

円錐孔底ひずみ法と AE 法によるトンネル覆工応力の評価

鹿島建設(株) 森 孝之, (株)レーザック 田仲 正弘, 斉藤 義弘, 藤井 宏和

1. はじめに

これまで我が国で建設されてきた供用中の道路、鉄道トンネルは経年劣化が顕在化しつつあり維持管理の重要性が高まっている。各機関において点検維持マニュアルが整備されており、変状目視観察・打音点検などが実施されているが、これらの情報からトンネルの安定性を定量的に判断するのは容易でない。覆工応力を直接測定できれば、トンネルの力学的健全性の定量的な評価に寄与できる。その際の課題としては測定に迅速性が要求される。そこで、トンネル覆工応力を実測する手段として、初期地圧測定法である円錐孔底ひずみ法¹⁾(CCBO: Compact Conical-ended Borehole Overcoring)とボーリングコアを用いる AE 法(Acoustic Emission)²⁾の2つの手法を適用し覆工の応力状態を評価した。本論文では両手法による測定事例と適用性について報告する。

2. 測定位置と座標の設定

測定対象トンネルは NATM 工法で施工され竣工から十数年経過している。その周辺地山の地質は節理が発達した火成岩類が主体であり、被り深さは 300m 程度と一様で、岩盤の弾性係数は 5GPa、一軸圧縮強度は 50~100MPa 程度である。

測定箇所は図1に示したように円錐孔底ひずみ法および AE 法ともトンネル天端の覆工コンクリート部で、試験は鉛直上向き方向となる。円錐孔底ひずみ法は OC1, OC2 および OC3 (孔番) の 3 箇所、孔の間隔は極力同一付近のデータを取得するために、それぞれ 1m 間隔とした。また、AE 法に用いるコアは円錐孔底ひずみ法の測定位置の OC1 から 1m 離れた箇所である。

また、ここで座標系を設定する。座標系は図1に示したようにトンネルの横断方向を+X 軸、上り線方向を+Y 軸、鉛直上向きを+Z 軸とした。以後、この座標系を用いて応力解析を行う。

3. 試験方法

3.1 円錐孔底ひずみ法 (CCBO 法)

円錐孔底ひずみ法は、 $\phi 76\text{mm}$ のボーリング孔の孔底部を円錐状に加工して、その面に図2に示した円錐ゲージを接着剤で固定し、同径でオーバーコアリングして、その時の各方向のひずみの変化量(解放ひずみ)から3次元の応力状態を求める手法である。

原位置測定は、既設トンネルであることを考慮して円錐孔底ひずみ法では通常用いているボーリングマシンを使用せず、コアドリルを用い、仮設を最小限に抑えて測定時間と作業エリアを最小にすることにした。しかし、一般のコアドリルには信号ケーブルを機械外部に出す機能が付加されていないため、オー

バーコアリング中のひずみ挙動が測定できない。そこで、本試験では、オーバーコアリングの前後でそれぞれのひずみデータを測定し、その2点のひずみ差を解放ひずみとした。そのためオーバーコアリング中のひずみ挙動から測定データの良否は判断できない。これを踏まえ、現在はコアドリルの改良³⁾を行いオーバーコアリング中のひずみ挙動が測定できるようにしている。円錐ゲージは図2に示した24成分ゲージを用いた。円錐ゲージには3方向のロゼットゲージが45°間隔に8枚貼付されており、各ひずみゲージの半径方向を ρ ゲージ、円周方向を θ ゲージ、そして、両者の中間方向を ψ ゲージとした。

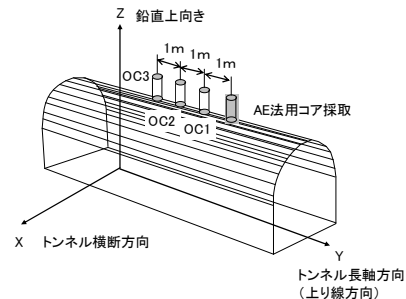


図1 試験位置と座標系の設定

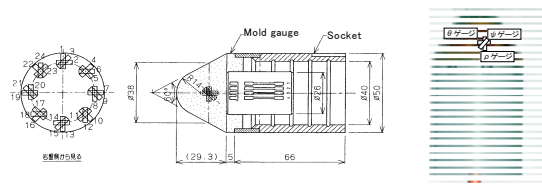


図2 円錐ゲージ(24成分)

3.2 AE 法

AE 法は、図3に示したように応力履歴を受けた材料を再び載荷すると、先行応力まで AE の発生は少ないというカイザー効果を利用して、岩石の室内一軸圧縮試験過程で AE が急増した時の応力値を先行応力とする手法である。

AE 法は定方位で採取したボーリングコア (コア径 $\phi 66\text{mm}$) から供試体を切り出すことになるが、ボーリングコア長の制限から、供試体の切り出しは図4に示したようにコア軸直交面内でトンネル軸方向から横断方向に45度間隔で4方向とした。したがって、得られる応力値は2次元応力(XY平面応力)となる。供試体Noと切り出し方向の関係は供試体No1, 2がX軸方向、No3, 4がY軸、そしてNo5, 6がそれぞれXからYへ45°と135°の方向とした。供試体の大きさは図5に示したように直径 $\phi 25\text{mm}$ 、長さ60mmの円柱供試体である。

AE 法の試験では、供試体内部から発生する AE を的確に捉え、載荷応力との関係を明確にすることが重要となる。しかしなが

ら、供試体と載荷板の接触面から AE が発生し、カイザー効果による AE の急増点を特定することが難しい場合がある。そこで、図 6 に示したように、AE センサは供試体側面の上部(1ch)、中央部(2ch)、下部(3ch)、そして対面する位置の中央部(4ch)に配置し、供試体の上下端面から発生する AE を除去するために、2ch と 4ch のセンサに最初に到達した AE だけ計数することにした。AE センサは広帯域型 (100kHz~1MHz) を用い、これらのセンサで捉えた信号はプリアンプで 40dB、シグナルコンディショナで 40dB の計 80dB 増幅させた。その信号はノイズレベルより若干高いしきい値を超えたものに対して、AE 波形記憶・解析装置によりその発生時刻、イベント、リングダウン計数および最大振幅値などのパラメータが計測した。また同時に波形データはサンプリング間隔 0.2μ秒、波形長 1,024words、プレトリガ 256words で記録した。

また、円錐孔底ひずみ法と AE 法の応力解析の際には供試体の弾性係数とポアソン比が必要となる。そこで、これらの算出は AE 法の試験時に併せて行うことにし、供試体に載荷軸と直交する方向にひずみゲージを貼付して、図 7 に示す載荷パターンで行った。同図の最初のふた山は AE 法の試験であり、供試体の物性値はこの 5 つの山すべての除荷時の応力-ひずみの関係から算出した。なお、載荷の制御は変位制御で行った。

4. 試験結果

4.1 円錐孔底ひずみ法 (CCBO 法)

円錐孔底ひずみ法では、上述したようにオーバーコアリング中のひずみ挙動を測定することはできない。そのため、測定は削孔による応力解放の影響がなくなるまでオーバーコアリング (OC)を行う必要がある。そこで、OC 長は削孔の影響が完全になくなるように孔径 (φ76mm) の 4 倍程度とした。図 8 はオーバーコアリング後に回収したコア (コア長 30cm) で、孔口側に円錐ゲージが接着された状態である。このコアは目視では亀裂などは存在しておらず、比較的良好なコンクリートといえる。

図 9(1)は OC-1 の円錐孔底ひずみ法で測定された解放ひずみ (試験前後のひずみ差) を理論曲線と併せてプロットした結果で、同図には ρ、θ、ψ の各ゲージ方向について示している。なお、同図は理論曲線と大きくかけ離れている解放ひずみ値は不良データとして棄却している。図 9(2)、図 9(3)は OC-2 および OC-3 の結果である。これらの結果をみてわかるように棄却データは各試験で数点認められるものの、解放ひずみ値と理論曲線は比較的一致しており、良好なデータといえる。

4.2 AE 法

図 10(1)は供試体 №4 (Y 軸方向) の載荷に伴う AE 発生数 (個/秒) の経時変化である。同図から AE の急増点を決めることになる。しかし、急増点が明瞭であれば客観性に問題はないが、急増点が不明瞭な場合にはどうしても主観が入り客観性に欠けるという課題があった。そこで、客観的な読取る手法が求めら

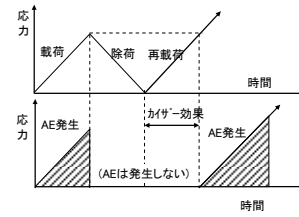


図 3 カイザー効果の概念図

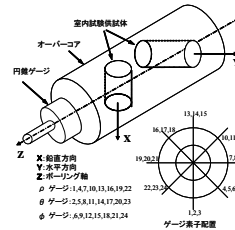


図 4 AE 法供試体の切出し方向



図 5 供試体の形状

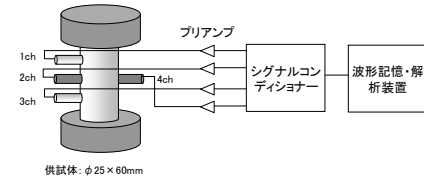


図 6 AE 法試験の概要

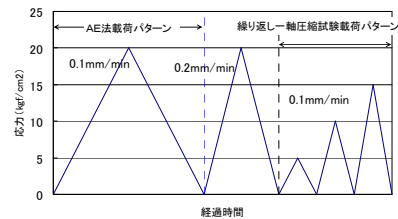


図 7 載荷パターン



図 8 回収コア

れ、今までに種々の方法が提案されてきた。例えば、岩石コアの AE 測定方法の技術情報 TR⁴⁾では、式(1)に示したように応力 σ_i に対するイベント数 N の 9 点間毎の傾き I_{i+5} を求め、さらにこれを傾きの最大値 $Max(I)$ と最小値 $Min(I)$ を用いて正規化して $Norm(I_{i+5})$ とする。この正規化した傾きと応力との関係を図化し、基準値(例えば 0.2)を越える点を AE 急増点と判定するとされている。

$$I_{i+5} = \frac{N_{i+9} - N_i}{\sigma_{i+9} - \sigma_i}, Norm(I_{i+5}) = \frac{I_{i+5} - Min(I)}{Max(I) - Min(I)} \quad (1)$$

また、相馬ら⁵⁾は応力-AE 累積図の傾きの変化率が最大になる点を推定応力値とする手法を提案され、その傾き変化率 $Cri(\sigma)$ は式(2)によるとしている。ただし、 m の値については試行錯誤的な検討が必要とされている。

$$Cri(\sigma_i) = \frac{Ct(\sigma_i + m) + Ct(\sigma_i)}{Ct(\sigma_i) + Ct(i - m)} \quad (2)$$

ここで、 σ_i は応力、 $i=1,2,\dots,n$ 、 $Ct(\sigma_i)$ は応力 σ_i に対する AE カウント数、 m は任意の整数であり、論文では 40 が採用されている。

次に、本試験では荷重は変位制御で行っているためグラフの横軸はすべて経過時間で整理している。そこで、筆者らは経過時間-AE 累積図の傾きの経時変化から推定応力値の読み取りを試みた。具体的には、AE 発生数の累積値を 40 点ずつ移動平均したデータを式(3)に示したように 20 点間隔で時間微分 $D(i+m)$ して、最大値で正規化した結果をプロットし、その曲線の変曲点を AE 急増点として評価する。

$$D(i) = \frac{AE(i+m) - AE(i)}{T(i+m) - T(i)} \quad (3)$$

ここで、 $AE(i)$ は AE 累積数、 $T(i)$ は経過時間、 $i=1,2,\dots,n$ 、 $m=20$ 。

これら 3 つの手法を用いて、図 10(1)のデータについて AE 発生の変曲点を整理した。その結果を図 10(2)~(4)に示した。

図 10(2)は TR 法によるもので、荷重初期の値の大きな箇所は、データのバラツキの理由で除外するものとされており、その後の基準値 0.2 以上になる点を AE 急増点として評価する。図 10(3)は相馬らの方法で、最初に大きな山が分布すれば AE 急増点の抽出は容易である。図 10(4)は(3)式で提案した微分法による曲線に基づき補助線を用いて変曲点を図解法で求めている。

以上の 3 つの手法で評価した応力には相違が見られる。今回著者らが提案した 図 10(4)の方法は視覚的に安定した判断が可能であるので、本論文では(3)式の方法で整理した先行応力の推定を行う。図 11 は供試体№1 (X 軸方向)、図 12 は供試体№2 (XY 軸方向) の結果である。

図 11(2)をみると、微分の変化は経過時間で 100 秒付近から一定の速度で変化し始め、165 秒付近でその速度が変化していることが認められる。この変化時の応力値を先行応力値とすると、供試体№1 (X 軸方向) の推定先行応力値は 6.9MPa と読み取れる。

Y 軸および XY 軸方向についても X 軸と同様に整理し、推定した先行応力値を表 1 にまとめた。

5. 応力状態の推定

AE 法の荷重試験 (繰返し) の結果から弾性係数とポアソン比を求めた。その応力とひずみの関係の一例を図 13 に示した。この結果は供試体№4 (Y 軸方向) の応力-ひずみ曲線で荷重軸方向とそれに直交する横ひずみの履歴である。これらの結果から覆工コンクリートの弾性係数 E は 18.7GPa、ポアソン比 ν は 0.21 とした。

円錐孔底ひずみ法と AE 法による応力の測定結果を図 14 に示した。この結果、トンネル円周方向の応力が卓越していることが特徴であり、最大でも 6MPa 程度であり、覆工コンクリートは健全な範囲の応力レベルにあると評価される。

円錐孔底ひずみ法の測定結果にはバラツキがみられ、AE 法は円

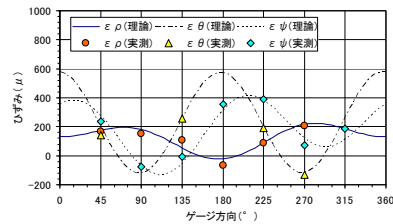


図 9(1) OC1 の解放ひずみ (ρ, θ, ψ 方向)

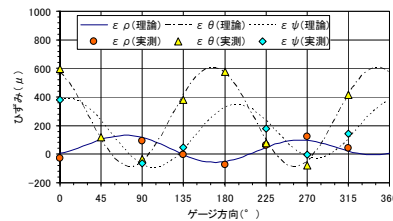


図 9(2) OC2 の解放ひずみ (ρ, θ, ψ 方向)

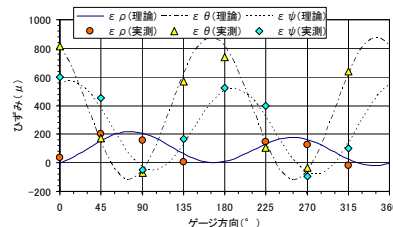
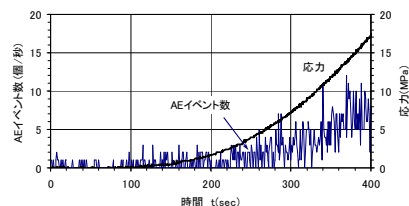
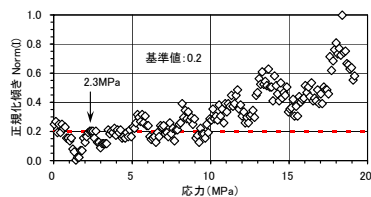


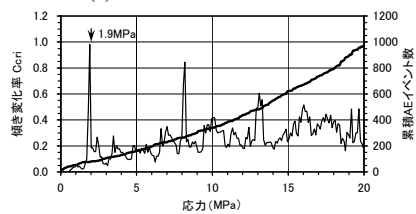
図 9(3) OC3 の解放ひずみ (ρ, θ, ψ 方向)



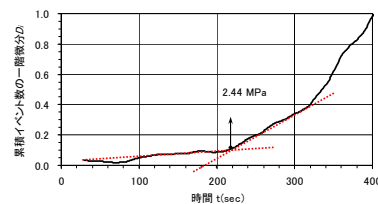
(1) AE 発生状況



(2) TR 法による変曲点の抽出



(3) 相馬・瀬戸法による変曲点の抽出



(4) 微分法による変曲点の抽出

図 10 各手法による AE 急増点の抽出方法の比較(Y 軸方向)

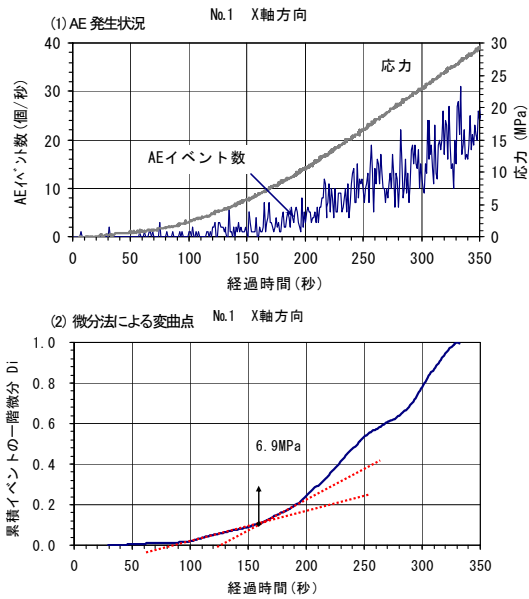


図11 X軸方向のAE発生状況と微分法による先行応力の推定例

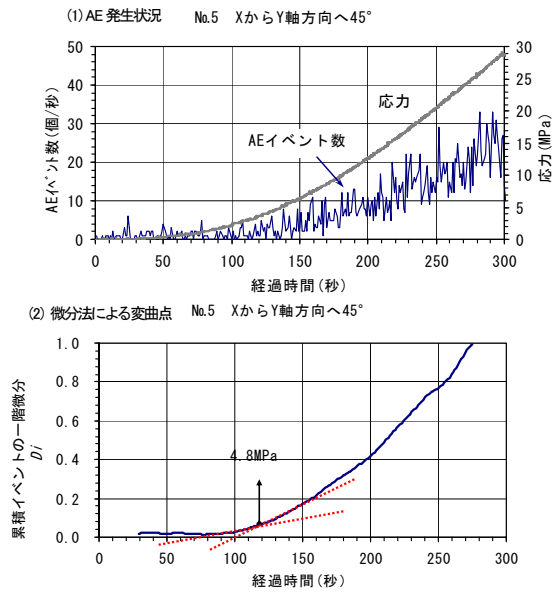


図12 XY軸方向のAE発生状況と微分法による先行応力の推定例

錐孔底ひずみ法のバラツキの範囲内にあり、AE法は概ね円錐孔底ひずみ法と同等の応力が評価されている。ただし、今回適用したAE法は二次元応力測定である。

6. おわりに

- (1)既設トンネルの健全性評価診断の定量的な評価手段として、覆工コンクリート応力の実測を試みた。適用した手法は円錐孔底ひずみ法(CCBO法)とAE法の2種類である。
- (2)今回の測定ではAE法は円錐孔底ひずみ法(CCBO法)と同等な応力の評価が可能であった。ただし、今回適用したAE法は二次元応力であり、三次元応力の測定には多くの試験数量を必要とし適用性の検証が課題である。
- (3)AE法はカイザー効果を利用するものであるが、AE発生の変曲点の判定法がキーポイントになる。本論文では微分法を提案して変曲点を評価したが、今後、種々の手法の適用を積み重ねAE法の信頼性向上に努めることが望ましい。

引用文献

- 1) International Society for Rock Mechanics, Commission on Testing Methods :Suggested Method for In Situ Stress Measurement Using The Compact Conical-ended Borehole Overcoring(CCBO), Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Vol.36,pp.307-322,1999
- 2) 金川忠, 北原義弘, 林正夫: 岩石のAEカイザー効果を利用した地圧測定法(一軸試験による測定法の詳細と適用例), 電力中央研究所報告研究報告, 381004. 1981
- 3) 森孝之他: 改良コアドリルを用いた応力測定, 第40回地盤工学研究発表会, pp.961-962,2005,7
- 4) 標準情報(TR), 岩石コアのAE測定方法—地圧測定技術 TR-A 0013: 2001, 日本工業標準調査会標準部会, 平成13年12月
- 5) 相馬宣和, 瀬戸政宏, 松井裕哉, 前田信行: 封圧環境下におけるAE法による原位置初期地圧測定法の開発, 資源と素材, Vol118, pp.546-552. 2002

表1 AE法による推定先行応力値

供試体No	X方向		Y方向		XY方向	
	No1	No2	No3	No4	No5	No6
切出し角(°) [※]	0	0	90	90	45	135
微分法	6.9	7.8	4.8	2.4	4.8	2.7
平均値(MPa)	7.4		3.6		3.8	

※切出し角はX軸から反時計回りを正とする

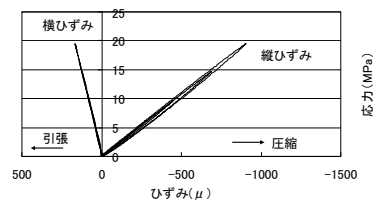


図13 繰返し載荷試験結果の一例(供試体No.4)

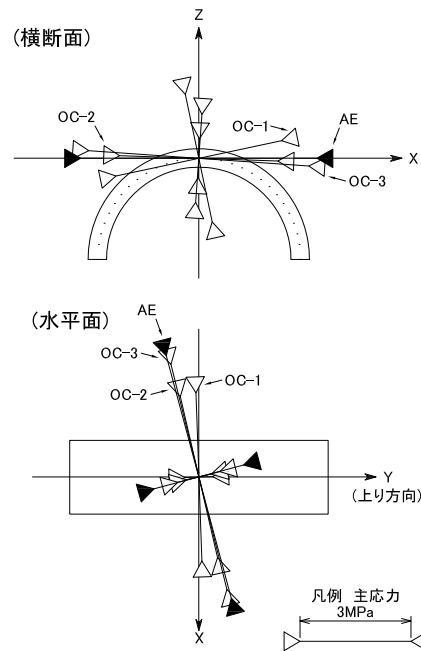


図14 覆工コンクリートの応力(CCBO法,AE法)