

海成粘土의 反復載荷 및 除荷壓密特性

Consolidation Characteristics of Repeated Increasing and Decreasing Load in Marine Clay

朱 宰 佑* · 金 在 英**
Jae Woo Ju, Jae Young Kim

Summary

This study was conducted to investigate the consolidation characteristics of repeated increasing and decreasing load in marine clay. Consolidation test was performed by the whole repetition of increasing and decreasing load and the partial repetition of increasing and decreasing load. The results obtained were as follows:

1. The void ratio e was decreased according to the increase of preloading and the repetition of increasing and decreasing load.
2. In case of the partial repetition of increasing and decreasing load the compression index C_c was decreased with the increase of preloading and the repetition of increasing and decreasing load
3. The expansion rate was greatly increased with the whole repetition of increasing and decreasing load and it was inclined to be increased with the increase of preloading in case of the partial repetition.
4. The coefficient of volume compressibility were decreased according to the repetition of increasing and decreasing load
5. The secondary consolidation coefficient was decreased with the repetition of increasing and decreasing load. Especially in case of the partial repetition, the peaks of secondary consolidation curves could be found to move toward the vicinity of preloading.

I. 緒 論

壓密이라함은 完全히 飽和되어 있거나 또는 部分的으로 飽和되어 있는 흙에 荷重이 加해지면 그 荷重으로 因하여 오랜 時間에 걸쳐 흙의 間隙속에 있는 물이 排出됨으로서 흙이 壓縮되는 現狀을 말한다. 壓密에 관한 研究는 1923年 Terzaghi의 壓密理

論이 母體가 되어 그後 많은 學者들에 의해 理論的 및 經驗的 方法에 의한 研究가 계속되어 왔다. 一般적으로 通用되고 있는 飽和된 粘土層의 沈下量과 沈下速度는 Terzaghi의 1次壓密理論을 근거로 해서 推定한다. 이러한 推定은 試驗室에서의 標準壓密試驗 方法에 의해서 얻어지는 資料에 依據하고 있지만 Terzaghi의 理論値와 實測値사이에는 많은 差異를 보인다는 것은 널리 알려진 事實로서 標準壓密試驗

* 順天大學

** 全北大學校 農科大學

法에서 規定하고 있는 試驗條件과 現場條件과의 差異를 減少시키기 爲하여 많은 研究가 수행되어 왔다. 즉 壓密링의 側面摩擦, 3次元壓密, 基礎形狀, 흙의 膨脹, 荷重增加率, 試料의 두께, 載荷時間 等에 관한 壓密特性이 發表되었으며 또한 그 差異를 보이는 重要한 理由中의 하나가 2次壓密 때문이라고 생각하여 2次壓密까지 고려한 沈下量을 推定하는 理論도 發表되었으나¹⁷⁾ 그 理論은 特殊한 粘土에서만 適用되고 있을 뿐 一般粘土에 대해서는 아직 適用되지 못하고 있다.

最近 國家的 政策事業인 干拓事業, 臨海工業園地造成事業 等이 活發히 推進되고 있으며 여기에 建設되는 構造物이나 土木工事は 大部分 地盤이 完全히 沈下되지 않은 狀態에서 이루어진다. 특히 道路建設 等으로 因하여 移動車輛荷重이 反復해서 作用할때 이 反復荷重으로 因한 壓密特性이 標準壓密試驗에 의한 것과 많은 差異를 가져올 것으로 생각되며 이 分野에 대한 많은 研究가 요청되어 왔다. 反復載-除荷方法을 使用한 것은 Casagrande²⁾가 이 方法으로 先行荷重 決定方法을 제안하였고 Tschebotarioff¹⁶⁾은 膨脹성이 큰 粘土에 있어서 實測沈下量에 비해 豫測沈下量이 過大함을 줄이기 위해 反復載-除荷方法을 利用하여 새로운 壓密特性值를 求하였다. Frost⁹⁾는 過壓密粘土(LL: 77%, PL: 37%)

가 試料採取, 運搬 및 定置도중 攪拌되어 初期間隙比를 減少시키고 再壓縮部分의 e-logP 曲線의 傾斜度를 增加시킨다 하여 사이클링 로우딩(cycling loading) 方法에 의해 새로운 再壓縮指數 決定方法을 제안하였다. 佐¹⁾는 漸減載荷壓密에 관한 研究에서 段階的載-除荷方法을 部分的으로 利用하였다.

反復載-除荷 方法에 의한 壓密의 研究는 國內外的으로 아직 미흡한 實情으로서 本 研究에서는 海成粘土에 대한 壓密荷重의 反復載-除荷가 壓密特性에 어떠한 影響을 미치는 가를 調査키 위해 실시하였으며 全段階 및 段階的 反復載-除荷時의 e-logP 曲線, 全段階 및 段階的 反復載-除荷와 膨脹率과의 관계, 先行荷重과 壓縮指數와의 관계, 全段階 및 段階的 反復載-除荷時의 壓密荷重과 體積壓縮係數 및 2次壓密係數와의 관계 等을 調査 分析하였다.

II. 材料 및 試驗方法

1. 材料

本 試驗에 使用된 試料는 全南 昇州郡 海龍面 仙月里의 海邊에 있는 海成粘土로서 이 흙의 物理的 性質 및 粒度分布는 Table-1 및 Fig. 1과 같다.

Table-1. Physical properties of soil used.

Sample No	Gravity	L.L.(%)	P.L.(%)	P.I	Water content (%)	Classification of soil
S-1, P-1, 2, 3	2.617	73	26	47	91	CH
S-2	2.630	60	25	35	85	CH

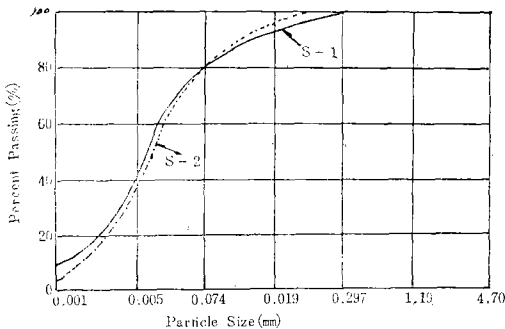


Fig. 1. Grain size distribution curves

2. 試驗方法

本 試驗에서는 反復荷重이 海成粘土의 壓密特性에

어떠한 影響을 미치는가를 推定하기 위하여 標準壓密試驗法으로 연속 3回 反復한 경우를 全段階反復載-除荷(the whole repetition of increasing and decreasing load)試驗으로 하였고 壓密荷重을 마지막 段階까지 載荷시키지 않고 어느 段階에서 原點으로 除荷시키는 過程을 荷重段階의 幅을 增加시키면서 反復하는 경우를 段階的 反復載-除荷(the partial repetition of increasing and decreasing load) 試驗으로 하였다.

가) 全段階反復載荷 및 除荷

標準壓密試驗에서는 1回의 載荷 및 除荷로서 荷重作用을 끝내지만 本 試驗에서는 연속 3回 反復載-除荷하여 이로 因한 壓密特性值의 變化를 推定하였고 使用된 試料는 現場에서 採取한 不攪亂試料를

그대로 使用하였으며 荷重은 0.05kg/cm²에서 10.75 kg/cm²까지 6段階로 하여 실시하였다.

나) 段階의 反復載荷 및 除荷

段階의 反復載荷 및 除荷試驗에서는 壓密荷重을 마지막 段階인 12.8kg/cm²까지 載荷시키지 않고 어느 段階까지 作用시킨 후 다시 載荷初期狀態로 除荷시키는 이러한 過程을 荷重段階의 幅(0~0.2kg/cm², 0~1.6kg/cm², 0~12.8kg/cm²)을 增加시키면서 되풀이하여 試驗을 하였다. 使用된 試料는 S-1試料로서 自然含水比를 유지시키며 되비법 한 후 壓密試驗器를 利用하여 先行荷重이 각각 다른 3種類의

試料를 만들었다. 이들 先行荷重은 각각 0.2kg/cm², 0.4kg/cm², 0.8kg/cm²이고 試料名은 각각 P-1, P-2, P-3라 하였다. 試料조제 過程을 Fig. 2에 나타냈다.

荷重載荷 및 除荷方法은 Table-2와 같으며 荷重增加率은 1을 使用하였고 載荷는 1段階荷重을 24時間, 除荷는 4時間으로 하였다. 試驗時에는 壓密링의 側面摩擦을 減少시키기 위해 실리콘 그리이스(silicon grease)를 使用하였으며 各 試料마다 3회씩 실시하여 平均值를 使用하였다.

Table-2. Increasing and decreasing load method of each sample.

No.	Condition of sample.	The method of increasing and decreasing load
S-1	Undisturbed	The whole repetition of increasing and decreasing load.
S-2	Undisturbed	(0-10.75kg/cm ²)
P-1	Preload 0.2kg/cm ² for the remolding of S-1	The partial repetition of increasing and decreasing load
P-2	Preload 0.4kg/cm ² for the remolding of S-1	(0-0.2kg/cm ² , 0-1.6kg/cm ²)
P-3	Preload 0.8kg/cm ² for the remolding of S-1	0-12.8kg/cm ²)

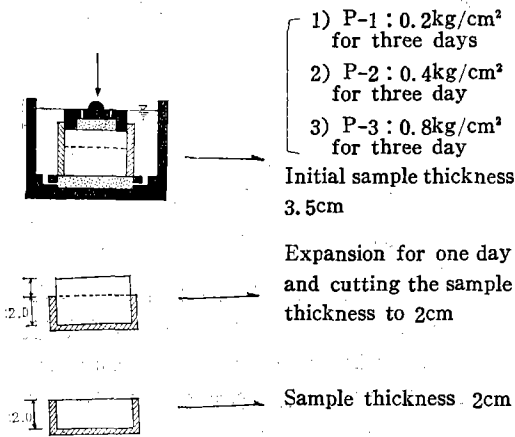


Fig. 2. The method of applying preloads to the remolded marine clay

Ⅲ. 結果 및 考察

1. 全段階反復載-除荷時의 e-logP曲線

Fig. 3과 4는 全段階反復載-除荷時 각각의 壓密荷重에 따른 間隙比의 變化를 나타낸 것으로 載荷 및 除荷가 거듭됨에 따라 間隙比가 減少하는 傾向

을 나타냈다. 間隙比의 계속적 減少는 沈下의 進行을 意味하므로 反復載-除荷壓密을 받는 地盤의 경우 沈下量이 過小側定되는 것에 有意해야 할 것으로 생각된다.

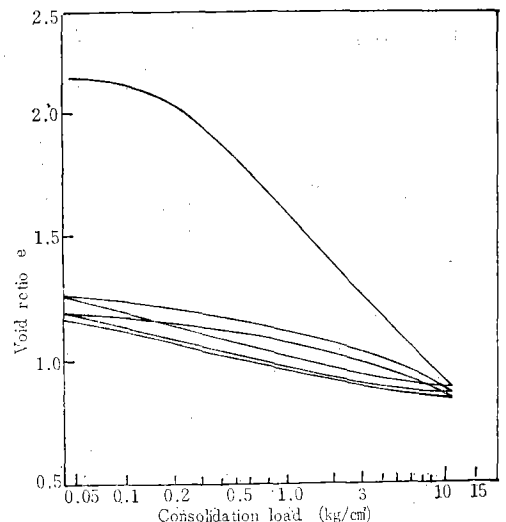


Fig. 3. e-log P curves due to the whole repetition of increasing and decreasing load in S-1

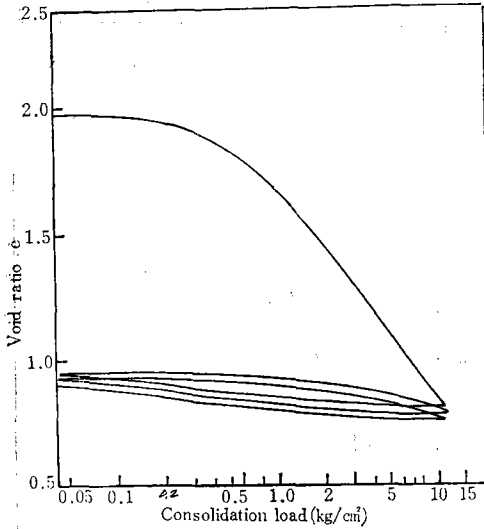


Fig. 4. e -log P curves due to whole repetition of increasing and decreasing load in S-2

2. 段階的 反復載-除荷時의 e -log P 曲線

Fig. 5, 6, 7은 試料 S-1을 되비침하여 先行荷重 0.2kg/cm², 0.4kg/cm², 0.8kg/cm²를 加한 試料 P-1, P-2, P-3에 대한 段階的 反復載-除荷時 壓密荷重에 따른 間隙比의 變化를 나타내고 있다. 各 段階別로 試料 P-1, P-2, P-3의 e -log P 曲線을 比較하여 보면 先行荷重이 0.2kg/cm², 0.4kg/cm²,

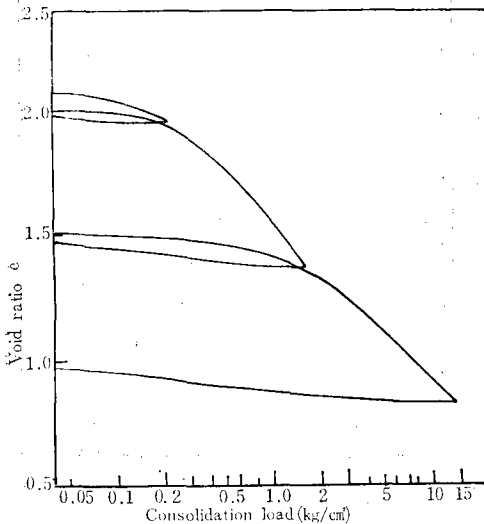


Fig. 5. e -log P curves due to the partial repetition of increasing and decreasing load in P-1

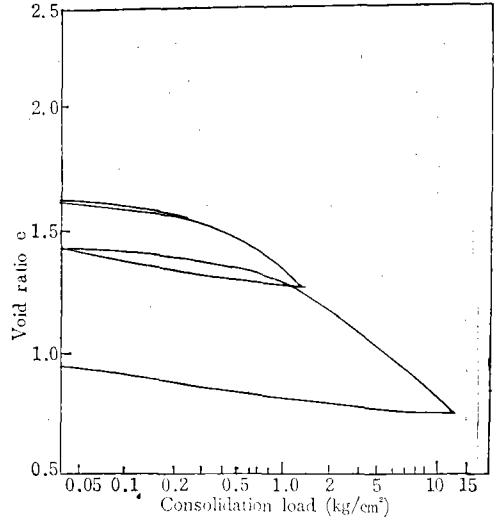


Fig. 6. e -log P curves due to the partial repetition of increasing and decreasing load in P-2

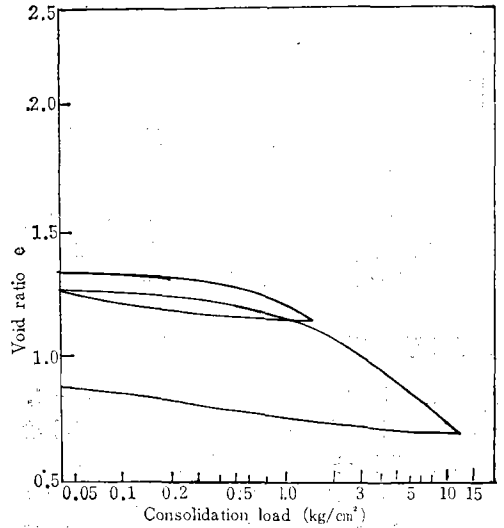


Fig. 7. e -log P curves due to the partial repetition of loading and unloading in P-3.

0.8kg/cm²로 增加함에 따라 間隙比의 變化幅이 減少하는 傾向을 보여주고 있음을 알 수 있다. 特히 1 段階에서 試料 P-3는 壓密이 완료된 狀態임을 보여주고 있다.

3. 全段階 反復載-除荷와 膨脹率과의 관계

Fig. 8은 全段階 反復載-除荷에 따른 膨脹率(膨

脹量/沈下量)을 나타낸 것으로 載荷 및 除荷가 거듭됨에 따라 膨脹率은 增加하는 傾向을 나타내고 있다. 이는 粘土가 反復荷重의 영향을 받는 경우 彈性的 性質의 增加를 意味하여 Fig. 8에서 3次荷重載-除荷時 膨脹率은 試料 S-1, S-2에 있어서 각각 98%, 90%로 되어 거의 彈性體에 가까운 性質을 나타내고 있음을 알 수 있다.

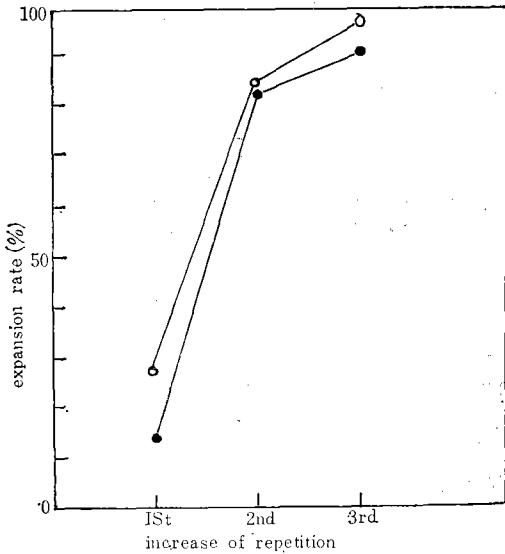


Fig. 8. Variation of expansion rate by the whole repetition of increasing and decreasing load in S-1 and S-2

4. 先行荷重과 膨脹率과의 관계

Fig. 9는 段階的 反復載-除荷의 경우 試料 P-1, P-2, P-3,에 있어서 各 段階別 및 先行荷重의 增加에 따른 膨脹率을 나타낸 것이다. 膨脹率은 先行荷重이 增加함에 따라 커지는 傾向을 보이고 있어서 先行荷重을 크게 받은 흙일수록 즉 過壓密狀態의 흙일수록 흙수膨脹되는 量이 그만큼 커짐을 알 수 있다. 膨脹率을 各 段階別로 比較해 보면 1, 2, 3 段階順으로 膨脹率은 減少하고 있는데 이는 處女壓密 (virgin compression) 部分이 相對的으로 增加하는데 기인되는 것으로 생각된다.

5. 先行荷重과 壓縮指數와의 관계

Fig. 10은 試料 P-1, P-2, P-3의 2段階荷重載荷 및 3段階荷重載荷時의 壓縮指數를 나타낸 것으로 P-1, P-2, P-3 順으로 즉 先行荷重의 增加

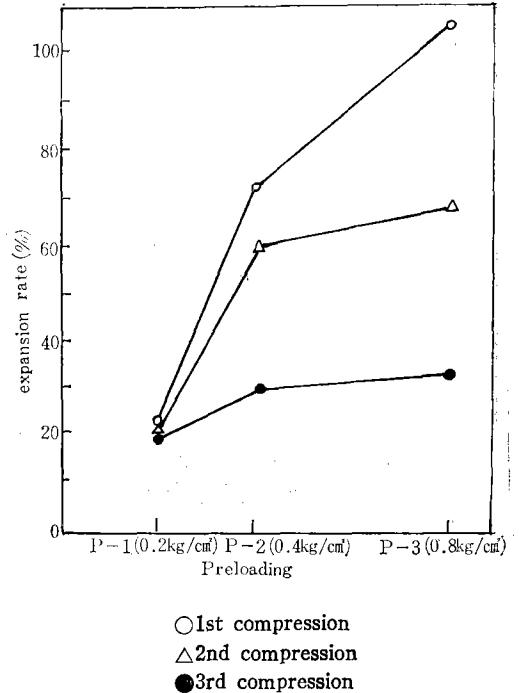


Fig. 9. Variation of expansion rate due to the increase of preloading

에 따라 同一한 흙에 대한 壓縮指數는 減少하는 것으로 나타났고 載荷段階가 거듭됨에 따라 壓縮指數

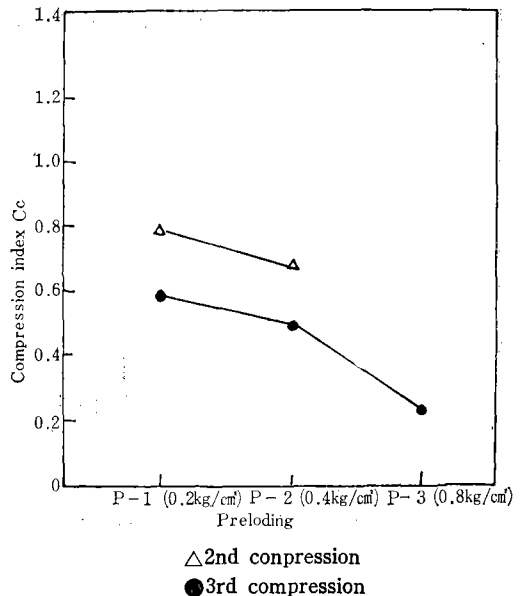


Fig. 10. Variation of compression index Cc due to the increase of preloading

는 減少하였다. 壓縮指數란 $e-\log P$ 曲線의 處女壓密部分의 기울기로 定義되며 同一한 흙의 경우는 언제나 그 값은 一定하다. 보통 正規壓密粘土에서는 沈下量 計算에 壓縮指數를 使用하며 過壓密粘土의 경우는 再壓縮指數를 使用한다. 本 試驗에서 壓縮指數는 先行荷重의 增加에 따라 減少하는 傾向을 보였는데 이는 1次壓密과 同時에 일어나는 2次壓密로 因한 土粒子의 점진적인 再調整에 因되는 것으로 생각된다.

Newland⁴³⁾에 의한 壓縮指數는 試料의 두께나 荷重增加率에 아무런 影響을 받지 않는다고 하였고 柳⁴⁴⁾는 試料의 두께가 작을수록 荷重增加率이 클수록 壓縮指數는 커진다고 하였다. Craig⁴⁵⁾는 試料의 교란정도의 增加는 壓縮指數를 減少시킨다고 發表한 바 있다.

6. 體積壓縮係數와 壓密荷重과의 관계

Fig. 11은 全段階 反復載-除荷時 試料 S-1의 1次, 2次, 3次荷重載-除荷에 따른 壓密荷重과 體積壓縮係數와의 關係를 나타낸 것으로 載-除荷의 反復에 따라 體積壓縮係數는 減少하였고 先行荷重부

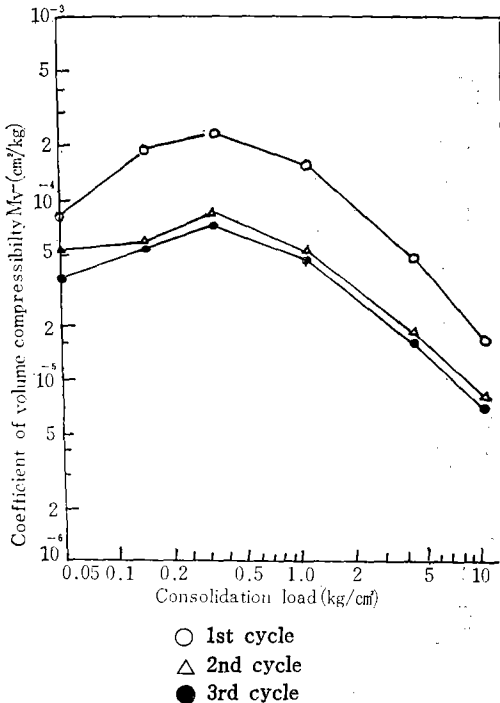


Fig. 11. Relationship between the consolidation load and the coefficient of volume compressibility m_v in S-1

근에서 體積壓縮曲線의 頂點을 이루는 것으로 나타났다. Fig. 12는 試料 P-1의 各段階에 따른 壓密荷重과 體積壓縮係數와의 關係를 나타낸 것으로 段階가 거듭될수록 體積壓縮係數는 減少하였으며 頂點이 先行荷重근처로 移動하는 現狀을 보여주었다. 體積壓縮曲線이 先行荷重근처에서 頂點을 이루는 것은 先行荷重보다 큰 荷重이 作用할때 處女壓密이 行해져 土粒子의 構造가 變형을 일으키기 때문이라고 생각된다.⁴⁶⁾

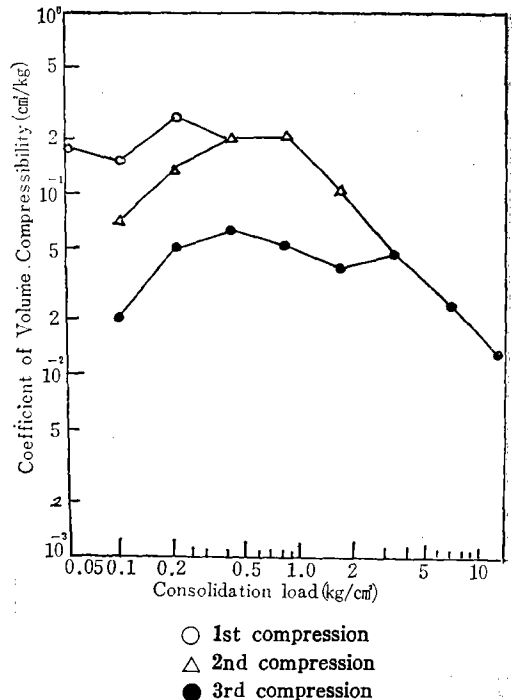


Fig. 12. Relationship between the consolidation load and the coefficient of volume compressibility m_v in P-1

7. 2次壓密係數와 壓密荷重과의 관계

2次壓密은 間隙比의 減少로 發生된 粘土粒子의 構造의 교란으로 因하여 좀더 安定된 配列을 이루려는 粘土粒子의 점진적인 再調整때문에 일어난다.⁴⁷⁾ 本 研究에서는 壓密荷重의 全段階 및 段階의 反復載-除荷時 2次壓密係數의 變化를 調查하기 위해서 時間과 沈下量曲線을 半對數用紙에 表示할때 間隙水壓이 完全히 消散된 후에도 거의 直線의인 傾向을 보이는데 이 曲線의 기울기를 2次壓密係數라 하였다.

Fig. 13은 全段階 反復載-除荷時 試料 S-1의 1

次, 2次, 3次荷重載-除荷에 따른 壓密荷重과 2次 壓密係數와의 관계를 나타낸 것으로 載-除荷의 反復에 따라 2次壓密係數는 減少하는 것으로 나타났다. Fig. 14, 15은 段階的 反復載-除荷時 試料 P-1, P-2의 各 段階에 따른 壓密荷重과 2次壓密係數와의 관계를 나타낸 것으로 載-除荷段階가 거듭될 수록 處女壓密應力 以內의 2次壓密係數는 減少하였고 先行荷重의 增加에 따라 2次壓密曲線의 頂點이 先行荷重 근처로 移動하는 傾向을 보여 주었는데 이는 柳¹⁶⁾와 同一한 結果이다.

Leonards¹²⁾는 Mexico Black Clay를 使用한 壓密試驗의 한 結果에서 載荷時間이 길 경우 2次壓密은 先行荷重에 의한 影響을 더 많이 받는다고 發表하였다.

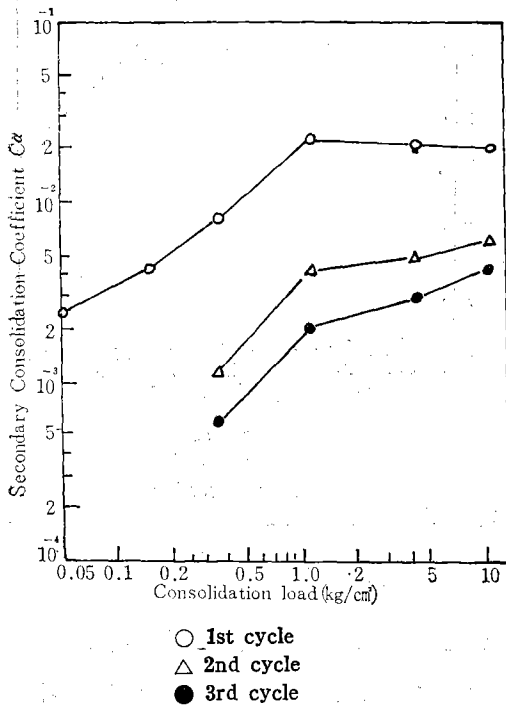


Fig. 13. Relationship between the consolidation load and the secondary consolidation coefficient in S-1

IV. 結 論

海成粘土(S-1: LL 77%, PL 26%, S-2: LL 60%, PL 25%)의 反復載荷 및 除荷壓密에 관한 特性을 調査하기 위해서 全段階 反復載-除荷 및 段階的 反復載-除荷壓密試驗을 실시하여 얻은 結果를

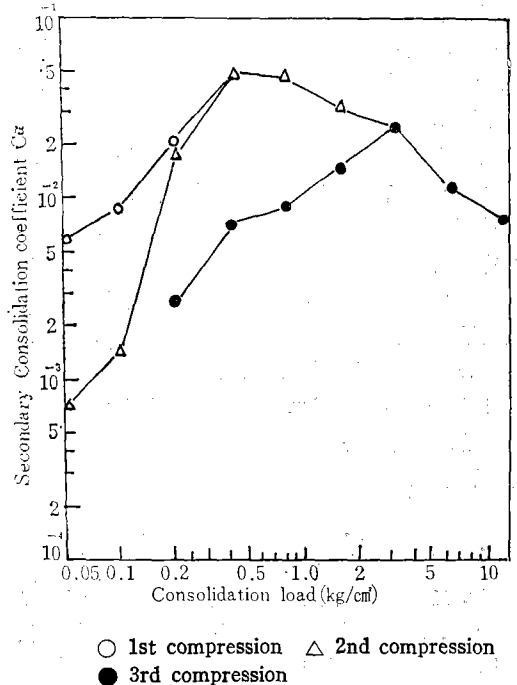


Fig. 14. Relationship between the consolidation load and the secondary consolidation coefficient C_{α} in P-1

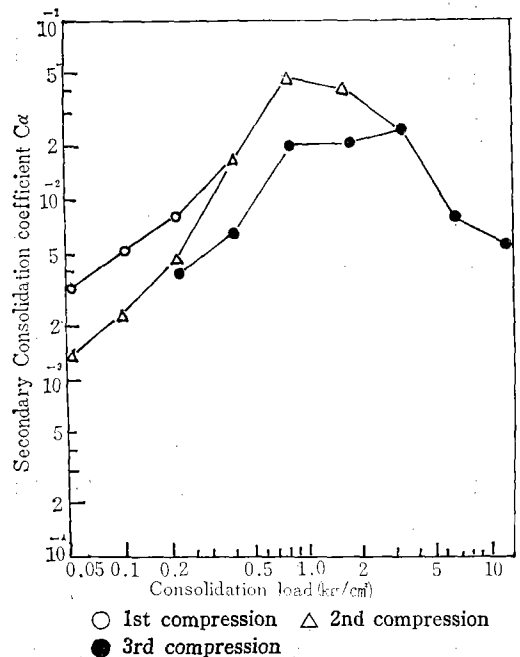


Fig. 15. Relationship between the consolidation load and the secondary consolidation coefficient C_{α} in P-2

요약하면 다음과 같다.

1. 間隙比 e 는 載-除荷의 反復 및 先行荷重의 增加에 따라 減少하는 傾向을 보였다.
2. 壓縮指數 C_c 는 段階的 反復載-除荷時 先行荷重의 增加 및 載-除荷의 段階가 거듭될수록 減少하는 傾向을 보였다.
3. 膨脹率(膨脹量/沈下量)은 全段階反復載-除荷時 載-除荷의 反復에 따라 크게 增加하였으며 段階的 反復載-荷除時 先行荷重의 增加에 따라 增加하는 傾向을 보였다.
4. 體積壓縮係數는 載-除荷의 反復에 따라 減少하였다.
5. 2次壓密係數는 載-除荷의 反復에 따라 減少하였고 特히 段階的 反復載-除荷時 先行荷重이 增加함에 따라 2次壓密曲線의 頂點이 先行荷重부근으로 移動하는 傾向을 보였다.

參 考 文 獻

1. Altschaeffl. A.G and G.A. Leonards. 1964. Compressibility of clay. J. of Soil Mech & Foud. Div. Proc. of Am. Soc. of Civil Engr 90 : 133.
2. Casagrande A. 1936. The determination of the preconsolidation load and principal significance. Proc 1st Int. Conf. on S.M & F.E, 3 : 34-35.
3. 鄭寅駿. 1970. 試料와 地層의 두께가 2次壓密에 주는 영향. 大韓土木學會誌, 18(3) : 1
4. Craig. R.F. 1977. Soil Mechanics. Van Nost-rand Reinhold Company. pp 177-223.
5. Davis E.H and H.G. Poulos. 1972. Rate of settlement under two and three dimensional conditions. Geotechnique 22(1) : 95-14.
6. Frost R.J and I.K. Nixon. 1971. Recompression characteristics of Perth overconsolidated clays. Proc. 1st Australia-N.Z. Conf. Geomech. 1 : 112-118.
7. 佐佐木伸. 1974. 漸減載荷壓密에 關する 研究. 第 8回 土質工學研究發表集 : 113-116
8. Harr. M.E. 1966. Foundations of Theoretical Soil Mechanics. Mcgraw-Hill Book Company pp118-151.
9. 金翔圭. 1971. 載荷條件에 따른 粘土의 壓密特性. 大韓土木學會誌, 18(3) : 20.
10. 金八圭. 1977. 多層土의 1次元壓密에 관한 研究. 大韓土木學會誌 25(3) : 83-89.
11. Terzaghi. K. and R.B. Peck. 1967. Soil Mechanics in Engineering Practice. John Wiley & Sons, Inc. pp63-83.
12. Leonards G.A. and G.A Girault. 1961. Study of the one dimensional consolidation test. proc. 6th. Intl. conf. on SM & FE 1 : 198.
13. 李汝樹. 1980. 二次壓密에 관한 研究. 全南大學校 工業技術研究誌 17
14. Newland. P.L. and B.H. Alley. 1960. A study of the consolidated characteristics of a clay. Geotechnique 9(2) : 62.
15. Tschebotarioff. G.P. 1973. Foundations, Retaining and Earth Structures. Mcgraw-Hill Kogakusa, LTD. pp 1-200.
16. Tschebotarioff. G.P and J.R. Schuyler. 1948. Comparison of the extent of disturbance produced by driving piles in plastic clay to the disturbance caused by an unbalanced excavation. Proc. 2nd. Int. Conf. Soil. Mech. Found, Eng. Rotterdam 2 : 199-205.
17. Wahls H.E. 1962. Analysis of primary and secondary consolidation. J. of Soil Mech. Div. ASCE. 88 (6) : 207-233.
18. 柳能桓. 1978. 試料의 두께, 荷重增加率 및 載荷時間이 壓密特性에 미치는 영향. 忠南大學校 博士學位發表論文 pp3~17.