

現地 岩盤應力 測定法에 關하여

In-situ Stress Measurements of Rock Masses

江原大 資源工學科 助教授 林 漢 旭*
李 正 仁**

最近 國內에서도 地下揚水發電所, 油類 備蓄, 大型터널의 建設等 여러 分野에서 岩盤內 大規模 空洞의 掘鑿이 活潑히 進行되고 있는 實情이다. 더욱이 우리나라와 같이 山地가 많고 國土가 比較的 狹小한 경우 앞으로 地下空間의 活用이 活潑해질 것으로 推定된다.

따라서 本稿에서는 現地岩盤應力 測定法에 對한 基本原理와 國內外 測定 事例를 說明하고자 한다.

1. 岩盤內 應力測定の 必要性

地下 深部に 大規模 空洞을 安全하고, 經濟的으로 掘鑿, 維持하기 爲해서는 먼저 空洞 周邊 岩盤에 對한 力學的 安定性을 檢討하지 않으면 안된다. 이를 爲해서는 空洞 周邊 岩盤의 強度와 더불어 應力狀態를 決定하여야 한다.

一般的으로 岩盤內 應力은 크게 나누어 地下에 空洞을 掘鑿하기 以前에 岩盤內에 存在하는 初期應力(또는 自然狀態의 應力, 絶對應力, 1次地壓이라고도 한다)과 空洞 掘鑿으로 因하여 初期應力이 攪亂되어 再配置된 狀態의 2次應力(또는 2次地壓)으로 區分되고 있다.

地下 岩盤 構造物의 設計 및 施工에 있어 空洞 掘鑿에 따른 應力의 分布狀態 即 2次應力 狀態에 對한 定量的인 解析은 岩盤 特有의 性質 및 構造의 複雜性에도 不拘하고, 最近 有限要素法

理論과 電子計算機의 發達로 어느 程度 可能하게 되었다.

그런데 이 解析을 爲해서는 가장 重要한 入力 資料인 初期應力을 決定해야 된다. 뿐만아니라 地下 空洞 設計 過程에 있어 그 力學的 安定性을 經驗的, 定性的으로 檢討할 때도 掘鑿 個所에 作用하고 있는 初期應力의 크기 및 作用 方向은 重要한 要素가 된다.

2. 測定 對象應力

岩盤內 存在하는 應力을 그 生成 要因을 基準으로 할 때 여러가지 種類로 나눌 수 있다.

即 岩盤內 應力은 크게 初期應力(natural stress)과 2次應力(induced stress)으로 나눌 수 있고, 前者는 다시 重力으로 因한 應力(gravitational stress)과 地體應力(tectonic stress)로 區分할 수 있다. 또한 地體應力을 더욱 細分하면 最近의 地體應力(current tectonic stress)과 殘留應力(residual stress)을 들 수 있다.⁽¹²⁾

重力으로 因한 應力이란 岩盤內 任意 一點에 있어 그 윗 部分에 놓여있는 岩石이나 土壤(overburden)의 自重에 依해 生成되는 應力이다. 이 應力은 過去 原地形 狀態에서 被覆岩의 무게로 因해 形成된 應力과, 그 後 侵蝕 또는 堆積等 各種 地殼 變動을 거쳐 이루어진 最近의 地形狀態에서, 被覆岩의 무게로 因해 形成된 應力

* 鑛業 技術士(採鑛)·工學博士

** 工學博士 서울大 資源工學科 教授

으로 區分되는데 重力으로 因한 應力이란 後者 만을 意味하고 前者는 地體應力의 一部로 看做 하는 것이 一般의이다.

current tectonic stress란 地殼 變動으로 생기는 應力이기 때문에 岩石層의 形成에 가장 重要한 要素라 할 수 있다. 이 應力은 水平 또는 거의 水平方向으로 作用하는데, 測定한 最大水平應力과 彈性學的으로 計算한 水平應力($\sigma_h = k \cdot \sigma_z$)과의 差異를 過剩水平應力(excess horizontal stress)이라 하며 이는 地體應力의 存在 有無를 判別하는 基準으로 삼고 있다.^{(8) (9)}

殘留應力은 때로는 內部應力(internal stress)이라고도 하는데 一般적으로 「殘留應力이란 荷重이나 溫度 變化가 없는 狀態에서 外力과 모멘트가 除去되는 경우 物體內에 남는 應力 成分으로 스스로 平衡을 이루려는 應力」이다.⁽⁵⁾

이 殘留應力도 더욱 細分할 수 있는데, 外力이 不均一하게 作用되었다가 除去된 後 物體內에 생기는 I形態의 殘留應力과, 비록 外力이 均一하게 作用하더라도 物體內에 構造的 不均質로 因해 생성되는 II形態의 殘留應力이 있다.⁽¹²⁾

Voight는 이 殘留應力을 說明하기 爲하여 그림 1과 같은 spring model을 導入하였다.

即 壓縮狀態에 있는 2個의 스프링과, 引張狀

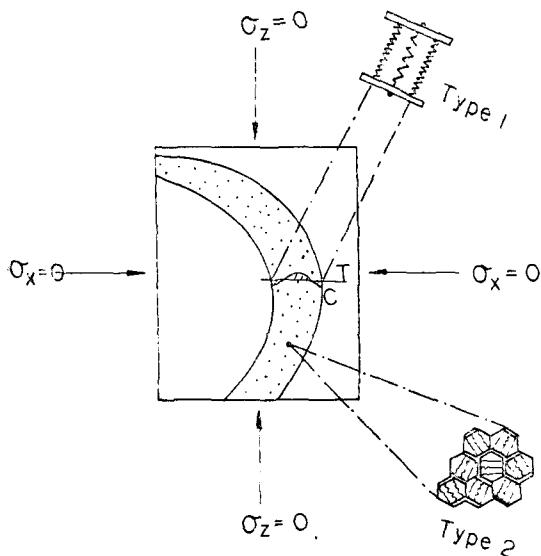


Fig 1. Schematic illustration of possible residual stress systems fold. (after Voight)

態에 있는 1個의 스프링이 서로 內的으로 均衡을 이루고 있는 경우, 이들 物體는 內的으로 應力狀態에 있지만 外部荷重이나 모멘트는 0이 된다.

應力이 比例限界內에 있는 單位 物體의 휨에서 外部의 휨모멘트가 除去되면 單位 物體는 原狀態로 回復될 것이지만, 萬一 褶曲作用 등에 依해 非彈性的 變形이 일어나면 外部 모멘트를 除去하더라도 모든 變位는 回復되지 못하여 I形態와 같은 殘留應力이 생긴다.

한편 多結晶 複合體로된 岩盤의 一部에 熱과 같은 物理的 作用이나 또는 化學的 作用으로 母岩의 粒子나, 結晶, 各 結晶內의 缺陷(defect) 사이에 調和를 깨뜨리게 되면 應力이 生成된다. 따라서 加해진 作用이 除去된 다음에도 結晶內 調和가 홀트려져 있는 限 殘留되는 應力을 II形態라 하는데 I 및 II形態의 殘留應力은 서로 重疊될 수 있다. 이들 2가지 形態의 應力은 서로 區分하기는 어려운 것이지만 大體의으로 I形態는 巨視的 規模인데 比하여 II形態의 殘留應力은 微視的으로 훨씬 작은 規模로 生成된다.

現地 應力測定法으로는 以上 여러 種類의 自然狀態 應力中, 最近의 重力으로 因한 應力(current gravitational stress), 最近의 地體應力(current tectonic stress), I형태의 殘留應力(residual stress of type I)만이 測定되고^{(6) (12)} II形態의 殘留應力은 別途의 X-ray法(X-ray line broadening and d-spacing technique method)과^{(5) (7) (11)} calorimetric energy technique法에 依해 測定할 수 있다.

따라서 現地 應力測定法에서 測定 對象이되는 應力이라 함은 II形態의 殘留應力과 2次應力을 除外한 初期應力이 된다.

2次應力이란 人爲的으로 空洞을 掘鑿함으로써 그 周圍에 應力이 集中되어 生成되는 應力이다.

3. 岩盤內 應力狀態

地壓 現象을 理論的으로 研究하기 始作한 初期에는 岩盤內 應力은, 岩盤을 均質, 等方的 彈性體로 보고 地表는 水平이며, 岩盤內에는 各種 不連續面(discontinuity)이나 地殼變動이 없는 媒

質로 假定하여 計算하였다.

即 岩盤內 任意 一點에 作用하는 初期應力中 鉛直成分의 크기(σ_v)는 地表로부터의 깊이(h)와 岩盤의 平均密度(r)만으로 決定하고($\sigma_v=r \cdot h$), 水平應力 成分(σ_h)은 여기에 岩石의 포아송比(ν)를 考慮하여 求한 값($\sigma_h=\frac{\nu}{1-\nu} \cdot \sigma_v$), 即 lithostatic stress로 看做하거나, 또는 地表로부터 深度가 깊은 때는 거의 靜水壓狀態(hydrostatic stress)의 應力인 것으로 알려져 왔다(Heim's rule).

그러나 岩盤은 위의 假定과 같이 單純하지 않기 때문에 最近 世界的으로 많은 測定을 實施한 結果, 鉛直應力 成分은 어느 程度 上記 計算值와 一致하지만, 水平應力 成分은 위 計算值보다 훨씬 큰 경우도 있고, 때로는 鉛直應力보다 더 큰 때도 많은 것으로 報告되고 있다. 위와 같은 傾向은 全 世界的인 것으로 Van Hernden, Sbar, Greiner 等에 依하면 測定 深度가 500m 未滿일 때 더욱 뚜렷한 것으로 알려지고 있다.

위와 같이 地殼內 큰 水平方向의 應力이 有在하는 理由에 對해서는 學者들에 따라 다르지만, 大體으로 地表收縮說, 板構造論說(plate tectonics), 新 地體構造論說(new global tectonics) 및 地殼 移動說(mantle flow) 등으로 說明하고 있다.

그러나 特定 地域에 큰 水平方向의 應力이 存在하는 理由로는 위에 列擧한 一般的인 要因 以外에도 測定地域 附近의 地形狀態 및 그 變化에 따라 生成되는 熱彈成應力(thermo-elastic stress), 地殼平衡說, 受動土壓理論說, 그리고 地殼 두께의 變化를 큰 原因으로 들고 있다.

또한 Eibacher, Scheidegger, Worotnicki, Nichols 等은 各種 地質構造의 影響을, Ranalli는 地體環境(tectonic environment), Voight는 岩石의 非均一한 流動의 舉動(behavior) 등을 들고 있지만 以上 여러 要因中에서도 特히 地形과 地質構造는 큰 影響을 주는 것으로 알려지고 있다.

以上에서 살펴본바와 같이 初期應力은 地質構造 및 地形의 特性 等 여러가지 要因에 따라 다르기 때문에 어느 나라에서나 一般的으로 適用될 수 있는 結論을 얻기 어렵다.

더욱이 우리나라의 경우 地質構造는 複雜하고, 岩盤應力을 形成한 條件이 다른 나라에 比하여 特異하기 때문에 外國의 測定 資料로부터 얻어진 數式을 利用하여 岩盤應力 狀態를 定量的으로 計算할 수도 없으므로 國內에서의 現地 應力 測定의 必要性이 더욱 緊要하다고 하겠다.

4. 岩盤內 應力推定法

岩盤內 應力의 크기와 方向을 推定하는 方法으로는 다음을 들 수 있다.

4.1 斷層面解法(stress inferred from fault plane solutions of earthquakes)

Anderson(1905)이 地層에 作用하는 主應力의 相對的 크기와 方向은 斷層의 生成과 關聯된다는 理論을 提示한 以來, 主로 地球物理學的인 面에서 利用되는 F.P.S法을 利用하여 P 및 T軸(各各 壓縮 및 引張軸을 나타냄)과 斷層面에 對한 slip vector를 求하여 主應力의 方向을 얻고 있다.

Rangely Col(美國)에서는 現地應力 測定値와 F.P.S法으로 求한 主應力 方向은 一致한다고 報告하였지만(Cruze) 地表面의 大部分은 地震活動이 없거나 또는 微弱하기 때문에 이 方法만으로는 應力場의 크기를 完全히 求할 수 없다.⁽⁹⁾
(10)

4.2 地質, 地形 等 最近의 地殼運動을 觀察하고 求하는 方法(geomorphic and geological effects of stresses)

Scheidegger(1965), Gerber(1980), Dungan(1980) 等은 斷層, 龜裂, 山脈의 方向 等 地質 및 地形의 現象은 應力에 依해 形成되는 것으로 보고 地殼內 各種 構造를 觀察하고 이를 統計的으로 處理하여 最大主應力의 作用 方向을 決定하였다. 이 方法은 地域에 따라 地質構造의 分散度가 크거나 또는 測定 地點의 深度가 깊을때는 明確한 關係를 얻기 어렵다.

4.3 地表面의 垂直 變位 測量에 依해 求하는 方法(recent displacement survey)

Gubler(1980), Höggerl(1980), 中根勝見(19

73) 등은 각국 스위스, 오스트리아 및 日本에서 最近 地表의 垂直 變位를 測量하고 이 結果로부터 主應力의 크기와 方向을 求하였다. 그러나 이 方法은 時間, 費用 및 測定精密度 等に 制限이 있기 때문에 活發히 利用되지 못하고 있는 實情이다.

4.4 有限要素法에 의한 理論解析法(geomechanical model by Finite Element Method)

有限要素法에 의한 應力解析法은 Voight(1969), Douglas(1970), Sturgal et al(1976) 등이 地質工學의 問題에 應用한 以來 많이 利用되고 있는 方法 中의 하나이다. 그러나 岩盤內의 不連續面, 地層의 變化, 物性의 差異 等を 實際 岩盤처럼 正確히 反映하기 어려운 缺點이 있다.

4.5 現地 應力測定法

以上 4가지 方法은 各々 特性을 갖고 있지만 適用上 制限이 있거나 完全한 解析을 하는데 充分하지 않기 때문에 主로 補助的 手段으로 利用된다.

따라서 定量的인 應力值을 얻고자 할 때는 現地 岩盤應力 測定法이 널리 쓰인다.⁽¹⁰⁾

5. 現地應力 測定法(In-situ stress measurements)

現地 應力 測定 方法을 그 原理에 따라 區分하면 크게 應力補償法, 應力開放法 및 岩石의 破壞 現象을 利用한 水壓破碎法(hydrofracturing) 等を 들 수 있다.

應力補償法에는 Mayer(1951), Tincelin(1951) 등이 開發한 Flat jack 法과 Tolobre 에 의해 開發된 cylinder jack 法이 있는데 이들은 岩盤表面이나 表面 近處에서 測定하기 때문에 岩盤表面의 狀態 即 發破나 風化作用의 影響을 받기 쉬운 缺點이 있다.

應力開放法이란 地壓을 받아 變形(strain)을 일으키고 있는 岩盤의 一部分을 파내면 그 部分은 無應力 狀態로 되고 變形이 消滅됨으로 이때 變形量을 測定함으로써 岩盤應力을 決定하는 方法

이다.

이 方法은 應力補償法에 比하여 測定 操作이 簡單하고 彈性理論에 따라 測定值의 處理가 容易한 長點이 있다. 그러나 應力을 計算하기 爲해서는 반드시 彈性係數와 泊松比를 求해야되며 彈性理論을 使用하기 때문에 岩盤內에 龜裂이 있거나, 岩盤이 軟弱하여 彈性的 舉動을 나타내지 않을 때는 正確한 應力을 求할 수 없는 缺點이 있다.

이 方法을 細分하면 應力開放을 行하는 位置에 따라 孔徑變形法, 孔壁變形法 및 孔底變形法 等으로 區分할 수 있다.

5.1 孔徑變形法(diametral deformation method)

孔徑變形法에 의한 應力 測定은 變形量(deformation) 및 彈性係數의 測定으로 나눌 수 있는데 이들의 原理는 다음과 같다.

5.1.1 變形量의 測定

그림 2에 表示한 바와 같이 먼저 內部 試錐孔(EX)을 穿孔하여 一定 壓力을 받고 있는 狀態에서 孔徑의 變形을 測定한 다음 그 周圍의 外部로 오버코어링(overcoring)을 實施하여 無應力 狀態로 應力을 開放시키면서 孔徑의 變形量을 求하여 이를 應力으로 換算하게 된다.

孔徑變形量은 一般的으로 3次元 極座標로 表示하면 半徑方向의 變形量(U), 接線方向의 變形量 및 孔軸方向의 變形量으로 表示되는데 이 가운데서 主된 變位는 半徑方向임으로, 오버코어링하면서 半徑方向의 變形量을 測定하여 이 結果로부터 3次元 應力을 解析하게 된다.

即 平面變形(plane strain) 狀態에서 孔軸方向

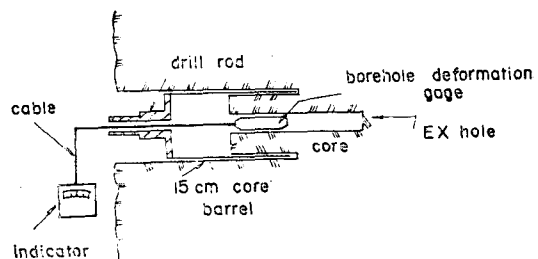


Fig 2. Schematic diagram of In-situ stress relief by diametral deformation method.

의 變形率은 無視할 수 있으므로 이때 變形量과 作用應力 사이에는 다음 式이 成立된다.

$$U = \frac{d(1-\nu^2)}{E} [(\sigma_1 + \sigma_2) + 2(\sigma_1 - \sigma_2) \cdot \cos 2\theta] \dots\dots\dots(1)$$

여기서

- d : 測定孔(EX)의 直徑
- σ_1, σ_2 : 平面主應力
- E : 岩盤의 彈性係數
- θ : 最大主應力 σ_1 에서 變形量(U)을 考慮한 點까지의 角

그림 3과 같이 中心角을 60° 씩 等間隔으로 測定한 孔徑變形量을 各各 U_1, U_2 및 U_3 라 하면

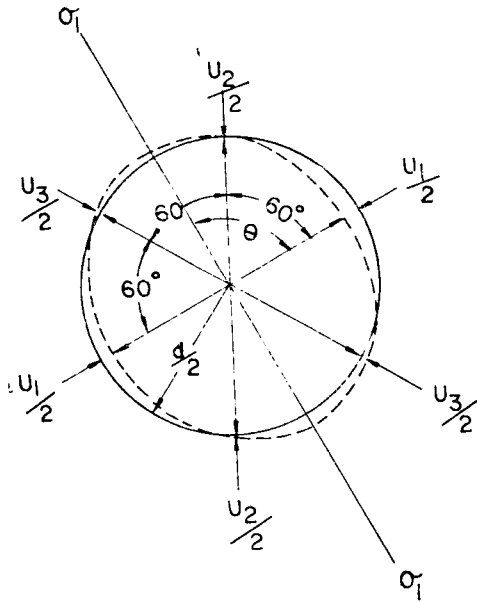


Fig 3. Borehole cross-section showing deformations measured 60° apart.

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{E}{6d} \left[(U_1 + U_2 + U_3) + \frac{\sqrt{2}}{2} \{ (U_1 - U_2)^2 + (U_2 - U_3)^2 + (U_3 - U_1)^2 \}^{\frac{1}{2}} \right] \\ \sigma_2 &= \frac{E}{6d} \left[(U_1 + U_2 + U_3) - \frac{\sqrt{2}}{2} \{ (U_1 - U_2)^2 + (U_2 - U_3)^2 + (U_3 - U_1)^2 \}^{\frac{1}{2}} \right] \\ \tan 2\beta &= \frac{\sqrt{3}(U_2 - U_3)}{2U_1 - U_2 - U_3} \end{aligned} \right\} (2)$$

여기서

U_1, U_2, U_3 : EX 孔內에서 60° 間隔으로 測定 σ_1, σ_2 및 β 는 式 (2)로 나타낼 수 있다.

한 孔徑變形量

β : σ_1 에서 U_1 까지 反時計 方向으로 測定한 角

5.1.2 彈性係數의 測定

應力을 計算하는데 重要한 岩石의 物性으로는 彈性係數와 泊松比를 들 수 있다. 特別히 彈性係數는 式 (2)에서와 같이 主應力의 方位角과 傾斜角에는 影響을 미치지 않지만 應力의 크기에는 直接 比例한다.

彈性係數의 測定 方法은 여러가지가 있지만, 一般적으로 原位置 實驗法으로는 平板載荷試驗法(plate bearing test), Flat-jack 法, Goodman jack 法, dilatometer 法, 二軸壓縮法(biaxial chamber), C. S. M cell 法 등이 主로 使用된다.

孔徑變形法으로 應力을 測定할 때, 얻어진 코어를 使用하여 彈性係數를 測定할 수 있는 二軸壓縮試驗法(biaxial chamber)을 選擇하는 것이 一般的이다.

特別히 이 方法은 孔徑 變形量을 測定할 때 버턴(button)이 놓인 位置를 表示해 두었다가 二軸 壓縮時 同一 點에서 測定하기 때문에 實질 原岩盤의 特性에 가까운 값을 求할 수 있으며 또 實驗室 試驗에 比하여 試驗片의 制作이 必要하지 않으므로 時間과 經費面에서도 有利하다.

코어內 孔徑變形量과 彈性係數와의 關係는 그림 4와 같이 안지름 a , 바깥지름 b 인 두꺼운 圓形管(thick-walled cylinder)에 等分布로 作用하는 外壓 P_0 와의 關係로부터 求하면 式 (3)과 같

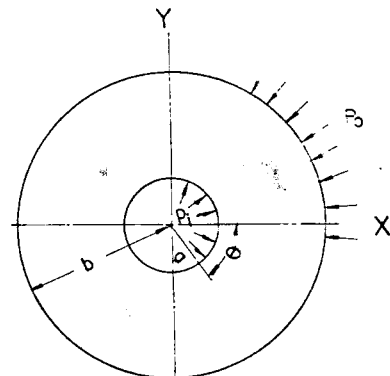


Fig 4. Cross-sectional view of a thick-walled cylinder.

이 주어진다.

$$E = - \frac{4ab^2 \cdot P_0}{(b^2 - a^2) \cdot U} \dots\dots\dots(3)$$

이 방법은 Maihak(1958, 1960), 남아프리카 共和國의 國立研究所, Siebeck(1960), Fairhurst(1967), Niwa(1969), Oka(1970), 美國 鑛務局 등에서 改良되었는데 現在에는 鑛務局에서 製作한 靑銅製 transducer 로 된 計測器가 主로 使用된다.

그렇지만 3次元 應力을 完全히 決定하기 爲해서는 平行이 아닌 3個의 測定孔에서 孔徑變形을 求해야 하는 缺點이 있다.

5.2 孔壁 變形法

Leeman(1966) 등에 의해 開發된 方法으로 그림 5와 같이 測定用 小口徑 孔壁面의 한 斷面內 3個所에 rosette gage를 附着한 다음 大口徑 오버코어링에 의해 應力을 開放하고 그때의 strain 變形量으로부터 岩盤應力을 決定하는 方法이다.

이 방법은 다른 方法과는 달리 1個孔의 測定만으로도 3次元 應力을 決定할 수 있는 長點이 있으나 孔壁의 研摩와 孔壁에 strain gage를 附着하는 技術이 어렵다. 最近에는 위 缺點을 補完한 triaxial strain cell法이 開發되어 쓰인다.

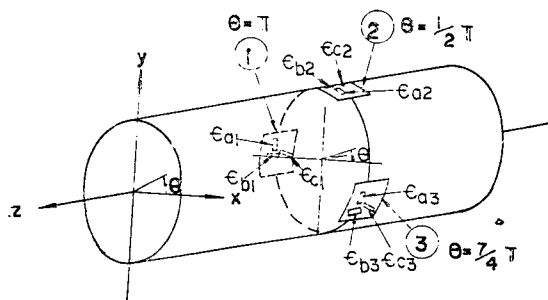


Fig 5. Diagram of Stress Relief Method on the Wall of a Hole.

5.3 孔底 變形法

測定孔의 底面을 研摩하고 그 中央에 rosette gage를 附着시켜 變形量을 읽은 다음, 測定孔을 보다 더 掘進하면서 應力을 開放시킨다.

이 方法을 最初로 試圖한 것은 Mohr(1956)이며 그 後 Olsen(1957), Slabodov(1958), Leeman(1966, 1969), Gray(1969), Hiramatsu(19

63) 등에 의해 改良되었다.

이 方法은 理論的인 原理가 正確하고, 彈性係數와 포아송比에 依한 影響이 쉽게 調查되는 利點이 있으나 濕한 孔底에서는 strain gage의 接着上 問題가 있는 것으로 報告되고 있다.

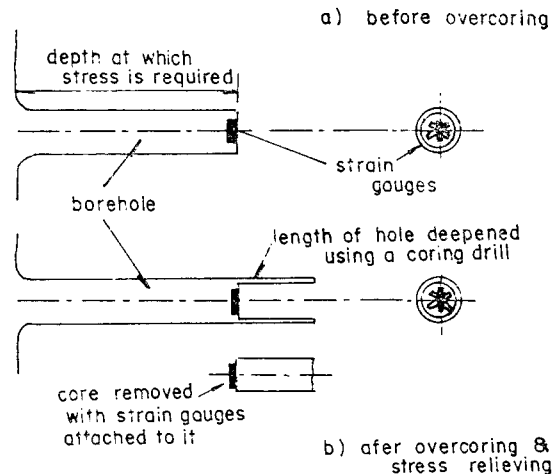
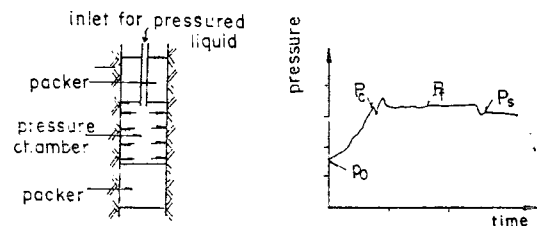


Fig 6. Schematic Diagram of Stress Relief Method on Flattened Bottom.

5.4 水壓 破碎法(Hydraulic fracturing)

Kehle(1964), Fairhurst(1964), Keys et als(1967), Schmitt(1981) 등에 의해 研究되어 오늘날 널리 쓰이는 方法中의 하나이다.

이 方法은 그림 7과 같이 于先 鉛直孔을 穿孔하고, 測定하고자하는 點에서 約 1m의 間隔을 두고 packer를 設置한다. 이 密閉된 部分에 液體를 注入하여 加壓하면서 加壓時間과 壓力變化와의 關係를 檢討하면 壁壓面에 龜裂이 生길



P_0 : initial pressure
 P_c : critical pressure
 P_f : flow-out pressure
 P_s : shut-in pressure

Fig 7. Schematic Diagram of the Pressurized Section and Accompanying Stresses(after Kehle)

때 壓力은 最高로 되고, 또 液體를 壓入시켜 두면 龜裂이 孔壁에서 더 깊게 發達하여 壁力은 安定된다. 이때 加壓을 中止하면 壓力은 急速히 低下되는데 이때 壓力을 shut-in 壓力이라 한다.

이러한 壓力의 變化와 岩石의 포아송比 및 引張強度로부터 主應力의 크기를 求하게 된다.

5.5 其他의 方法

以上 說明한 方法 以外에 Core discing 法, 微小破壤音 頻度法(Acoustic emission), 彈性波 測定法 等이 있지만 이들은 定量的 解析을 하기 어려운 경우가 많으므로 主로 補助的 手段으로 쓰인다.

6. 現地應力 測定 結果

6.1 外國의 測定 結果

岩盤內 應力 狀態를 究明하기 爲하여 지금까지 여러나라에서 많은 測定이 實施되었다. 이들 測定 地域 및 그 結果에 對한 報告는 多數 發表된 바 있거니와 그 代表的인 例를 들면 다음과 같다.

即 Hast(1967, 1979, 1980), Voight(1967), Kropotkin(1972), Herget(1974), Sbar et al(1973), Gentry(1973), Gay(1975, 1977), Worotnicki et al(1976), Lee et als(1977), Nichols et als(1980), Blackwood(1978, 1983), Haimson(1978), Illies(1978), Froidevaux et al(1980) 등은 各 各 北아메리카, 유럽, 아프리카州 및 호주 等 地에서 測定한 結果를 報告하였다.

한편 竹內昌之, 龜岡美友(1978), Lavie et al(1977), Saxena et als(1983) 등은 日本, 이스라엘, 印度 等 아세아 諸國에서 測定하였다.

以上 測定 對象 地域은 大部分이 測定 地點의 깊이가 地表面로부터 2km 未滿이며 서로 地質條件, 即 岩石의 種類, 地形, 岩盤의 不連續性 等 이 서로 다르다.

6.2 우리나라의 測定例

우리나라에서도 岩盤內 應力 狀態를 알기 爲하여 筆者에 依히 (1) (2) (3) (4) 地表面로부터 깊이가 285m 및 594m 되는 上東鑛山, 150m 되는 三浪

津 地下 揚水 發電所, 200m 및 440m 되는 第2 蓮花鑛山, 802m 되는 江原炭礦 等 4個 地域 7個 所에서 孔徑變形法으로 測定하였는데(그림 8은 實測例임), 이 結果는 다음과 같다.

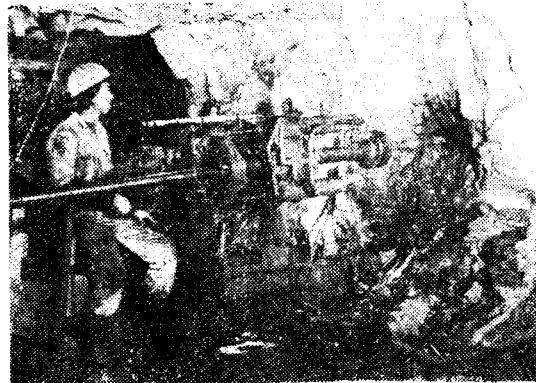


Fig 8. Testing apparatus used at Samrang-jin power house.

國內外를 莫論하고 鉛直應力(σ_z)은 理論적으로 計算한 被覆岩의 무게(rh)와 거의 一致하는 傾向을 보인다. 國內外的 測定 結果를 보면 약간의 差異가 있지만 主要한 數式은 그림 9와 같다.

即 美國, 캐나다, 호주, 南아프리카共和國, 스칸디나비아 諸國의 測定 結果로부터 얻은 Brown 式, Worotnicki 式, 캐나다 外 8個國에서 얻은

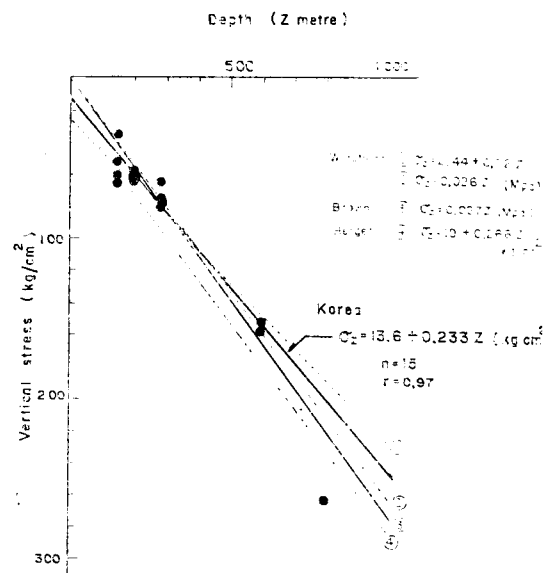


Fig 9. Variation of vertical stress with depth.

Hast 및 Herget 式이 주어지고 있다. 國內의 式은 總 15 個의 測定값을 回歸曲線法(regression line method)으로 處理한 結果, 相關係數 0.97 일 때 式 (4)와 같다.

$$\sigma_z = 0.233Z + 13.6 \text{ kg/cm}^2 \quad (4)$$

Z : 地表로부터의 深度(m)

以上 여러 값과 比較할 때 國內의 測定値는 外國의 값보다 약간 적은 것을 알 수 있다.

6.4 深度에 따른 水平應力の 變化

國內의 測定 資料를 中心으로 深度에 따른 平均 水平應力の 關係를 表示하면 그림 10과 같으며 이는 式 (5)로 表示될 수 있다.

$$\sigma_{hav} = 0.183Z + 27.8 \text{ (kg/cm}^2\text{)} \quad (5)$$

Haimson, Herget, Hast 式은 세계 各國의 測定 結果를 處理하여 얻은 式인데 國內 測定値는 大體의으로 이들 값보다 적다. 다만 Hast 式은 常數가 크기 때문에 地表 近處에 큰 水平應力이 存在함을 意味한다.

以上 現地 岩盤에 對한 應力 測定法에 關하여

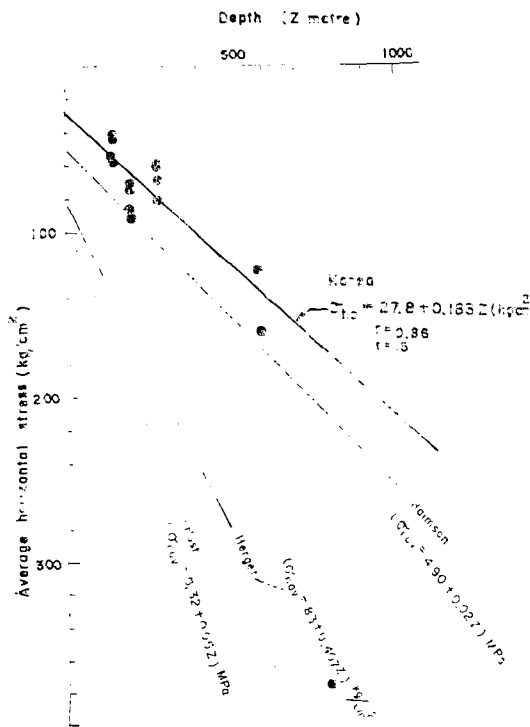


Fig 10. Change of Ave. horizontal stress with depth.

簡略히 記述하였거니와 우리나라의 여러 地域에서 많은 測定을 繼續함으로써 뚜렷한 結果를 얻게 되길 바란다.

〈參 考 文 獻〉

1. 林漢旭, 李正仁., 1980, 孔徑變形法에 依한 岩盤內 初期應力 測定에 關한 研究: 大韓鑛山學會誌., V. 17, No.1, pp.30~37.
2. 林漢旭, 李正仁., 1980, 孔徑變化法에 依한 岩盤內 應力測定과 그 解析에 關하여: 大韓鑛山學會誌., V. 17, No.3, pp.131~137.
3. _____, _____, 1981, 三浪津 揚水地下發電所 現地 岩盤의 應力 測定에 關한 研究: 서울大學校 工科大學 生産技術研究所., V.4, No.1, pp.1~15.
4. 林漢旭, 徐栢洙, 金雄秀., 1984, 石炭鑛山 坑道 周圍의 岩盤應力 測定에 關한 研究: 江原大學校 論文集., V.19, pp.157~166.
5. Friedman, M., 1972, Residual elastic strain in rocks: Tectonophysics, V.15, pp.297~330.
6. Froidevaux, C., Paquin, C., Angelidis, C., and Tritziras, A., 1980, In-situ stress measurements in Greece: Rock Mech., Supp. 9, pp.19~20.
7. Froidevaux, C., Paquin, C., and Souriau, M., 1972, Virgin rock stresses at Doornfontein gold mine, Carletonville, South Africa: Jour. of Geology, V.80, pp.61~80.
8. Illies, J.H., and Greiner, G., 1978, Rhinegraben and the Alpine system: Geol. Soc. Am. Bull., V.89, pp.770~782.
9. Nichols, T.C., 1980, The state of stress in the barre granite of Vermont and other near-surface crystalline rocks of north America, paleo and present-day stress fields: Univ. of Colorado at Boulder, ph D. Diss., 196pp.
10. Ranalli, G., and Chandler, T.E., The stress field in the upper crust as determined from in-situ measurements: Geologische Rundschau, Bd. 64, pp.653~674.
11. Russell, J.E., and Hoskins, E.R., 1973, Residual stress in rock: Proc. 4th Symp. Rock mechanics, ASCE, Newyork, part 3, pp.1~24,
12. Voight, B., 1967, Interpretation of in-situ stress measurements: Proc. 1st Congr. Int. Soc. Rock Mech., V.3, pp.332~348.