

Stress measurement

Hydraulic Fracturing

Hydraulic Fracturing Test

- Hydraulic fracturing field testing is a two-step procedure. Sequentially, it consists of
- a) pressurization of the selected borehole segment until fracturing occurs, and
- b) delineation of the induced fracture.

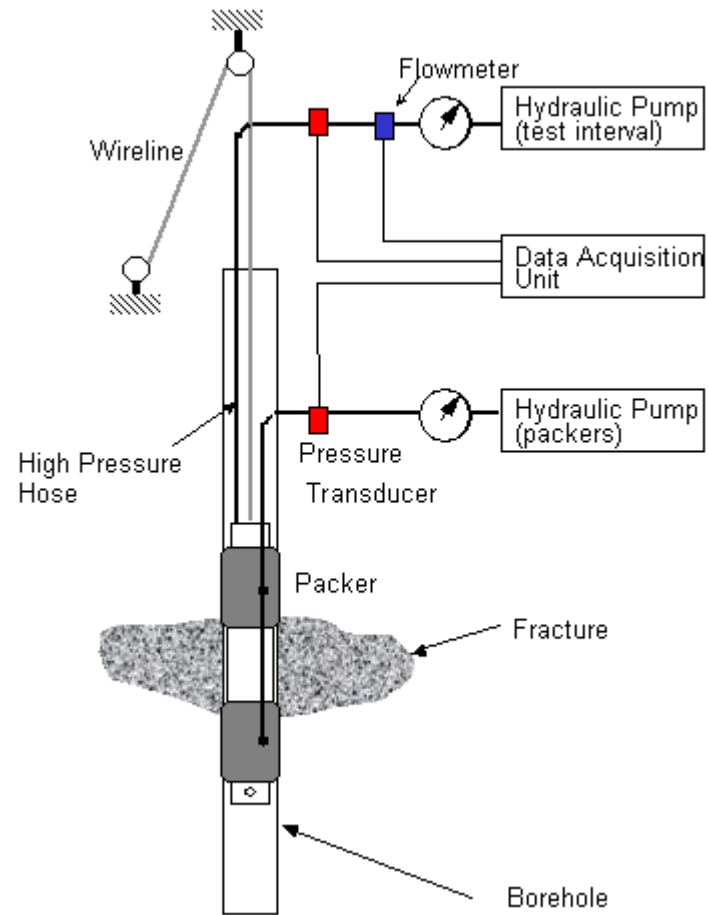
Typically, a complete test will consist of two trips downhole to the test interval, each with different equipment assemblies.

มาตรฐานการทดสอบ

- ASTM Designation D₄₆₄₅₋₈₇, Standard test method for determination of the in-situ stress in rock using the hydraulic fracturing method, Annual Book of ASTM Standards, 4.08, 851-856 (1989).

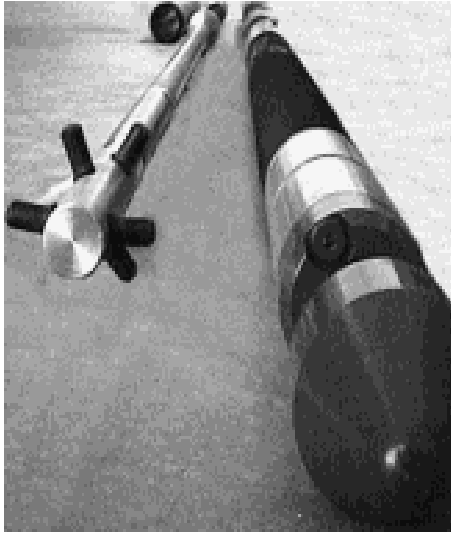
ขั้นตอนการทดสอบ

- ทำหลุมเจาะลึกถึงระดับที่ต้องการวัดค่า
- ทำการแยกส่วนที่ต้องการวัดความดันด้วยลูกยางแบ่ง
- อัดความดันด้วยน้ำในบริเวณที่ได้แบ่งส่วนแล้วจนถึงจุดที่เกิดการแตกของหินค่าความดันนี้จะบันทึกไว้เป็น P_1 ทำการอัดความดันต่อไป ค่าความดันที่อัดจะลดลง และรอยแตกจะเปิดขยายตัวจนกระทั่งความดันคงที่บันทึกความดันนี้ เป็น P_s (shut - in pressure) จึงลดความดันน้ำไปที่เริ่มต้น
- ทำการอัดความดันขึ้นอีกครั้งจนถึงความดันที่ P_2 ซึ่งจะมีค่าน้อยกว่า P_1 ความดันนี้จะทำให้รอยแตกที่มีอยู่เปิดอีกครั้งหนึ่ง



Wireline Straddle Packer System (Haimson and Lee, 1984)

Equipments

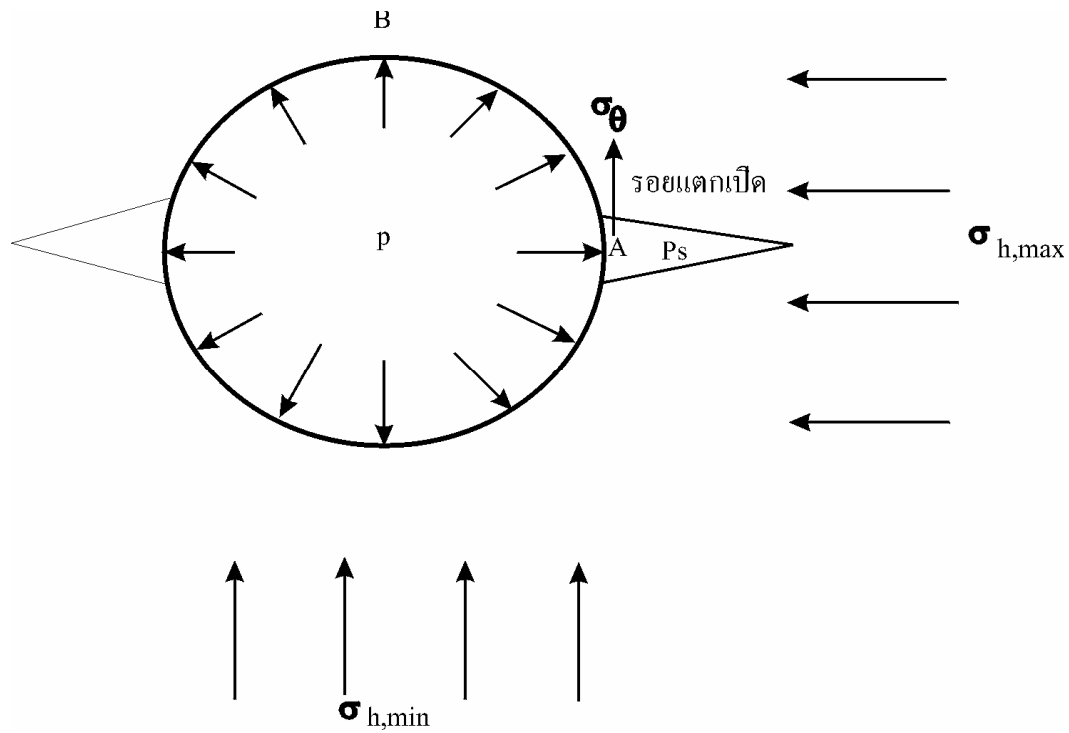


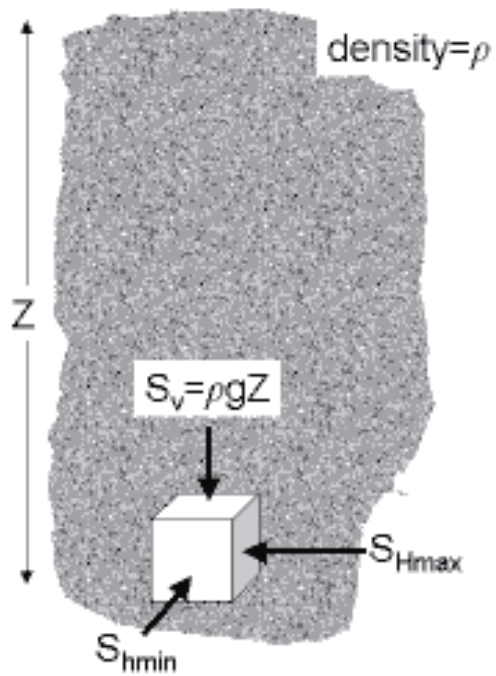
Straddle and Impression Packer System



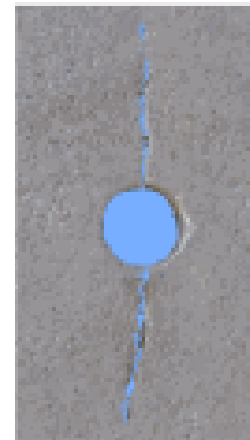
Hydrofrac Impression

Top view





S_H
(max. horizontal stress)



Top View

$$\sigma_{\theta} = 3\sigma_{h,\min} - \sigma_{h,\max}$$

$$\sigma_{\theta} - P_1 = 3\sigma_{h,\min} - \sigma_{h,\max} - P_1 = -T_0$$

$$\sigma_{\theta} - P_2 = 3\sigma_{h,\min} - \sigma_{h,\max} - P_2 = 0$$

$$P_1 - P_2 = T_0$$

$$P_s = \sigma_{h,\min}$$

ข้อสังเกตเมื่อรอยแตกไม่เกิดในแนวตั้ง

- เมื่อรอยแตกจากการอัดแรงดันน้ำไม่อยู่ในแนวตั้ง แต่เกิดอยู่ในแนวนอน พบว่าแรงดันน้ำภายในหลุมจะเท่ากับความเค้นฉากในแนวตั้งรวมกับค่ากำลังดึงของหิน

ภาวะที่ทำให้เกิดการแตกในแนวตั้ง

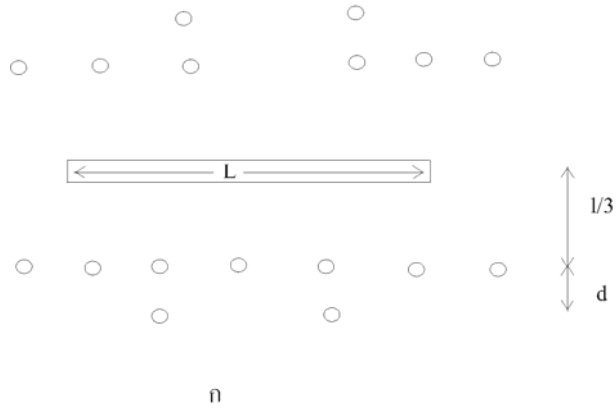
$$\sigma_v \geq (3N - 1)\sigma_{h,\max}$$

$$N = \frac{\sigma_{h,\min}}{\sigma_{h,\max}}$$

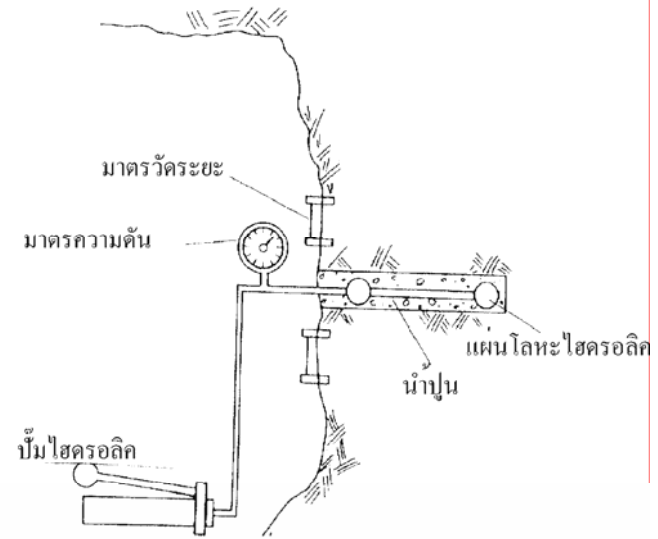
การหาความเค้นที่เกิดในมวลหินโดย Flat Jack

- ขั้นตอนการตรวจวัดมีดังนี้
- ปักหมุดเป็นแนวระหว่างช่องที่จะเปิดเพื่อสอด flat Jack ทำเป็นสองแถว วัดระยะห่างของหมุดทุกตัว
- ตัดเปิดช่องให้มีขนาด **13-19** นิ้วกว้าง **1½** นิ้วสอดแผ่นโลหะไฮดรอลิกเข้าไปในช่อง
- ทำการอัดน้ำปูนเพื่อยึดอุปกรณ์ทิ้งไว้ ประมาณ **3-4** วัน ระหว่างนี้วัดระยะห่างของหมุดที่เปลี่ยนแปลงไป
- อัดความดันเข้าแผ่นโลหะ พร้อมวัดระยะหมุดที่เปลี่ยนแปลงจนกระทั่งระยะหมุดคืนสู่จุดตั้งต้น บันทึกค่าความดัน

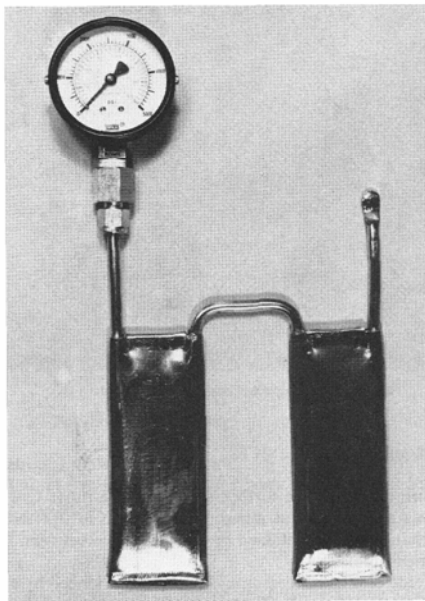
- คลายความดันลงและเพิ่มความดันขึ้นอีกครั้งจนกระทั่งระยะห่างของหมุดกลับสู่ที่เดิม ทำซ้ำเช่นนี้ สองถึงสามครั้ง
- ความดันที่ใช้ในการอัดให้ระยะหมุดกลับสู่ที่เดิมคือค่าความเค้นในทิศตั้งฉากกับแผ่นโลหะไฮดรอลิก ณ จุดที่ทำการตรวจวัด



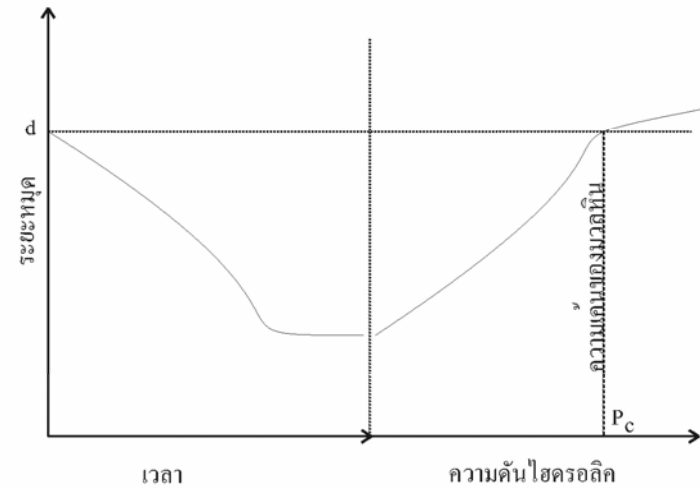
ก



ข



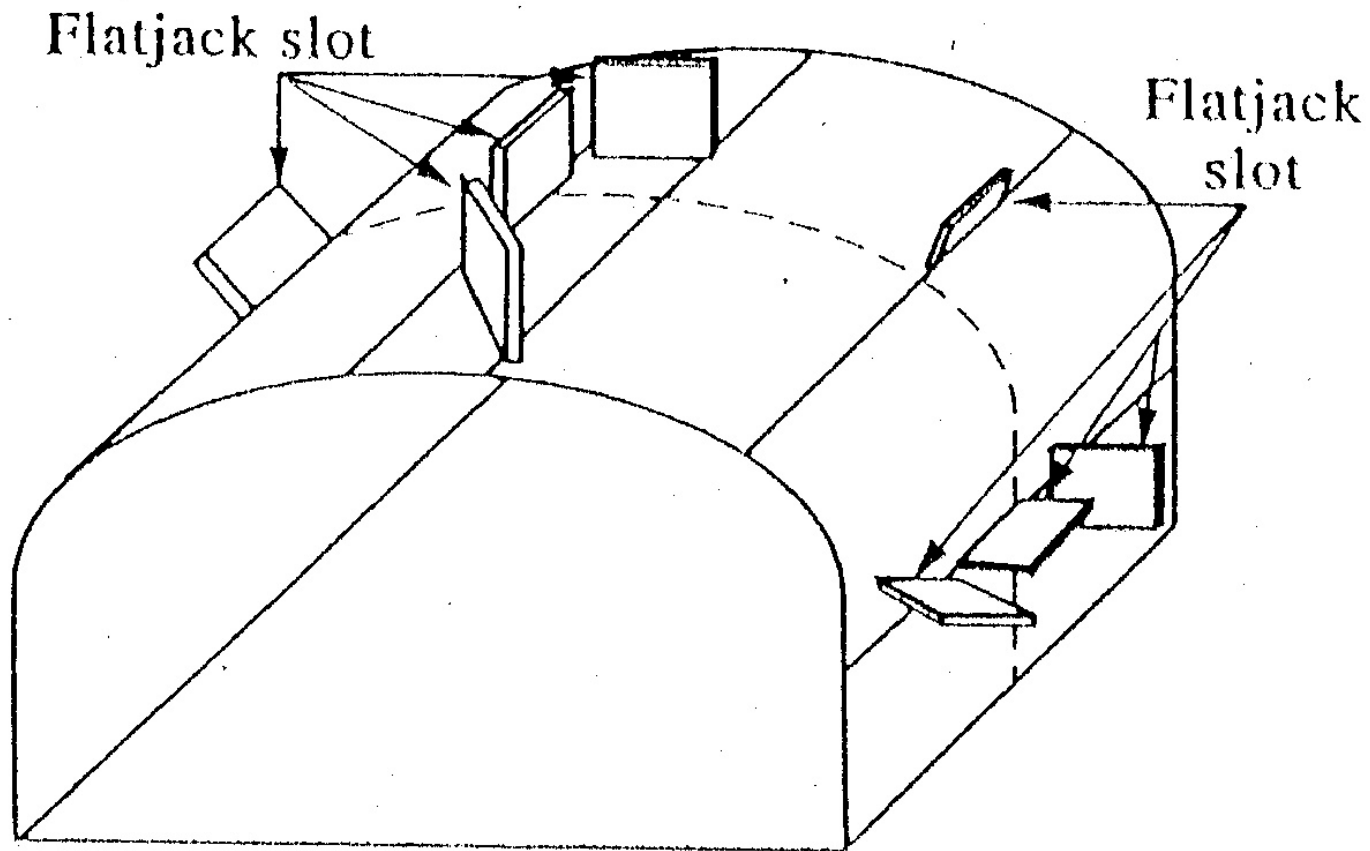
ค



ง

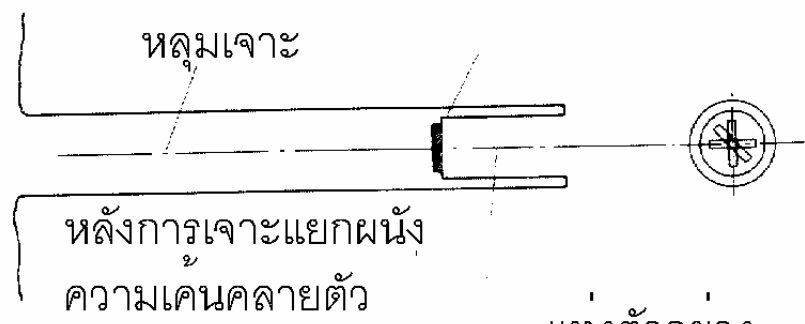
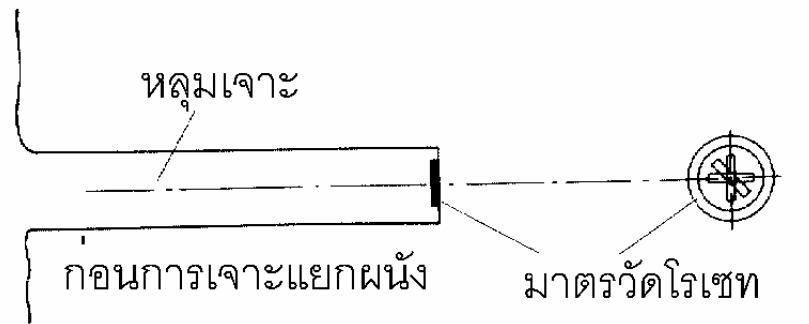
Flat Jack test

รูปแบบการตรวจวัดความเค้นในอุโมงค์

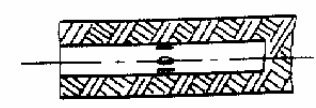
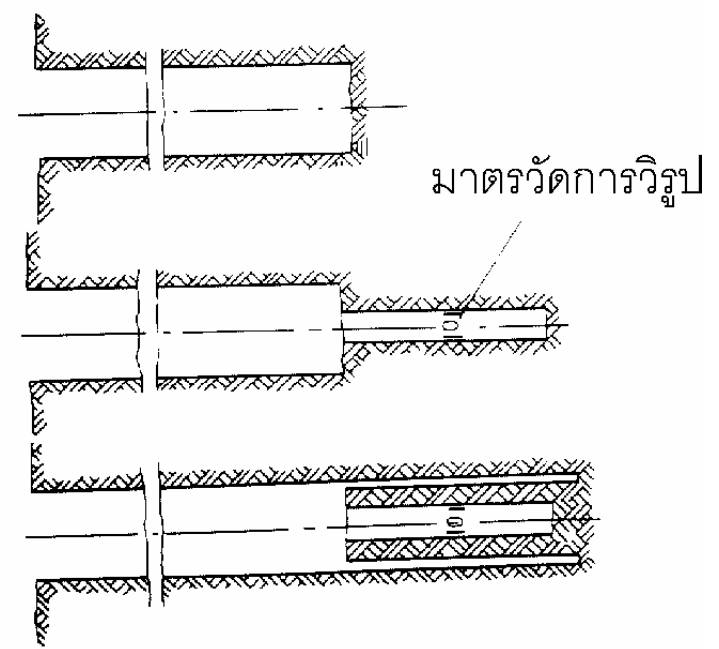


Over Coring, Stress Relief Method

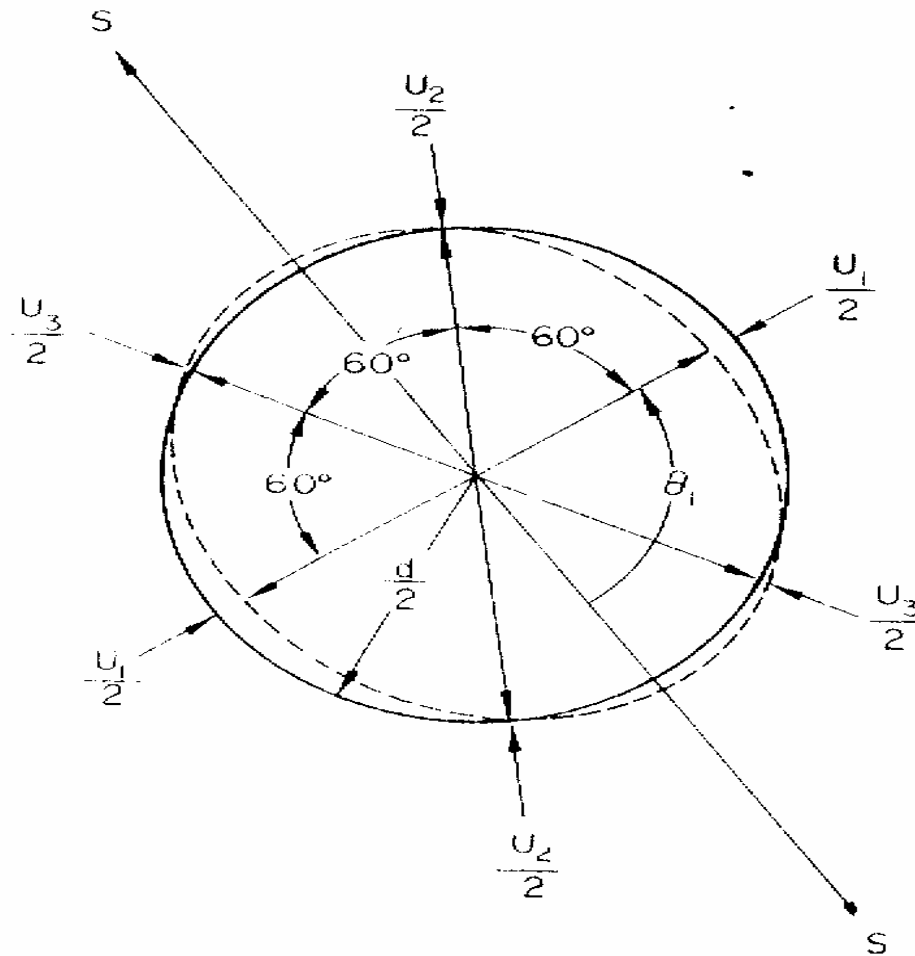
- ในการวัดค่าความเค้นโดยวิธีความเค้นคลายตัวจะมีขั้นตอนการวัดดังนี้
- ทำการเจาะผนังหลุมให้เข้าไปถึงจุดที่ต้องการวัด ขนาดของหลุมประมาณ 6 นิ้ว
- ติดตั้งอุปกรณ์วัดการเปลี่ยนแปลง หรือความเครียด ที่นิยมใช้ได้แก่ มาตรวัดการวิรูปในหลุม(borehole deformation gauge) มาตรวัดความเค้นแบบอินคลูชัน(borehole inclusion stressmeter) และ มาตรวัดความเครียดในหลุม (borehole strain cell)
- ทำการเจาะช่องผนังที่ติดตั้งมาตรวัดแล้ว (overcoring) เพื่อให้ผนังที่ติดตั้งมาตรวัดนั้นแยกตัวออกจากความเค้นในที่ที่กระทำอยู่



แท่งตัวอย่าง
ที่ติดมาตรวัดความเครียด



การจัดกลุ่มมาตรวัด(60°)และทิศทางที่ทำการวัด จากการใช้ มาตรวัดการวิรูปในหลุมเจาะ



มาตรวัดการวิรูปในหลุม(Borehole Deformation Meter)

มาตรวัดการวิรูปประกอบด้วยกลุ่มมาตรวัดแบบ 60° ซึ่งมีการจัดวางกลุ่มดังรูปที่ 5.8 เมื่อผนังถูกตัดแยกออกจะเกิดความเค้นคลายตัว มาตรวัดนี้จะวัดการเปลี่ยนแปลงของผนังที่ติดตั้งมาตรวัด ซึ่งใช้หลักความเครียดในระนาบ

$$\Delta D = \frac{\alpha_1 D}{E} \{ (1 + K) - \nu L + 2(1 - K)(1 - \nu^2) \cos 2\theta_1 \} \quad (5-6)$$

$$\Delta D = \frac{D}{E} \{ (\sigma_1 + \sigma_2) - \nu \sigma_3 + 2(\sigma_1 - \sigma_2) \cos 2\theta_1 \} \quad (5-7)$$

หรือความเค้นในระนาบ

$$\Delta D = \frac{D}{E} \{ (\sigma_1 + \sigma_2) + 2(\sigma_1 - \sigma_2) \cos 2\theta_1 \} \quad (5-8)$$

$$\Delta D = \text{ค่าการเปลี่ยนแปลงของเส้นผ่าศูนย์กลางในทิศ } \theta_1 \text{ จากทิศของ } \sigma_1$$

$$K = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}$$

$$L = \frac{\sigma_3}{\sigma_1}$$

ถ้า U_1, U_2, U_3 เป็นค่าการวิรูปที่วัดได้ตามที่ระบุในรูป 5.8 และทราบค่าคงที่อีลาสติกโมดูลัส และค่าสัดส่วนพัวของส การประเมินหาภาวะความเค้นและทิศทางทำได้ดังนี้

$$\sigma_1 + \sigma_2 = \frac{E}{3D(1-\nu^2)}(U_1 + U_2 + U_3) \quad (5-9)$$

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{\sqrt{2}E}{6D(1-\nu^2)} \{ (U_1 - U_2)^2 + (U_2 - U_3)^2 + (U_1 - U_3)^2 \}^{1/2} \quad (5-10)$$

$$\tan 2\theta_1 = \frac{\sqrt{3}(U_2 - U_3)}{2U_1 - U_2 - U_3} \quad (5-11)$$

ถ้ากลุ่มของมาตรวัดจัดเป็น 45° สมการคำนวณจะเปลี่ยนเป็น

$$\sigma_1 + \sigma_2 = \frac{E}{2D(1-\nu^2)}(U_1 + U_3) \quad (5-12)$$

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{E}{2D\sqrt{2}(1-\nu^2)} \{ (U_1 - U_2)^2 + (U_2 - U_3)^2 \}^{1/2} \quad (5-13)$$

$$\tan 2\theta_1 = \frac{-2(U_2 - U_1 - U_3)}{U_1 - U_3} \quad (5-14)$$

การกำหนดหาทิศทางของ θ_1 สามารถประเมินได้ดังนี้ (Merrill & Peterson, 1961)

กลุ่มมาตรวัดแบบ 60°

1. ถ้า $U_2 > U_3$ θ_1 จะอยู่ระหว่างมุม 90° กับ 180° หรือ 0° ถึง -90°

2. ถ้า $U_2 < U_3$ θ_1 จะอยู่ระหว่างมุม 0° กับ 90°

3. ถ้า $U_2 = U_3$ และ

ก. $U_1 > U_2$ $\theta_1 = 0^\circ$

ข. $U_1 < U_2$ $\theta_1 = 90^\circ$

กลุ่มมาตรวัดแบบ 45°

1. ถ้า $U_2 > \frac{U_1 + U_3}{2}$ θ_1 จะอยู่ระหว่างมุม 90° กับ 180° หรือ 0° ถึง -90°

2. ถ้า $U_2 < \frac{U_1 + U_3}{2}$ θ_1 จะอยู่ระหว่างมุม 0° กับ 90°

3. ถ้า $U_2 = \frac{U_1 + U_3}{2}$

ก. $U_1 > U_3$ $\theta_1 = 0^\circ$

ข. $U_1 < U_3$ $\theta_1 = 90^\circ$

แผ่นถูกตัดแยกออกจะเกิดความเค้นคลายตัว มาตรการนี้จะวัดการเปลี่ยนแปลงของผนังที่ติดตั้งมาตรวัด ซึ่งใช้หลักความเครียดในระนาบ

$$\Delta D = \frac{\alpha_1 D}{E} \{ (1+K) - \nu L + 2(1-K)(1-\nu^2) \cos 2\theta_1 \} \quad (5-6)$$

$$\Delta D = \frac{D}{E} \{ (\sigma_1 + \sigma_2) - \nu \sigma_3 + 2(\sigma_1 - \sigma_2)(1-\nu^2) \cos 2\theta_1 \} \quad (5-7)$$

หรือความเค้นในระนาบ

$$\Delta D = \frac{D}{E} \{ (\sigma_1 + \sigma_2) + 2(\sigma_1 - \sigma_2) \cos 2\theta_1 \} \quad (5-8)$$

$$\Delta D = \text{ค่าการเปลี่ยนแปลงของเส้นผ่านศูนย์กลางในทิศ } \theta_1 \text{ จากทิศของ } \sigma_1$$

$$K = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}$$

$$L = \frac{\sigma_3}{\sigma_1}$$

ถ้า U_1, U_2, U_3 เป็นค่าการวิรูปที่วัดได้ตามที่ระบุในรูป 5.8 และทราบค่าคงที่อีลาสติกโมดูลัส และค่าสัดส่วนพิวของส การประเมินหาภาวะความเค้นและทิศทางทำได้ดังนี้

$$\sigma_1 + \sigma_2 = \frac{E}{3D(1-\nu^2)} (U_1 + U_2 + U_3) \quad (5-9)$$

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{\sqrt{2}E}{6D(1-\nu^2)} \{ (U_1 - U_2)^2 + (U_2 - U_3)^2 + (U_1 - U_3)^2 \}^{1/2} \quad (5-10)$$

$$\tan 2\theta_1 = \frac{\sqrt{3}(U_2 - U_3)}{2U_1 - U_2 - U_3} \quad (5-11)$$

ถ้ากลุ่มของมาตรวัดจัดเป็น 45° สมการคำนวณจะเปลี่ยนเป็น

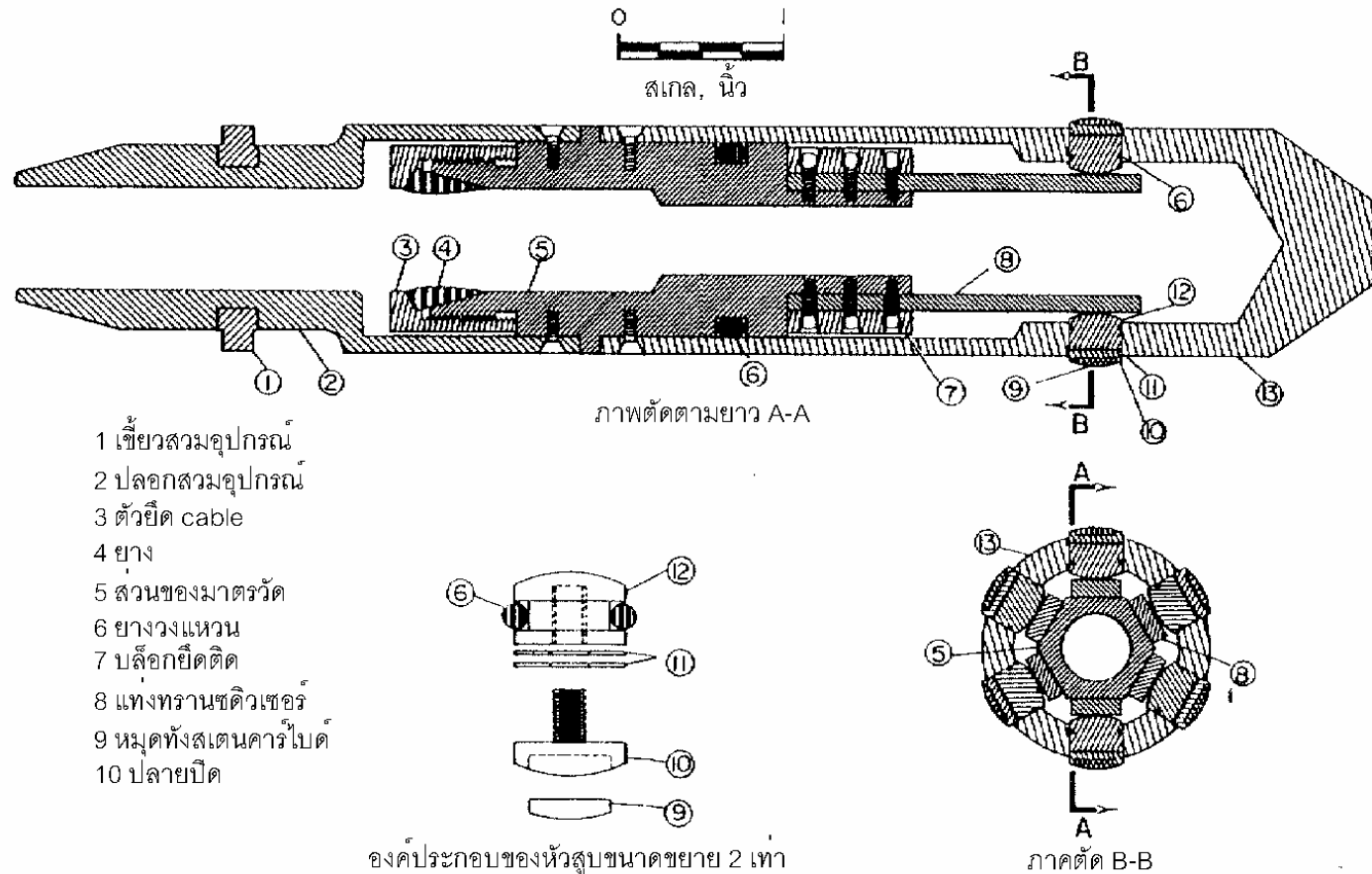
$$\sigma_1 + \sigma_2 = \frac{E}{2D(1-\nu^2)} (U_1 + U_3) \quad (5-12)$$

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{E}{2D\sqrt{2}(1-\nu^2)} \{ (U_1 - U_2)^2 + (U_2 - U_3)^2 \}^{1/2} \quad (5-13)$$

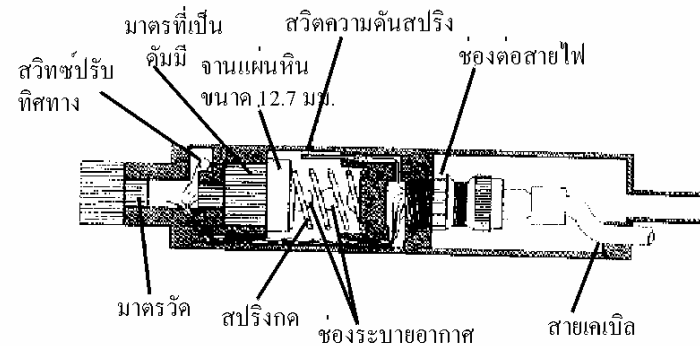
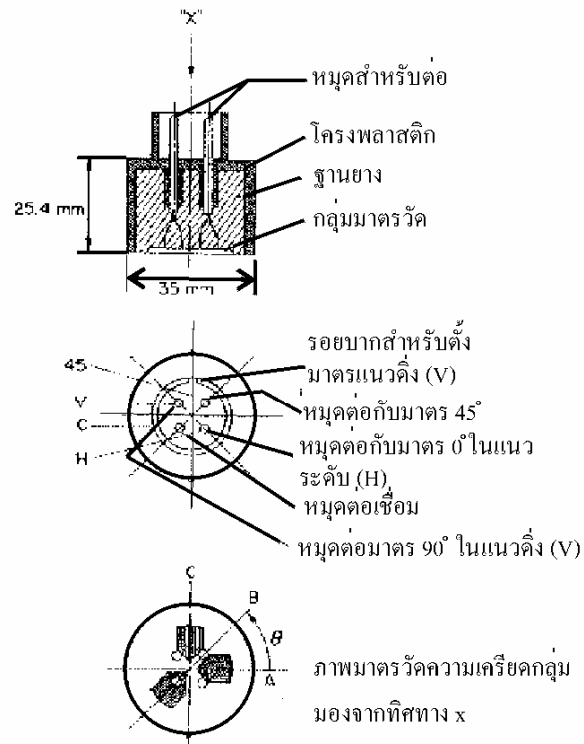
$$\tan 2\theta_1 = \frac{-2(U_2 - U_1 - U_3)}{\dots} \quad (5-14)$$

มาตรวัดการวิรูปในหลุมเจาะ

USBM borehole deformation gauge



มาตรฐานความเครียดในหลุมแบบ door stopper



- CSIR doorstopper ที่มีขนาดและการจัดกลุ่มของมาตรวัดดังรูปที่ 5.10 ซึ่งมาตรวัดนี้จะติดตั้งที่กั้นหลุมเจาะที่อาจอยู่ในแนวตั้งหรือแนวราบก็ได้ บางครั้งมาตรวัดความเครียดในหลุมอาจจะเรียกว่าเป็น มาตรแบบอินคลูชันอย่างอ่อน (soft inclusion) มาตรวัดความเครียดจะเป็นกลุ่มแบบ 45° ซึ่งจะวัดความเครียดในทิศ ε_V , ε_{45} , ε_H ตามลำดับกลุ่มของมาตรวัด ค่าของภาวะความเครียดหลักของหิน $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ สามารถคำนวณได้จาก

$$\varepsilon_1, \varepsilon_2 = \left\{ (\varepsilon_H + \varepsilon_v) \pm \sqrt{2\varepsilon_{45} - (\varepsilon_H + \varepsilon_v)^2 + (\varepsilon_H - \varepsilon_v)^2} \right\}$$

- θ_1 และ θ_2 เป็นมุมของความเครียดหลัก $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ ที่วัดจากทิศของ ε_H สามารถได้จาก

$$\tan \theta_1 = \frac{2(\varepsilon_1 - \varepsilon_H)}{2\varepsilon_{45} - (\varepsilon_H + \varepsilon_v)}$$

$$\tan \theta_2 = \frac{2(\varepsilon_2 - \varepsilon_H)}{2\varepsilon_{45} - (\varepsilon_H + \varepsilon_v)}$$

$$\sigma_1 = \frac{E}{(1-\nu^2)} (\varepsilon_1 + \nu \varepsilon_2)$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{(1-\nu^2)} (\varepsilon_2 + \nu \varepsilon_1)$$

มาตรการควบคุมรูปแบบใช้สมบัติทางแสง

