

Pilot 공벽변형법에 의한 암반응력 측정 장비의 개발

Development of Rock Stress Measurement Probe Based on The Pilot Hole Wall Deformation Method

이기하¹⁾, Ki-Ha Lee, 石島 洋二²⁾, Yoji Ishijima, 구호본³⁾, Ho-Bon Koo, 김승현⁴⁾, Seung-hyun Kim

- ¹⁾ 한국건설기술연구원 지반방재·환경연구실 선임연구원, Senior Researcher, Geotechnical Disaster Environment Research Division, Korea Institute of Construction Technology
- ²⁾ Horonobe지권 연구소 소장, Director, Horonobe Research Institute for the Subsurface Environment
- ³⁾ 한국건설기술연구원 지반방재·환경연구실 책임연구원, Research Fellow, Geotechnical Disaster & Environment Research Division, Korea Institute of Construction Technology
- ⁴⁾ 한국건설기술연구원 지반방재·환경연구실 연구원, Researcher, Geotechnical Disaster & Environment Research Division, Korea Institute of Construction Technology

SYNOPSIS : The theory and a probe of the pilot hole wall deformation method, which is a 3-dimensional stress measurement method based on the stress relief principle, were developed. A pilot hole is drilled from the bottom of a borehole and the stress measurement probe is inserted into the pilot hole. The borehole is advanced as the overcoring and the changes in the radius of the pilot hole in three directions and in the axial lengths between the borehole bottom and the pilot hole wall along four axial lines are measured by cantilever type-displacement sensors. The differences between the displacements by the elastic stress analysis and those measured by using the probe were within 3% in the uniaxial compression test of an acrylic resin plate having a hole.

Keywords : pilot hole wall deformation method, the stress relief principle, 3-dimensional rock stress

1. 서론

암반응력을 측정하는 방법 중에 하나인 응력해방법(K. Sugawara, 1998)은 응력해방에 따른 변위와 변형률이 계측되어 탄성이론에 의해 암반응력으로 역계산 되어 진다. 변형률 게이지를 사용하는 많은 측정에 있어서 가장 큰 문제점은 수중에서 변형률 게이지를 소정의 계측위치에 부착하는 것이다. 측정 장비를 설치하기 위해 실시하는 보링작업이 아랫방향(지표에서 지중으로)의 경우, 보링작업에 의해 발생하는 이물질(보링에 의한 분말)은 변형률 게이지의 설치에 어려움을 발생시킨다(K. Sakaguchi, 2006).

본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 변위를 측정하는 방식을 사용하였다. 측정을 위한 pilot hole을 보링작업과 동시에 완성시킨 후, 측정장비를 pilot hole에 삽입함으로써 측정을 위한 준비가 완료된다. 암반응력은 bore hole의 바닥면으로부터 깊이 20cm의 overcoring 작업동안에 측정된 변위를 역계산하여 계산되어진다(그림 1). 본 측정장비는 3방향의 직경방향 센서와 4방향의 축방향 센서에 의해 계측된 변위량을 이용하여 3차원 암반응력을 측정하는 것이 가능하도록 설계되어져 있다.

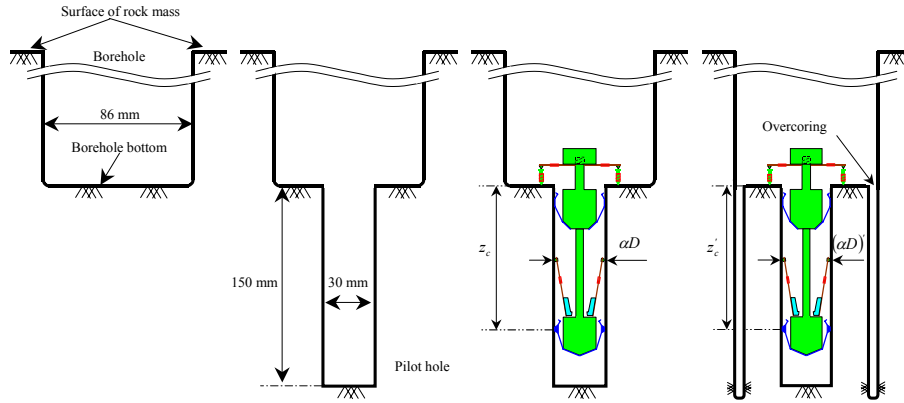


그림 1. pilot hole 공벽변형법의 변위측정 개념도

2. Pilot 공벽변형법의 이론

2.1 계표계와 측정대상변위

bore hole의 바닥면 중심에 원점을 설정하고, z 축을 boring방향의 역방향으로 결정하다. 그림 2(b)에 표시한 것 처럼 원주좌표계의 회전각 θ 는 x 축으로부터 y 방향으로 반시계 방향이다.

직각좌표계에 있어서 변위성분을 (u_x, u_y, u_z) , 원주좌표계에 있어서 변위성분을 (u_r, u_θ, u_z) , 암반에 작용하는 초기응력을

$$\{\sigma\} = \{\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}\}^T \quad (1)$$

으로 한다.

bore hole(직경 : D)의 바닥면 중심으로부터 pilot hole(직경 : $aD, 0 < a < 1$, 깊이 : γD)의 공벽에 복수의 측정점을 설정한다. pilot hole의 깊이 $z=z_m$ 의 공벽에 설정된 측정점에서 직경방향의 변위, 깊이 $z=z_c$ 의 공벽에 설정된 측정점과 bore hole 바닥면의 축선(직경 : $\beta D, a < \beta < 1$) 위에 설정된 측정점에서 z 축방향에 대한 상대변위를 측정 대상으로 한다. 본 연구에서는 a, β, γ 를 각각, 0.35, 0.58, 1.74로 결정하였다(그림 2).

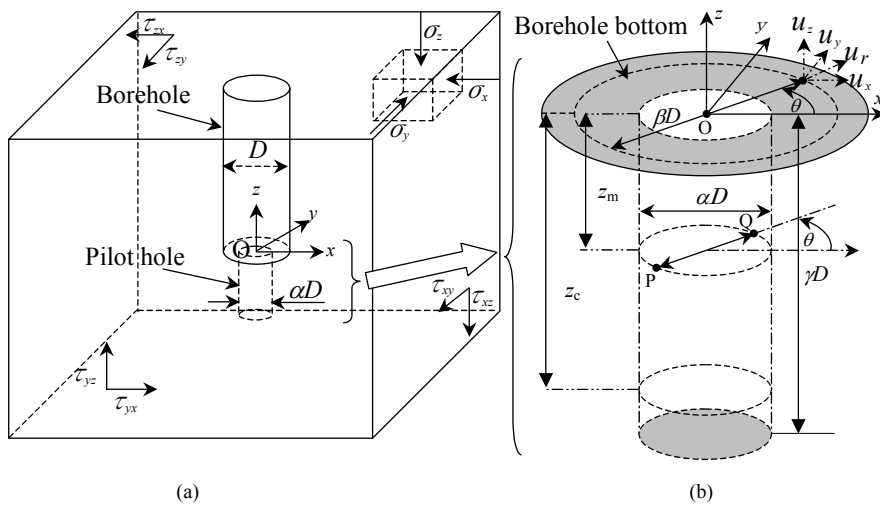


그림 2. pilot hole과 좌표계

2.2 관측방정식

z_m 의 깊이가 충분히 긴 경우에 대한 직경방향 변화에 대한 탄성이론 해는 계산 가능하다(T. Kanagawa, 1986). 하지만 본 연구에서는 $|z_m| \approx \alpha D$ 이고, bore hole의 바닥면에서의 z 축 방향변위를 측정하는 것에 차이점이 있다. 따라서, 암반을 탄성계수 E , 포아송비 ν 의 균질한 등방탄성체로 가정하고, 초기응력이 작용할 때의 암반의 변형과 초기응력과의 관계식을 3차원 유한요소법을 이용하여 구한 후, 관측방정식을 유도하였다.

해석영역의 대칭성을 고려하고 좌표변환공식을 이용하면 3개의 경계조건에 대한 탄성해를 구하는 것이 가능하므로 bore hole의 바닥면 주변의 변형과 응력과의 관계식을 얻을 수 있다. 3개의 경계조건은 다음과 같다.

- i) $\sigma_x \neq 0, \sigma_y = \sigma_z = \tau_{xy} = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$
- ii) $\sigma_z \neq 0, \sigma_x = \sigma_y = \tau_{xy} = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$
- iii) $\tau_{zx} \neq 0, \sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = \tau_{xy} = \tau_{yz} = 0$

경계조건에 대해서 실시한 수치해석 결과의 예를 그림 3에 나타내었다. 좌표변환과 중첩의 원리를 이용하면 편리하므로, 수치해석 결과에 의해 구해진 해를 대상으로 삼각함수를 이용하여 근사 해를 구하면 다음과 같다.

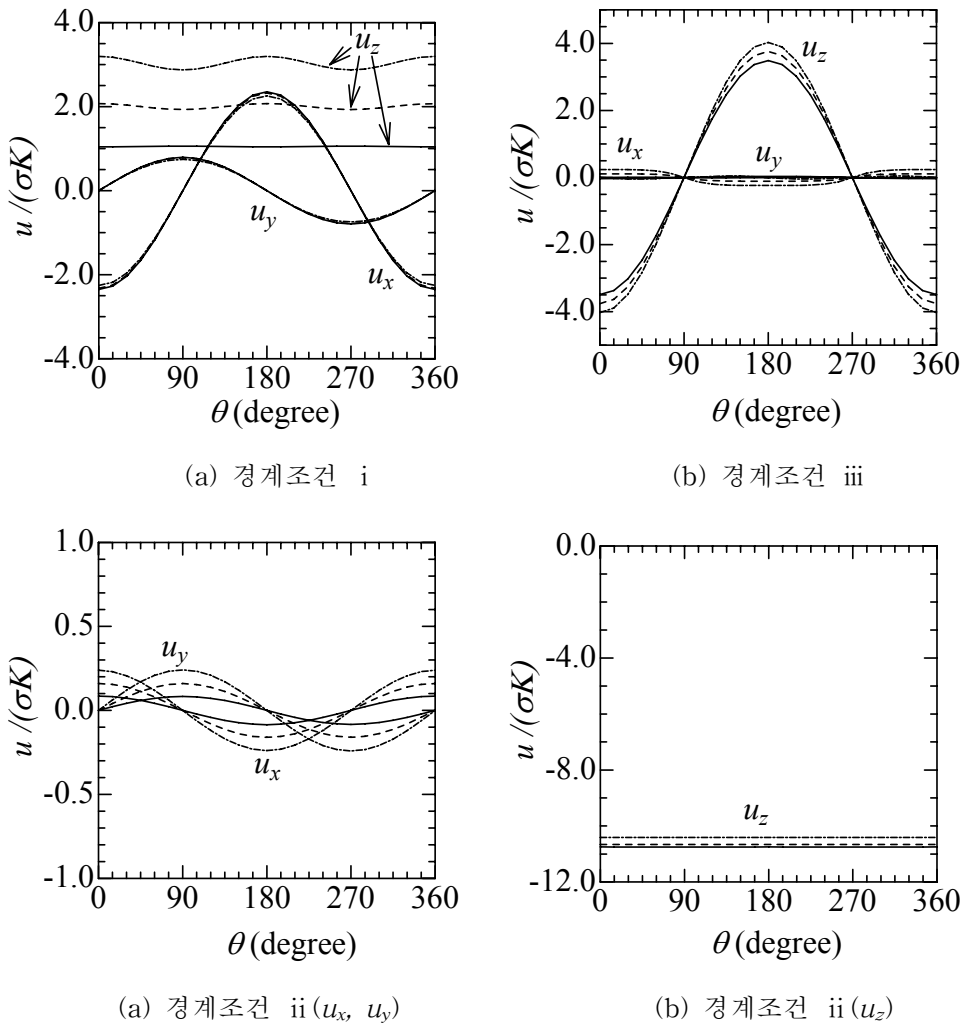


그림 3. 변위성분($z_m = -40\text{mm}$)(실선 : $\nu = 0.1$, 점선 : $\nu = 0.25$, 일점쇄선 : $\nu = 0.4$)

경계조건 i)

$$u_x = m_x \sigma_x K \cos \theta \quad (2(a))$$

$$u_y = n_x \sigma_x K \sin \theta \quad (2(b))$$

$$u_z = \sigma_x K \{s_x + t_x \cos 2\theta\} \quad (2(c))$$

경계조건 ii)

$$u_x = m_z \sigma_z K \cos \theta \quad (3(a))$$

$$u_y = m_z \sigma_z K \sin \theta \quad (3(b))$$

$$u_z = s_z \sigma_z K \quad (3(c))$$

경계조건 iii)

$$u_x = m_{zx} \tau_{zx} K \cos \theta \quad (4(a))$$

$$u_y = n_{zx} \tau_{zx} K \sin 2\theta \quad (4(b))$$

$$u_z = t_{zx} \tau_{zx} K \cos \theta \quad (4(c))$$

여기서, $K = \frac{\alpha D}{2E}$

m, n, s, t 는 α, β, γ, z (이상은 그리 2. 참조), ν 에 의존하는 정수이다. $\sigma_y, \tau_{xy}, \tau_{yz}$ 에 대한 변위성분은 좌표변환과 중첩의 원리에 의해 구해지므로 축점 P에 대한 변위성분만을 이용하여 식을 구성하면 다음과 같다.

$$\begin{Bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{Bmatrix} = K \begin{bmatrix} m_x \cos \theta, & n_x \cos \theta, & m_z \cos \theta, \\ n_x \sin \theta, & m_x \sin \theta, & m_z \sin \theta, \\ s_x + t_x \cos 2\theta, & s_x - t_x \cos 2\theta, & s_z, \\ (m_x - n_x) \sin \theta, & n_{zx} \sin 2\theta, & m_{zx} \cos \theta \\ (m_x - n_x) \cos \theta, & m_{zx} \sin \theta, & n_{zx} \sin 2\theta \\ 2t_x \sin 2\theta, & t_{zx} \sin \theta, & t_{zx} \cos \theta \end{bmatrix} \{\sigma\} \quad (5)$$

pilot hole 공벽변형법에서 측정하는 3방향에 직경변화와 4방향의 축방향의 상대변위는 다음과 같다.

a) pilot hole 공벽 $z=z_m$ 의 축점에서 측정되는 3방향의 직경방향 변화(U_θ)

$z = z_m$ 의 단면상에서 θ 의 방향을 가지는 직경의 양 단면 축점 P, Q를 설정한다. 축점 P, Q의 직경방향의 신축에 의한 직경변화 U_θ 는 축점 P, Q의 반경방향 변위성분 $u_r(\theta), u_r(\theta + \pi)$ 를 이용하

여 다음의 식으로 표현하는 것이 가능하다.

$$\begin{aligned}
 U(\theta) &= u_r(\theta) + u_r(\theta + \pi) \\
 &= 2K[\{m_x \cos^2 \theta + n_x \sin^2 \theta\} \sigma_x + \{m_x \sin^2 \theta + n_x \cos^2 \theta\} \sigma_y + m_z \sigma_z \\
 &\quad + \{m_x - n_x\} \tau_{xy} \sin 2\theta + m_{zx} \tau_{yz} \sin^2 \theta + m_{zx} \tau_{zx} \cos^2 \theta] \quad (6)
 \end{aligned}$$

b) pilot hole 공벽 $z=z_c$ 의 축점과 bore hole 바닥면($z=0$)의 축선(βD)상에 90° 간격으로 설정된 4개 축점 사이의 축방향 상대변위 $\Delta u_z(\theta)$

$$\Delta u_z(\theta) = u_z(\theta) - u_z^{**} \quad (7)$$

$u_z(\theta)$ 는 bore hole 바닥면 축선상의 축점의 축방향 변위이고, u_z^{**} 는 pilot hole 공벽 $z=z_c$ 의 4방향 ($\theta=0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$) 축점의 축방향 변위의 평균값이다. 축방향 변위의 평균값은 다음의 식(3)과 같다.

$$\begin{aligned}
 u_z^{**} &= \frac{u_z(r_m, 0, z_c) + u_z(r_m, \pi/2, z_c) + u_z(r_m, \pi, z_c) + u_z(r_m, 3\pi/2, z_c)}{4} \\
 &= K\{s_x(r_m, z_c)(\sigma_x + \sigma_y) + s_z(r_m, z_c)\sigma_z\} \quad (8)
 \end{aligned}$$

여기서, $\gamma_m = (\alpha D/2)$ 이다.

$\Delta u_z(\theta)$ 와 $\{\sigma\}$ 의 관계식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 \Delta u_z(\theta) &= K[\{s_x + t_x \cos 2\theta\} \sigma_x + \{s_x - t_x \cos 2\theta\} \sigma_y + s_z \sigma_z \\
 &\quad + 2t_x \sin 2\theta \tau_{xy} + t_{zx} \sin \theta \tau_{yz} + t_{zx} \cos \theta \tau_{zx}] - u_z^{**} \quad (9)
 \end{aligned}$$

이상을 정리한 관측방정식은 다음의 식과 같다.

$$\{U\} = K[A]\{\sigma\} \quad (10)$$

단, $\{U\}$ 와, $[A]$ 는 다음의 식(11), 식(12), 식(13)과 같다.

$$\{U\} = \begin{Bmatrix} U(\theta_1) \\ U(\theta_2) \\ U(\theta_3) \\ \Delta u_z(\theta_4) \\ \Delta u_z(\theta_5) \\ \Delta u_z(\theta_6) \\ \Delta u_z(\theta_7) \end{Bmatrix} \quad (11)$$

$$\begin{aligned}
A(i,1) &= 2m_x \cos^2 \theta_i + 2n_x \sin^2 \theta_i \\
A(i,2) &= 2m_x \sin^2 \theta_i + 2n_x \cos^2 \theta_i \\
A(i,3) &= 2m_z \\
A(i,4) &= 2(m_x - n_x) \sin 2\theta_i \\
A(i,5) &= 2m_{zx} \sin^2 \theta_i \\
A(i,6) &= 2m_{zx} \cos^2 \theta_i
\end{aligned}
, i = 1, 2, 3 \tag{12}$$

$$\begin{aligned}
A(i,1) &= s_x + t_x \cos 2\theta_i - s_x(r_m, z_c) \\
A(i,2) &= s_x - t_x \cos 2\theta_i - s_x(r_m, z_c) \\
A(i,3) &= s_z - s_z(r_m, z_c) \\
A(i,4) &= 2t_x \sin 2\theta_i \\
A(i,5) &= t_{zx} \sin \theta_i \\
A(i,6) &= t_{zx} \cos \theta_i
\end{aligned}
, i = 4, 5, 6, 7 \tag{13}$$

독립한 계측수가 상기식의 미지수 보다 많고, 계측 값의 계측정도에는 커다란 차이를 가지지 않을 것으로 판단되어지므로 아래와 같이 최소자승법을 이용하여 미지수(압반응력 6성분)에 대한 최확치를 유도하는 것이 가능하다.

$$\{\sigma\} = \frac{1}{K} \{ [A]^T [A] \}^{-1} [A]^T \{U\} \tag{14}$$

3. 아크릴 블록을 이용한 측정정도에 관한 검토

3.1 아크릴 블록재료

균질·등방한 재료로서 아크릴 블록을 선택하여 1축 압축시험을 실시하였다. 또한, 아크릴 블록의 주양에는 직경 30mm의 pilot hole을 관통시킨 후, 1축 압축시험에 따른 pilot hole 주변 변위의 측정정도에 대하여 검토하였다.

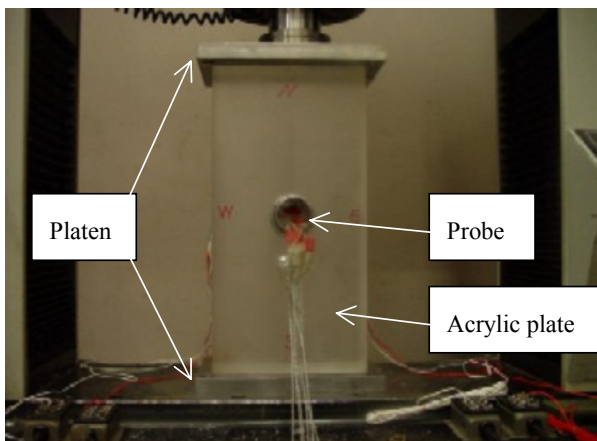


그림 4. 아크릴 블록을 이용한 1축 압축시험

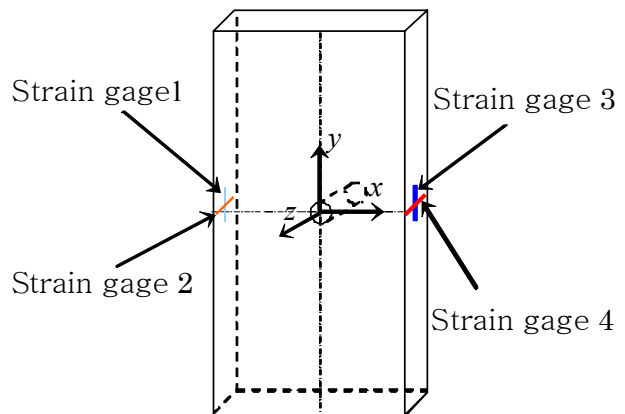


그림 5. 아크릴 블록 시험 공시체

그림 5와 같이 직경 30mm의 관통한 pilot hole을 가지는 폭 200mm, 높이 400mm, 두께 100mm의 아크릴 공시체의 표면을 bore hole의 바닥면으로 설정하고, 중심점을 원점 O, 공시체의 수직방향을 z축, 수평방향을 x축, 상향을 y축으로 한다(그림 5).

아크릴 공시체의 2개의 y-z면의 중앙에 각각 유효길이 5mm의 크로스형 변형률 게이지를 부착시켜 일축압축응력 $\sigma_y = 12.0$ (MPa)을 반복하여 작용시켰을 때 평가한 탄성계수와 포아송 비의 평균값은 3.4(GPa)과 0.39 이다(그림 5, 그림 6).

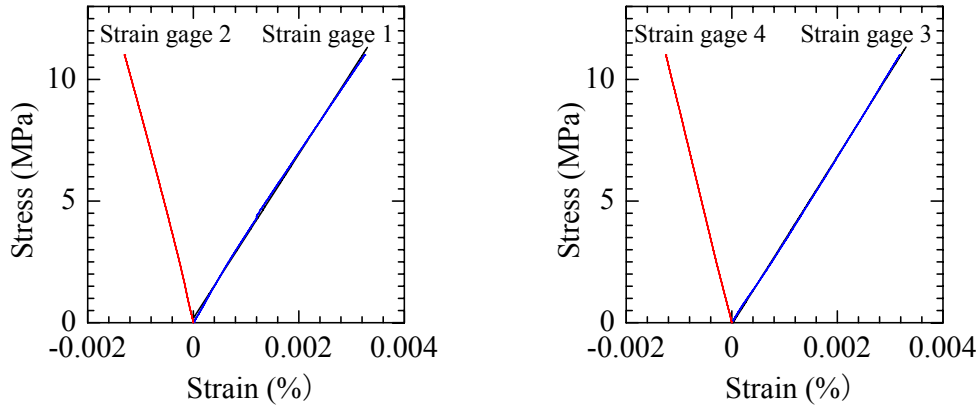


그림 6. 1축 압축시험에 의한 변형률 게이지의 측정결과

3.2 1축 압축시험에 의한 변위계측

직경방향의 변위센서는 ch1, ch2, ch3이고, 축방향의 변위센서는 ch4, ch5, ch6, ch7이다. 직경방향의 변위센서 ch1의 방향을 x축에 일치시켜 측정장비를 pilot hole에 투입시킨다(그림 7). Instron사의 5586형 재료시험기(300kN, 기계식)을 이용하여 0.72 mm/min의 제하속도로 아크릴 공시체에 연직방향응력 $\sigma_y = 12.0$ (MPa)을 작용시키는 동안에 pilot hole과 bore hole 바닥면에서 변위측정을 실시하였다.

pilot hole 벽면의 직경방향 변위는 ch1($\theta=0$), ch2($\theta=\pi/3$), ch3($\theta=2\pi/3$) 3방향의 변위센서, bore hole 바닥면의 축방향 변위센서는 ch4($\theta=\pi/12$), ch5($\theta=7\pi/12$), ch6($\theta=13\pi/12$), ch7($\theta=19\pi/12$) 4방향의 변위센서에 의해 측정한다(그림 7).

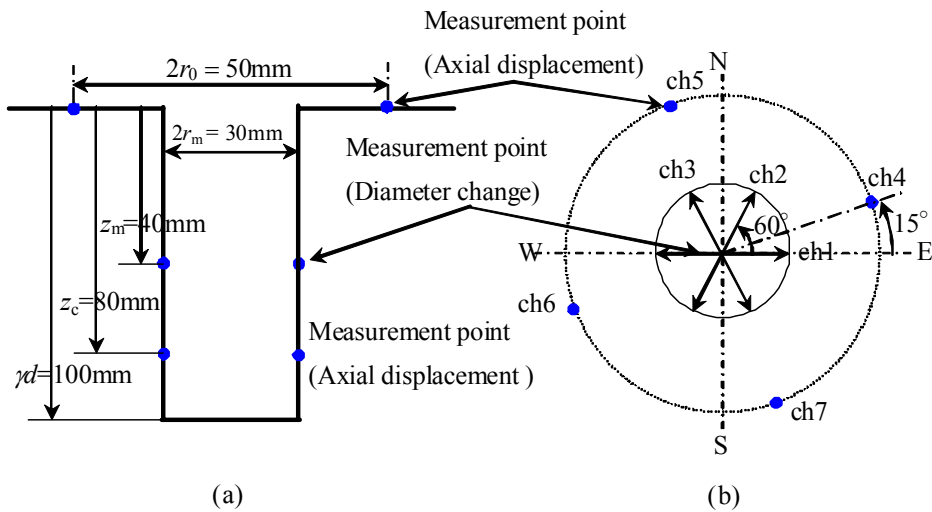


그림 7. pilot hole 및 bore hole에 설정된 측정점 위치

1축 압축시험에 의한 변위를 검증하기 위하여 실제 크기의 3차원 탄성해석 모델을 이용하여 1축 압축 시험과 동일한 $\sigma_y = 12.0$ (MPa)의 작용응력에 대한 각 측정위치의 변위 값을 계산하였다. 또한, 변위센서가 측정한 변형률을 변위로 환산하여 표 1에 표시하였다.

표 1. 변위센서에 의해 측정된 변위와 수치해석에 의해 계산된 변위 (mm)

Sensor	ch1	ch2	ch3	ch4	ch5	ch6	ch7
Measured displacement	0.118	-0.191	-0.192	-0.129	-0.094	-0.127	-0.091
Calculated displacement	0.117	-0.189	-0.189	-0.127	-0.092	-0.127	-0.092

4. 결론

본 연구는 3차원 암반응력을 한 번의 overcoring에 의해 측정되어 지도록 개발되었다. 특히, 지하수위 등 변형률 게이지를 암반에 직접 부착하기 어려운 수중에서 변위센서를 이용하여 직접 암반응력을 측정하는 측정장비로 개발 되었다. 변위센서를 이용한 측정은 변형률 게이지를 직접 암반에 부착하는 경우에 비해 다소의 측정정도가 떨어지는 단점이 있다. 개발된 측정장비의 측정정도를 검증하기 위하여 등방·균질의 아크릴 블록을 이용한 1축 압축시험을 실시하여 변위의 실측값과 수치 탄성 응력해와의 비교분석을 실시하였다.

실측값의 변위는 계산값의 변위보다 약간 크게 계측되어지나, 최대 오차는 3%정도로 암반응력 계측을 위한 목적에 충분한 측정정도를 가지는 것으로 판단되어 진다.

참고문헌

- 1) K. Sakaguchi, N. Yoshida, M. Minami, M. Hara, Y. Suzuki and K. Matsuki: Journal of MMIJ, 122(2006), 338-344.
- 2) K. Sugawara: Journal of MMIJ, 114(1998), 834-844.
- 3) T. Kanagawa, S. Hibino and T. Ishida: Report of Central Research Institute of Electric Power Industry (1986), E385033.