石膏플라스터 混合土의 工學的 特性

A Study on the Engineering Characteristics of the plaster-soil mixtures

都 德 鉉* · 鄭 晟 模**
Doh, Duk Hyun · Jung, Sung Mo

Summary

The plaster mixed to loam and sandy soil from 4 to 12 percent by dry soil weight, and the compaction, permeability, CBR, unconfined compressive strength and freezing-thawing test were performed

The results obtained are summarized as follows;

1. The coefficient of permeability reduced sharply at the plaster content of 4 percent, and in the CBR test, the swelling ratio reduced by the increment of plaster content.

2. The addition of plaster increased the unconfined compressive strength by the cementing effect, and it was found that the optimum plaster content existed with the soil type, which showed the maximum strength

3. It was possible to enhance the unconfined compressive strength of the gypsum-lime-soil mixtures when the optimum content of plaster was mixed to the hydrated lime.

4. In case of sandy soil, the relative frost heave decreased with the mixture of plaster, however in loam soil, the relative frost heave began to increase at the plaster content of 12 percent than non-treated soil.

Therefore the optimum plaster content existed for protecting frost heave by the different soil type.

5. The above summarized results make it possible to expect the effects such as improvement of soil properties, decrement of permeability, increment of unconfined compressive strength, and protection of frost heave, etc, therefore, it is considered that it is possible to use plaster as sub-base materials of road.

Ⅰ. 緖 論

石膏는 紀元前 4000餘年경 古代 에집트·西南亞細亞 文化가 번영했던 당시 피라밋의 石材로서 또 접착용모르터나 建築用石材의 모르터로서 使用하기 시작하였다.

그후 中世 유럽의 그리스도敎의 發達과 더불어 裝飾性을 滿足하는 內裝材로서 宗敎建築에 利用되었으며, 특히 1,200年頃 불란서 파리 近郊의 Mont-

* 建國大學校 農科大學
** 建國大學校 大學院

marte 鑛床의 天然 石膏로부터 만들어진 플라스터는 유럽각지에서 使用되어 왔고, plaster of Paris는 오늘날에도 燒石膏의 慣用名으로 使用되고 있다.[17]

최근 美國[6]과 Sweden,[4] Finland[5]를 비롯한 유럽 각국, 그리고 가까운 日本[14]에서는 安定處理材로서의 性質을 지닌 工場副産石膏 또는 이와 同等한 性質의 廢材를 石灰에 適量 混合한 gypsum-lime을 開發하여 軟弱地盤의 深層安定處理는 물론이고 道路, 비행장 등 淺層安定處理에 使用하므로서 石灰混合土 固有의 改良效果를 增大시킬 뿐만 아니라,[9] 有機質土에서 石灰混合土의 效果를 높이기 위한 2次添加劑로서 使用한 例가 많다.[2,18]

우리나라에서는 1967年의 嶺南化學과 鎭海化學, 1977年 南海化學에서 複合肥料 生産時의 原料인 燐酸의 生産過程에서 副産되는 소위 副産石膏를 再處理하여 시멘트 生産時의 凝結遲延劑 또는 建材用으로 使用하고 있으나, 그 일부는 초벌용混合 石膏플라스터(半水石膏)로 再生産하여 市販中에 있다.

外國에서는 石膏플라스터가 土質安定處理材로서 만족스러운 效果를 期待할 수 있다는 報告가 많으나, 年間 燐酸副産石膏가 200餘 萬톤이 生産되고 있는 우리나라에서는 아직 土質工學的 性質에 關한 硏究가 거의 이루어지지 않고 있다.

따라서 本 硏究는 石膏플라스터 混合土의 强度特性, 透水性, 凍結에 對한 抵抗性 等을 究明하여 道路, 비행장 鋪裝등 淺層安定處理와 軟弱地盤改良을 위한 深層 安定處理材로서의 使用可能性을 檢討하였다.

Ⅱ. 材料 및 試驗方法

1. 材 料

가. 試料土

試料土는 서울市 城東區 長安洞에서 채취한 loam(A試料)과 東大門區 徽慶洞에서 채취한 砂質土(B試料)를 使用하였다.

이들 試料의 物理的 性質 및 粒度分布圖는 Table-1 및 Fig-1과 같다.

나. 石膏플라스터

石膏플라스터(이하 플라스터라 함)는 太原物産製品을 使用하였으며 이의 物理·化學的 性質은 Table-2와 같다.

2. 試驗方法

가. 다짐 및 壓縮强度試驗

壓縮强度試驗用 供試體를 製作하기 위하여 플라스터混合量을 乾燥土重量의 0, 4, 8, 12%로 하여 KS F 2312의 A-1方法으로 다짐試驗을 하여, 含水比와 密度關係를 구하고, 直徑 7cm, 높이 14cm規格으로

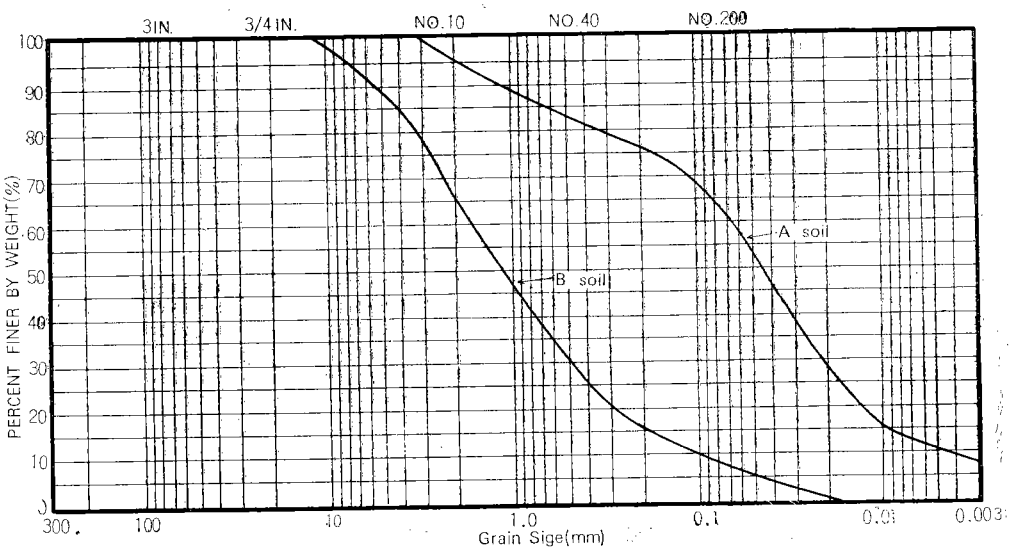

Fig. 1. grain size distribution curves.

Table-1. Physical properties of soil used

Soil Types	Location	Sepec-ific gravity	LL (%)	PL (%)	PI	Ma~xim-um size mm	Mechanical analysis			Coeffic-ient of uniform-ity	Classifica-tion		γ_{dmax} (g/cm³)	OMC (%)
							over 2mm	2~0.074 mm	below 0.074 mm		USCS	PRA		
A	Seoul Jangan dong	2.64	30.2	21.0	9.2	3.0	4.2	31.7	64.1	6.1	CL	loam	1.61	20.5
B	Seoul Whui-kyung dong	2.63	19.6	—	NP	6.0	40.5	50.5	9.0	16.8	SW-SM	Sand	1.84	13.2

Table-2. Chemical compositions and physical properties of plaster used

Fe_2O_3 (%)	Combined-H_2O (%)	Ig-loss (%)	SiO_2 (%)	P_2O_5 (%)	SO_3 (%)	CaO (%)	Al_2O_3 (%)	Total-P_2O_5 (%)	Soluble-P_2O_5 (%)	Free-H_2SO_4 (%)
0.28	3.51	5.45	2.28	1.57	53.05	36.71	1.29	0.90	0.21	0.20

—100# (%)	—200# (%)	—325# (%)	Standard water mixed(%)	Setting time(min) first	Setting time(min) last	Unconfined compressive strength(kg/cm²)	Flexible strength (kg/cm²)	Thermal conduction (kcal/mh°C
99.1	90.1	73.8	67.2	6′15″	7′43″	40.5	28.4	0.237

KS F 3507에 의함

最適含水比(OMC)와 最大乾燥密度(γ_{dmax})에 맞도록 供試體를 製作하여 溫度 23°C, 相對濕度 95%以上되도록 濕潤養生을 한 다음 養生日數 3,7,28日에서의 壓縮强度試驗을 하였다. 이외에도 플라스터를 石灰混合土에 대한 2次添加劑의 効果를 확인하기 위하여 石灰 12%混合土에 石灰重量의 4,8,12%의 플라스터를 2次 添加하여 위와 同一한 方法으로 一軸壓縮强度試驗을 하였다.

나. 剪斷試驗

非處理土와 플라스터를 混合한 試料에 대하여 KS F 2312의 A-1 다짐에서의 최적함수비와 최대건조밀도 狀態로 직경 4.8cm 높이 9.6cm의 三軸試驗用 供試體를 製作하여 7日養生後 變形制御方法으로 UU 試驗을 하였다.

다만 三軸試驗機의 容量이 부족되는 供試體에 대해서는 直接剪斷試驗을 하였다. 直接剪斷試驗은 斷面積 31.66cm², 두께 2.54cm의 供試體를 준비하고 剪斷速度 1.27mm/min으로 조절하여 試驗하였다.

다. 凍結試驗

플라스터 混合土를 KS F 2312의 A-1다짐몰드에 최적함수비 및 최대건조밀도가 되도록 試料를 다져 넣은 후 이를 毛管水 上昇이 容易하도록 裝置한 凍結 상자에 —23°C에서 12時間 凍結시키고 23°C에서 12時間 融解시키는 方法을 1週期로 하여 7週期 반복後 凍結에 의한 體積變化를 檢討하였다.

기타 CBR試驗, 透水試驗을 비롯한 흙의 物理的 性質에 關한 各種 試驗은 KS F 規定에 의하여 實施하였다.

Ⅲ. 結 果

1. 다짐特性

A試料는 플라스터混合量이 4,8,12%로 增加함에 따라 최적함수비는 21.3, 22.5, 24.0%로 增加하고 최대건조밀도는 1.57, 1.54, 1.52 g/cm³로 減少하는 傾向을 보였으며, B試料는 플라스터混合量이 4, 8,12%로 增加됨에 따라 최적함수비는 13.6, 13.8, 14.4%로 增加하였고 최대건조밀도도 1.87, 1.88, 1.89g/cm³로 增加하였다. 한편 플라스터의 混合量과 최대건조밀도에서의 間隙比(e)와의 關係는 Fig. 2

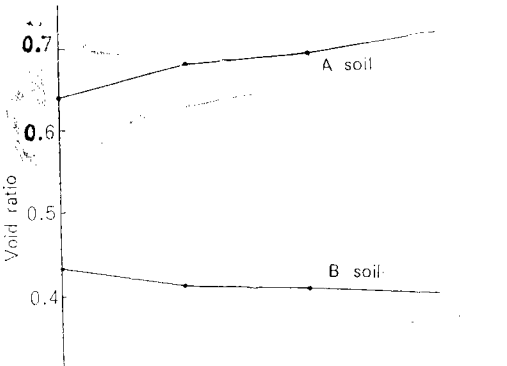

Fig. 2. Relationships between plaster content and void ratio

에서와 같이 A試料는 플라스터混合量이 증가함에 따라 간극비는 增加하며 B試料는 플라스터混合量의 增加와 더불어 간극비가 減少하였다.

2. 透水性

Fig-3은 플라스터混合土를 7日養生後 透水試驗을 한 結果이다. 플라스터混合量 4%까지는 A, B試料 모두 透水係數 (k)가 急激히 減少하였으나 그 이상의 混合量에서는 透水係數의 減少率이 완만하게 나타났다.

3. CBR特性

플라스터混合土의 CBR試驗에 의하면 CBR値 8.5%인 A試料에서는 플라스터混合量을 4, 8, 12%로 增加시킴에 따라 CBR値 11, 15.5, 13.3%로 플라스터混合量 8%에서 最大値를 나타내었으며, CBR値 27.5%인 B試料에서는 플라스터混合量을 4, 8, 12%로 增加시킴에 따라 CBR値 34, 38, 43%로 增加되었다.

Fig-4는 水浸後 時間經過에 따른 膨脹量을 나타낸 것으로 4日水浸後의 膨脹量은 A試料의 경우 플라스터混合量이 增加될수록 減少되었다. 즉 無處理

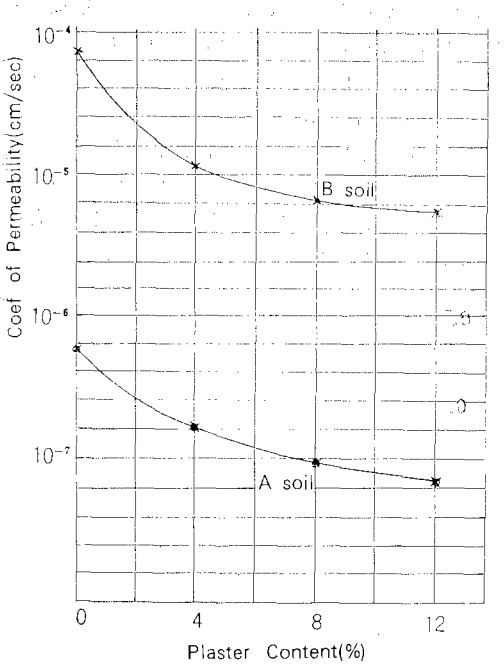

Fig. 3. Relationships between plaster content and coefficient of permeability at 7 days curing

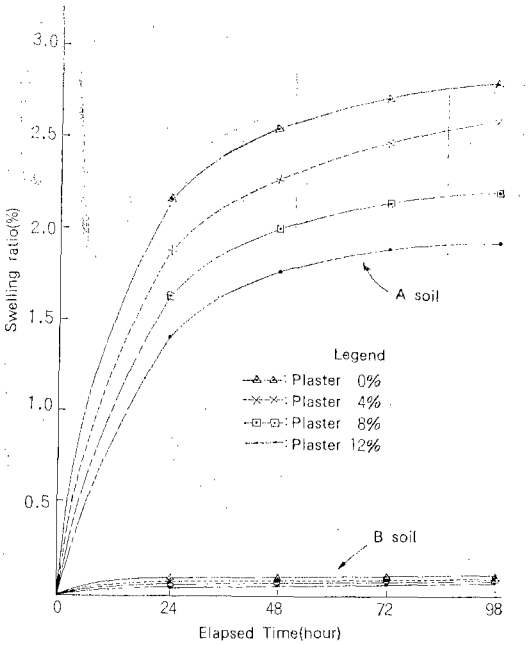

Fig. 4. expansion-time curve with soaked 7 days curing samples

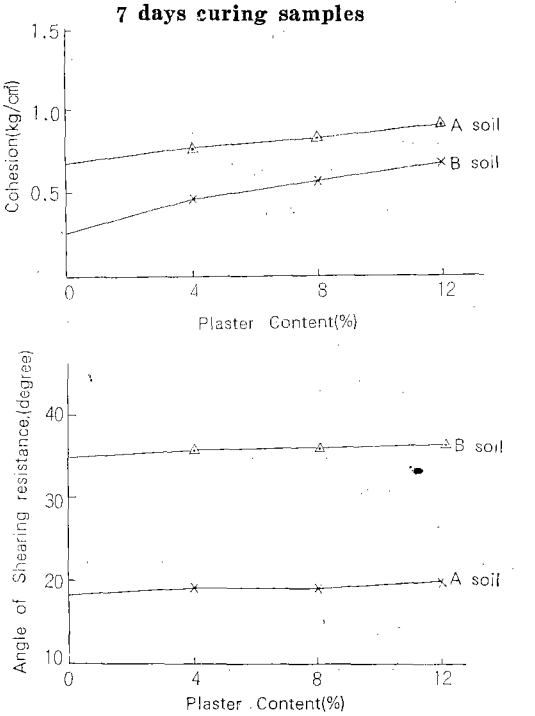

Fig. 5. Correlation of plaster content. cohesion and angle of shearing resistance

土의 膨脹量은 2.8%인 반면 플라스터混合量이 4, 8, 12%로 增加시킴에 따라 膨脹量은 2.3, 2.0, 1.8

%로 減少하였다.

B試料는 無處理土의 膨脹量은 0.1%이었으나 플라스터混合量이 4,8,12%로 增加됨에 따라 膨脹量이 각각 0.07, 0.05, 0.03으로 減少되었다.

Fig-5는 플라스터混合量과 粘着力(c) 및 剪斷抵抗角(ϕ)과의 關係를 나타낸 것으로 粘着力은 플라스터混合量의 增加에 따라 增加하였으며 특히 B試料는 A試料에 比하여 粘着力의 增加率은 컸다.

剪斷抵抗角은 A,B試料 모두 플라스터 混合量이 增加함에 따라 微少하게 增加되었으나, 이값은 무시할 수 있을 정도로 增加率이 낮았다.

4. 一軸壓縮强度

플라스터 混合土의 一軸壓縮强度試驗結果는 Fig. 6과 같다.

A試料는 플라스터 混合量 8%까지 壓縮强度는 增加하였으나 그 이상의 混合量에서의 壓縮强度는 減少하는 傾向을 보였고, B試料는 플라스터의 混合量을 增加시키면 一軸壓縮强度도 增加하는 傾向을 나타내었다. 다만 養生期間의 增加에 따라 强度는 약간 增加되었으나 크게 期待할 수는 없었다. 한편 消石灰 12% 混合土와 이에 消石灰重量의 4,8,12%의 플라스터를 2차 添加하였을 때의 壓縮强度는 Fig. 7과 같이 A試料는 플라스터 첨가량 8%를 B試料는 4%를 添加함으로써 石灰 고유의 强度를 增加시킬 수 있었다.

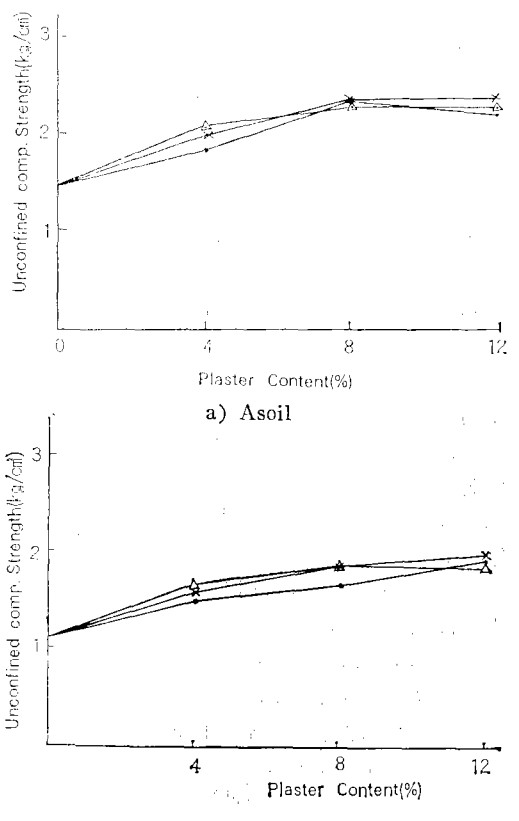

Fig. 6. Relationships between plaster content and unconfined compressive strength of plnster soil mixtures

5. 凍結·融解에 대한 抵抗性

凍上에 對한 메카니즘은 일찌기 Tabor[3]에 의하여 定立되었다. 凍上에 의한 피해는 한냉기후에서

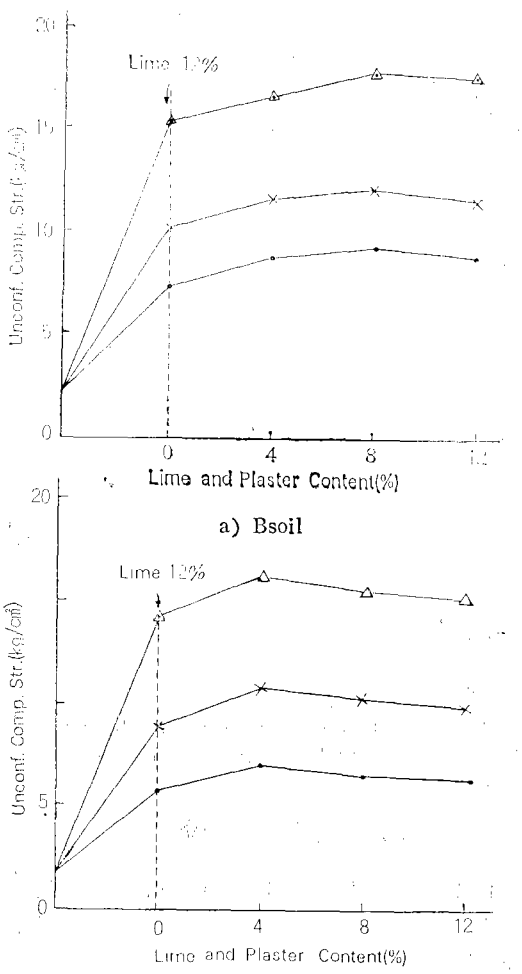

Fig. 7. Relationships between 12 percent of lime content added various contentof plaster and unconfined compre-ssive strength.

道路, 비행장에서의 pothole, 균열등을 들 수 있다. 凍上에 민감한 흙은 실트와 細砂로서, 이들 흙은 毛管水의 공급이 잘 되는 粒度와 透水性을 가지므로 ice-lens의 生成이 양호하기 때문이다.

凍結은 다짐에 의한 單位重量의 증가, 열에 의한 건조, 고결에 의한 보강, 배수, 혼합, 치환등의 방법으로 감소시킬 수 있다.[2)12)]

Fig. 8은 플라스터 混合量別 相對凍結率을 다음 公式으로 구하여 플라스터가 凍結에 미치는 영향을 比較한 것이다.

$$\text{相對凍結率} = \frac{T-C}{C} \times 100 \cdots\cdots (1)$$

C: 基準試料의 膨脹比(%)

T: 處理試料의 膨脹比(%)

A試料는 플라스터 8%에서 供試體의 相對凍結率은 비처리토에 비하여 16%감소하였으나 플라스터 混合量 12%에서는 오히려 증가되었다.

B試料의 相對凍結率은 플라스터혼합량 12%까지 계속 감소되었으며, 플라스터 混合量 8%에서는 相對凍結率은 39%로 감소되었다.

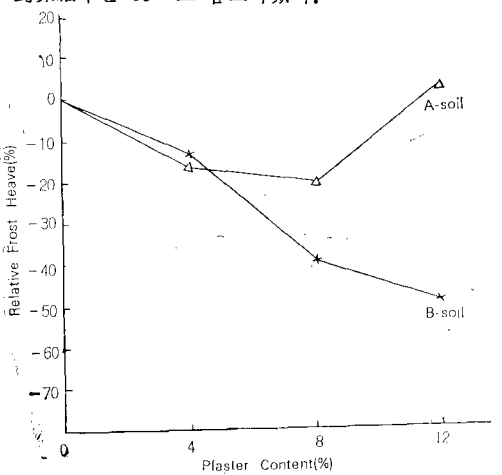

Fig. 8. Relationships between plaster content and relativ frost heave

Ⅳ. 考 察

1. 플라스터 混合土에서 플라스터는 單位重量, 透水性, 强度(支持力), 凍上 等 흙 고유의 성질에 큰 영향을 미친다.

플라스터의 효과는 다음과 같은 물과의 化學反應으로 설명이 可能하다.

$$\underset{\text{plaster}}{2(CaSO_4 \cdot \tfrac{1}{2}H_2O)} + \underset{\text{water}}{3H_2O} \longrightarrow$$

$$\underset{\text{gypsum}}{2(CaSO_4 \cdot 2H_2O)} \cdots\cdots (2)$$

한편 燐酸石膏는 濕式燐酸製造法에 의하여 生産되는 것으로 主反應은 다음과 같다.

$$3Ca_3(PO_4)_2 \cdot CaF_2 + 10H_2SO_4 + \frac{n}{0.1}H_2O \longrightarrow$$

$$6H_3PO_4 + 10(CaSO_4 \cdot 3H_2O) + 2HF \cdots\cdots (3)$$

이상의 반응에서 플라스터 (石膏)는 흙의 性質을 변화시키는 3가지의 反應을 일으킬 수 있다고 생각된다.

첫째, 土粒子사이의 공극이 部分的으로 石膏로 채워지며, 둘째 石膏는 土粒子와 反應을 일으키며 셋째 石膏는 土粒子의 部分的인 固結化로 인하여 흙의 强度를 增加시킨다는 것이다.[3)]

흙에 플라스터를 混合하면 최적함수비와 최대건조밀도가 變化된다.

loam土인 A試料의 경우 密度가 減少되는 이유는 石膏가 細粒子와 同一한 擧動을 하여 흙속에서 比重(2.30內外)이 작은 石膏가 比重이 큰 粘性土와 置換되기 때문이다.

한편, B試料에서 密度가 增加되는 이유는 물이나 空氣 대신 흙사이의 공극을 比重이 큰 石膏가 채워주기 때문이다.

간극비는 플라스터가 透水係數와 密度에 주는 영향을 究明하는데 도움이 된다.

흙에 플라스터 混合量 4%에서는 透水性이 급격히 저하되나, 8, 12%混合量에서는 減少率이 완만하였는데 初期의 급격한 透水性의 減少는 플라스터가 흙의 공극을 채우므로서 간극비의 감소 효과가 크기 때문이라고 생각된다.

플라스터 混合土는 粘着力과 剪斷抵抗角이 增加한다.

그 이유는 Coulomb-mohr의 式으로 설명할 수 있을 것같다.

즉, $\tau_p = \sigma \cdot \tan(\phi_m + \phi_c) + C_c + C_s \cdots\cdots (4)$

여기서, τ_p: 전단강도

σ: 유효수직응력

ϕ_m: 광물마찰계수

ϕ_c: 토립자의 접촉에의 한 마찰계수

C_c: 토립자의 접촉으로 인한 접착력

C_s: 불변성의 rigid structural cohesion

粘性土에 플라스터를 混合하였을 때 剪斷强度의 增加는 初期플라스터 혼합량의 增加로 우선 土粒子사이의 接觸에 의하여 形成되는 C_c가 급격히 증가되고 이는 또 C_s를 增加시키는 원인이 되기 때문이

라고 한다.[10,11] 이와같이 플라스터 혼합에 의한 전단강도의 증가는 점착력의 증가에 기인되며 마찰각에는 큰 영향을 미치지 않는다고 생각된다.

適量의 플라스터를 混合하여 다지면 强度가 증가되어 土粒子 사이의 結合力이 커지고, 吸水量이 減少되는 등 여러가지 效果가 複合되어 水浸後의 膨脹이 적어진다.

强度의 增加는 전술한 바와 같이 石膏가 흙과의 反應에 의하여 흙이 固結되기 때문이며, 아울러 石膏가 土粒子의 공극을 메워서 단위중량이 增加되기 때문이다.[18]

그러나 A試料의 경우 플라스터 混合量 8%에서 最大强度를 나타내었고, 그 이상에서는 減少되기 시작하였는데 그 이유는 石膏混合量이 어느 限界이상되면 土粒子와 石膏 相互間의 反應을 저해하여 固結作用으로 부터 얻을수 있는 利點이 상쇄될 뿐만 아니라 細粒子量이 증가하여 간극비가 커지기 때문이라고 생각된다.

한편 養生期間이 길어지면 石膏와의 反應이 深化되어 强度가 약간 增加되었으나 큰 强度는 기대할 수는 없다고 생각된다. 그리고 副產石膏만으로는 養生期間에 관계없이 强度增加는 거의 기대할 수 없었다.[18]

플라스터를 소석회에 제2첨가제로서 適量 添加하면 石灰고유의 强度보다 더 큰 效果를 期待할 수 있다. 특히 유기질이 약간 섞인 A試料는 强度增大效果가 컸는데 이는 石膏가 式(2) 또는 式(3)과 같은 反應에 의하여 石膏가 固結되면서 유기물질을 捕集하여 石灰와 칼슘이온과의 固結反應을 促進시켜 주기 때문이다.[18]

따라서 유기질 含量이 많은 연약지반에 深層改良工法으로 Gypsum-lime을 使用하는 例가 많으며[4,6] 이는 石灰보다 변위의 性質도 改善된다고 하였다.[7]

여기서 Gypsum-lime은 石灰에 binding劑로서 副產石膏를 加한 것으로 대략 生石灰에 대한 比率은 25%가 적당하다고 하며 이때 强度는 3倍정도 增加되었다고 한다. 이는 Gypsum-lime과 粘土속의 알루미나와의 反應에 의하여 바늘모양의 結晶을 가진 ettringite(calcium sulph aluminate)를 生成하기 때문이라고 한다.[4,5] 日本의 關東 loam의 安定處理材로서 工業用 消石灰에 燐酸副產石膏를 5~15% 添加하여 道路鋪裝 安定處理材로 使用한 例도 이와 같은 맥락에서 이루어진 것 같다.[15]

凍上의 有無 및 그 정도는 흙의 粒度, 透水性, 單位重量, 飽和度, 强度, 有效水分量 等에 좌우된다.

最適플라스터 混合量에서 相對凍結率이 적은 이유는 플라스터의 混合으로 透水係數가 減少되어 ice-lens의 生成을 低下시키고 壓縮强度(支持力)의 增加 및 플라스터 自體의 熱傳導率(0.23kcal/mh°C)이 적어 물의 氷點降下의 效果가 나타났기 때문으로 생각된다.[8]

이상의 結果를 綜合하면 플라스터를 良質土에 適量 混合하면 다짐密度 및 透水性의 變化, 强度의 增加, 凍上의 減少 등의 效果로부터 淺層安定處理 특히 道路의 補助基層材로서 使用可能한 것으로 判斷되며, 또한 石灰의 제2添加材로서 플라스터를 사용하여 道路基層 안정처리나 유기질이 섞인 軟弱地盤의 深層安定處理에 사용하면 보다 경제적일 것으로 판단된다.

V. 結 論

loam土와 砂質土에 石膏플라스터를 4, 8, 12% 混合하여 다짐, 透水, CBR, 一軸壓縮, 凍結試驗 등을 실시한 結果를 要約하면 다음과 같다.

1. 플라스터 添加量이 4%에서 透水係數는 급격히 減少되었으며, CBR試驗에서 플라스터 添加量이 增加됨에 따라 膨脹量은 減少되었다.

2. 플라스터 混合量이 增加됨에 따라 固結效果에 의하여 强度(支持力)가 增加되었으며 試料에 따라 最大强度를 나타내는 最適플라스터 混合量이 存在함을 알 수 있었다.

3. 消石灰에 適量의 플라스터를 混合使用하면 消石灰 混合土의 强度增大效果를 높일 수 있었다.

4. 砂質土의 경우 플라스터 混合土는 相對凍結率이 抵下되었으나 loam土의 경우 플라스터 混合量 12%에서는 非處理土보다 凍上이 增加되기 시작하였다.

따라서 試料에 따라 凍上防止를 위한 最適 플라스터 添加量이 存在하였다.

5. 위와 같은 結果를 綜合할 때 粒度가 良好한 砂質土에 適量의 플라스터를 添加하면 土性의 改良, 透水性의 減少, 强度의 增大, 凍上의 防止 等의 效果를 期待할 수 있으며, 따라서 道路의 補助基層材로서 使用이 可能할 것으로 判斷된다.

參 考 文 獻

1. Beskow, G: Soil Freezing and Frost Heaving with special Application to Road and Railroads, Swedish Geotechnical Society 36th Yearbook, No.375 (1935)
2. Davidson, D.T. and M. Mateos: Evaluation of gypsum as a soil stabilizing agent, Iowa State Univ. pp.338-340 (1960)
3. Feldman, L.A.; A study of the effect of plaster on frost susceptable soils, Thesis of Syracuse Univ. pp.1-40 (1979)
4. Holm. G. and R. Tränk and A. Ekström; Improving Lime Column strength with gypsum, 8th European Conference of soil mechanics and Foundation Engineering, Helsinki, Vol.2. pp. 903-907 (1983)
5. Kaplar, C.W.; Phenomenon and mechanism of Frost heaving, Highway Rescarch Record, No.309 pp.1-14 (1969)
6. Kujala, K. and P. Nieminen: On the Reactions with clays stabilized of gypsum-lime, 8th European conference of soil mechanics and Foundation Engineering, Helsinki, Vol.2, pp.929-932 (1983)
7. Kujala, K.: The use of gypsum in deep stabilization, 8th European Conference of soil Mechanics and Foundation Engineering, Helsink, Vol.2, pp.925-928 (1983)
8. National Cooperative Highway Research program Report 166: waste materials as potential replacements for Highway Aggregates, pp.3-24(1976)
9. Nieminen, P.: Soil stabilization with gypsum-lime, Intl. conf. on the use of by-products and waste in civil engineering Vol.1, Paris, pp.229-235(1978)
10. Petrukhin, U.P. and S.U. Alperovich: Performability of bases under gypsum lixiviation, SM&FE, translated from Russian, Vol. 204, pp.155-159(1982)
11. Petrukhin, U.P. and E.A. Arakelyan: Strength of Gypsum-clay soils and its variation during the leaching of salts, SM&FE, translated from Russian, Vol.21, pp.264-268(1984)
12. Sower, G.F.: Introductory soil mechanics and Foundations, Geotechnical Engineering, 4th edition MacMillan publishing Co. Inc. N.Y.(1979)
13. Taber, S.: Frost heaving, Journal of Geology, Vol.37, pp.428-461(1929)
14. 有泉 昌, : 消石灰 石膏混合による關東ロームの安定處理方法, 土木技術資料, 4-2, pp. 10-17 (1962)
15. 有泉 昌, 牧 陸正, 西島 高秀 : 關東ロームの石灰—石膏系による 土質安定處理現場試驗について, 土木技術資料, 5-3, pp.16-27(1963)
16. 都 德鉉 : 石灰混合土의 다짐 壓縮强度 및 耐久性에 對하여, 建國大學校農資源開發論集, 第10輯, pp. 101-117(1985)
17. 工業進興廳 : 石灰 및 石膏工業에 관한 技術세미나, pp. 63-112(1977)
18. 稻松敏夫, 渡邊亮一: 排脫石膏添加による法面安定處理現場試驗施工について, 日本土木學會 第34回 年次學術講演集, 第3部, pp.195-196(1979)