## 地盤内埋設型センサーの計測手法に関する検討

田中 悠一1\*・谷 和夫<sup>1</sup>・岡田 哲実<sup>2</sup>・高倉 望<sup>3</sup>・池野谷 尚史<sup>3</sup>

<sup>1</sup>横浜国立大学(〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)
<sup>2</sup> 電力中央研究所(〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)
<sup>3</sup>㈱東急建設(〒150-8340 東京都渋谷区渋谷1-16-14 渋谷地下鉄ビル)
\*E-mail: b0343023@ ynu.ac.jp

深度 50m の堆積軟岩空洞中で行われた地盤内埋設型センサー(コアセンサー)を用いた岩盤(泥岩)の クリープ試験において,ひずみの経時変化に岩盤のクリープとは異なるドリフトが生じた.そこで,泥岩 に対してスレーキング試験を実施するとともに,コアセンサーを岩盤に埋設するためのグラウトで作製し た供試体で,気中・水中におけるひずみを計測したり,人工軟岩ブロック中にコアセンサーを埋設して計 測を行った.その結果,コアセンサーに用いる岩石のスレーキングに留意すべきであること,ドリフト現 象の原因がグラウトの固化または乾燥収縮と推測されること,およびドリフトが2週間程度で収束する傾 向があることがわかった.

Key Words : sensor, soft rock, mudstone, cleep, strain, measurement

#### 1. はじめに

岩盤中のひずみ計測の高度化を目的に,ボーリングで 採取したコアにひずみゲージを貼付し,ボーリング孔内 に再び埋設するというひずみ計測方法(コアセンサー) を開発した<sup>1)</sup>.このコアセンサーは,堆積軟岩中に構築 した深度 50m の地下空間実験場においてすでに試用さ れている.この地下実験で得られた,人為的に熱や荷重 をかけていない状態のひずみの経時変化を見ると,岩盤 のクリープによるものとは異なるひずみの変動(ドリフ ト)が計測されていた<sup>2)</sup>.

そこで本研究では,まず,計測現場の泥岩に対してス レーキング試験を実施し,得られた知見を基にコアセン サーの作製方法について検討した.さらに,コアセンサ ーを岩盤に埋設するために用いるグラウトや,現場で採 取した泥岩などで供試体を作製し,気中・水中における ひずみの計測を行ったり,現場の泥岩と近似した一軸圧 縮強さ・ヤング率で作製したブロック状の人工軟岩に, コアセンサーを埋設して計測を行うなど,条件の異なる いくつかの室内ひずみ計測実験を実施した.そして,得 られたひずみの経時変化を比較することにより,現場計 測におけるドリフト現象の影響要因や,ドリフト現象の 補正可能性について検討した.

2. 試験方法

(1) スレーキング試験

地盤工学会基準の「岩石のスレーキング試験方法 (JGS2124-2006)」<sup>3</sup>に準拠して,現場で採取した第三紀 鮮新世後期の泥岩に対してスレーキング試験を行った.

直径50mm×厚さ20mm程度の円柱状の供試体を3体(MS-1, MS-2,MS-3)作製した.またトリミングの際,表面に 弱面や劣化部がある場合は,カッターややすりなどを用 いて除去した.水浸には蒸留水を利用した.

#### (2) ひずみ計測実験

表-1 に示すように,供試体,計測環境,ひずみゲージなどを変え,全5ケースのひずみの経時変化を調べた. 以下に 供試体の作製法,計測環境,ひずみゲージの貼付方法 について記す.

a) ケース1(図-1参照)
現場で採取した泥岩コアを直径 50 mm×高さ 100 mmの
円柱形にトリミングし,側面を研磨して素地を出した後,ひずみゲージを貼付した.
ひずみゲージを貼付してから 24 時間後に,水を入れた容器内に静置して計測を開始した.
側面の軸方向と周方向にそれぞれ 2 枚の防水型ゲージ(東京測器 WFLA)をシアノアクリレート系瞬間 接着剤(東京測器 CN-E)により貼付した.ゲージ 表面はシリコンゴムによりコーティングした.
b) ケース2(図-2参照)

コアセンサー用グラウト B(次節参照)を直径 50 mm×高さ 100mmのモールドに打設し,2日後に脱型した.側面を研磨して,ひずみゲージ貼付用の平滑面を作製した.ひずみゲージ貼付後,15 時間経過した時点で気中計測を開始した.気中での計測を1日行った後に,水を入れた容器内に静置して計測を継

衣一試験クー人						
Case	供試体の種類	計測環境	ひずみゲージ / 接着剤			
1	泥岩 / 単独	水中	防水型/シアノアクリレート系瞬間型			
2	グラウトB/単独	気中 水中	防水型 / ポリエステル系二液型			
3	人工軟岩 / ブロック	气中 水中	防水型 / ポリエステル系二液型			
		×1千 小千	防水型メタルベース / ポリエステル系二液型			
4	人工軟岩/連結	気中(補修) 埋設 水中 気中	一般用 / シアノアクリレート系瞬間型			
			防水型メタルベース / ポリエステル系二液型			
5	人工軟岩 / 連結	水中 気中(補修) 埋設 水中	防水型メタルベース / ポリエステル系二液型			

続した.

防水型ゲージ(東京測器 WFLA)をポリエステル系 2 液型接着剤(東京測器 PS)により供試体上面に 1 枚,側面の軸方向に 2 枚貼付した.

c) ケース3(図-3参照)

-辺が約20cmの人工軟岩ブロックを作製した. ひずみゲージ貼付後に1日気中養生を行った後に気 中計測を開始し,30時間後に水中計測に移行した. 防水型ゲージ(東京測器 WFLA)を軸方向に3枚, 周方向に1枚貼付した.また,現場のコアセンサー に使用している防水型メタルベースゲージ(東京測 器 WFLM)を軸・周方向に1枚ずつ貼付した.両ひ ずみゲージとも,ポリエステル系2液型接着剤(東 京測器 PS)により貼付した.

d) ケース4(図-4参照)

ケース 3 と同じ配合の人工軟岩ブロックから直径 50 mm×高さ 200 mmのコアを抜き取り,50 mm×2,100 mm×1 に 3 分割した.軸方向のゲージ貼付面を平滑 にして,コアにひずみゲージを貼付し,約1日間接 着剤の硬化を待ってから,内径 66 mmのアクリル管 のモールド内でグラウトA(次節参照)により連結 した.

モールド内で9日間湿潤養生した連結コアを脱型し, 補修(次節参照)を開始した時点から計測を開始し た.計測開始から3日後に,人工軟岩ブロック内へ の埋設(次節参照)を行って,18日間の水中計測 後に,気中計測に移行した.

高さ 50 mmの 2 体の分割コアには,分割面に,一般 用ゲージ(東京測器 FLA)をシアノアクリレート系 瞬間接着剤(東京測器 CN-E)により貼付した.ま た,高さ 100 mmの分割コアには,分割面には一般用 ゲージをシアノアクリレート系瞬間接着剤で,側面 の軸方向には防水型メタルベースゲージ(東京測器 WFLM)をポリエステル系 2 液型接着剤(東京測器 PS)で2枚ずつ貼付した.一般用ゲージはすべてシ リコンによる防水コーティングを行った.

e) ケース5(図-4参照)

ケース4と同様にコア抜き→分割→ひずみゲージの 貼付→連結という流れで連結コアを作製した. 連結コアのモールド養生を始めた時点から計測を開 始した.3日間モールド養生をした後に供試体を脱



図-1ケース1の概要





図-3ケース3の概要

型して,水中計測を 8 日間,気中計測を 10 日間 (途中,補修中の計測3日間)行い,埋設して水中 計測を行った.

軸方向 2 ヶ所・半径方向 4 ヶ所の計 6 ヶ所に防水型 メタルベースゲージ(東京測器 WFLM)を貼付し た.

- (3) 用語の説明
- a) グラウト

グラウト A は, 早強ポルトランドセメント(住友大 阪セメント), 木節粘土粉末(浅岡窯業原料), デン カプレタスコン TYPE1 と水を 2.5:1:02:3の質量比で 配合した.現場のコアセンサーの作製(連結・補修・ 埋設)に使用された.

グラウト B は, 早強ポルトランドセメント(住友大阪セメント), 泥岩粉末, 水を1:1:1の質量比で配合した.コアセンサー作製用のグラウトとして改良中である.

#### b) 連結コアの補修

グラウト A により連結した連結コアの表面には, グ ラウトが十分充填されていない空隙が観察された.そこ で,練り上げて 3~6 時間経過させてやや粘性が高い状 態にしたグラウトAにより,空隙の欠損部を充填した.

#### c) 連結コアの埋設

一辺が約 20cm の人工軟岩ブロックに直径 75mm 程度





#### 図-4 ケース4,5の概要

の埋設用ボーリング孔を掘削し, 孔底部を止水して, ブ ロックを上面から 1cm 下まで水浸させた状態で, グラ ウトAを流し込みながら連結コアを埋設した.

#### 3. 試験結果と考察

(1) スレーキング試験の結果

表-2にスレーキング指数と初期・水浸前・水浸24時間 経過後の各含水比(w,w,w)を,図-5にスレー キング区分 - 時間の関係を示す.また,形状変化の様子 を写真-1に示す.

泥岩のスレーキング指数は1となった.供試体周辺か ら薄い岩片が剥離する崩壊形態が全ケースで観察された. この崩壊形態は,Caイオンの多いスメクタイトを含む 軟岩に多い.Caイオンを多く含むタイプの軟岩は,初 期に湿潤状態であれば,乾燥させずにそのままの状態を 保つことによりスレーキングしないことが明らかにされ ている<sup>4)</sup>.また,供試体MS-2の初期含水比が他のものよ り3%程度低いのは,泥岩コアの密閉保存が不完全であ ったためと考えられる.初期の乾燥を許してしまったこ とが原因で,水浸直後から急激に崩壊が進行したと推測 される.

以上のことを踏まえると,コアセンサーに使用する泥 岩コアは,ボーリング後に切断などの成形作業までを現 場の湿潤環境で行い,ひずみゲージの貼付の際はゲージ 接着面のみを乾燥させるような方法をとるなど,コアの 湿潤を可能な限り保つことが望ましいと言える.

#### (2) ひずみ計測実験の結果

ひずみの経時変化のグラフを,ケース1からケース3は 図-6に,ケース4とケース5は図-7に示す.また,ケース 4とケース5の連結コア埋設後の水中計測結果を軸方向ひ ずみについてのみ抽出したグラフが図-8である.Y軸の 正の方向を引張方向,負の方向を圧縮方向と しており,X軸は一目盛24時間の時間軸である.図中

表-2 スレーキング指数と含水比

供試体	スレーキング指数	w(%)	w(%)	w(%)		
MS-1	1	26.74	2.64	28.37		
MS-2	1	23.74	1.97	26.06		
MS-3	1	26.24	2.52	27.42		



図-5 スレーキング区分 - 時間の関係



<行>上: MS-1、中: MS-2、下: MS-3 <列>左: 水浸前、中: 30分経過、右: 24時間経過

の凡例については,Z が軸方向, が周方向,Rが半径 方向である.具体的なひずみゲージ位置と方向に関して は図-1 から図-4 に示している.グラフ中には供試体の 計測環境について,「気中」「水中」「埋設/気中」 「埋設/水中」の4種類で表すとともに,計測中に供試 体に対して行った作業(「連結」「補修」など)も記載 した.グラフ中で破断している箇所は計測を一時中断し た箇所である.

a) ひずみのドリフトとその収束

図-7 のケース 4 の計測結果において,防水型メタル ベースゲージ(WFLM)による軸方向ひずみに着目して みると,連結コア埋設後の水中計測では引張方向へ,水 中計測後の気中計測では圧縮方向へそれぞれひずみがド リフトしている.

また,気中計測中のブロック表面を確認したところ, 上面に残留したコア埋設用のグラウトAに,水中計測 時には見られなかった亀裂が生じていた.これは,グラ ウトAの乾燥収縮によるものと考えられ,気中計測時 のコアセンサーが圧縮方向にドリフトを生じたのは,こ の乾燥収縮が原因のひとつである可能性が高い.

以上のような点から推測すると,コアの連結や埋設に 用いたグラウトAが化学変化(固化)または乾燥収縮 を生じることにより,ひずみをドリフトさせていると考 えられる.

次に図-8 を見ると,防水型メタルベースゲージ (WFLM)による軸方向ひずみ値に関しては,埋設直後 (約2日間)の引張ひずみはケースにより上昇の程度が 異なるが(ケース4は40µ程度,ケース5は百数十µ), 埋設から10日目で1日当り1~2µ程度,2週間で1日当 り0~1µ程度の上昇量にまでドリフトが収束するのが確 認できる.また,両ケースのグラフの波形も,埋設直後



図-6ケース 1(上), ケース 2(中), ケース 3(下)のひ ずみの経時変化

の上昇を除けば類似している.

以上の結果を踏まえると,両ケースのひずみのドリフトは同じ傾向を示していると言え,コア埋設後の水中計測において,発生するひずみのドリフトをあらかじめ予測できるようなモデル式を導くことが可能ではないかと考えられる.

b) ひずみゲージの適用性

ケース 3~5 の計測結果を比較すると,防水型ゲージ (WFLA)と一般用ゲージ(FLA)は,どの計測環境に おいても1日に 20µ以上のひずみの変動を生じている場



図-7 ケース4(上), ケース5(下)のひずみの経時変化

所が見られ,そのような変動箇所ではほぼ全ての防水型 ゲージまたは一般用ゲージのひずみが同時にドリフトし ていることが多く,特にケース4の一般用ゲージ (FLA)において顕著である.恒温状態が保たれていな い環境で計測している点を考慮すると,このようなひず みが同時に変動する現象は気温の変化に起因する可能性 が高い.

一方,防水型メタルベースゲージ(WFLM)は,防水 型ゲージ(WFLA)または一般用ゲージ(FLA)のひず みが変動している計測区間においてもほぼ変動せず,無 負荷時(「補修」以外の計測時)において3種類のひず みゲージの中で最も安定している.

c) 供試体の吸水膨張

ケース 1 では, 泥岩供試体を水浸させた直後から 24 時間以内に約 500µ もひずみが上昇している(WFLA-Z-2 のみ初期に大幅な変動を生じた).同様に他のケースで も水中計測開始直後の 24 時間のひずみの変化量を調べ ると,ケース 2 では約 300µ 上昇しており,ケース 3 で は防水型メタルベースゲージ(WFLM)は 40µ 程度の上 昇で,防水型ゲージ(WFLA)は最小で 40µ,最大で 400µ の上昇が見られる.また,グラフの形状を比較す ると,ケース 1 は急なひずみの上昇を示しており,ケー



図-8 ケース4とケース5の比較

ス2,ケース3はケース1よりも緩やかな上昇を示して いると言える.

このような水中計測時のひずみの上昇は,供試体の吸水膨張により引き起こされたものではないかと推測される.ケース1,2,3はそれぞれ異なる供試体を使って計測を行っているため,吸水膨張の大きさや進行する速さに違いがある.この違いに付随して,ひずみの上昇量や上昇速度も不均一になったと考えられる.

吸水膨張によるひずみの上昇を抑制する方法としては, 水中計測を実施するまでに,被測定物を十分に吸水させておくことが挙げられる.

#### d) 接着剤の適用性

ケース1のWFLA-Z-2に着目すると,水中計測開始直 後は他のゲージと同様にひずみが上昇しているが,急に 300µ近くもひずみが下降している.

この急激なひずみの下降の発生要因として考えられる のは,ひずみゲージの剥離である.水中計測中に泥岩供 試体表面の岩片が剥離して沈殿していたことや,シアノ アクリレート系瞬間接着剤によりひずみゲージを貼付し たことなどから考察すると,泥岩供試体表面のスレーキ ングによる崩壊に対してシアノアクリレート系瞬間接着 剤の接着力が弱かったためではないかと考えられる.

ー方ポリエステル系2液型接着剤はケース2やケース 3 でのひずみゲージの貼付において,シリコンゴムによ る接着の補強を行う必要がない程度の接着力を発揮した.

4. まとめ

スレーキング試験により,現場の泥岩はスレーキン グ指数が1であることと,薄い岩片が剥離する崩壊 形態をとることがわかった.コアセンサーを作製す る際は,可能な限り現場における泥岩の湿潤状態を 保持して成形やゲージ貼付を行うことが好ましい. コアセンサーを用いた計測の際には,コアの連結や 埋設に用いるグラウトが,固化または乾燥収縮など を生じることにより,ひずみを経時的にドリフトさ せていると推測される.

埋設したコアセンサーによる水中ひずみ計測実験に おいて,軸方向ひずみに関しては,埋設後10日目 で1日当り1~2μ,2週間で1日当り0~1μのドリフ ト量に収束する.この傾向は異なるケース間で類似 しており,計測値の適切な補正式を導くことが可能 ではないかと考えられる. 現場のコアセンサーに使用した防水型メタルベース ゲージ(東京測器 WFLM)は、シリコンコーティ ングを施した一般用ゲージや防水型ゲージに比べて 外的影響下においても安定しており、信頼性が高い. 被測定物が水浸時に吸水膨張を起こす場合、無視で きない程度の引張ひずみを生じる可能性がある.対 策としては、被測定物をあらかじめ十分吸水させて から水中計測を行うことが考えられる. 現場のコアセンサーに使用したポリエステル系2液 型接着剤(東京測器 PS)は、泥岩などの細かい粒 子で形成された被測定体に用いた場合、シアノアク リレート系瞬間接着剤に比べて接着力が強く、ひず みゲージの剥離を招きにくい.

#### 5. 今後の予定

現在の室内ひずみ計測実験をより現場計測に近い状態 に改善することや,計測環境の温度がコアセンサーの計 測結果に与える影響について定量的な評価を行うことな どが課題として挙げられる.

参考文献

- 回田哲実,澤田昌孝,平賀健史平野公平,谷和夫:堆積軟 岩の埋設型ひずみ計測方法の高度化,土木学会第62回年次 学術講演会,2007.
- 2) 池野谷尚史,高倉望,岡田哲実,澤田昌孝,平賀健史,平 野公平,谷和夫:堆積軟岩空洞における処分孔竪置き方式 を模擬した空洞の掘削,土木学会第 62 回年次学術講演会, 2007.
- 3) 地盤工学会:岩の試験・調査方法の基準・解説書, pp.1-34, 2006.
- 4) 石田良二,神藤健一:スメクタイトを含む軟岩の劣化防止に 関する研究,応用地質,Vol.35,No.5,pp.179~192, 1994.

# STUDY ON MEASUREMENT TECHNIQUE OF SENSOR EMBEDDED IN BEDROCK

### Yuichi TANAKA, Kazuo TANI, Tetsuji OKADA, Nozomu TAKAKURA and Takafumi IKENOYA

A new strain measurement technique 'Core Sensor' was developped and used for monitoring rock creep of the bedrock at underground test site of 50m depth. However, the results demonstrated significant influence of the drift that is the gradual change of the measured results with time.

Therefore, to examine the applicability of Core Sensor, slaking test and a serier of model tests of Core Sensor were conducted. The result of slaking test for the mudstone of the test site shows that attention must be paid not to dry the Core Sensor when strain gauges are attached on the side of the core. From the measured results of the model tests, it was recognized that the drift of measurement by Core Sensor tends to converge within two weeks after installation of the Core Sensor.