

半月地域 海成土의 沈降特性에 關한 實驗的 研究

An Experimental Study on the Settling Behavior of Marine Fluid
Mud in the West Seaside of Korea (Banweol area)

金 修 三*
Kim, Soo-Sam

Abstract

The settling behavior of marine fluid mud in the west seaside of Korea has been studied with theoretical analysis and experimental technique.

This paper describes laboratorial experiments on the sedimentation and the deposition of soil particles in seawater, with measurement of velocity of interface, the water contents, the settlement. And the results are compared with an earlier theoretical research, the hindered settling theory of Kynch, McRoberts and Nixon.

According to the results the process of Banweol mud sedimentation showed the typical mode of the hindered settling under the condition of initial water content, $w_0 \approx 1000\%$.

Also, the falling rates of fluid mud interface from initial settling height vs. the rising rates of soil deposit from the bottom of the test tub were measured by the function of time, the relationship of them demonstrated as a straight line and obtained an experimental formula.

要 旨

우리나라 서해안 半月地域에 散在한 海成土의 沈降特性에 대한實驗的 연구를 실시하였다.

浚渫土와 같이 土粒子를 多量으로 함유하고 있는 흙의 沈降은 自由沈降理論 만으로 설명할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 Kynch, McRoberts and Nixon의 干涉沈降理論을 도입하여 半月海成土의 沈降特性을 실험을 통하여 파악하였다.

그 결과에 의하면 初期含水比 1000%에서 干涉沈降發生함을 알았다. 또한 沈降界面의 下降과 墨積高의 關係를 時間의 함수로 實驗에 의해 그 關係를 확인하였다.

1. 序 論

最近人口의 增加와 經濟成長이 促進됨에 따라 利用可能한 土地에 대한 需要가 점점 增大되어 새로운 團地造成을 위하여는 海面埋立方法이 有

用하게 選擇되어지고 있다.

바다의 公有水面을 埋立하기 위하여는 埋立地 隣近의 흙을 盛土用으로 使用하여 團地造成하는 方法과 浚渫船等을 利用하여 바다밑 海床에서 흙을 浚渫하여 團地를 만드는 方法等이 있다.

특히 浚渫土를 利用하여 團地를 造成함에 있어

* 正會員, 中央大學校 工科大學 土木工學科 教授

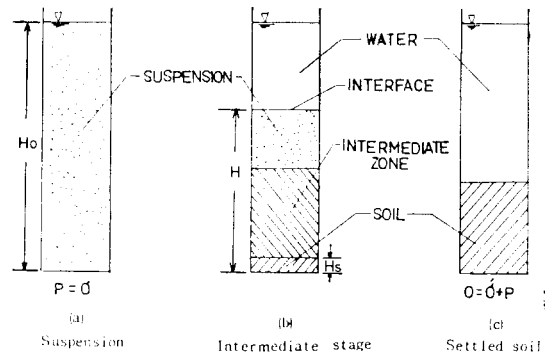
서는 매우 큰 습水比를 갖는 흙의 特性을 理解해야 한다. 浚渫에 의해 投棄된 흙은 水中에서 沈降과 壓密過程을 통하여 安定을 찾게 된다. 흙의 沈降은 흔히 Stokes의 單粒子의 自由沈降概念을 導入하여 解析하고 있으나 많은 研究에 의하면 흙과 같이 임의의 粒子가 多數沈降하는 경우에 沈降形態는 自由沈降뿐만 아니라 干涉沈降 壓縮沈降等이 나타난다고 紹介하고 있다⁷⁾⁸⁾¹²⁾

各種沈降形態에 대한 研究는 Stokes의 單粒子 自由沈降 理論 以來로 化學工學分野를 中心으로 研究가 進行되어 왔으며 이를 應用한 研究가 흙을 대상으로 많지 않은 연구가 수행되어 오고 있다. 흙이 수중에 버려지면 土粒子는 沈降과 壓密과정을 반복하여 거치게되며 따라서 沈降過程의 理解와 그 이후에 발생하는 自重壓密의 進行을 파악하고 이를 통한 흙의 舉動을 理解함이 매우 중요하다. 다시말하면 浚渫土가 投棄되었을때 安定에 要하는 時間이나 投棄해야 할 總土量을 豫測하는 問題와 各種 基礎設計를 위한 土質工學的인 資料를 提供받을 수 있어야 하는 것이다. 그러나 既存研究에 의하면 浚渫特性은 매우 복잡하여 이를 一目瞭然하게 파악하기가 매우 어렵고 따라서 自重壓密에 대한 理解가 상당히 難解한 상태이고 이들에 대한 研究가 推進되어야 浚渫土의 全般的인 特性을 究明하게 될 것이다.

實際로 沈降이 完了되었을 때부터는 大變形(Large strain)을 수반하는 壓密과정으로 나타나며 이러한 現象은 Terzaghi의 壓密理論만으로는 그 假定條件때문에 正確하게 解析되지 못한다고 알려져왔다.¹⁾⁵⁾¹¹⁾ 本研究에서는 앞으로 海岸埋立이 盛行할 것으로 예상되는 西海岸泥土의 沈降特性을 究明하기 위한 1次的인 努力으로써 半月地域海成土의 沈降 樣式을 室內實驗을 통하여 分析하고자하며 海成土가 갖는 初期 습水比에 따른 沈降特性의 變化, 自重壓密의 發生 領域 및 沈降과 堆積의 相互關係等을 究明하고자 한다.

2. 沈降理論

一般的으로 水中에 土粒子가 넓은 간격으로



SUSPENSION INTERMEDIATE STAGE SETTLED SOIL
그림 1. Stages of settling of fluid mud.

섞여있고 土粒子가 浮力を 받아 浮遊하는 狀態의 液體를 懸濁液(Suspension)이라하고 이때의 有效應力은 零인 상태가 된다. 靜止된 水中에 球形의 土粒子가 그 直徑보다 매우 큰 간격으로서 떨어져있는 狀態에서 自由沈降하는 경우에는 Stokes의 沈降法則에 의해 이를 解析할 수 있으나 浚渫土等과 같은 土木工事에서 實際 當面하는 懸濁液속의 土粒子의 沈降은 單粒子의 沈降形態보다는 土粒子들이 相互連繫되어 있어 floc 나 aggregate를 形成하고 이들이 Skeleton network을 構成하여 相互衝突하면서 沈降하게 된다. 液狀의 海成土를 容器에 投入하면 初期에는 懸濁液을 유지하고 약간의 時間이 경과하면 floc를 形成하고 floc들은 물과 分離되면서 한데 얽혀 沈降을 開始한다. 沈降이 開始되는 때부터는 懸濁液은 上部의 물과 密度가 더욱 커진 下部의 懸濁液間에 確實히 區分되는 境界面이 形成되고 이 境界面은 時間이 經過하면서 沈降하고 이와 거의 같은 時間에 下端바닥에서는 堆積이 發生된다. 그러나 이와같은 境界面의 沈降

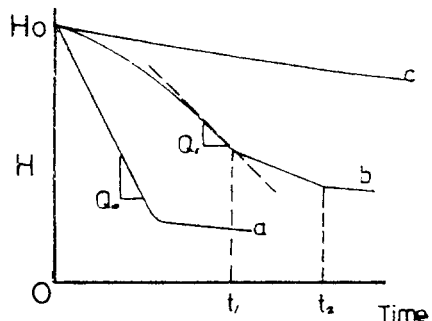


그림 2. Three general types of settling plots

速度는 flocc 나 aggregate 들의 相互衝突과 干涉 때문에 그 沈降速度가 相異하다. 이와같은 沈降樣式을 “干涉沈降(Hindered Settling)”이라 부르며¹²⁾ 干涉沈降에 影響을 미치는 要素로는 粒子의 크기, 鑛物性, 初期含水量(密度), 排水條件, pH, 添加物等이 指摘되고 있으며 懸濁液에서 堆積에 이르는 過程은 그림 1에 나타낸 바와 같으며 境界面의 沈降特性을 時間의 變化에 따라 나타내면 그림 2와 같다.

一般的으로 含水量이 적으면 C-曲線과 같은 沈降形態를 나타내고 含水量이 크면 A-曲線과 같은 曲線을 形成한다

2.1. 沈降과 壓密의 關聯性

海成土가 攪亂되어 懸濁液狀態로부터 平衡狀態로 變해가면서 沈降이 進行되고 同時에 下部에는 堆積이 進行된다. 堆積된 層은 時間이 경과함에 따라 점점 두꺼워지고 이로인하여 堆積層間에도 應力의 變化가 發生한다. 지금 懸濁液狀態의 液狀海成土의 初期間隙比를 e_0 라하면 이 때 懸濁液(또는 浚渫土等)의 有效應力 σ' 는 零이다. 점점 시간이 경과하면서 堆積이 進行되고 液狀粘土 各部分의 間隙比 e 는 堆積物의 各部分의 σ' 의 變化와 對應하여 變化된다. $e-\sigma'$ 曲線은 壓密理論에서 利用하고 있으며 이를 대표적으로 나타내면 그림 3과 같다.

그림에 나타낸바와 같이 曲線 A에서 $e_0 \rightarrow e_0^*$ 되는 과정은 沈降이고 e_0^* 以下에서는 自重壓密의 進行을 나타낸다. Been and Sills (1981)는

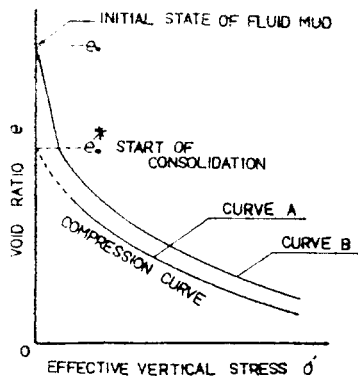


그림 3. Typical types of initial void ratio change and compression curve on fluid mud

$e_0 \rightarrow e_0^*$ 로 간주할 수 있는 領域에서도 微小한 有效應力이 나타남을 실험으로 확인하였으며 이를 나타낸것이 曲線 B이다. A와 B 曲線은 自重壓密의 開始點을 찾는데 논의의 여지를 남기고 있으나 e_0^* 때 나타나는 σ' 의 값이 매우 적으므로 e_0^* 때를 自重壓密의 開始點으로 간주하고 있다.⁶⁾⁷⁾⁸⁾²⁷⁾

2.2. 沈降에 關한 研究

1851年 Stokes에 의해 沈降速度에 關한 式이 제안된 이후 흙의 沈降에 關한 工學의 諸問題는 自由沈降理論에 의해 說明되어 왔다. 그러나 自由沈降理論은 化學工學과 같은 微細粒子의 沈澱現象이 重要하게 취급되는 분야에서는 문제가 제기되었고 따라서 修正된 理論이 發表되어 왔다. 이들의 연구는 그후 土質工學分野에서 흙의 沈降問題를 究明하는데 도움을 주게되나 흙이 갖는 복잡성 때문에 아직도 알맞는 理論을 定立하지 못하고 있는 실정이다. 自由沈降理論에 修正을 加한 干涉沈降理論이 Kynch에 의해 소개되었고¹⁰⁾ McRoberts and Nixon에 의해¹²⁾ 흙에 실질적으로 利用될 수 있도록 理論의인 體係가 세워졌으나 아직도 많은 문제를 내포하고 있으며 이들의 연구가 계속되고 있는 실정이다. 沈降에 關한 既存의 研究를 요약하면, Work and Kohler (1940)가 Slurry 境界面의 下降速度에 關한 式을 實驗에 의해 제시하였고²⁶⁾ Richardson and Zaki(1954)는 粒子群의 沈降速度에 關한 式을 Stokes의 式을 利用하여 發表하였다,¹⁸⁾ 또한 Michaels and Bolger(1962)는 Richardson and Zaki의 式을 Flocculated Kaolin Suspension에 대해 적용할 수 있는지를 究明하였다.¹³⁾ 그리고 最初의 干涉沈降理論은 Kynch(1952)에 의해 研究되었는데¹⁰⁾¹²⁾ 그에 의하면 懸濁液面(Interface)의 沈降速度는 境界面에서의 局部的인 濃度만의 함수로서 定할 수 있으며 沈降過程은 固體狀態(Solid phase)와 液體狀態(Liquid phase)의 連續方程式에 의해 결정할 수 있음을 발표하였다.

Mikasa(1963)는 埋立地에 堆積된 粘土의 自重壓密을 說明하기 위하여 Terzaghi의 壓密理論에 變形度 概念을 導入하고 境界面의 沈降速度를 透水係數와 單位重量의 함수로 나타냈다. Mc-

驗에 의해 이를 確認하였다. 이에 의하면 初期沈降始高(H_0)가 높고 鹽分濃도가 낮으면 分散性自由沈降(Dispersed free settling)에 가깝고 同一한 H_0 에 대해 鹽分濃度(Salt concentration : g/m^3)가 높아지면 凝集性自由沈降(Flocculated free settling)樣式을 나타낸다고 說明하고 있으며 鹽分濃도가 $3.3g/m^3$ 이후에서 沈降樣式은 干涉沈降(Hindered settlement)과 自重壓密을 가져오는 壓密沈降(Consolidation settling stage) 現象이 나타남을 實驗에 의해 확인하고 있다.

또한 人工的으로 堆積시킨 粘性土에 대해 鹽分을 漸進的으로 脫鹽(Leaching)시킴에 따른 粘性土의 特性의 變化에 관한 研究結果가 Bjerrum (1956)등에 의해 報告되었는데 그에 의하면 鹽分을 갖는 粘土(Salt clay)보다 脫鹽粘土의 含水比가 약간 낮게되고 液性限界는 鹽分濃도가 낮아짐에 따라 감소하고 또한 脫鹽粘土의 銳敏比는 增加하고 非排水剪斷強度는 減少한다고 보고하고 있다. 또 淡水(Fresh water)에서는 堆積(Sedimentation)중에 flocculation이 발생하지 않으며 이로인해 細粒土와 粗粒土가 分離된다고 說明하고 있다. 本 研究에서는 自然 海水를 사용하여 實驗을 실시하였으므로 沈降實驗을 통하여 肉眼으로 실제 나타나는 現象을 통하여 flocculation의 發生을 確認했으며 觀察에 의하면 高含水狀態와 低含水狀態에 있어 沈降初期의 floc 形成時間이 다르다.

含水比가 1,000% 이상인 경우에는 實驗開始 5分前後에서 界面狀態가 희미하게 判別되고 약 1시간이 지나면 鮮明히 境界를 확인할 수 있다 또 初期含水比가 400% 및 600% 경우에는 界面을 確認하는데 약 10分 정도면 가능하였다. 또한 界面形成初期에 있어 上澄液의 色度も 低含水狀態에서는 보다 밝은색을 띠었으나 高含水狀態에서는 옅은 褐色의 透明한 빛을 오랫동안 유지했다. 結果的으로 floc 形成時間은 初期含水比와 密接한 관계가 있으며, 이는 Mikasa가 說明한 懸濁液의 透水性에 관계된다고 보아진다 즉, 含水比가 낮으면 單位體積中에 粒子의 數가 많아지고 이로 인하여 粒子의 自由로운 移動을 爲한 領域이 좁아지므로 floc와 같은 任意의 構造를 構成하는데 時間이 所要된다고 思料된다.

界面이 形成된 직후부터는 時間에 따른 界面의 沈降을 確實히 觀測할 수 있었으며 이때부터 沈降容器 下端 바닥에는 土粒子가 堆積됨이 觀察되었다. 즉, 上部界面은 下降하고 下部堆積面이 上昇하는 것이다. 沈降이 계속되는 동안 土粒子和 물의 移動이 확인되었고 沈降現象은 容器의 口徑(D)이나 初期含水比, 初期沈降開始(H_0)위치에 따라 다르지만 一定時間이 지나면 下部 堆積層과 懸濁液層間의 境界가 不明해지기 시작한다. 이는 堆積層과 懸濁液의 密度가 거의 균일해지기 때문이라 判斷된다.

懸濁液이 沈降하는 동안은 무수히 많은 土粒子가 下向으로 沈降단을 進行하지 않고 土粒子는 下向으로 물은 上向으로 움직이면서 회전과 衝突을 반복하면서 界面전체가 서서히 下降함을 볼 수 있었으며 時間에 따른 沈降曲線을 半對數方眼紙에 표시하면, 이들은 壓密實驗에서의 $e-\log P$ 曲線과 매우 비슷한 모습을 보여준다. 24時間이 지난 후 堆積層을 관찰하여 보니 前日に 쌓였던 堆積層의 높이가 감소하는 경우가 많았다. 이는 自重壓密에 의한 壓縮의 진행때문이라 생각된다. 沈降實驗이 완료된 후(대개 24~30時間後)堆積層의 表面을 除去한 후 含水比를 測定해 보니 60% 前後의 分布를 보였다.

4.2. 初期沈降開始位置에 따른 影響

初期 沈降開始位置(H_0)를 變化시키면서 界面의 時間에 따른 높이 變化를 tube 직경 45, 75, 95, 143mm 각각에 대해 실험하였고 一例로서 95 mm tube에 대한 沈降曲線은 그림 5와 같다. Kynch나 Mikasa에 의하면 calcium carbonate를 使用하여 H_0 를 變更시키면서 沈降實驗을 行한 結果 沈降速度(v)가 時間의 經過에 關係없이 一定한 區間(Constant Rate Period : CRP)과 時間에 따라 沈降速度가 變化하는 區間(Falling Rate Period : FRP)이 存在하고 CRP 區間에서 同一한 密度를 갖는 경우에 沈降速度는 H_0 에 關係없이 一定하다고 하였다.

本 實驗에서 觀察한 바에 의하면 그림 6에 나타낸 H_0-V 의 關係에서 알 수 있는바와 같이 H_0 의 變化에 따른 V 가 거의 一定한 값을 보여 주고 있음을 알 수 있다. 沈降速度가 一定한 場

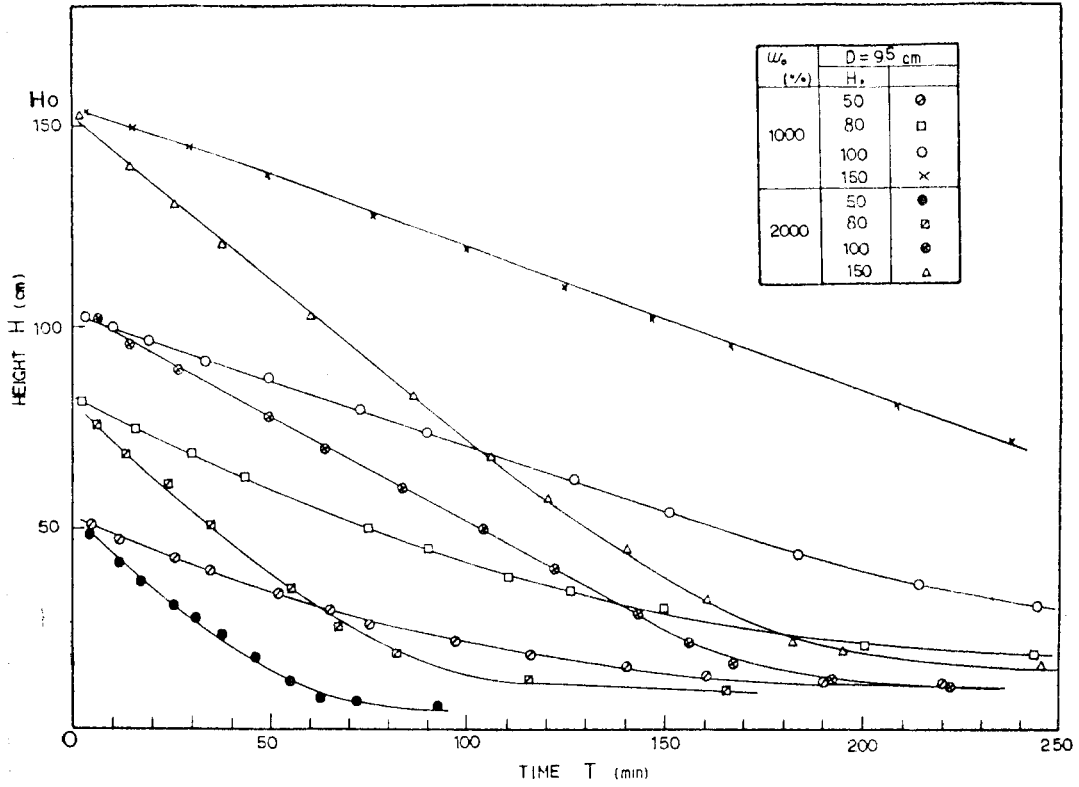


그림 5. Comparison of settling effect with difference of initial height (H_0)

위에서 H_0 의 변화에 따른 沈降形態의 基本的인 mode 를 그림 7 과 같이 나타낼 수 있다면 그림에서 다음과 같은 式을 豫想할 수 있다.

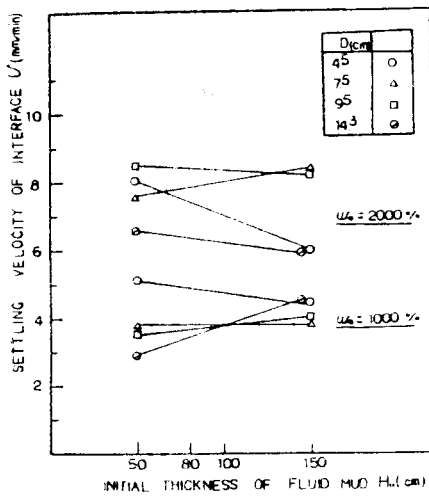


그림 6. Relationship of initial height of fluid mud and settling velocity of interface

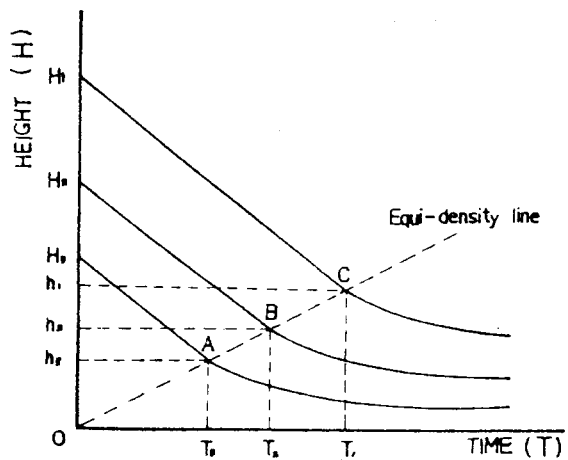


그림 7. The typical mode of settling curves with the varies Initial height of fluid mud

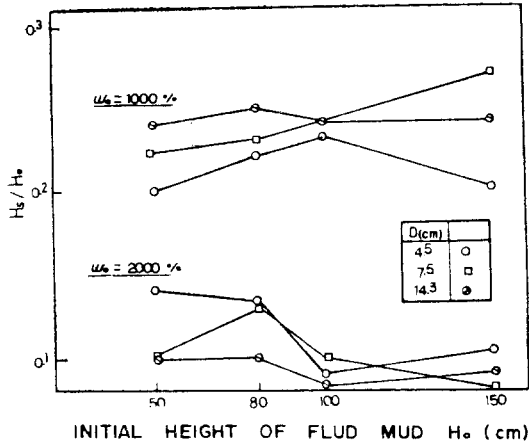


그림 8. Relationship of H_i/H_0 vs H_0

$$\frac{OC}{OA} = \frac{OT_1}{OT_3} = \frac{Oh_1}{Oh_3} = \frac{OH_1}{OH_3} \quad (4-1)$$

式(4-1)의 關係에서 同一한 初期 含水比를 갖는 液狀海成土의 界面의 沈降高를 豫測할 수 있다.

沈降이 進行됨에 따라 容器 下端에는 堆積層

이 成形됨을 볼 수 있었는데 이 堆積層이 初期 沈降開始高(H_0)에 따라 어떤 영향을 받는지를 究明하기 爲하여 堆積高(H_i : Virtual solid height)와 H_0 와의 關係를 그림 8에 나타냈다.

그림 8에 의하면 $w_0=2000\%$ 경우에 初期沈降開始高(H_0)가 높으면 높을수록 H_i/H_0 比가 減少하는 傾向을 나타내고 있다.

즉 同一한 含水比를 갖는 液狀粘土의 H_0 가 變함에 따라 H_i/H_0 의 比가 減少함은 堆積層의 密度는 H_0 가 클수록 크다는 뜻이고 이는 沈降 進行 時間이 길어짐에 따라 堆積層의 一部分이 自重壓密이 進行되기 때문이라고 思料된다.

4.3. 初期 含水比가 沈降에 미치는 影響

4.3.1. 初期 含水比에 따른 沈降現象

初期 含水比가 (初期 含泥率, 初期密度, 初期 濃度 等으로도 쓰이고 있음) 沈降現象에 미치는 影響에 대하여는 Work and Kohler(1940), Mc

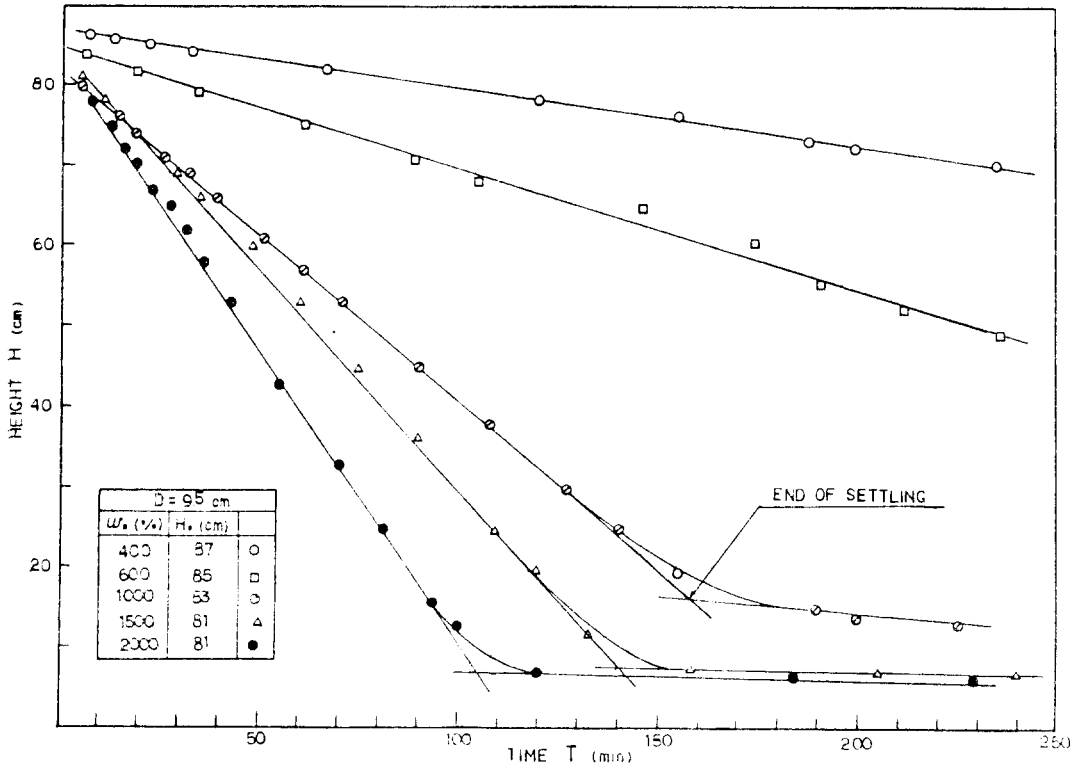


그림 9. comparison of settling effect with different initial water content (w_0)

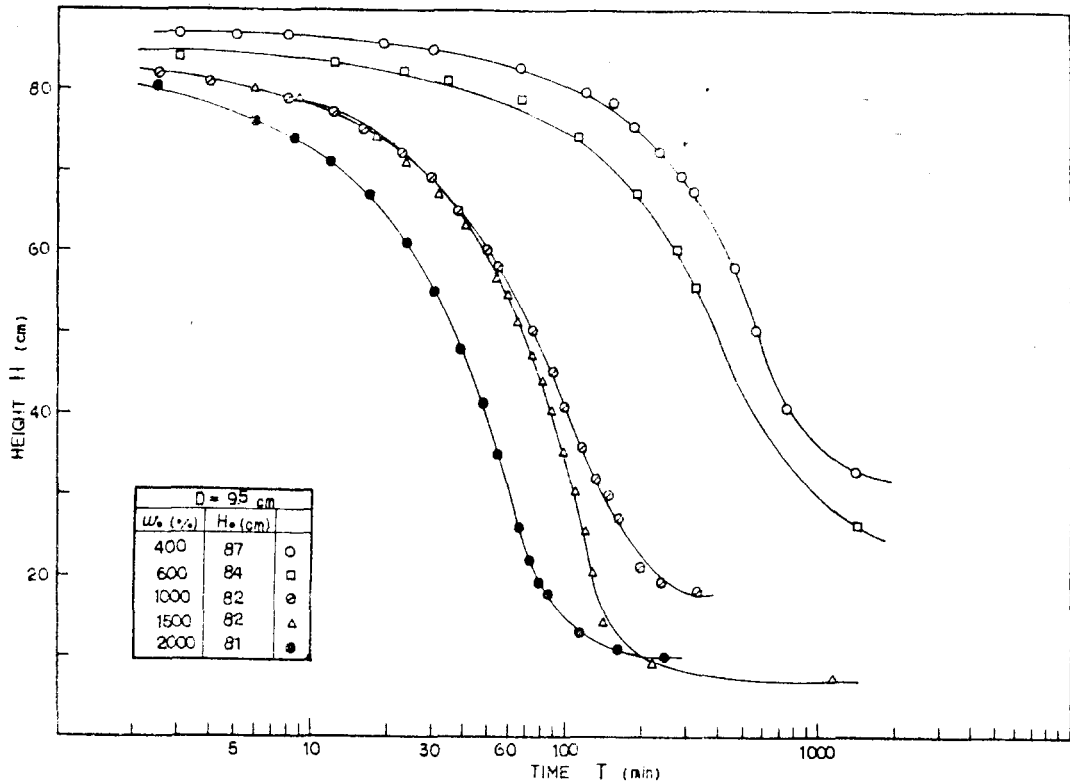


그림 10. Settling behavior with different initial water content ($D=9.5\text{cm}$)

Roberts and Nixon (1976), 鄭·柳(1979), Imai (1980, 1981), Been and Sills (1981) 등이 각각의 與件에 따라 研究를 進行시켜 왔다.

本 研究에서는 初期含水比를 400, 600, 1000, 1500, 2000%로 各各 變更시켜 가면서 H_0 가 80cm인 경우에 대해 沈降實驗을 행하고 그 結果를 그림 9에 용기직경이 95mm인 경우를 一例로서 自然눈금으로 나타냈고, 半對數 方眼紙에 같은 結果를 plot한 것이 그림 10에 정리되어 있다. 實驗結果에 의하면 w_0 가 400, 600%인 경우와 w_0 가 1,000, 1500, 2000%인 경우에 있어 沈降 形態가 判異하게 다르다. 즉 高含水比를 갖는 液上海成土의 沈降 形態는 干涉沈降과 壓密沈降이라고 생각되는 堆積의 境界가 分明히 區分지워지지만 低含水比를 갖는 경우에 있어서는 自然눈금에 時間에 따른 界面의 沈降을 나타내어서는 그 境界를 區分지울 수가 없다 그러므로 그 境界를 파악하기 위하여 半對數 方眼紙에 plot한 結果, 確實하지는 못하지만 그림

10이 보여주듯이 沈降速度가 急速히 下降하는 境界를 一部파악할 수 있었다

Mikasa (1963)는 沈降速度가 一定한 區間을 初期 沈降過程이라 規定짓고 있으며 그 이후를 狹義의 壓密過程이라 지칭하고 있다.

이때의 Mikasa의 見解는 自重壓密 開始 初期에 있어서는 時間에 따른 界面의 沈降이 直線을 나타내고 이때의 沈降速度는 오직 透水係數 K 와 粘土의 水中單位體積重量 γ' 에만 關聯된다고 說明하고 있다. 그러므로 半月地區 泥土를 使用하여 實施한 本 實驗에서는 w_0 가 400, 600% 경우는 沈降 初期에 自重壓密이 並行되는 形態로 생각할 수 있고 $w_0 \geq 1000\%$ 隣近에서는 干涉沈降에 이은 自重壓密이 進行되기 때문이라고 思料된다.

4.3.2. 初期 含水比(w_0)와 沈降速度(v)

本 實驗 結果에서 求한 界面의 時間에 따른 變化를 그림 11에 나타냈다. 그림에 나타난 바와 같이 w_0 가 增大됨에 따라 v 또한 增加하고 있

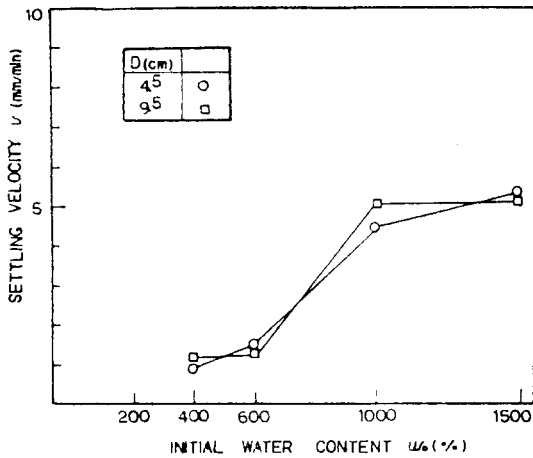


그림 11. Relationship initial water contents vs. settling velocity of interface

으며, 특히 w_0 가 600%에서 1000%로 변화되는 구간에서 특히 속도, v 의 변화가 급속히 이루어지고 있다. 즉含水比가 커짐에 따라界面沈降速度 v 의 증대는高含水比로 因하여 flocc-aggregate 結合 시간이 短縮되기 때문이라 생각된다. Imai (1980)는 w_0 의 변화에 따른 v 에 관한 實驗에서 Ohsaka mud를 사용했을 때 w_0 가 1000% 前後에서 v 가 갑자기 변화하는 性向을 調査하고 沈降의 形態를 $w_0 > 1000\%$ 인 區間에서는 界面(干涉)沈降이 發生하는 領域이고 $w_0 \leq 1000\%$ 의 區間에서는 壓密沈降(Consolidated settling)이 發生한다고 說明하고 있다.

本 實驗에 의한 半月 泥土의 경우 w_0 가 600%와 1000%間에서 v 의 變化가 急速히 이루어지고 있어 w_0 가 1000% 근처에서 干涉沈降이 發生한다고 思料된다.

4. 4. Flux Plots 에 의한 沈降形態

Kynch가 提案하고 McRoberts and Nixon이 發展시킨 Particle Flux Plots Curve에 의한 沈降 mode의 分析은 干涉沈降에 대한 理論的인 解析方法을 提示하고 있으나 複雜한 沈降現象을 濃度만의 函數로 生覺하고 있어 實際 適用上에는 많은 實驗과 現場 確認을 거친 複合的인 沈降分析이 要請된다 할 수 있다. 本論에서는 半月 泥土를 使用한 沈降實驗結果의 適應性을 究明

해 보고자 한다. McRoberts and Nixon (1976)에 의하면 初期濃度(C_0 : initial concentration, 또는 初期 含水比로도 表現可能함)을 파악하고 實驗에 의해 干涉沈降의 沈降速度가 주어지면 particle flux plots에 의해 沈降 mode를 定할 수 있다고 說明하고 있다. Particle flux plots에 의해 沈降時 界面의 沈降速度 v 를 求하기 爲하여는 Richardson and Zaki(1954)가 提案한 關係式(4-2), (4-3)을 만족해야 한다.

$$\frac{S}{S_m} = \frac{C}{C_m} \left[\frac{G_s/C_m - C/C_m}{G_s/C_m - 1} \right]^r \dots\dots(4-2)$$

$$V = V_0 n^r \dots\dots(4-3)$$

$$S = \rho \cdot V(\rho) \dots\dots(4-4)$$

여기서 S : particle flux(粒束)

C : 濃度

ρ : volume concentration

V : 沈降速度

r : 實驗常數

n : 間隙率

그리고 濃度 C 는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$C = G_s(1-n)r_w$$

本 實驗에서 Richardson and Zaki關係는 그림 12에 나타난 바와 같이 直線 關係를 보여주고 있다. 또한 半月泥土에 대한 particle flux를 plots 하면 그림 13와 같다. 液狀海成土의 初期濃度가 0에서 增加하기 시작하여 干涉沈降을 開始할 때의 濃도에 해당하는 粒束 S 가 定해진다 이때부터 $(S-C)$ 曲線을 實線으로 나타냈고 C_0

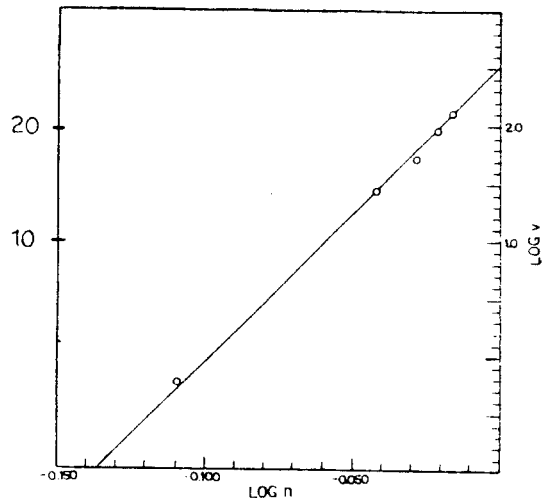


그림 12. Richardson and Zaki relationships

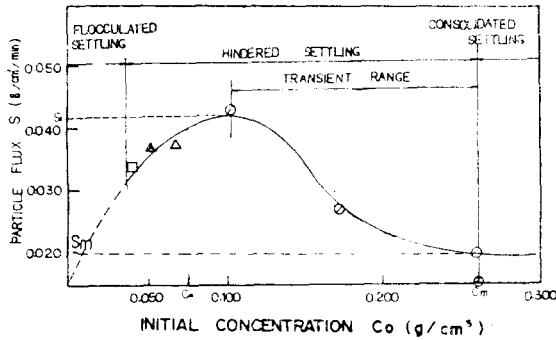


그림 13. Particle flux of Banweol mud

(初期濃度)의 증가에 따라 S 또한 커지다가 C_0 의 값이 계속 커짐에 따라 S 값은 最大値를 지나 점점 減少하는 傾向을 보인다.

그림 13에서 S 가 最大일때의 含水比는 1000%를 나타내는데, 이는 1000%前後의 初期 含水比(濃度)를 가질때 沈降 樣式이 變함을 뜻한다. 즉 干涉沈降이 發生하는 領域은 C_0 와 S 가 同時에 增加하는 區間이고 S 가 最大값에서 감소하면서 C_0 의 값이 커지는 區間은 沈降領域이 變하는 遷移領域으로 Imai가 提案한 壓密沈降(Consolidated settling)이 發生하는 區間으로 變遷하는 區間이다. C_0 가 壓密沈降區間에 해당하게 되면 이때부터 S 의 變化는 극히 微少하여 거의 一定한 狀態를 나타낸다.

이를 그림 13에 나타냈으며 S 가 一定해질 때의 濃度を C_m 이라 하고 $C_0=C_m, S=0$ 인 點에서 $S-C_0$ 曲線에 接線을 그린 결과에 따라 沈降 mode를 定할 수 있다.

4.5. 沈降終了와 自重壓密

沈降終了時點은 堆積土層의 높이와 自重壓密의 開始點을 推定하기 위하여 檢討할 必要가 있다. 初期沈降高(H_0)를 一定하게 하고 初期含水比(w_0)를 變化시켜 實驗한 結果를 그림 9에 나타냈다.

그림 9에 나타난 沈降曲線의 특징을 살펴보면 沈降開始點부터 任意의 時間이 經過하면 沈降曲線의 기울기가 急變함을 알 수 있다. 이 時點에서 floc나 aggregate 등의 沈降이 終了되었다고 생각되며, 沈降曲線의 特性을 利用하여 沈降의 完了時點을 推定할 수 있다. 卽 그림 9와

같이 曲線上·下部에 接線을 그리고 그 만나는 點을 구하면 이 點이 沈降의 終了(End of settling)되는 時點이 나타낸다고 思料된다. 그러나 圖上에서 求한 沈降 終了時點은 界面의 沈降(Zone settling)이 停止했다고 生覺되는 時點이고 沈降終點 以後에도 長時間에 걸쳐 堆積層의 變化가 進行되며 이때 堆積層의 變化는 微少하나 이는 주로 自重에 의한 壓密의 進行때문으로 生覺된다. 그러나 自重에 의한 堆積層의 壓密이 沈降開始 直後부터 土粒子가 下端에 쌓이면서 部分的으로 이미 進行되고 있기 때문에 엄밀하게 沈降終了時點을 自重壓密의 開始點으로 看做하기에는 어려우므로 이를 위해서는 많은 實驗과 研究가 必要하다. 卽 自重壓密의 進行을 確認하기 爲하여는 超低應力下에서 有效應力의 發生을 確認하여야 하며 界面의 沈降과 堆積層의 두께가 時間에 따라 變하므로 有效應力의 存在를 確認하기가 相當히 어렵다. 그러나 極大 含水比를 갖는 海成土를 浚渫했을 경우 界面의 沈降速度가 堆積層의 自重壓密 速度보다 越等히 빠른 것이므로 一端 沈降曲線에서 圖式的으로 求한 終了點이 自重壓密始點으로 推定할 수 있을 것이다.

4.6. 沈降과 堆積의 關聯性

일정한 밀폐된 空間에 一定量의 液狀海成土가 投入되었을때 沈降이 開始된다.

이와함께 上部의 界面은 下降하고, 바닥에는 土粒子가 쌓이는 것이 目測으로 確認할 수 있었다.

卽, 上部 界面의 沈降과 下部堆積面의 上昇은 相互關聯性이 있을 것이다.

時間에 따른 堆積面의 上昇曲線을 그림으로 나타내어보니 條件에 따라서 약간의 差異가 있지만 時間에 따른 堆積面의 上昇은 거의 直線的으로 變化한다.

그러나 堆積面은 沈降이 進行됨에 따라 두가지 形태로 區分되어 나타났다.

첫째는 沈降이 完了될 때까지 堆積面을 계속 確認할 수 있는 경우와 둘째는 初期含水比에 따라 다르지만 沈降 開始後 50~60分정도 지나서 부터는 堆積面을 區分할 수 없는 경우이

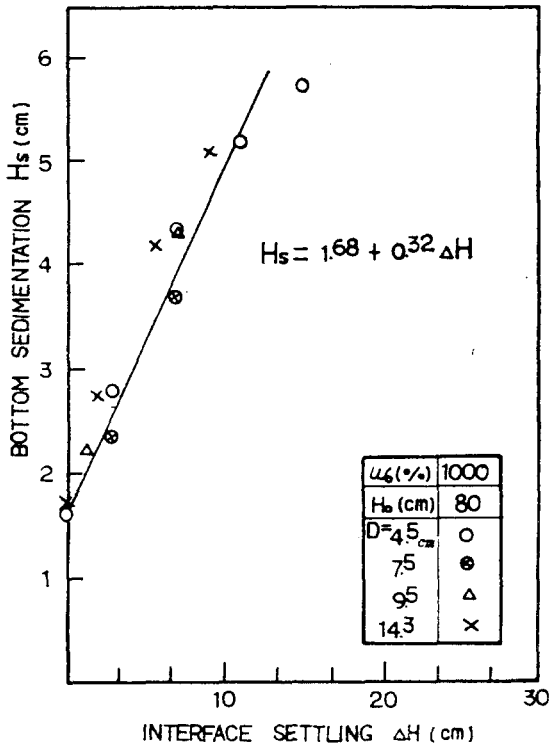


그림 14. Height of sediment deposit against settling height of interface with $w_0=1,000\%$

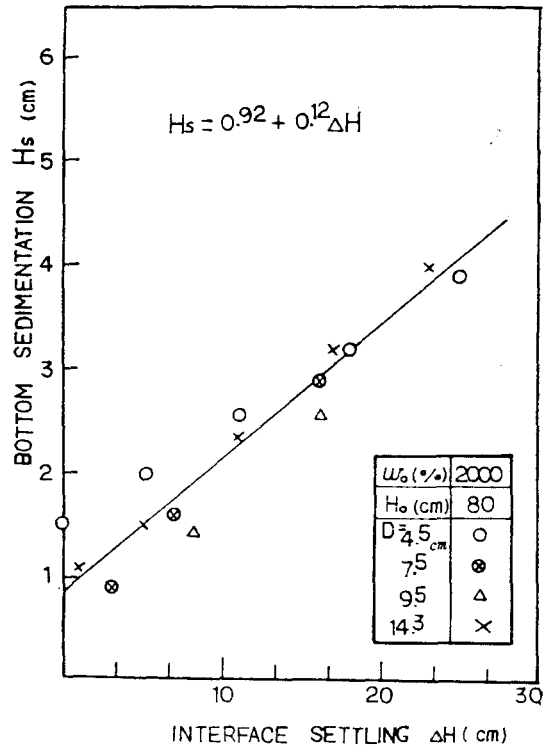


그림 15. Height of sediment deposit against settling height of interface with $w_0=2,000\%$

다. 첫째 경우는 습수비가 큰 경우이고 둘째, 경우에는 습수비가 적을때이다.

이는 습수비가 적은 경우 시간에 따라 下層으로 갈수록 密度가 커지므로 沈降과 堆積 境界面間에 거의 等密度(Equi-density) 상태에 도달하면 肉眼으로 觀察이 不可能하다고 보아진다. 이러한 境界를 干涉沈降과 自重壓密의 關係로 해석할 수 있을지는 의문이지만 今後 詳細한 研究가 必要하다고 본다.

本 實驗에서 界面의 침강과 퇴적을 시간의 함수로 나타내고 침강깊이와 퇴적높이의 관계를 그림으로 나타낸 것이 그림 14, 15이다.

그림 14, 15에서 알 수 있듯이 이들의 變化는 거의 直線狀을 보이므로 이를 最小자승법에 의해 식으로 정리한 결과 半月 泥土에 대한 다음 식을 얻었다.

$$w_0=1,000\% \text{ 일때 } H_s=1.68+0.32\Delta H \quad (4-5)$$

$$w_0=2,000\% \text{ 일때 } H_s=0.92+0.12\Delta H \quad (4-6)$$

H_s : 시간에 따른 堆積高(cm)

ΔH : 시간에 따른 界面의 沈降高(= H_0-H_i) (cm)

H_i : 任意時間에 底面으로부터 測定한 界面의 높이(cm)

H_0 : 初期沈降 開始高(cm)

위의 식에 의해서 高습수비를 갖는 경우 沈降이 完了될 때까지, 그리고, 低습수비를 가질 경우에는 堆積境界가 사라질 때까지의 堆積高와 界面沈降高와의 關係를 求할 수 있다.

즉, 界面의 沈降만으로서도 堆積量을 推定할 수 있게 된다.

또 (4-5)식과 (4-6)식으로 주어진 界面의 下降과 堆積面의 上昇에 관한 關係가 沈降 開始點부터 堆積이 終了되는 時點까지 두루 成立한다고 가정하면(實際는 制限한 條件에서만 實驗式이 求해졌다) 最終 堆積高(H_s)_f는 H_0 에 의해 다음과 같이 求할 수 있다.

$$\text{即 } H_0=(\Delta H)_f+(H_s)_f \dots \dots \dots (4-7)$$

H_0 : 沈降初期開始高

$(\Delta H)_f$: 最終 界面의 沈降高(↓)

$(H_s)_f$: 最終 堆積高(↑)

式(4-7)은 $(\Delta H)_f = H_0 - (H_s)_f$ 가 成立하므로 식(4-5)과 식(4-6)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$w_0 = 1,000\% \text{ 일 때 } H_s = 0.24H_0 + 1.27 \dots (4-8)$$

$$w_0 = 2,000\% \text{ 일 때 } H_s = 0.11H_0 + 0.82 \dots (4-9)$$

따라서 半月 泥土의 경우 沈降開始高(H_0)를 利用하여 最終 堆積高를 推定할 수 있다.

5. 結 論

韓國 西海岸 半月 인근의 泥土를 사용하여 沈降實驗分析을 行하였다.

本 研究은 우리나라 西·南海岸의 各種 泥土에 대한 沈降과 自重壓密現象을 理解하기 위한 試圖로서 우선 半月地域 泥土에 대한 沈降樣式의 分析을 150여회의 實驗을 통하여 多角의 으로 究明하고 이를 圖式化하였다.

本 研究에서 얻는 資料는 今後 餘他の 광범위한 地域에 대한 研究의 시작일 뿐이며 今後에 自重壓密에 따른 諸係數의 확인까지를 繼續하기 위한 최초의 試圖에 불과하다.

지금까지 研究結果를 要約한 結論은 다음과 같다.

(1) 半月 泥土에 대한 沈降樣式은 干涉沈降이 지배적이며 沈降容器의 變化에 따른 沈降現象은 初期含水比가 1,000%인 경우가 2,000%인 경우보다 變化幅이 적고 容器口徑이 커질수록 界面 沈降速度가 느려지는 傾向을 나타낸다.

初期沈降高(H_0)와 界面의 最終沈降高(H_s)와 의 比는 容器口徑에 거의 무관하게 일정한 값을 보여준다.

最初 沈降開始高(H_0)에 따른 界面沈降速度는 初期含水比가 1,000%인 경우에 比하여 2,000%인 경우에서 훨씬 變化가 심했고 初期含水比가 2,000%인 경우의 沈降速度는 1,000%인 경우보다 약 2배에 達했다.

(2) 初期含水比와 界面沈降速度(V)와의 관계는 初期含水比가 클수록 界面沈降速度가 增加는 性向을 나타내며 初期含水比가 400%인 경우에 比해 2,000%에서 沈降速度는 7~10 배 정

도 增大되었다.

그리고 初期含水比가 1,000% 보다 큰 범위에서 의 沈降曲線은 界面沈降의 特性을보여 주었다

3) Richardson-Zaki 관계와 McRoberts and Nixon의 方法에 의한 界面沈降과 自重壓密開始點의 推定方法은 本 半月 泥土에서도 비교적 良好하게 適用되었다.

4) 半月泥土의 堆積高 H_s 와 初期沈降高 H_0 와의 關係는 初期含水比가 1000%인 경우는 $H_s = 0.24H_0 + 1.27$ 이고 2000%인 경우는 $H_s = 0.11H_0 + 0.82$ 로 나타낼 수 있었다. 이 관계는 $H_0 = 50 \sim 150\text{cm}$ 범위와 $H_s = 5 \sim 8\text{cm}$ 범위에서 실험에 의해 확인하였다.

參 考 文 獻

1. Been, Kenneth, "Stress strain behavior of a cohesive soil deposited under water", D. Phil Thesis, University of Oxford, 1980, pp.107~144.
2. Been, K., Sills, G.C., "Self weight consolidation of soft soils: an experimental and theoretical study", Geotechnique, Institution of Civil Engineers, London, Vol.31, No.4, 1981, pp.519~535.
3. Been, Kenneth, "Nondestructive soil bulk density measurements by X-ray attenuation", Geotechnical Testing Journal, Dec. 1981, pp.169~176.
4. Bjerrum, L. and Resenquist, I.T., "Some experiments with artificially sedimented clays", Geotechnique, Vol. VI, 1956, pp.124~136.
5. Gibson, R.E., England, G.L., and Hussey, M.J. L., "The theory of one dimensional consolidation of saturated clays", Geotechnique, Vol. 17, 1967, pp.261~273.
6. Imai, G., Tsuruya, K., Yano, K., "A treatment of salinity in water content determination of very soft clays", Soil and Foundation, JSSMFE, Vol.19, No.3, 1979, pp.84~89.
7. Imai, G., "Settling behavior of clay suspension", Soils and Foundation, JSSMFE, Vol.20, No.2, 1980.
8. Imai, G., "Experimental studies on sedimentation mechanism and sediment formation of clay materials", Soils and Foundation, Vol.21, No.1, 1981, pp.7~20.

9. Keshian, Berg, Jr., Ladd, Charles C., and Olson, R.E., "Sedimentation-consolidation behavior of phosphatic clays", Geotechnical Practice for Disposal of Solid Wasted Materials, ASCE, Specialty Conference, June, 1977, pp.188~209.
10. Kynch, C.J., "A theory of sedimentation", Trans. Faraday Soc. 48, 1951, pp.166~177.
11. Lee, Kuantsai and Sills, G.C., "A moving boundary approach to large strain consolidation of a thin soil layer", Proceedings of the Third International Conference on Numerical Methods in Geomechanics, AAHEN, Apr. 1979, pp.163~173.
12. McRoberts, E.C. and Nixon, J.F., "A theory of soil sedimentation", Can. Geotech. J., Vol.13, 1976, pp.294~310.
13. Michaels, Alan, S. and Bogler, Justin, C., "Settling rates and sediment volumes of flocculated kaolin suspensions", I and EC Fundamentals, Vol.1, No.1, 1962, pp.24~33.
14. Monte, J.L. and Krizek, R.J., "One-dimensional mathematical model for large strain consolidation," Geotechnique, LONDON ENG., Vol.26, No.3, 1976, pp.495~510.
15. Parker, W.R., Kirby, R., "Fine sediment studies relevant to dredging practice and control," Second International Symposium on Dredging Technology, No. V, 1977, B2-16-B2-26.
16. Parker, W.R., Lee, K., "The behavior of fine sediment relevant to the disposal of pollutants", ICES Workshop on Sediment and Pollutant Interchange in Shallow Seas, SM004/SRC, Department of Engineering Science, Oxford University, 1979.
17. Raymond, J. Krizek and Abdelsalam, M. Salem, "Time-Dependent development of strength in dredgings", ASCE, Vol.103, No. CT. 3, 1977, pp.169~184.
18. Richardson, J.F. and Zaki, W.N., "Sedimentation and fluidisation: part I", Trans. INSTN. CHEM. ENGRS., Vol. 32, 1954, pp. 35~53.
19. Scott, Romald, F., "Principles of soil mechanics", Addison-Wesley Publ. Co., 1965, pp. 23.
20. Sills, G.C. and Been, K., "Escape of pore fluid from Consolidative Sediment", Soil Mechanics Internal notes, Department of Engineering Science, Oxford Univ., Box No.9, SM 108/SRC, OUEL 1378, 1981.
21. Stokes, G.G., "On the effect of the internal friction of fluids on the motion of pendulums", Cambridge Transaction 9, 1851.
22. Suzanne, Lacasse M., Lambe, Willian, T., Marr, Allen W., and Thom, Neff, L., "Void ratio of dredged material", Geotechnical Practice for Disposal of Solid Waste, Materials, ASCE, Specialty Conference, June 1977, pp.158~168.
23. Taylor, D.W., "Fundamental of soil mechanics", John Wiley and Sons Inc., 1948, pp.27~64.
24. Terzaghi, C., "Model Conceptions concerning foundation engineering", Jol. of the Boston Society of Civil Engineers, Vol. XII, Dec. 1925.
25. Visilind, P.A., (1975), "下廢水 汚泥의 處理 術" 針生昭一, 森勇譯, 日本公害對策技術同友會.
26. Work, Lincoln, T., and Kohler, Arthur, S. "Sedimentation of suspensions", Industrial and Engineering Chemistry, Vol.32, No.10, 1940, pp.1329~1334.
27. 三立正人, 高田. 李., "超軟弱粘土壓密特性." 第11回, 日本 土質工學發表會, 1976, pp.185~186.
28. 松尾新一郎, 嘉門雅史, 田仁司, "超軟弱粘土의 舉動について" 第12回, 土質工學研究發表會 論文集, TSSMFE, 昭和 52年, pp.129~132.
29. 金修三, 全有錫, "昌原赤峴圍地 軟弱地盤處理 工事報告," 大韓土木學會誌, 제24권, 제1호, 1971.
30. 서효준, 김승우, 이윤오, "서해(중부) 海底堆積物 調査研究報告(I)," 資源研究所, 1981.
31. 李澄洙, 金修三, "馬山港 隣近 海波沖積層의 paper drain 工法의 適應性에 관한 研究," 中央大學校 論文集(自然科學論), 제25집, 1981, pp.153~172.
32. 鄭寅峻, 柳健善, "浚渫上의 基本的 實驗研究," 大學土木學會誌, 제27권, 제5호 1979.10, pp.55~64.
33. 한상준, "韓半島 南東海域 現世 堆積物中의 粘土 廢物에 관하여," Bulletin of KORDI, Vol.1, No 1, 1979, pp'23~37.
34. 金修三, 李澄洙 "沈降容器가 海成土의 沈降에 미치는 영향," 中大論文集(自然科學論) 제28집, 1978, pp.271~280.

(접수일자 1987. 8. 19)