連の比較より、マッチング法による変位計測は岩盤変位計測に十分適用できるものと思われる。

5 まとめ

本研究では、画像解析手法のひとつであるテンプレートマッチングを拡張して、非接触の二次元変位場解析手法（マッチング法）の開発を行い、この手法が実際の地下空洞掘削時の変位計測に適用できるか否かを検討する目的で、本手法から求まる解析結果と実データとの比較を行った。ボーリング孔壁の画像データに基づくマッチング解析による地下空洞掘削時の相対変位量は、隣接して埋設された岩盤変位計から求まるそれとかなり良く一致しており、本手法の有効性が示されたものと思われる。また、計測画像からは多数の不連続面が捉えられており、これらの変形と岩盤挙動の関係を明らかにできる可能性があり、より適切な岩盤評価に繋がるものと思われる。

最後に、本研究における高精度 BSS 観測に当たっては、(株)東京電力より貴重な機会とデータを提供して頂いた。ここに感謝の意を表する次第である。

参考文献

- [1] 宇野晴彦 他：ボーリング孔壁観測による地下空洞掘削時の岩盤変形挙動評価，第 33 回地盤工学研究発表会発表講演集，pp.1255-1256，1998.
- [2] Horii, H., Takamatsu, K., Inoue, J. and Sasaki, N.: Measurement of Displacement Field by “Matching Method” and Observation of Strain Localization in Soft Rock, *Proceedings of the Conference on Digital Image Technologies II: Techniques and Civil Engineering Applications*, 1997.
- [3] 安居院毅，中嶋正之，木見尻秀子：C 言語による画像処理，昭晃堂
- [4] 本田道紀：不連続面を有する有限要素による終局破壊の解析，東京大学修士論文，pp22-31，1996.
- [5] Lin, M.: Development of 3D Analysis Method Base on MBC Model and Analysis of Tunnel and Cavern Excavation in Jointed Rock Mass. 東京大学博士論文，pp13-31，1998.