

土 壓 의 測 定 과 分 析

金 周 範* · 尹 忠 燮** · 柳 基 松***

1. 序 論

土壓은 構造物이나 흙속의 어느면에 흙에 의하여 作用하는 壓力으로서 이 土壓은 60年前 Goldbeck이 土壓計를 開發한후 부터 土壓計에 作用하는 垂直應力은 상당히 精密하게 測定할 수 있게 되었다. 鰐댐에 使用되는 土壓計種類는 電氣式과 流體式으로 크게 나누어지며 또한 土壓計의 配置形式에 따라서는 그림. 1과 같이 1次元(1成分)土壓計, 2次元(3成分)土壓計, 3次元(7成分)土壓計가 있으며 2次元 및 3次元 土壓計는 모두 1次元土壓計를 組合한 것으로서 1次

元土壓計는 鰐댐일때 鉛直方向의 土壓을 測定하고 2次元土壓計는 堤體를 2次元으로 假定하여 鰐內의 最大, 最小主應力의 크기와 方向을 測定하기 위한 것이며, 3次元土壓計는 堤體를 2次元으로 假定할 수 없거나 正確한 主應力의 크기와 方向을 알기 위하여 利用된다. 이와같은 土壓計를 利用한 測定值를 分析하여 壓力狀態를 알던 設計値와 比較하여 設計의 適否를 判斷하고 앞으로 構造物設計時의 基準設定 및 施工後의 安全管理에 有效한 資料로 利用할 수 있다. 本稿는 土壓計의 埋設, 測定原理 및 問題點에 대하여 記述한 것이다.

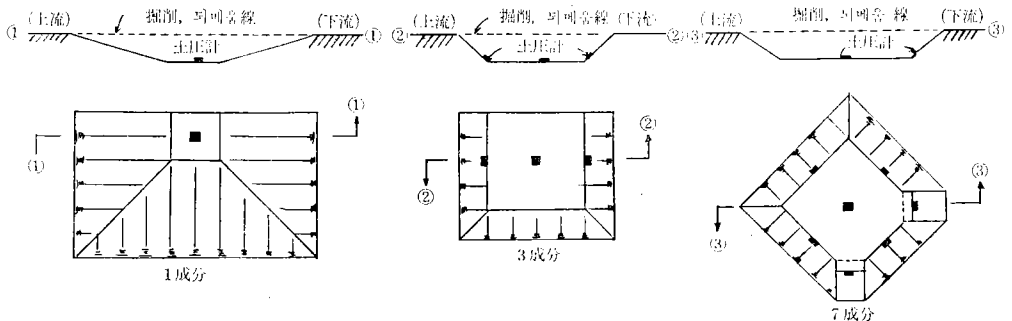


그림. 1. 土壓計의 配置

2. 土壓計의 埋設

土壓計를 埋設할때는 다음과 같은 檢査를 하고 埋設하여야 한다.

가. 土壓計의 檢査

土壓計는 한번 埋設하면 掘削하여 꺼내기가 不可能한 경우가 많으며 土壓計를 運搬도중에 衝擊, 其他의 原因으로 故障은 일으키는 경우가 있으므로 土

壓計의 埋設前에 檢査를 하여 좋은 測定結果를 얻도록 해야 한다. 즉 土壓計埋設前에는 土壓計를 測定器에 接續시키고 壓力을 받는 面을 손으로 눌러서 正常으로 作動하는가를 檢査하고 물속에 넣어 深度마다 바늘의 움직임이 빠른가를 檢査하며 電氣式일 때는 電線이 損傷되어 있는가도 調查한다. 또한 土壓計의 零點을 檢査하여 이를 調整하고 調整할 수 없을 때는 이를 記錄해 두어야 한다.

一般으로 土壓計는 直射光線은 받으면 局部的으로 熱變化가 생겨서 零點이 移動하는 경우가 많으

* 正友엔지니어링株式會社

** 慶尙大學校 農科大學

*** 農業振興公社 農業土木試驗研究所

므로 零點移動을 調査할때는 長時間 그늘진 室內에서 해야하며 이러한 零點移動은 地中에 埋設하면 없 어지므로 이때는 零點을 調整하지 않아도 좋다. 土 壓計의 埋設後에는 埋設한 土壓計위를 로올러로 다 짐할 때 그 土壓計容量을 超過하는 壓力이 作用하 던 故障이 나는 경우가 많으므로 土壓計위의 盛土가 1m程度가 되면 土壓을 測定하여 異常이 없는가 調 査하고 異常이 있으면 꺼내서 다시 檢定해야 한다.

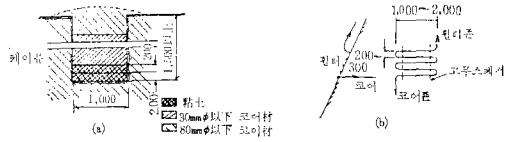


그림. 3. 케이블의 埋設例

埋設方法은 一般의으로 그림. 3의(a)와 같이 深度 0.5m~1.5m, 幅 0.5m~1.0m의 트렌치를 파고 케 이블이 서로 重疊되지 않도록 配列한후 파낸 盛土材 料를 그대로 되메운다. 最初 1層은 잘게 부순 것 을 20cm程度갈고 手動式뎀퍼로 다지며 그후는 層 두 개를 20cm~30cm로 하여 순서있게 다진다. 이때 壓 密沈下가 현저히 다른 材料를 橫斷할때는 그림. 3의 (b)와 같은 窠손을 設置한다.

나. 土壓計의 埋設

土壓解析을 위하여 1成分, 3成分, 必要에 따라 水 平方向을 包含한 7成分 土壓計를 埋設하는 경우가 많으며 여기서는 가장 많이 利用되는 3成分土壓計 埋設方法에 대하여 記述하기로 한다. 土壓計의 埋設 은 埋設計劃標高보다 약 1.5m경도 높게 盛土되었을 때 埋設地點中心에 底面 1.5m×1.5m, 深度 1.5m, 斜面傾斜는 埋設角度(보통 45°, 60°)에 따라 파고 土壓計設置面을 램머로 잘 다져서 그림. 2와 같이 整形한후 土壓計 3個를 손으로 設置面에 잘 壓着시 켜 設置한다.

이때 設置位置 및 標高를 바르게 해야하며, 되메 음은 약 30cm程度의 層으로 될수 있는한 周圍地盤 과 같은 密度가 되도록 다짐한다. 다질때 注意할 것 은 土壓計에 큰 衝擊을 주지 말아야 한다.

되메움이 不完全할때는 掘削部에 集中應力이나 아 이치(Arching)現象이 생겨 土壓을 正確히 測定할 수 없을때가 있으므로 되메움할때 注意를 해야한다. 또한 되메움材料의 粒徑은 土壓을 받는 板直徑의 2%以下로 해야 한다. 土壓을 받는 板의 直徑은 細 粒土일때 最小 15m, 粗粒土일때는 그 以上の 것이 利用되고 있다.

또한 케이블은 盛土材料의 沈下나 施工 機械等에 의하여 斷線되는 경우가 많으므로 이에 견딜 수 있 는 케이블을 埋設해야 한다.

다. 土壓計의 容量 및 精密度

一般의으로 土壓計는 그의 最大容量을 超過하는 壓力이 作用하면 機能이 變化하므로 最大容量을 決 定할때는 豫想되는 土壓의 2倍程度로 容量을 決定해 야 한다. 또한 그의 精密度는 電氣式이 一般의으로 그 最大容量의 1~2%程度이므로 精密度를 좋게 하 려면 最大容量을 적은 것으로 해야 하는 矛盾이 있 다.

라. 土壓計의 埋設位置

土壓計의 埋設位置는 土壓測定目的에 따라 다르나 一般의으로 土壓分布의 變化가 많은곳은 稠密하게 적은곳은 드물게 埋設하며, 윗덤과 같은 畝構造物에 土壓計를 埋設할때는 設計時에 假定한 臨界滑動面 附近에 2次元土壓計를 數個以上 設置하는 경우가 많다.

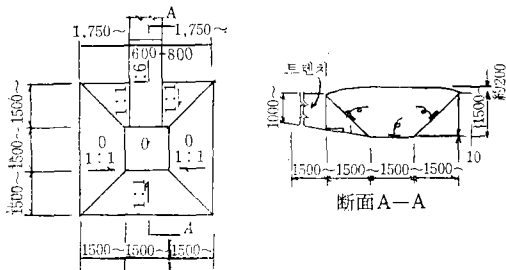


그림. 2. 3成分土壓計 埋設例

3. 土壓의 測定

土壓을 測定할때는 土壓測定值外에 測定者, 測定 時, 施工狀況, 日氣, 雨量, 水位, 氣溫, 交通量, 構造物의 變形, 周圍地盤의 沈下等을 詳細히 記錄해 야 하며, 結果를 整理할때는 土質柱狀圖, 土質試驗 結果, 水壓, 變形測定結果等을 把握하여 土壓測定 結果를 考察해야 한다.

測定間隔은 施工中일때 埋設後 첫 1週間은 每日1回

1週~4週는 3日에 1回, 1個月~4個月은 每週 1回, 4個月에서 完工까지는 10日에 1回測定하는 것이 보통이며 埋完工後는 一般的으로 湛水前 3日間은 每日 그후 水位가 2~3m變動時마다 測定하며 滿水後는 每月 1~2回測定한다. 測定時는 每回에 2번以上 連續測定하여 各測定值를 比較하여 測定值의 信賴性을 確認하고 測定值의 差異가 많을때는 그 原因을 檢討한다. 一般的으로 埋의 舉動은 急擊하지 않으므로 그 原因은 接觸抵抗의 增加, 電氣的인 것은 絶緣不良이 많다. 또한 豫備用測定器를 確保하여 測定器故障時 測定에 支障이 없도록 해야 한다.

4. 土 壓 的 測 定 原 理 와 主 應 力

2次元土壓計의 測定原理와 主應力計算에 대하여 記述하면 다음과 같다.

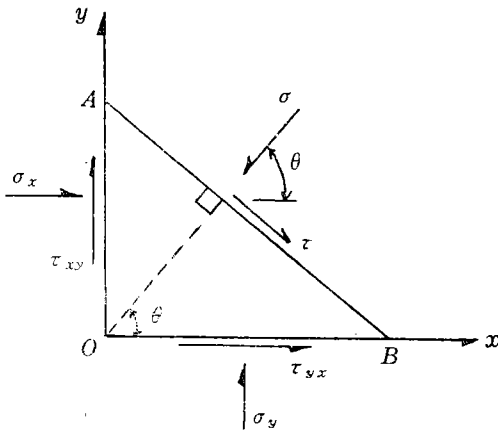


그림. 4. 平面應力狀態

平面應力狀態에서 三角形(AOB)에 作用하는 힘은 그림. 4와 같다. 이때 斜面AB에 垂直方向으로 作用하는 應力(σ)과 이에 平行으로 作用하는 剪斷應力(τ)을 힘의 平衡條件으로 다음과 같이 구한다.

$$\sum F_x = 0 : \sigma \cos\theta - \tau \sin\theta - \sigma_x \cos\theta - \tau_{xy} \sin\theta = 0 \dots (1)$$

$$\sum F_y = 0 : \sigma \sin\theta + \tau \cos\theta - \sigma_y \sin\theta - \tau_{xy} \cos\theta = 0 \dots (2)$$

(1), (2)式을 聯立方程式으로 풀면 斜面 AB에 作用하는 垂直應力(σ)과 이에 平行으로 作用하는 剪斷應力(τ)은 (3), (4)式과 같다. 여기서 서로 垂直인 面에 生기는 剪斷應力은 微小部分의 安定條件으로 모멘트가 平衡을 이루어야 하므로 $\tau_{xy} = \tau_{yx}$ 이다.

$$\sigma = \sigma_x \cos^2\theta + \sigma_y \sin^2\theta + 2\tau_{xy} \sin\theta \cos\theta \dots (3)$$

$$\tau = (\sigma_y - \sigma_x) \sin\theta \cos\theta + \tau_{xy} (\cos^2\theta - \sin^2\theta) \dots (4)$$

三角函數 :

$$\sin^2\theta = \frac{1 - \cos 2\theta}{2}, \quad \cos^2\theta = \frac{1 + \cos 2\theta}{2}, \quad 2\sin\theta \cos\theta = \sin 2\theta$$

= sin 2θ를 利用하여 (3), (4)式을 整理하면

$$\sigma = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta \dots (5)$$

$$\tau = \frac{\sigma_y - \sigma_x}{2} \sin 2\theta + \tau_{xy} \cos 2\theta \dots (6)$$

(5)式에서 $\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}$ 項을 왼쪽으로 移項하고 (6)式과 함께 兩邊을 自乘하면,

$$\left(\sigma - \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}\right)^2 = \left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta\right)^2 \dots (7)$$

$$\tau^2 = \left(\frac{\sigma_y - \sigma_x}{2} \sin 2\theta + \tau_{xy} \cos 2\theta\right)^2 \dots (8)$$

또한 (7), (8)式의 兩邊을 각각 더하면

$$\left(\sigma - \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau^2 = \left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2 \dots (9)$$

여기서 最大, 最小主應力은 剪斷應力이 零일때 생기므로 (6)式에서 $\tau = 0$ 로 하면

$$\tan 2\theta = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y} \dots (10)$$

(10)式에서 2θ는 두개의 값 즉 $2\theta_0$ 와 $2\theta_0 + \pi$ 의 값을 만족시킨다. 이값의 하나는 垂直應力의 最大値($\sigma_1 = \sigma_{max}$)이고 다른 하나는 最小値($\sigma_3 = \sigma_{min}$)가 된다. 이 σ_1 과 σ_3 는 (9)式에서 $\tau = 0$ 로 하고 풀면 다음式과 같이 구할 수 있다.

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2} \dots (11)$$

$$\sigma_3 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2} \dots (12)$$

한편 土壓計는 垂直應力만을 測定하는 構造로 되어 있으므로 測定되는 土壓은 (3)式에서 σ 值가 된다.

또한 혹속의 應力狀態는 2次元일때 $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ 의 3或分으로 나타낼 수 있다. 이들의 값은 垂直應力(σ)을 測定하는 面의 垂直方向餘弦은 既知이므로 方向餘弦이 다른 3個以上의 面에 대한 垂直應力을 測定하면 (3)式에 의하여 구할 수 있다. 2次元土壓計는 그림. 5(a)와 같이 正三角形이 理想的이나 그림. 5(b)와 같이 直角二等邊三角形이 많이 利用되고 있다. 表-1은 그림. 6과 같은 2次元土壓計일때 各面의 方向餘弦이다. 먼저 그림. 5(a)와 같이 土壓計를 埋設($\alpha = 60^\circ$)했을때 測定한 土壓(σ)과 既知의 方向餘弦을 (3)式에 代入하여 未知의 應力成分 $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ 를 구하면 다음과 같다.

$$\sigma_a = \cos^2\theta \sigma_x + \sin^2\theta \sigma_y + 2\cos\theta \sin\theta \tau_{xy} = \frac{3}{4} \sigma_x + \frac{1}{4} \sigma_y - \frac{\sqrt{3}}{2} \tau_{xy} \dots (13)$$

$$\sigma_b = \sigma_y \dots (14)$$

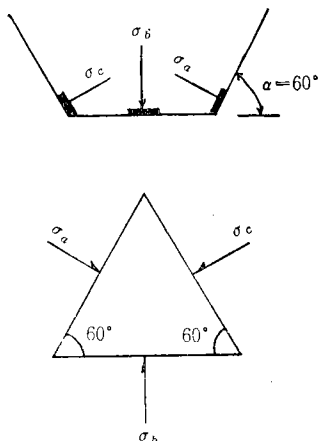


그림. 5(a). 土壓計의 配置와 測定值의 名稱

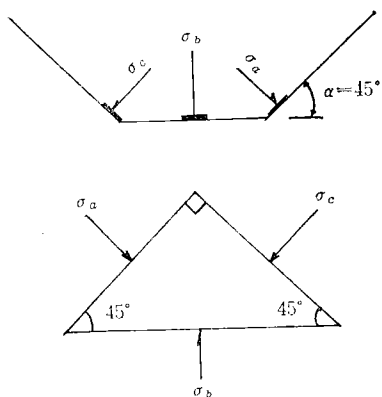


그림. 5(b). 土壓計의 配置와 測定值의 名稱

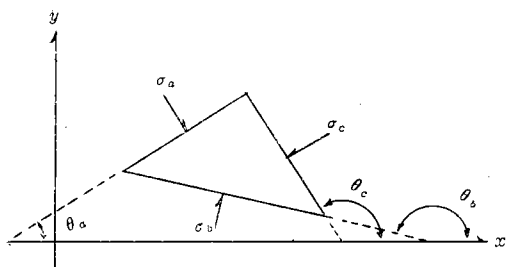


그림. 6. 2次元土壓計의 各面과 測定值名稱

$$\sigma_c = \frac{3}{4}\sigma_x + \frac{1}{4}\sigma_y + \frac{\sqrt{3}}{2}\tau_{xy} \dots\dots\dots (15)$$

上記의 (13), (14), (15)式을 聯立方程式으로 풀어 3個의 未知數 $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ 를 구하면,

$$\sigma_x = \frac{2}{3}\sigma_a - \frac{1}{3}\sigma_b + \frac{2}{3}\sigma_c$$

表-1. 方向餘弦

埋設角度 方向餘弦 土 壓	$\alpha=45^\circ$		$\alpha=60^\circ$	
	$\cos\theta$	$\sin\theta$	$\cos\theta$	$\sin\theta$
σ_a	-0.707	0.707	$-\frac{\sqrt{3}}{2}$	$\frac{1}{2}$
σ_b	0	1	0	1
σ_c	0.707	0.707	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	$\frac{1}{2}$

$$\sigma_y = \sigma_b$$

$$\tau_{xy} = \frac{\sigma_c - \sigma_a}{\sqrt{3}}$$

위와 같은 方法으로 그림. 5(b)와 같이 $\theta=45^\circ$ 로 土壓計를 埋設했을때 未知의 應力成分 $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ 를 구하면

$$\sigma_x = \sigma_a - \sigma_b + \sigma_c$$

$$\sigma_y = \sigma_b$$

$$\tau_{xy} = \frac{\sigma_c - \sigma_a}{2}$$

따라서 未知의 應力成分 $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ 를 (11)式과 (12)式에 代入하여 最大主應力(σ_1)과 最小主應力(σ_2)을 구하여 그림. 7와 같이 물원을 그려서 設計値와 比較檢討한다.

5. 測定值의 補正

土壓計의 受壓面에 作用하는 垂直應力은 受壓面 附近에 생기는 아아치作用이나 흙과 土壓計의 剛性差에 의하여 應力이 集中하여 實際의 土中垂直應力과 若干 다르게 된다. 흙의 아아치作用에 의한 測定誤差는 受壓面의 有效徑에 대한 受壓面의 相對變位를 적게해서 없앨 수 있는데 最近의 土壓計는 이를 無視할 수 있는 程度까지 相對變位를 적게하고 있으므로 아아치作用에 의한 測定值의 補正은 하지 않아도 된다.

흙과 土壓計의 剛性差에 의한 應力集中은 土壓計

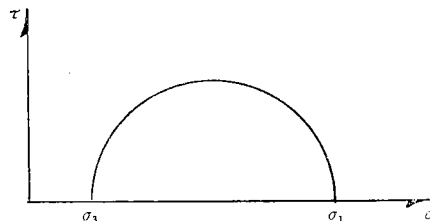


그림. 7. 主應力圖

土 壓 的 測 定 과 分 析

의 形, 흙의 種類, 埋設時의 흙의 다짐狀態에 따라 相當히 큰것으로 豫想되므로 測定値는 應力集中에 의한 誤差가 包含되어 있다고 보아야 한다. 피스톤式土中土壓計에 대한 應力集中에 관한 測定誤差를 치토빗치(Tsitovich)는 다음식을 提案하였다.

$$\frac{P - P_0}{P_0} = \frac{P_g}{P_0} = \frac{\frac{B}{D} \cdot \frac{E_g}{E_s} - 1}{\frac{\pi(1-\nu_s^2)}{4} \cdot \frac{B}{H} \cdot \frac{E_g}{E_s} + 1}$$

여기서

P : 土壓計測定值(kg/cm²)

P_0 : 補正土中壓力(kg/cm²)

P_g : 應力集中에 의한 測定誤差(kg/cm²)

B : 土壓計受壓面의 有效徑(cm)

D : 土壓計의 外徑(cm)

H : 土壓計두께(cm)

E_g : 土壓計의 變形係數(kg/cm²)

E_s : 土壓計周邊흙의 變形係數(kg/cm²)

ν_s : 土壓計周邊흙의 포아손비(Poisson's Ratio)

6. 資料整理 및 土壓의 分析

土壓測定結果는 施工狀況 및 設計値와 比較하여 댐의 安定性을 檢討해야 하므로 土壓計台帳, 土壓計配置圖, 埋設施工圖施工日誌, 測定記錄, 氣象日誌, 埋設施工狀況記錄日誌等의 資料를 整理해 두어야 한다. 測定土壓을 分析할때는 縱軸에 土壓, 橫軸에 測定年月日을 取한 그래프에 測定土壓을 프롯트하여 土壓의 分布狀況이나 댐의 舉動狀況을 把握하는 한편 測定値가 計器, 케이בל등의 絶緣 및 接觸不良에 의한 誤讀이 아닌지 判定할 수 있도록 해야 한다.

또한 主應力計算結果를 設計値와 比較할 때 그림. 8의 경우는 土壓實測値가 設計値보다 剪斷強度가 적어 댐은 安定性이 있고 盛土를 함에 따라 垂直應力이 커짐을 알 수 있으며, 設計値가 實測値와 一致하지 않는 것은 設計時에 安全率을 두고 設計를 하며 施工時에는 管理値以上の 값이 얻어지도록 施工管理를 하고 또한 施工中의 壓密에 의해 強度가 增加되기 때문이다.

그림. 9의 경우는 堤體의 不等沈下로 그 部分의 拘束壓이 低下된 경우로서 浸透壓이 作用하면 空隙水壓이 增加해서 剪斷強度가 低下되어 滑動破壞를 일으킬 위험성이 많으므로 댐安全管理에 注意를 해야 한다.

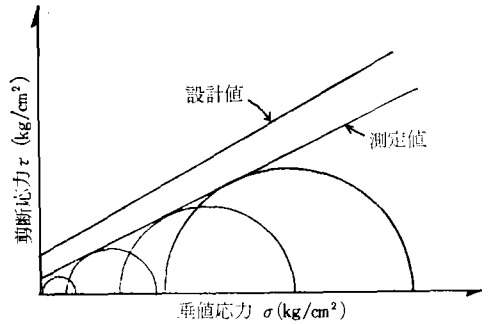


그림. 8. 土壓測定値에 의한 몰圖

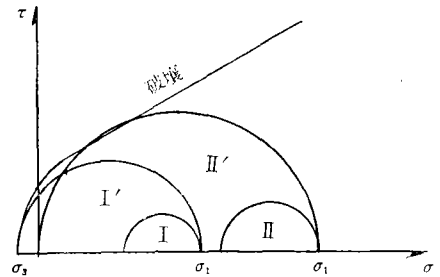


그림. 9. 不等沈下에 의한 σ₂減少로 생기는 破壞

以上으로 記述한바를 綜合해보면 土壓測定値의 精密度가 問題로 된다. 고로 土壓計의 埋設, 測定 및 管理를 잘해야 올바른 分析을 할 수 있다고 보며, 可及的 同一人이 關心을 가지고 土壓計埋設에서부터 分析까지 參與를 해야 좋은 結果値를 얻을 수 있다고 본다.

參 考 文 獻

1. 農業振興公社 : 蔡山江4個댐 埋設計器分析資料集 (1978)
2. Alfreds R. Jumikis: Theoretical Soil Mechanics, Van Nostrand Reinhold Company(1968).
3. 山口柏樹, 大根義男 : フィルダムの設計および施工, 技報堂
4. 市原松平 桑山 忠 : 多面土壓計によるフィルダムの管理について, 土と基礎, 22卷, 11號(1974)
5. 岡田 昇, 大山英治 : 山村ダムの計器計測結果と安定解析, 土と基礎, 23卷, 3號(1975)
6. 日本土質工學會編 : 土質調査法(1980).
7. 日本土質工學會編 : 土質調査實習書(1981)
8. 日本土質工學會編 : 建設工事と地下水(1980)