孔底三軸試験における試験体への ひずみゲージの全周接着方法に関する検討

重国 祐貴^{1*}·谷 和夫²

¹横浜国立大学 工学部建設学科(〒240-8501神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5土木工学棟) ²横浜国立大学 工学研究院(〒240-8501神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5土木工学棟) *E-mail: b0743037@ynu.ac.jp

孔底三軸試験における試験体のひずみ計測システムとしてひずみゲージが導入され、ボーリング泥水中で試験体にひずみゲージを接着する方法が提案されている.しかし、従来の方法は、泥水を排除するために圧着補助材を用いなければならず、作業が複雑で時間がかかるなどの問題があった.そこで、圧着補助材を用いない新たな接着方法を考案した.それは、接着剤を試験体の全周にわたって塗布し圧着することで、試験体と接着剤の薄層が一体化して変形することを期待したものである.一軸繰返し載荷試験を行った結果、接着剤の塗布厚さ、塗布範囲、圧着圧力に関する適切な条件の範囲を決定することができた.

Key Words : triaxial test, specimen, drilling mud, strain gauge, adhesion

1. はじめに

原位置で深部岩盤の強度特性と変形特性を同時に評価 する方法として孔底三軸試験が開発され、試験装置の改 良が進められてきた^{10.2}. 試験体の変形を計測するシス テムとしては、試験体にひずみゲージを接着する方法が 提案されている³.

ボーリング孔底で試験体にひずみゲージを接着するに あたっては、試験体の側面に付着した泥水を接着面から 排除することが必要となる.従来の方法では、写真-1の ような圧着補助材をメンブレンの内側に取り付け、セル 水の圧力によってゲージ部分に存在する泥水を上下左右 に押し出すことでこの課題を解決していた.しかし、圧 着補助材の作製や取り付け作業に手間と時間がかかる上、 圧着補助材がひずみゲージの変形を拘束してしまう恐れ があった.

そこで、それらの問題を解決するため、圧着補助材を 用いない新たな接着方法を考案した。それは、泥水を取 り込む性質をもった接着剤を試験体の全周にわたって塗 布しひずみゲージを圧着することで、接着剤の薄層とひ ずみゲージが試験体と一体化して変形することを期待し たものである。本研究では、一軸繰返し載荷試験により、 新たに考案した方法でひずみゲージの接着の可否と、塗 布や圧着の適切な条件について検討した。

2. 改良のコンセプト

従来の接着方法の問題点を考慮すれば、①圧着補助材 を使用しない、②ゲージ部分の部材が分厚くなるのを避 ける、という2つの要件を実現する接着方法が望ましい. そこで新たに考案したのが、接着剤を試験体の全周にわ たって塗布する方法である.これは、泥水を取り込む性 質をもった接着剤を試験体の全周にわたって塗布し圧着 することで、試験体と接着剤の薄層を一体化させるもの である.これにより、接着剤の薄層が試験体に追随して



写真-1 圧着補助材³⁾

変形し,接着剤の薄層の外面に位置するひずみゲージに よって,試験体のひずみが計測できることが期待される.

基本的に接着剤と試験体の剛性は一致していることが 理想的だが、それを実現することは難しいため、接着剤 を可能な限り薄くすることがこの接着方法の要件である. しかし、泥水を取り込んで接着するという性質上、最低 限の接着剤の層厚は必要である.

3. 試験方法

ー軸繰返し載荷試験により,新しい接着方法で貼り付けたひずみゲージ(以下,圧着ゲージと呼ぶ)の計測値を理論値との整合性の面で検討した.供試体には,ヤング率とポアソン比が既知である鋼製の円柱を用いた.計測の信頼性の判断のため,供試体にはあらかじめ通常の接着方法⁴でひずみゲージを貼り付けておいた(以下,通常ゲージと呼ぶ).

(1) 主な試験材料

a) ベントナイト泥水

水道水20Lにベントナイト(クニミネ工業,クニゲル V1)2.0kgを加え,質量濃度10%,比重1.05の標準的な掘 削泥水を作製した.

b)供試体

直径**D=50mm**,高さ**H=100mm**の鋼製の円柱を用いた. ヤング係数*E*=2.0×10⁵MPa,ポアソン比v=0.3である⁵.

c) ひずみゲージ

ゲージ長10mmのポリエステル箔ゲージ(東京測器研 究所, PFL-10-11-3LHT)を用いた. 試験1ケースにつき, 通常ゲージを4枚, 圧着ゲージを4枚用いた(それぞれ軸 方向2枚ずつ, 周方向2枚ずつ).

d)接着剤

通常ゲージの接着には、シアノアクリレート系瞬間接 着剤(東京測器研究所, CN-E)を用いた.

圧着ゲージの接着には、エポキシ樹脂系 2 液型水中硬 化接着剤(特注品.以下,水中接着剤と呼ぶ)を用いた ³.この接着剤は、泥水中で水分を吸収しながら硬化反 応を生じるとともに、多少の泥水は接着剤の一部として 取り込む性質を有する.主剤は、ビスフェノール A エ ポキシとウレタン変性エポキシをベースに、水中接着性 向上のための添加剤と流動性を調整するためのシリカ系 無機質粉、着色のための酸化チタン粉を混合したもので ある.硬化剤は、疎水性の変性ポリアミンに硬化速度を 早くするための硬化促進剤、流動性を調整するためのシ リカ系無機質粉を添加したものである.配合比は、質量 比で主剤:硬化剤=2:1である.配合後の密度は、 $\rho_a=1.296g/cm^3$ である.

e)メンブレン拡張器

内径62mm,高さ105mm,厚さ6mmの円筒型で,アク リル管に空圧給排出用の継ぎ手を設け,エポキシ接着剤 で外面をコーティングしたものである.

(2) 試験手順

a)通常ゲージの接着

供試体にはあらかじめ通常の方法で、軸・周方向に2 枚ずつ対角位置にひずみゲージを貼り付けた. 接着剤の 厚さは、指圧により余分な接着剤を押し出して極薄くし た.

b)供試体の泥水中への静置

図-1に示す装置を用いて、供試体を泥水中で数時間静置させた.このとき、泥水中で供試体の位置が分かるよう、供試体上面には直径50mmの円柱体のキャップを置いた.

c) 圧着ゲージのメンブレンへの取付け

メンブレン拡張器にメンブレン(外径50mm,長さ 180mm,厚さ0.25mm)を装着し,負圧をかけて内壁に 密着させた.その状態で、メンブレン内側の圧着ゲージ の貼付け位置(図-2)に耐水性両面テープを貼り、その 上から圧着ゲージの受感部側(表面)を貼り付けた.

d) 水中接着剤の塗布

所定の塗布厚さt_p,塗布長L_pで、メンブレンの内側に 全周にわたって水中接着剤を塗布した.水中接着剤の量







表-1 試験ケース

Case	塗布厚さ <i>t</i> p(mm)	塗布長 $L_p(mm)$	圧着圧力 P (kPa)	圧着時間 T(h)	
1	1.0	52	100	24	
2	0.5	52	100	24	
3	1.0	72	100	24	
4	1.0	52	50	24	
5	0.6	52	100	24	
6	0.8	52	100	24	
7	0.4	52	100	24	
8	0.35	52	100	24	

表-2 試験結果

Case	塗布質量	平均塗布厚さ	ヤング率 E_{tan} (×10 ⁵ MPa)		周方向の傾き (×10 ⁵ MPa)		ポアソン比v	
	m _a (g)	$t_{\rm av}$ (mm)	通常	圧着	通常	圧着	通常	圧着
1	11.53	1.09	2.054	2.168	6.150	7.971	0.334	0.272
2	4.22	0.40	2.007	4.155	6.559	11.804	0.306	0.352
3	14.85	1.01	2.131	4.464	6.808	9.662	0.313	0.462
4	9.85	0.93	1.846	3.500	6.258	9.695	0.295	0.361
5	6.43	0.61	2.065	2.481	5.957	7.011	0.347	0.354
6	8.81	0.83	2.084	2.250	4.698	6.739	0.444	0.334
7	4.76	0.45	2.045	2.906	5.058	8.545	0.404	0.340
8	4.07	0.38	2.074	2.572		13.159	_	0.195

mはあらかじめ式(1)により計算し,用意したほぼ全量を 指で均一になるよう塗布した.なお,塗り残しによる余 分量としてS_p=2.0gを考慮した.

$$m = \pi D L_p t_p \rho_a + S_p \tag{1}$$

e) 圧着作業

図-1のように、メンブレン拡張器をキャップに沿って 供試体に被せた後、キャップを取り外した.その後、空 圧によりメンブレン拡張器が浮き上がるのを押さえるた めに、メンブレン拡張器の上におもり約50kgを載せ、圧 着圧力Pをかけて圧着ゲージを供試体に圧着した.

f) 一軸繰返し載荷試験

圧着時間*T*=24h経過後,供試体を泥水中から取り出し, 一軸繰返し載荷試験を行った.最大軸圧縮力*F*_{max}は25kN と50kN(軸応力*σ*_{al,max}=12.7MPa, 25.5MPa)とし,各段階の 繰返し回数は3回ずつとした.

(3) 試験ケース

表-1に示す8ケースについて試験を行い, 接着剤の塗 布厚さ t_p , 接着剤の塗布長 L_p , 圧着圧力Pに関する適切な 条件について検討した. Case 1は基本ケースで, t_p =1.0mm, 塗布長 L_p =52mm, 圧着圧力P=100kPaである. Case 2, 5, 6, 7, 8は t_p を, Case 3は L_p を, Case 4はPを変化させた.

塗布厚さなは目標値であり、実際の平均塗布厚さなは、 塗布前後のメンブレン拡張器の質量の差から水中接着剤 の塗布質量maを求め、式(2)により計算した.

$$t_{av} = \frac{m_a}{\pi D L_p \rho_a} \tag{2}$$

4. 試験の結果と考察

表-2に、一軸繰返し載荷試験により求められた接線ヤング率E_{an}、ポアソン比vを示した.接線ヤング率E_{an}は、 図-3に示す応力-ひずみ関係の軸方向の回帰直線の傾き より求めた.ポアソン比vは、軸方向と周方向の回帰直 線の傾きの比として求めた.なお、Case 8の通常ゲージ の周方向は、正常な計測値が得られなかったため棄却し た.

図-3より,通常ゲージの応力-ひずみ関係は,いずれ のケースも線形弾性的な挙動を示しており,鋼の理論値 と整合性が高い.このことから,計測結果の信頼性に問 題はないと考えられる.



図-3 一軸繰返し載荷試験の結果から得られた応力-ひずみ図

(1) 接着剤の塗布厚さに関する検討

図-4(a)より、 $t_{ar}=1.09$ mmでは $E_{E^{*}}/E_{mm}=1.08$, $v_{E^{*}}/v_{m}=0.91$ と理論値に近い値が得られているが、 t_{ar} が小さくなるにつれて値のばらつきが大きくなり、かつ理論値との誤差が大きくなっている.また図-3より、Case 1の圧着ゲージは理論値との整合性が高いが、Case 2,5,6,7,8の圧着ゲージは理論値より傾きが大きい(計測されたひずみが小さい)上、繰返し載荷に伴うドリフト(荷重を0にしてもひずみが原点に戻らないこと)が最大で20~65 μ 程度生じている.これは、供試体と接着剤の間の接着が不十分であったためと考えられる.その証拠として、写真-2を見ると、Case 1では試験後の供試体の表面に残っていた泥水はごくわずかであったのに対し、Case 2,5,6,7,8では多くの泥水が付着していた.

以上のことから, 接着剤の塗布厚さが薄いと, 泥水を 十分に取り込むことができず, ひずみゲージの接着が不 十分になることが分かった. 図-4(a)より, 接着剤の塗 布厚さは0.5mm程度では不十分で, 1.0mm程度必要であ る.

(2) 接着剤の塗布長に関する検討

図-4(b)より、 $L_p=52$ mmでは $E_{EE\#}/E_{EE\#}=1.08$ 、 $v_{EE\#}/v_{EE}$ =0.91と理論値に近い値が得られているが、 $L_p=72$ mmでは $E_{EE\#}/E_{EE\#}=2.23$ 、 $v_{EE\#}/v_{EE\#}=1.54$ となり、理論値との誤差 は大きい.また図-3(c)より、Case 3の圧着ゲージは計測 されたひずみが理論値より小さい上、最大で25 μ 程度の ドリフトが生じていることから、ひずみゲージの接着が 不十分であったと言える.写真-2(c)を見ると、Case 3の 試験後の供試体にはCase 1より多くの泥水が付着してい た.この原因としては、接着剤の塗布長が長いことで、 圧着時の泥水の排出距離が長くなること、またメンブレ ンの折り返し部分の影響を受けることが考えられる.し たがって、接着剤の塗布長は72mmでは長く、52mm程度 あれば十分であることが分かった.

(3) 圧着圧力に関する検討

図-4(c)より、P=100kPaでは $E_{E^{\pm}}/E_{E^{\pm}}$ [1.08, $v_{E^{\pm}}/v_{E^{\pm}}$ =0.91と理論値に近い値が得られているが、P=50kPaでは $E_{E^{\pm}}/E_{E^{\pm}}$ [1.75, $v_{E^{\pm}}/v_{E^{\pm}}$ =1.20となり、理論値との誤差 は大きい.また図-3(d)より、Case 4の圧着ゲージは計測 されたひずみが理論値より小さい上、最大で25 μ 程度の ドリフトが生じていることから、ひずみゲージの接着が 不十分であったと言える.写真-2(d)を見ると、Case 4の 試験後の供試体にはCase 1より多くの泥水が付着してい た.この原因としては、圧着圧力がP=50kPaと小さかっ たために、余分な泥水を接着剤部分から排出できなかっ たことが考えられる.したがって、圧着圧力は50kPaで は不十分で、100kPa程度必要であることが分かった.



図-4 検討項目ごとの E_{E着}/E_{理論}, v_{E着}/v_{理論}

5. まとめ

接着剤を全周塗布してひずみゲージを圧着する新たな 接着方法を考案し、一軸繰返し載荷試験により接着の可 否を検討した結果、適切な条件で塗布・圧着を行えば、 ひずみゲージの接着が可能であることが分かった。接着 剤の塗布厚さは0.5mm程度では不十分で、1.0mm程度必 要である。接着剤の塗布長は72mmでは長く、52mm程度 あれば十分である。圧着圧力は50kPaでは不十分で、 100kPa程度必要である。

ただし、接着剤の塗布厚さに関しては、より薄い条件



(a) Case 1





(d) Case 4



(e) Case 5



(f) Case 6

写真-2





(g) Case 7

(h) Case 8

で接着できることが理論上望ましいため、さらなる検討 が必要である.また、現段階では条件の範囲が広く、塗 布条件や圧着条件を詳細には決定できていない. したが って、さらに多くの試験ケースを行い、適切な条件の範 囲を絞り込む必要がある.また,現段階では接着剤の塗 布や厚みのコントロールは指により行っているが、個人 差が生じ均等厚で塗布できない可能性があるため、塗布 用の冶具を開発し、塗布作業の簡素化と利便性向上を図 る必要がある.

参考文献

試験後の供試体

- 1) 池野谷尚史, 鶴俊太郎, 金子進, 立川日出男, 谷和 夫:差動トランス式変位計測装置を利用した新しい原 位置三軸試験装置の開発,第35回岩盤力学に関する シンポジウム, pp.145-148, 2006.
- 2) 池野谷尚史, Abbas Taheri, 金子進, 谷和夫:小型原位 置三軸試験装置の均質な堆積軟岩地盤への適用,第36 回岩盤力学に関するシンポジウム, pp.407-412, 2007.
- 3) 田中悠一: ひずみゲージによる計測システムを導入し た孔底三軸試験装置の設計,横浜国立大学修士論文, 2010.
- 4) 東京測器研究所:製品総合カタログ 2007-2008, p.43, 2007.
- 5) 国立天文台編:理科年表平成22年, p.379, 丸善, 2009.

STUDY ON ADHESION METHOD OF STRAIN GAUGES TO SPECIMEN FOR DOWNHOLE TRIAXIAL TEST

Yuuki SHIGEKUNI and Kazuo TANI

A new adhesion method of strain gauges on the side of the specimen in drilling mud for downhole triaxial tests was proposed. Strain gauges are pressurized onto the side of the specimen with a cylindrical thin layer of epoxy resin.

A series of uniaxial repeated compression tests were conducted to examine the applicability of the proposed method. The test results demonstrated proper conditions concerning application thickness, application area and pressure of adhesion.