

흙의 粒度分布가 石灰混合土의 强度特性에 미치는 影響

Effect of Grain Size Distribution in Soil on the Strength Characteristics of Lime-Soil Mixtures

趙 誠 正* · 姜 又 默**
Cho, Seong Jeong · Kang, Yea Mook

Summary

The characteristics of compaction and unconfined compressive strength were investigated by mixing with lime to all soils adjusted by given percentages of two kinds of clays to sand to obtain the most effective distribution of grain size and the optimum lime content for soil stabilization.

In addition, unconfined compressive strength and durability were tested by adding of sodium metasilicate, sodium sulfate, sodium carbonate, sodium hydroxide and magnesium oxide to lime-soil mixture mixed with 8 percent lime to adjusted soil having the mixing percentage of 60 percent of cohesive black clay and 40 percent of sand by weight to get the effect and the optimum additive content of chemicals.

The results obtained were as follows;

1. With the addition of more lime, the optimum moisture content was increased, and the maximum dry density was decreased, whereas the more the amount of clay contained, the more was the value of optimum moisture content of lime-soil mixture and the less was the maximum dry density.

2. In the soil having more fine grain size the unconfined compressive strength was larger in the earlier stage of curing period, in accordance with the longer period, the mixing percentages of sand to clay showing the maximum unconfined compressive strength, on the basis of 28-day strength, were 60% : 40% (black clay) and 40% : 60% (brown clay) respectively.

3. The reason why the soil adjusted with black clay was remarkably bigger in the unconfined compressive strength than ones adjusted with brown clay for all specimen of lime-soil mixture was the difference in the kind of clay, the amount of chemical composition, the value of pH. Black clay was mainly composed of halloysite that reacted with lime satisfactorily, whereas the main composition of brown clay was kaolinite that was less effect in the enhance of unconfined compressive strength. Also the difference of unconfined compressive strength was because black clay was larger

*忠北大學校 農科大學

**忠南大學校 農科大學

in the amount of composition of calcium oxide and magnesium oxide in the value of pH affecting directly on the unconfined compressive strength of lime-soil mixture than brown clay.

4. In the lime-soil mixture mixed with 8 percent of lime to soil that mixing percentage of sand to black clay was 60% : 40%, on the standard of 7-day strength, the effect of chemical was arranged in the order of magnesium oxide, sodium carbonate, sodium sulfate, sodium hydroxide and sodium metasilicate.

5. The optimum amount of chemical being applicable to the maximum unconfined compressive strength of lime-chemical-soil mixture was 1 percent by weight for air dry soil in the case of adding sodium carbonate and 0.75 percent on sodium hydroxide, the unconfined compressive strength was increased continuously with increase of the amount of chemical up to 2 percent of chemical content in the lime-chemical-soil mixture added sodium metasilicate, sodium sulfate and magnesium oxide.

6. It was considered that the chemical played an accelerant role of early revelation of strength because the rate of increase of unconfined compressive strength of all of lime-chemical-soil mixtures was largest on the 7-day cured specimen.

7. The effect of test on freezing and thawing after adding suitable amount of chemical on the lime-soil mixture mixed with 8 percent of lime to soil that mixing percentage of sand to black clay was 60% : 40% was arranged in the order of magnesium oxide, sodium carbonate, sodium sulfate, sodium metasilicate and sodium hydroxide.

I. 結 論

우리나라는急速한經濟成長과 더불어各種建設工事が活潑해지고 특히,食糧自給을 위한農地基盤造成事業의一環으로西南海岸干拓事業이積極적으로推進되고있어 이에農道기타各種構造物의築造를 위한地盤改良工法の開發利用이切實하게되었다. 우리나라에서地盤改良工法の主材料로利用되어온石灰는全國에 걸쳐分布되어있고 그埋藏量이豊富¹⁾할 뿐 만 아니라改良效果도良好하여軟弱地盤安定處理 특히農道와用排水路의基礎工法은勿論이고良質의骨材를求하기 어려운一部地域에서道路의路床基層等各種安定處理材料로利用하기 위한研究가進行되어왔다.

石灰를使用하여土質改良한效果를土質工學的인側面에서 보면石灰混合土는粘土鑛物과石灰와의이온反應,포조란反應,炭酸化反應等的化學的인反應^{5,7,8,9,10,14,20)}과吸收,膨脹,發熱等的作用에依하여含水比의低下,권시스텐시의改善^{2,3)}

強度의增加^{15,20,27,30)}等 흙의工學的性質이改良된다. 또한石灰混合土의強度를向上시킬目的으로各種添加劑의效果 및 그의耐久性を檢討하기 위하여 X-ray 回折分析,示差熱分析,DTA 分析^{6,9,20)} 등에依한 흙과石灰 또는 흙과石灰와添加劑와의反應機構에對한研究가 많이試圖되고 있으나 아직도 권시스텐시, 다짐 및強度特性에對한未解決部分이 많이 남아있는實情이다.

本研究는石灰混合土의道路 특히農道鋪裝材料로서의利用可能性을究明하기 위하여2種類의粘土와砂質土를各各一定한比率로調整配合한後0, 2, 4, 6, 8, 10, 12%의石灰를混合하여 권시스텐시, 다짐 및一軸壓縮強度試驗을하였다. 또한試驗結果強度面에서 가장效果가 큰黑色粘土 60%와 모래 40%의配合土에 8%의石灰를處理한石灰混合土에 Sodium metasilicate, Sodium sulfate, Sodium carbonate, Sodium hydroxide, Magnesium oxide 等5種類의添加劑를乾燥土重量의 0, 0.25, 0.50, 0.75, 1.00, 1.50, 2.00%를添加하여 가장效果가 큰添加劑와各添加劑의最適添加量을求하였으며,

흙의 粒度分布가 石灰混合土의 強度特性에 미치는 影響

또한 凍結融解試驗에 依하여 耐久性을 檢討하였다.

本 研究에 使用한 試料는 No.10체를 通過하고 No.40체에 殘留한 粗粒土인 忠北 淸原郡 美湖川에서 採取한 모래와 No.40체를 通過한 細粒土인 全南 寧光에서 採取한 黑色粘土(Black clay)와 忠北 淸州近郊에서 採取한 黃褐色粘土(Brown clay)를 各各 一定한 比率로 配合하여 使用하였으며 그 配合比率는 Table-1과 같고 配合試料의 物理的 性質 및 化學成分은 Fig.1, 및 Table-2 및 Table-3과 같다.

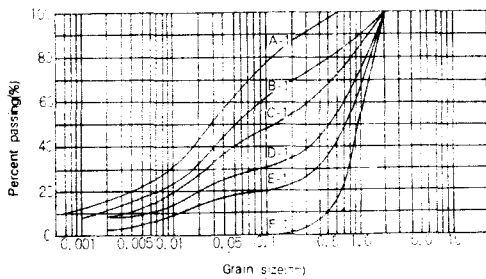
II. 材料 및 方法

1. 使用材料

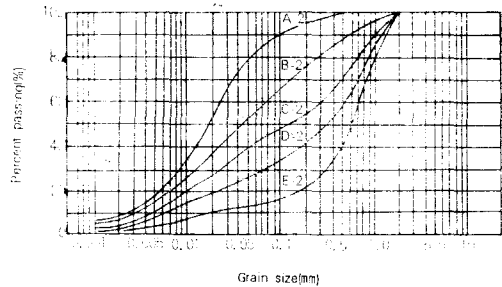
가. 試料土

Table-1. Mixing percentage of sand and clay

Samples of soil	Mixing percentage (%)		Samples of soil	Mixing percentage (%)	
	Clay (Black)	Sand		Clay (Brown)	Sand
A-1	100	0	A-2	100	0
B-1	80	20	B-2	80	20
C-1	60	40	C-2	60	40
D-1	40	60	D-2	40	60
E-1	20	80	E-2	20	80
F-1	0	100			



(a) Black clay



(b) Brown clay

Fig. 1. Grain size distribution curves

Table-2. Physical properties of soil

Samples of soil	Specific gravity	Natural moisture content (%)	Atterberg limit			Maximum grain size(mm)	Grain size distribution (Percent passing) (%)		
			LL (%)	PL (%)	PI (%)		No.10 sieve	No. 40 sieve	No.200 sieve
A-1	2.53	5.973	58.0	32.2	25.8	0.42	100.0	100.0	73.4
B-1	2.54	4.727	43.0	21.6	21.4	2.00	100.0	77.8	58.6
C-1	2.55	3.493	34.2	20.3	13.9	2.00	100.0	62.7	47.0
D-1	2.56	2.403	26.0	16.8	9.2	2.00	100.0	41.3	29.8
E-1	2.56	1.111	21.1	13.5	7.5	2.00	100.0	27.0	19.5
F-1	2.64	0.258	NP	NP	NP	2.00	100.0	0.0	0.0
A-2	2.58	6.200	47.1	30.4	16.7	0.42	100.0	100.0	90.3
B-2	2.60	4.920	38.1	26.1	12.0	2.00	100.0	77.6	63.2
C-2	2.61	3.170	33.7	22.9	10.8	2.00	100.0	57.4	46.7
D-2	2.63	2.530	25.0	15.3	9.7	2.00	100.0	42.0	30.0
E-2	2.64	1.650	19.8	12.0	7.8	2.00	100.0	21.9	16.0

Samples of soil	Coefficient of uniformity	Classification of soil		Maximum dry density (g/cm ³)	Optimum moisture content (%)	Main mineral composition	Location
		Unified soil class	AASHTO				
A-1	64.6	MH	A-7-6	1.522	25.60	Halloysite	Yong Kwang
B-1	62.9	CL	A-6	1.700	24.00		
C-1	102.9	SC	A-6	1.754	19.48		
D-1	113.3	SC	A-2-6	1.885	14.75		
E-1	80.0	SC	A-2-4	1.894	13.20		
F-1	2.0	SP	A-1-b	—	—	Quartz Kaolinite	Mi Ho River Cheong Ju
A-2	10.0	CH	A-7-5	1.445	27.55		
B-2	25.5	CL	A-6	1.567	24.50		
C-2	84.0	SC	A-6	1.696	18.50		
D-2	26.0	SC	A-2-4	1.843	15.40		
E-2	23.0	SC	A-2-4	1.850	14.60		

Table-3. Chemical composition of soil

Item Sample of soil	SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	Ignition loss (%)	pH
A-1	72.60	1.78	11.60	2.65	1.25	8.27	6.2
B-1	76.80	1.84	9.52	2.18	1.00	6.86	6.6
C-1	81.00	1.91	7.44	1.71	0.76	5.45	6.7
D-1	85.20	1.97	5.37	1.24	0.51	4.04	6.8
E-1	89.40	2.04	3.29	0.77	0.27	2.63	7.1
F-1	93.60	2.10	1.21	0.30	0.02	1.22	7.3
A-2	72.60	0.80	12.60	0.10	0.29	12.10	5.4
B-2	76.80	1.06	10.32	0.14	0.23	9.92	5.5
C-2	81.00	1.32	8.04	0.18	0.18	7.75	5.6
D-2	85.20	1.58	5.77	0.22	0.13	5.57	5.7
E-2	89.40	1.84	3.49	0.26	0.08	3.40	5.8

나. 石灰

本 研究에 使用된 石灰는 消石灰로서 그 物理的 性質 및 化學成分은 Table-4와 같다.

다. 添加劑

本 研究에 使用된 添加劑의 特性은 Table-5와 같다.

2. 試驗方法

가. 다짐試驗

다짐試驗用 몰드는 Davidson이 使用한 方法에 準

하여 Iowa state compaction apparatus를 製作 使用하였으며 內容積은 120.25cm³, 래머의 重量은 1.0085kg, 落下高는 25.02cm로 하여 3層 10回씩 다 짐으로서 다짐에너지를 標準다짐에너지와 같게 5.96kg·cm/cm³가 되도록 하였다. A-1, B-1, C-1, D-1, E-1 및 A-2, B-2, C-2, D-2, E-2 試料에 乾燥土 重量의 0, 4, 6, 8, 10, 12%의 石灰를 混合하여 위의 다짐方法으로 最適含水比와 最大乾燥密度를 求하였다.

Table-4. Physical properties and chemical composition of lime

Item Additive	Specific gravity	Percentage finer than No.200 sieve	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Ignition loss
Lime	2.40	95.08%	0.71%	0.13%	0.04%	71.4%	0.69%	26.6%

Table-5. Various kinds of additives

Characteristics	Sodium metasilicate (Na ₂ SiO ₃ ·9H ₂ O)	Sodium sulfate (Na ₂ SO ₄)	Sodium carbonate (Na ₂ CO ₃)	Sodium hydroxide (NaOH)	Magnesium oxide (MgO)
Appearance	Viscous Solution	White Powder	White Powder	Crystal Powder	White Powder
Source	Commercial	Commercial	Commercial	Commercial	Commercial

나. 壓縮強度試驗

A-1, B-1, C-1, D-1, E-1 및 A-2, B-2, C-2, D-2, E-2 試料에 石灰를 各各 乾燥土重量의 0, 4, 6, 8, 10, 12% 混合한 石灰混合土에 다짐 試驗에서 求한 最適含水比에 相當하는 量의 물을 計量混合하여 直徑 43mm, 높이 86mm의 몰드에 最大乾燥密度에 相當하는 量을 3회에 걸쳐 다져넣고 上下에서 plug에 依하여 油壓 jack로 壓縮해서 養生期間 0, 7, 14, 28 日에 對한 同一한 供試體를 3個씩 製作하였다. 또한 最大強度를 나타낸 C-1試料에 石灰 8%를 混合한 石灰混合土에 Sodium metasilicate, Sodium sulfate, Sodium carbonate, Sodium hydroxide, Magnesium oxide 等 5種類의 添加劑를 各各 乾燥土重量의 0, 0.25, 0.50, 0.75, 1.00, 1.50, 2.00%를 添加하여 위의 方法으로 供試體를 製作하였다. 供試體는 養生期間中 大氣中으로부터 炭酸 gas의 carbonation을 防止하기 위하여 비닐로 密封後 濕潤養生室에서 溫度 21±2°C, 濕度 95% 以上으로 維持하여 養生시켰다. 壓縮強度試驗은 容量 1,000KN의 Tinius Olsen 萬能試驗機를 使用하였다.

다. 耐久性試驗

역시 最大強度를 나타낸 C-1試料에 石灰를 8% 混合한 石灰混合土에 위의 5種類의 添加劑를 乾燥土重量의 0, 0.25, 0.50, 0.75, 1.00, 1.50, 2.00% 添加한 7日養生 壓縮強度供試體를 -23°C의 凍結 캐비닛속에서 24時間 凍結後 溫度 21±2°C, 濕度 95% 以上の 濕潤養生室에서 24時間融解를 1cycle로 하여 cycle의 增加에 따른 壓縮強度의 變化를 調査하였다.

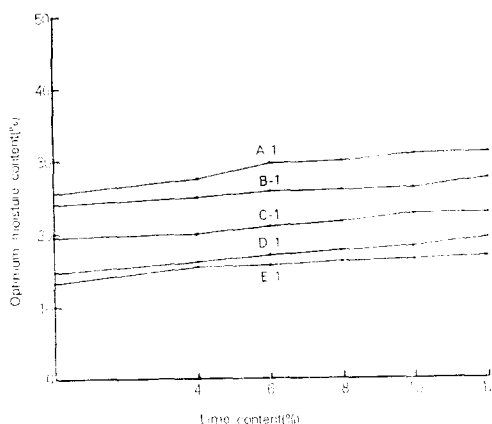
Ⅲ. 結果 및 考察

1. 石灰混合土의 다짐特性

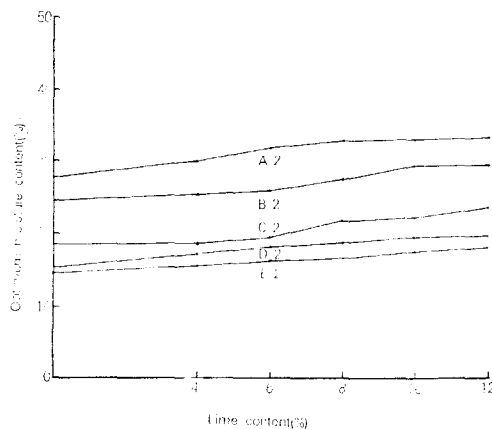
壓縮強度試驗用 供試體의 製作에 앞서 石灰混合土의 다짐特性을 究明하기 위하여 各 試料에 石灰混合量을 變化시키면서 다짐試驗을 한 結果 石灰混

合量과 最適含水比 및 最大乾燥密度와의 關係를 나타내면 Fig.2 및 Fig.3과 같다.

Fig.2는 粘土含有量에 따른 石灰混合量과 最適含水比와의 關係를 나타낸 것으로 Black 및 Brown clay 配合試料 모두 粘土含有量 및 石灰混合量이 增加할수록 모든 試料에 있어서 最適含水比는 增加되며 全般的으로 Black clay 配合試料가 Brown clay 配合試料에 比하여 最適含水比는 작은 값을 나

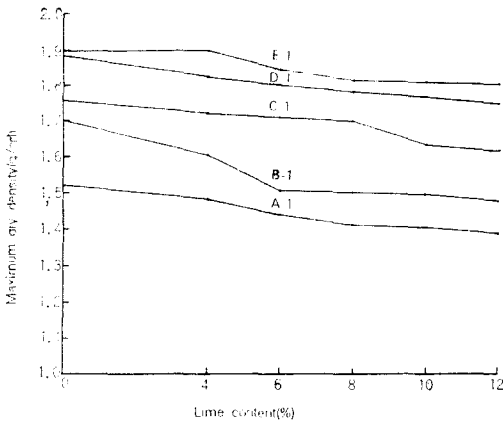


(a) Black clay

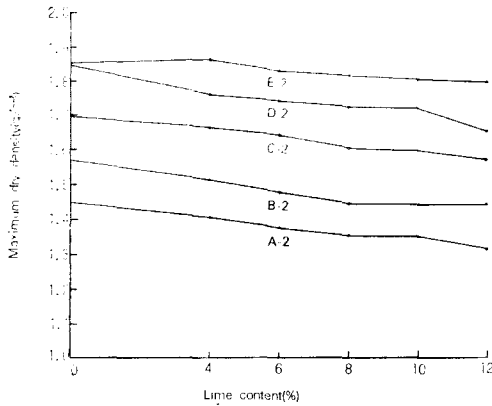


(b) Brown clay

Fig. 2. Relationship between lime content and optimum moisture content



(a) Black clay



(b) Brown clay

Fig. 3. Relationship between lime content and maximum dry density

타왔다.

Fig. 3은 粘土含有量에 따른 石灰混合量과 最大乾燥密度와의 關係를 나타낸 것으로 Black 및 Brown clay 配合試料 모두 粘土含有量이 增加할수록, 또 E-1 및 E-2 試料를 除外하고는 石灰混合量이 增加할수록 最大乾燥密度는 減少하는 傾向을 보였을 뿐만 아니라 그 減少率은 石灰 混合量이 增加할수록 若干 큰 傾向을 나타냈다. 이는 Hoover¹¹⁾, 佐藤²⁰⁾, Wang²⁴⁾ 등의 研究結果와 거의 一致되는 것으로 粘土含有量이 增加함에 따라 最大乾燥密度가 減少되는 理由는 粘土含有量이 많을수록 最大乾燥密度를 나타내기 위한 다짐狀態가 되려면 보다 많은 含水量을 要求하므로 이와같은 물의 增加는 그 量만

큼의 흙이 減少되므로 比重이 물보다 훨씬 큰 흙의 減少는 結局 最大乾燥密度를 減少시키게 하는 것이다. 또 石灰混合量이 增加할수록 E-1 및 E-2 試料를 除外하고는 最大乾燥密度가 減少되었는데 이는 粒子가 가는 石灰도 粘土와 같은 役割을 하기때문이며 石灰混合量이 增加할수록 最大乾燥密度의 減少率이 커지는 理由는 粘土에 比하여 比重이 작은 石灰가 比重이 큰 흙과 代置되기 때문에 생각된다. 다만 砂質土인 E-1 및 E-2 試料의 경우 石灰混合量 4%에서는 石灰 非處理土에 比하여 最大乾燥密度가 오히려 큰 값을 나타내고 있는데 이는 흙을 다질때 土粒子사이에서 binder의 役割을 하는 粘土의 量이 不足하므로 그 不足되는 量의 一部를 石灰가 補充해 주기 때문인 것으로 생각되며 이외에도 石灰가 濕한 흙과 混合되면서 化學反應에 依한 이온交換이 생겨 石灰混合土에서 agglomeration과 flocculation 作用에 影響되는 것으로 생각된다.

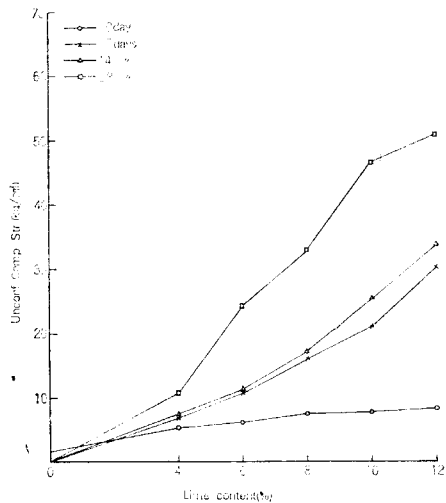
한편 粘土含有量이 增加됨에 따라 最適含水比가 增加되는 理由는 最大乾燥密度를 나타내는 다짐 狀態에서는 粘土含有量이 增加함에 따라 土粒子間의 空隙量이 增大되어 이 空隙에 土粒子 代身물로 채워져 있기 때문이며 또 石灰混合量이 增加할수록 最適含水比가 增加하는 理由는 石灰도 粘土와 같은 役割을 하여 그만큼 細粒子의 量이 많아지기 때문이며 이외에도 粘土含有量이 增加되면 試料全體의 比表面積이 커지기 때문에 물과 反應하는 土粒子의 面積이 넓어져 相對的으로 保水力이 增大되기 때문인 것으로 생각된다.

또한 halloysite가 主成分이고 比重이 작은 Black clay 配合土에 比하여 kaolinite가 主成分인 Brown clay 配合土가 大體的으로 最大乾燥密度가 작고 最適含水比가 큰 理由는 kaolinite 粘土는 다짐에너지의 傳達效果가 작기 때문인 것으로 생각된다.

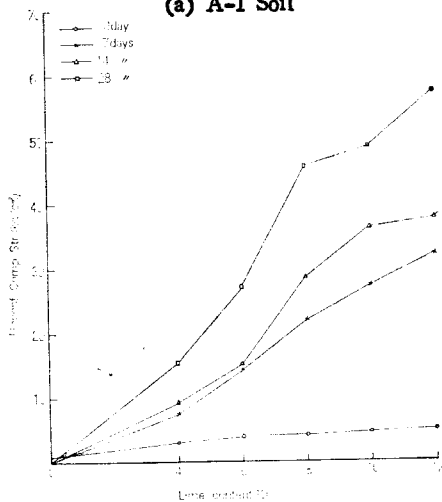
2. 石灰混合土의 壓縮強度特性

Table-1의 모든 配合土에 0, 4, 6, 8, 10, 12%의 石灰를 混合하여 다짐試驗에서 決定된 最適含水比와 最大乾燥密度로 供試體를 製作하여 0, 7, 14, 28 日의 養生期間에 따른 壓縮強度試驗을 한 結果 石灰混合量과 壓縮強度와의 關係를 나타내면 Fig.4 및 Fig.5와 같다. Fig.4와 Fig.5는 Black 및 Brown clay에 各各 모래를 配合한 試料로서 供試體의 成形直後의 強度는 細粒土일수록 큰 값을 나타내며

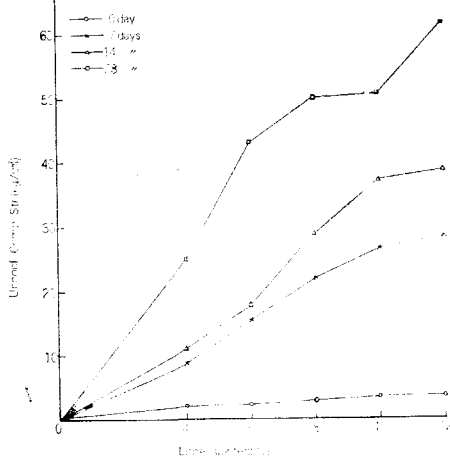
흙의 粒度分布가 石灰混合土의 强度特性에 미치는 影響



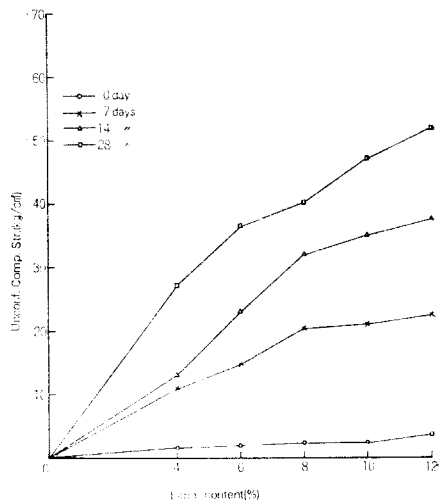
(a) A-1 Soil



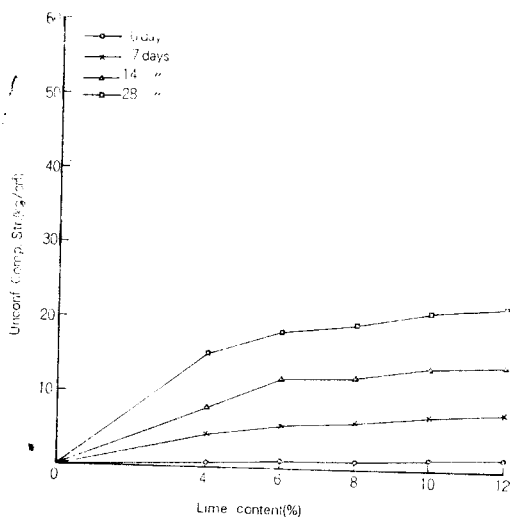
(b) B-1 Soil



(c) C-1 Soil



(d) D-1 Soil



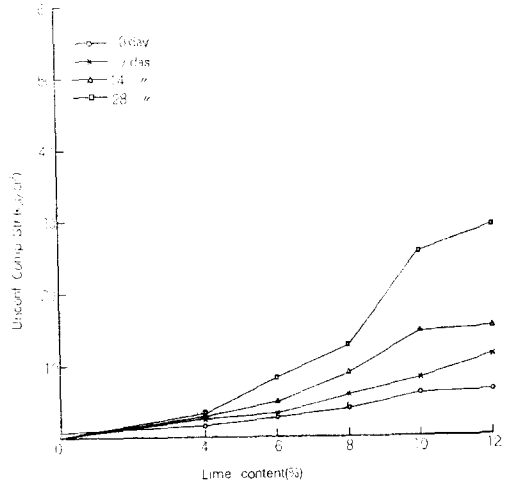
(e) E-1 Soil

Fig. 4. Relation of compressive strength to lime content by curing period in each soil (Black clay)

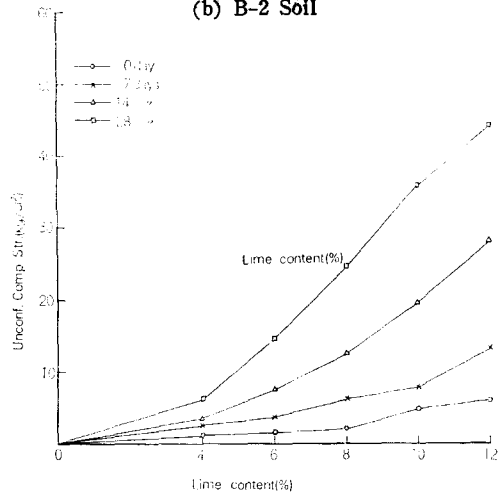
同一한 試料에서는 石灰混合量이 增加 할수록 큰 값을 나타냈다.

이와같이 細粒土와 粗粒土의 粒度配合이 良好한 試料에서 큰 값을 나타내는 理由는 흙의 粘着力과 内部摩擦角의 大小에 基因되며 Black clay 配合土

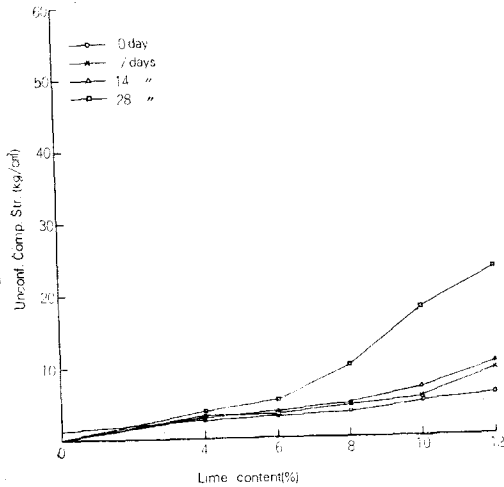
보다 Brown clay 配合土가 強度가 작은 理由는 Brown clay는 塑性과 다짐密度가 작기때문으로 생각된다. 또 石灰混合量이 增加할수록 強度가 커지는 理由는 石灰混合에 依한 稠士스텐시의 變化와 더불어 흙固有의 性質이 改善되기 때문이며 特히 粘着力의 增加가 主影響이 되는 것으로 생각된다. 그러나 養生期間이 7, 14, 28日로 길어지고 石灰混合量이 增加할수록 壓縮強度도 增加하는 傾向을 나타냈는데 흙의 種類와 粒度分布에 따라 큰 差異가 있었다. 即, 同一한 條件에서는 Black clay 配合土가 Brown clay 配合土에 比하여 強度가 顯著히 컸다. Black clay 配合土의 경우 A-1, B-1, C-1 等 粘土含有量이 많은 試料에서는 石灰混合量의 增加量에 거의 比例하여 強度가 增加되었으며 粘土含有量이 적은 E-1 試料는 石灰混合量 6%에서부터 強度增加率이 鈍化되었고, Brown clay 配合土는 粘土含有量이 많은 A-2, B-2 試料 및 粘土含有量이 가장 적은 E-2 試料는 石灰混合量 6%까지의 少量에서는 強度發現效果가 낮은 反面, C-2, D-2 等 粘土含有量이 40~60%인 中粒試料는 少量의 石灰混合量에서도 強度增加率이 比較的 컸다. 石灰混合量이 많아질수록 強度가 增加되는 理由는 粘土와 化學反應이 活潑해지기 때문으로 생각되며, 同一한 石灰混合量에서 養生期間이 길어질수록 強度가 增加되는 것은 養生期間이 길어짐에 따라 여러가지 物理化學的인 反應에 依한 cementing 作用에 基因되는 것



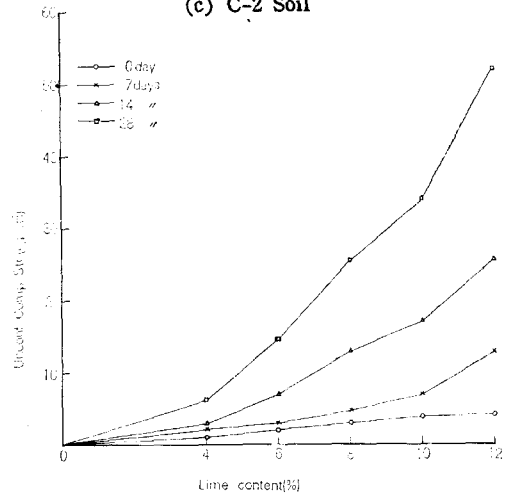
(b) B-2 Soil



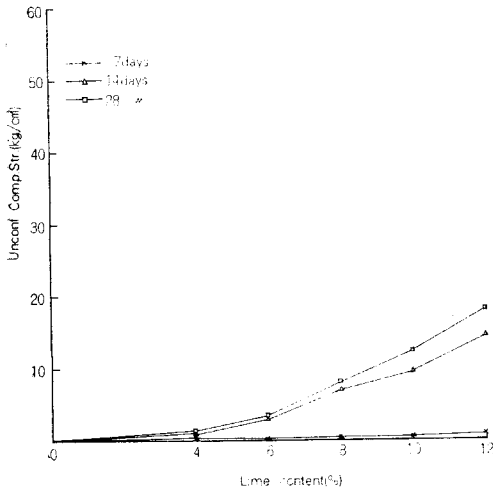
(c) C-2 Soil



(a) A-2 Soil



(d) D-2 Soil



(e) E-2 Soil

Fig. 5. Relation of compressive strength to lime content by curing period in each soil (Brown clay)

으로, 一般적으로 7일까지의 初期養生에서는 強度增加率이 큰 反面 14日, 28日等 養生期間이 길어짐에 따라 強度增加率은 鈍化되었다. 또 粘土含有量이 많은 試料에서는 7日부터 14日까지의 養生期間에서는 強度增加率이 比較的 緩慢하고 14日을 經過하면 다시 強度增加率이 큰 反面 粘土含有量이 적은 試料에서는 이와 反對現象이 나타났다. 또 養生期間이 길어짐에 따라 粘土含有量이 적은 試料에서 強度가 크게 나타났는데 이는 養生初期에는 反應에 의한 強度增加보다는 微細한 土粒子의 物理的인 性質에 의하여 強度發見이 생기고 試料의 粒子가 強度에 미치는 影響이 작으나 養生期間이 길어질수록 粒度에 의한 影響이 커지기 때문인 것으로 생각된다.

本 試驗에서 C-1 또는 C-2 試料과 같이 粘土가 60%内外, 모래가 40%内外로 混合한 試料에서 가장 理想인 安定處理效果가 나타나는데 이는 石灰混合土는 適正 粘土含有量이 있으며 그 以上の 粘土含有量에서는 石灰의 化學的 反應에 必要한 粘土量은 充分하나 다짐에 의한 흙의 密度가 작아지므로 強度는 오히려 減少되는 反面 適正 粘土含有量以下에서는 石灰의 化學反應에 必要한 粘土의 含有量이 不足하여 反應이 弱화된 硯 아니라 砂質土의 空隙에 充填된 細粒土의 不足으로 역시 密度가 작아지기 때문이다. 따라서 石灰의 反應에 꼭 必要한

良質의 粘土量과 다짐密度를 가장 높일수 있는 粗細粒의 粒度配合이 良好한 試料에서 強度가 가장 크게 나타날 것으로 생각된다. 또한 本試驗에서는 모든 試料가 最大石灰混合量인 12%에서 最大強度가 나타났으나, Herrin⁹⁾의 研究結果로 미루어 볼때 養生期間이 길어지면 石灰混合量이 12% 以內에서 最大強度를 나타낼 것으로 생각된다. 한편 Black clay 配合土의 最大強度를 나타내는 C-1 試料의 경우 石灰混合量 12%의 7日強度가 28.4kg/cm², 28日強度가 61.3kg/cm²인 反面, Brown clay 配合土인 C-2 試料는 同一한 條件에서 各各 13.2kg/cm², 44.0kg/cm²를 나타내어 Brown clay 配合土보다 Black clay 配合土가 顯著히 큰 強度를 나타냈다.

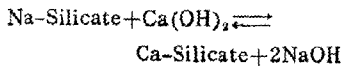
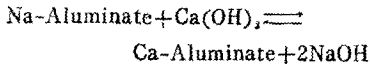
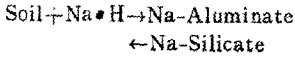
그리고 C-1, C-2 試料로서 道路工事補助基層材料로서 使用可能한 7日養生壓縮強度 10kg/cm²를 얻기 위한 石灰混合量은 各各 6% 및 12%이고, 基層材料에 必要한 強度 20kg/cm²를 얻기 위한 石灰混合量은 C-1 試料의 경우 8%이며 C-2 試料는 基層材料로서는 使用不可能한 것으로 나타났다. Shen¹¹⁾은 kaolinite 및 illite 粘土를 各各 모래와 여러가지 比率로 配合하여 5%의 石灰를 混合한 供試體의 強度試驗을 한 結果 illite 粘土 配合土가 kaolinite 粘土 配合土보다 2倍程度의 強度를 나타냈다고 하였다.

本 試驗에서 Black clay 配合土가 Brown clay 配合土보다 強度가 顯著히 크게 나타난 것은 Black clay는 石灰와의 反應이 良好한 halloysite가 主成分인 粘土인 反面 Brown clay는 kaolinite가 主成分이기 때문에 強度發見效果가 작으며, 또한 Table-3에 나타난 바와 같이 Black clay는 CaO, MgO의 化學成分의 量에 있어서 Brown clay 보다 各各 約 27倍, 5倍以上 成分量이 많으며 pH값은 0.8이 크기 때문인 것으로 생각된다.

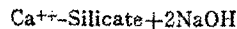
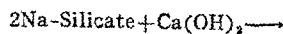
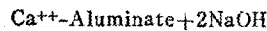
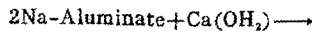
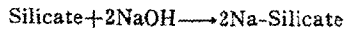
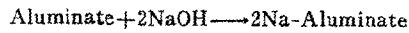
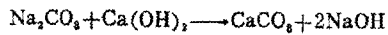
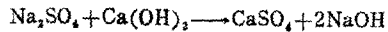
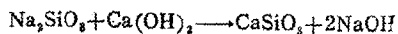
3. 添加劑에 의한 石灰混合土의 強度增進

石灰混合土에 對한 添加劑의 強度增進 效果는 흙과 石灰의 種類, 養生溫度와 濕度, 養生期間等 여러 要因에 따라 다르게 나타났은 前述한 바 있거니와 이에 添加劑를 使用하게된 契機는 早期強度의 增加와 耐久性의 增進 또는 石灰混合量의 減少等을 目的으로 하여 비롯되었다. 石灰混合土에서 添加劑가 作用하는 反應機構는 原來 粗粒인 모래는 細粒인 粘土에 比하여 比表面積이 매우 작기때문에 흙속에서의 化學反應은 主로 比表面積이 큰 粘土에서 일어나는데 粘土粒子는 Aluminat과 Silicat의 鹽

으로 構成되어 있어서 흙에 石灰과 Sodium hydroxide가 添加되면 複雜한 化學反應이 일어나 Sodium hydroxide에 依하여 土壤溶液의 pH가 上昇하며 이러한 條件下에서 흙 即 Aluminate나 Silicate의 表面이 反應性으로 되고 繼續적으로 Na-Aluminate나 Na-Silicate가 된다. 溶液中에 溶解되어 있는 石灰는 Na-Aluminate나 Na-Silicate와 反應하여 cementitious한 Ca-Aluminate나 Ca-Silicate가 되는 것이다. 即 式으로 表示하면 다음과 같다.

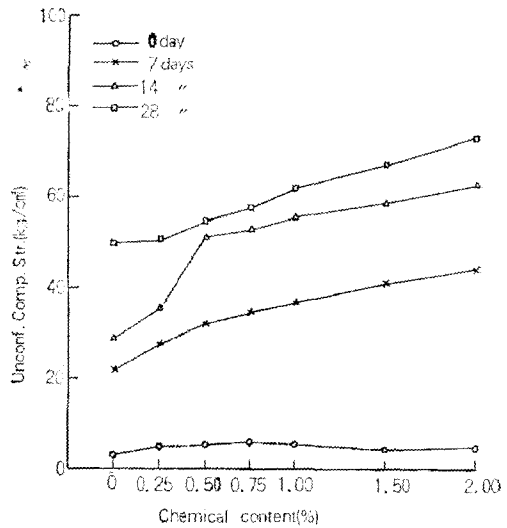


여기서 生成된 NaOH는 다시 粘土粒子的 表面을 反應性으로 만들어 위와같은 反應을 反復적으로 進行시킨다¹⁰⁾. 또한 石灰混合土에 Sodium metasilicate, Sodium sulfate 및 Sodium carbonate를 各各 添加하면 $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$, Na_2SO_4 , Na_2CO_3 共히 흙속에 均一하게 擴散되어 매우 쉽게 石灰(Ca(OH)_2)와 反應하여 NaOH를 生成하며 土壤溶液이 強알칼리성으로 되면 粘土粒子的 表面(Aluminate나 Silicate 表面)은 다른 物質과 反應하기 쉬운 狀態로 된다. 그러므로 Sodium hydroxide로부터 遊離된 Na^+ 이온이 粘土粒子表面에 쉽게 吸着 結合하게 된다. 石灰에서 解離되어 나온 Ca^{++} 이온은 2價의 荷電을 갖고 있기때문에 1價의 荷電을 갖고있는 Na^+ 에 比하여 靜電氣的(electrostatic) 結合이 더 強하므로 粘土粒子的 表面에 置換되어 들어감으로서 Ca-Aluminate나 Ca-Silicate로 되므로 cementing 作用을 하게 되는 것이다. 이와같은 現象을 式으로 表示하면 다음과 같다.

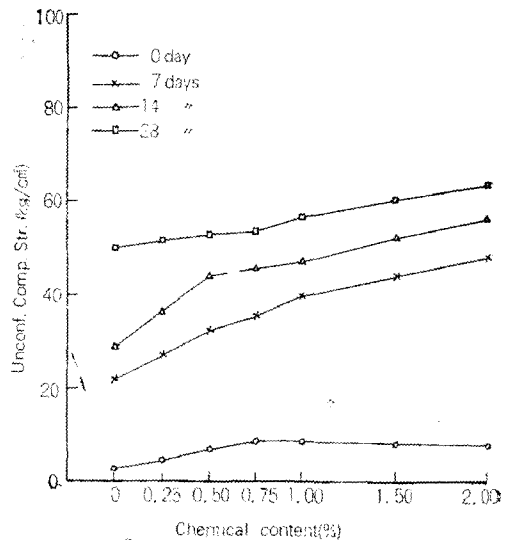


여기서 生成된 NaOH는 다시 粘土粒子的 表面을 反應性으로 만들어 위와같은 反應을 反復적으로 進

行시켜 漸漸 強度가 커지는 것이다^{15,16,17)}. 한편 Na_2CO_3 와 Ca(OH)_2 의 反應에서 生成된 CaCO_3 는 그 自體로서 土粒子를 結合시키는 cementing 作用을 한다²¹⁾. 石灰混合土에 添加劑를 添加하였을때의 效果를 究明하기 위하여 強度增進效果가 가장 큰 Black clay 配合土인 C-1 試料에 對하여 道路基層安定處理에 必要한 提案強度인 20kg/cm^2 以上을 얻을 수 있는 石灰混合量 8%를 基準으로 이에 工業用 化學

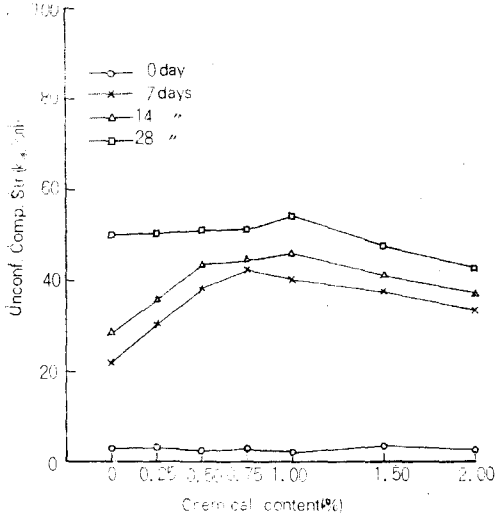


(a) Sodium metasilicate

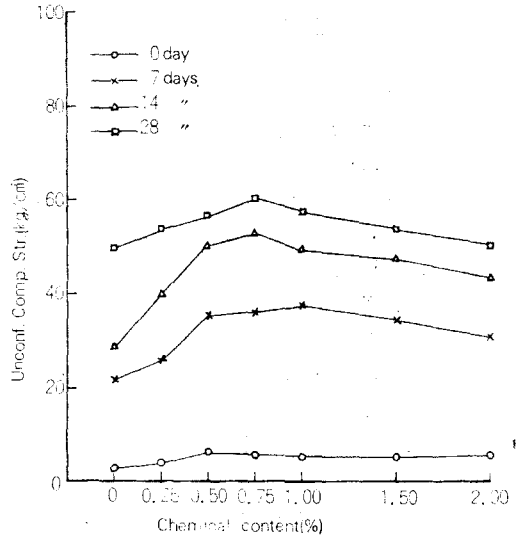


(b) Sodium sulfate

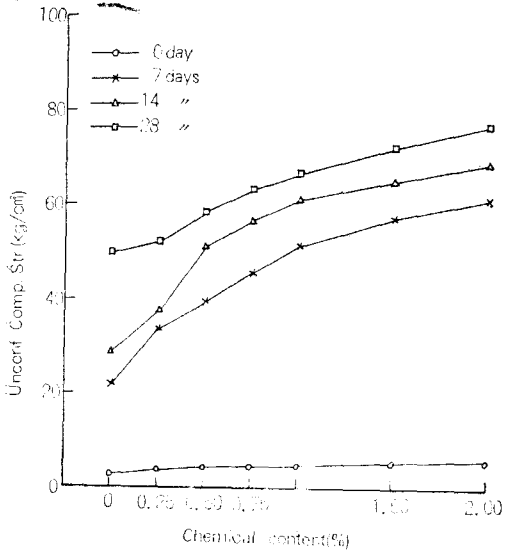
흙의 粒度分布가 石灰混合土의 強度特性에 미치는 影響



(c) Sodium carbonate



(d) Sodium hydroxide



(e) Magnesium oxide

Fig. 6. Relation of compressive strength of lime-chemical-soil mixture to chemical content by curing period in each kind of chemical

藥品인 Sodium metasilicate, Sodium sulfate, Sodium carbonate, Sodium hydroxide, Magnesium oxide를 添加劑로 乾燥土重量의 0, 0.25, 0.50, 0.75, 1.00, 1.50, 2.00%를 添加하여 製作한 供試體에 對하여 添加劑의 種類에 따른 添加量과 壓縮強度와의 關係를 養生期間別로 나타내면 Fig.6과 같다.

Fig.6에서 添加劑를 添加한 경우 成形直後の 供試體의 壓縮強度는 非處理 石灰混合土와 거의 비슷한 傾向을 나타냈으며 非處理 石灰混合土를 基準의

로 할 때 Sodium metasilicate, Sodium sulfate, Sodium hydroxide, Magnesium oxide 등은 添加量을 增加시키면 強度도 增加되는 傾向을 나타내며 Sodium carbonate는 이와 反對로 強度가 減少되는 傾向을 나타냈다. 한편 養生期間이 길어짐에 따라 強度도 增加되었고 材令 7日까지의 初期養生에서는 強度增加率이 커서 非處理 石灰混合土에 比해 早期 強度의 效果가 나타났으나 養生期間이 길어짐에 따라 強度의 增加率이 緩慢해짐은 역시 非處理 石灰混合土와 거의 비슷한 傾向을 나타냈다. 그리고 0.25, 0.50% 등 少量의 添加量에서는 強度 增加率이 顯著히 컸고 添加量이 많아질수록 強度增加率은 鈍化되었다. 特히 Fig.6 (a)(b)(e)의 Sodium metasilicate, Sodium sulfate, Magnesium oxide는 添加量이 2.00%까지 增加하여도 強度는 繼續 增加하였으나 Fig.6 (c)(d)의 Sodium carbonate, Sodium hydroxide는 0.75~1.00% 以上 添加하면 強度는 오히려 減少되어 最適添加量이 存在함을 알 수 있다. 이들 強度增加의 相互關係를 適正添加量으로 생각되는 添加量 1.00%에서의 強度를 比較하면 非處理 石灰混合土의 7日養生強度는 21.9kg/cm²에 不過 하였으나 強度發現效果가 가장 良好한 Magnesium oxide는 51.7kg/cm²로 137%의 強度增加를 보였고 그 다음 이 Sodium carbonate, Sodium sulfate, Sodium hydroxide, Sodium metasilicate 등의 順이며 가장 強度가 작은 Sodium metasilicate도 36.6kg/cm²로 非處理 石灰混合土에 比하여 67%의 強度增加를 나타냈다. 그러나 養生期間이 길어짐에 따

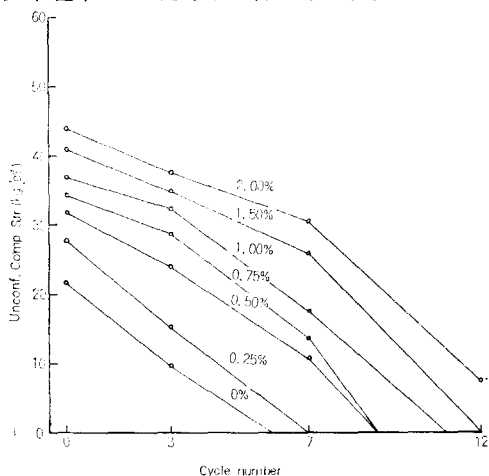
라若干 달라져 非處理 石灰混合土의 28日 養生強度를 基準으로 할때 強度增進效果가 가장 큰 添加劑는 역시 Magnesium oxide로서 28日 養生強度가 67.1kg/cm²이었고 그 다음이 Sodium metasilicate, Sodium hydroxide, Sodium sulfate의 順이었으며 強度增進效果가 가장 작게 나타난 Sodium carbonate는 54.0kg/cm²이었다. Ladd¹⁸⁾는 New Hampshire silt로 부터 粘土에 이르는 4種類의 흙에 對한 添加劑의 強度特性 試驗에서 Sodium hydroxide, Sodium metasilicate, Sodium sulfate 등 Sodium 化合物의 添加는 石灰混合土의 強度를 增加시켰는데 그 增加效果는 흙의 種類, 化學添加劑의 添加量 및 養生期間에 따라 다른데 그 中에서 Sodium metasilicate가 가장 效果가 컸다고 하여 本試驗結果와 다르게 나타났고, Davidson¹⁹⁾은 粘土含有量이 35~75%인 Iowa 흙에 對한 石灰와 添加劑의 效果에 對한 試驗에서 calcitic 消石灰와 Sodium carbonate는 一定한 最適含量이 나타났는데 石灰를 6% 混合한 石灰混合土에서 2%의 Sodium carbonate의 添加가 가장 理想的이었다고 하였으며, Sodium hydroxide는 粘土를 使用할 石灰混合土의 포조란 反應의 促進劑로서 效果가 컸고, calcitic 消石灰를 使用할 경우 最適石灰混合量은 6~8%이고 最適 Sodium hydroxide 添加量은 1~2%이었다고 하였다.

本 研究結果와 이들의 研究結果를 比較할때 添加劑의 種類에 依한 強度增加의 效果가 거의 비슷한 現象을 나타냈는데 石灰混合土의 添加劑의 添加에 依한 強度增進의 反應機構는 前述한 바 있거니와 Magnesium oxide의 添加가 큰 強度를 나타낸것은 Magnesium oxide는 그 自體가 一種의 良質의 dolomitic monohydrate 石灰로서 追加添加의 效果때 문으로 생각되며 Sodium metasilicate의 경우는 水溶性인 Sodium metasilicate가 石灰混合土 全體에 골고루 섞여 擴散되기 때문에 強度發現의 原因이 되는 흙粒子的 Silicate의 量을 增加시키는데 基因되는 것으로 생각된다. 또 Sodium metasilicate, Sodium sulfate, Magnesium oxide는 添加量이 增加할수록 強度가 增加되었으나 強度增加率은 添加量이 增加할수록 漸次 鈍化되어 非經濟的이므로 適正 添加量을 1~2%로 하는것이 바람직하다고 생각되며, Sodium carbonate, Sodium hydroxide는 一定量 以上 添加하면 오히려 強度가 減少되므로 이들의 適正添加量은 0.75~1.00% 範圍로 나타났다. 以上과 같이 適合한 添加劑를 少量 添加하므로써 同

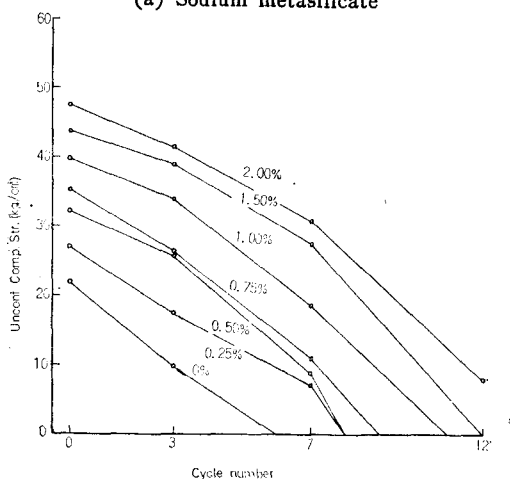
일하는데 要求되는 石灰混合量을 減少시킬수 있어 經濟的일 뿐만 아니라 石灰安定處理後의 耐久性도 增加시킬 수 있을 것으로 期待된다.

4. 石灰混合土의 耐久性 檢討

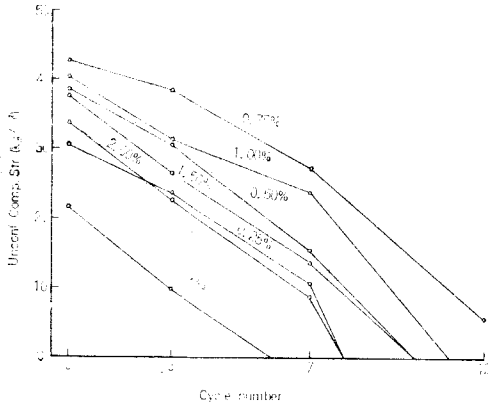
石灰混合土의 耐久性檢討方法은 KS F 2330 및 2332에 準하여 7日養生 供試體에 對한 乾濕 및 凍結融解 cycle 反復後 規定된 方法으로 供試體表面을 철사솔로 긁어서 重量 損失量을 測定判定토록 되어 있으나 이는 濕潤狀態에서의 試驗이므로 正確한 供試體 침수의 變化量과 損失量을 實測하기 어려운 問題點이 있으므로 乾濕 또는 凍結融解의 cycle 反復에 따른 強度의 減少量을 測定하여 耐久性의 基準으로 定하려는 努力이 많이 이루어졌다.



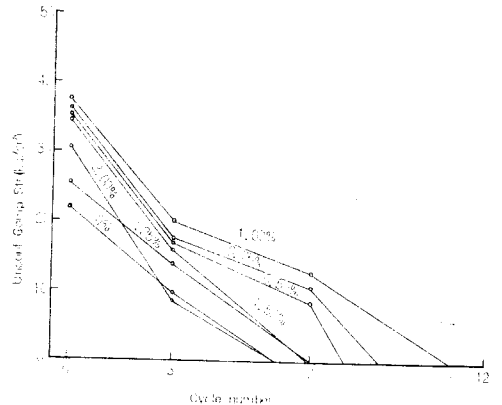
(a) Sodium metasilicate



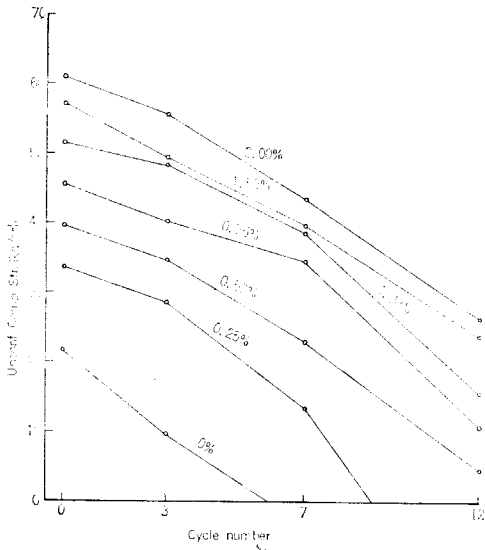
(b) Sodium sulfate



(c) Sodium carbonate



(d) Sodium hydroxide



(e) Magnesium oxide

Fig. 7. Relationship between unconfined compressive strength and cycle number of freezing and thawing

11, 22, 25, 28). 우리나라와 같은 氣候條件에서는 乾濕의 反復보다는 冬期の 凍結融解에 依하여 耐久性이 左右되므로 本 研究에서는 強度效果가 가장 큰 C-1 試料에 石灰混合量 8%와 이에 5種類의 添加劑의 添加量을 變化시킨 7日 養生供試體에 對하여 凍結融解 cycle 反復에 따른 壓縮強度試驗을 하여 cycle 횟수와 壓縮強度와의 關係를 添加劑의 添加量別로 나타낸바 Fig.7과 같다. Fig.7에서 보는바 같이 7日養生強度가 작은 供試體일수록 凍結融解의 cycle 反復 횟수가 작아도 쉽게 崩壞되었고 添加劑의 添

가에 依하여 7日養生強度가 큰 供試體는 凍結融解 cycle이 12회까지 反復되어도 強度의 減少率은 작게 나타났다. 即 7日養生強度 21.9kg/cm²의 非處理石灰混合土는 凍結 및 融解 6 cycle에서 供試體가 崩壞되었으나 이에 添加劑를 適量 添加하여 強度가 크게 增加된 供試體는 12 cycle 以上 反復되어도 壓縮強度는 比較的 큰 값을 維持하였는데 Sodium metasilicate, Sodium sulfate, Sodium carbonate, Magnesium oxide 등의 添加劑는 이의 添加量이 增加할수록 cycle 反復에 따른 強度의 減少가 적어 12 cycle까지 維持된 反面, Sodium hydroxide의 경우는 添加量 0.75~1.00% 範圍까지는 添加量이 增加할수록 強度의 減少는 적었으나 適正添加量 以上으로 過多하게 添加한 供試體는 Cycle 反復에 따라 強度가 크게 減少되었다.

이와같이 石灰混合土의 凍結融解에 對한 抵抗性은 凍結融解 cycle 反復이 始作되기 前의 7日 養生 壓縮強度와 密接한 關係가 있으며 添加劑의 使用으로 耐久性을 增加시킬 수 있을것으로 생각된다.

한편 3 cycle까지의 凍結融解 初期에는 強度의 減少率이 컸고 7~12 cycle로 反復 횟수가 增加됨에 따라 強度의 減少率이 작은 理由는 cycle 反復 前의 7日 養生供試體는 아직 所定의 強度가 發現되지 못한 狀態에서 凍結融解作用을 받았기때문에 이에 對한 抵抗性의 弱화에 基因된 것으로 생각되며 cycle 횟수가 많아짐에 따라 強度의 減少率이 작은 理由는 凍結融解가 反復되어도 融解時 石灰의 化學反應에 따른 強度의 增加要因이 複合的으로 나타나기 때문인 것으로 생각된다. 凍結融解에 對한 耐久性 檢討方法의 一選으로 試驗後 壓縮強度를 基準으

로 하는 規定은 아직까지 定하여지지 않았으나 다만 工事目的에 따라서 7日, 14日 또는 28日 養生後 凍結融解試驗을 始作하는 경우도 있고 또 凍結融解 溫度 역시 一律적으로 規定되어 있지는 않은 實情이다. Ruff²³⁾에 依하면 石灰混合土의 7日養生供試體에 對한 -5°C 및 $+25^{\circ}\text{C}$ 로 14日間 凍結融解試驗 後의 壓縮強度는 40~60% 減少되었다고 하였고 Mateos²⁴⁾는 Gumbotil 粘土에 對한 石灰-flyash 混合土의 28日 養生後 -6.6°C 및 $+25^{\circ}\text{C}$ 로 10日間 凍結融解試驗을 한 結果 13~32%의 強度가 減少되었다고 하였다. 또 三嶋²⁵⁾은 日本의 山砂에 對한 石灰混合土의 7日養生 供試體에 對하여 -15°C 및 $+21^{\circ}\text{C}$ 로 凍結融解시킨 結果 石灰混合量의 大小에 關係없이 1 cycle에서 이미 崩壞되었다고 하였다. 道路基層安定處理에 使用되는 石灰混合土의 壓縮強度를 $20\text{kg}/\text{cm}^2$ 로 하고 本 試驗에서 C-1 試料과 같은 良質材料는 石灰混合量 8%로서 凍結融解에 따른 耐久性에 問題點이 없다는 前提下에 本 試驗에서와 같이 -23°C 및 $+21^{\circ}\text{C}$ 의 濕潤養生方法으로 6 cycle 以上 維持되면 耐久性面에서 安全하다고 假定할때 위와 같이 適量의 添加劑를 使用하여 石灰混合量을 어느 程度 減少시키면서도 耐久性을 滿足시킬 수 있을 것으로 생각된다.

IV. 摘要

흙의 安定處理에서 石灰混合의 效果가 가장 좋은 粒度配合 및 各 粒度別 最適 石灰混合量을 求하기 위하여 2種類의 粘土와 모래를 各各 一定한 比率로 配合한 試料에 石灰를 混合하여 다짐 特性 및 軸 壓縮強度試驗을 하였다.

또한 添加劑의 種類別 效果 및 最適添加量을 求하기 위하여 Black clay 60%와 모래 40%의 配合土에 8%의 石灰를 混合한 後 Sodium metasilicate, Sodium sulfate, Sodium carbonate, Sodium hydroxide, Magnesium oxide 등 5種類의 添加劑를 使用하여 壓縮強度 및 耐久性試驗을 한 結果를 要約 하던 다음과 같다.

1. 粘土含有量이 增加할수록 最大乾燥密度는 減少하였고 最適含水比는 增加하였으며, 石灰混合量이 增加할수록 最適含水比는 增加하였고 最大乾燥密度는 減少하였다.

2. 細粒土가 많은 흙일수록 養生初期에 壓縮強度가 컸고 養生期間이 길어짐에 따라 最大強度를 나

타내는 粘土와 모래의 配合比率는 28日強度를 基準으로 할때 Black clay에서는 60:40%, Brown clay에서는 40:60%의 比率로 各各 配合된 試料에서 나타났다.

3. 모든 石灰混合土의 供試體에서 Black clay 配合試料가 Brown clay 配合試料보다 強度가 顯著히 크게 나타난 原因은 Black clay는 石灰와의 反應이 良好한 halloysite가 主成分이고 Brown clay는 強度發現效果가 작은 kaolinite가 主成分이기 때문이며, 또한 石灰混合土의 強度에 直接的으로 影響을 미치는 CaO, MgO의 含量 및 pH의 값이 크기 때문이다.

4. Black clay 60%, Sand 40%의 配合土에 石灰 8%를 處理한 石灰混合土에서 添加劑의 效果는 7日 強度를 基準으로 할때 Magnesium oxide, Sodium carbonate, Sodium sulfate, Sodium hydroxide, Sodium metasilicate의 順으로 나타났다.

5. 添加劑의 量은 Sodium carbonate는 1.00%, Sodium hydroxide는 0.75%에서 最大強度를 나타냈고 Sodium metasilicate, Sodium sulfate 및 Magnesium oxide는 添加量 2.00%까지 添加量의 增加에 따라 壓縮 強度가 繼續 增加하였다.

6. 添加劑의 使用에 의한 壓縮強度의 增加率은 7日 養生한 供試體에서 큰 값을 나타냈으므로 添加劑가 早期強度發現의 促進劑의 役割을 하는 것으로 생각된다.

7. Black clay 60%, Sand 40%의 配合土에 石灰를 8% 處理한 石灰混合土에 添加劑를 適量 添加하여 凍結融解試驗을 한 結果는 Magnesium oxide, Sodium carbonate, Sodium sulfate, Sodium metasilicate, Sodium hydroxide의 順으로 耐久性이 크게 나타났다.

參考文獻

1. Ahmed, S.A.: Lime-soil mixtures for low-volume road construction in Egypt. TRR, 827, 27-29 (1981)
2. 淺川美利, 渡邊茂: 石灰安定處理 における 配合設計法試案. 第13回 土質工學研究發表會, 665-668(1978).
3. 趙誠正: 石灰混合土의 強度特性에 關한 研究. 韓國農工學會誌, 22(3), 46-59 (1980)
4. Davidson, D.T., Mateos, M., and Barnes

- H. F. : Improvement of lime stabilization of montmorillonitic clay soils with chemical additives. HRB, 262, 33-50 (1960)
5. Eades, J.L., and Grim, R. E. : Reaction of hydrated lime with pure clay minerals in soil stabilization. HRB, 262, 51-63 (1960)
 6. Eades, J.L., and Grim, R. E. : A quick test to determine lime requirements for lime stabilization. HRR, 139, 61-72(1966)
 7. Glenn, G.R., and Handy, R.L. : Lime-clay mineral reaction products. HRR, 29, 70-82 (1963)
 8. Herrin, M., and Mitchell, H. : Lime-soil mixtures. HRB, 304, 99-138 (1961)
 9. Herzog, A., and Mitchell, J.K. : Reactions accompanying stabilization of clay with cement. HRR, 36, 146-171 (1963)
 10. Hilt, G.H., and Davidson, D.T. : Lime fixation in clayey soils. HRB, 262, 20-32 (1960)
 11. Hoover, J.M., Handy, R.L., and Davidson, D.T. : Durability of soil-lime-flyash mixes compacted above standard proctor density. HRB, 193, 1-11 (1958)
 12. Jan, M.A., and Walker, R.D. : Effect of lime, moisture and compaction on a clay soil. HRR, 29, 1-12 (1963)
 13. 全夢角 : 石灰에 의한 土質安定處理. 大韓土木學會誌, 23(3), 61-66 (1975)
 14. Jones, C.W. : Stabilization of expansive clay with hydrated lime and with portland cement. HRB, 193, 40-47 (1958)
 15. Ladd, C.C., Moh, Z.C., and Lambe, T.W. : Recent soil-lime research at the Massachusetts Institute of Technology. HRB, 262, 64-85 (1960)
 16. Lambe, T.W., Michaels, A.S., and Moh, Z. C. : Improvement of soil-cement with alkali metal compounds. HRB, 241, 67-108(1960)
 17. Lawrence, W.G. : Clay-water systems, 1-176 (1971)
 18. 松尾新一郎, 宋永焜 : 石灰およびリン酸 安定處理土におよぼす2次添加物の効果. 第6回 土質工學研究發表會, 301-304 (1971)
 19. 松尾新一郎 : 石灰安定處理工法. 土質安定工法便覽, 215-242 (1976)
 20. 松田應作, 工藤矩弘, 下田正雄, 高橋秀雄 : 生石灰處理土の諸性質(その1) 第1回 土質工學研究發表會
 21. Mateos, M., and Davidson, D.T. : Further evaluation of promising chemical additives for accelerating hardening of soil-lime-flyash mixtures. HRB, 304, 32-50 (1961)
 22. Mateos, M., and Davidson, D. T. : Lime and flyash proportions in soil, lime and flyash mixtures, and some aspects of soil lime stabilization. HRB, 335, 40-64 (1962)
 23. Mateos, M., and Davidson D.T. : Compaction characteristics of soil-lime-flyash mixtures. HRR, 29, 27-41 (1963)
 24. Mateos, M. : Soil lime research at Iowa State University. Jour of soil mechanics and foundations division. ASCE. Proc, 127-153 (1964)
 25. 三嶋信雄 : 粒徑のそろった山砂の 強度特性について. 日本道路公團試験所報告, 18-36 (1971)
 26. Pietsch, P.E., and Davidson, D.T. : Effects of lime on plasticity and compressive strength of representative Iowa soils. HRB, 335, 11-30 (1962)
 27. Remus, M.D., and Davidson, D.T. : Relation of strength to composition and density of lime-treated clayey soils. HRB, 304, 65-75 (1961)
 28. Ruff, C.G., and Davidson, D.T. : Lime and sodium silicate stabilization of montmorillonite clay soil. HRB, 304, 76-92 (1961)
 29. Ruff, C.G., and Ho, C. : Time-temperature strength-reaction product relationships in lime-bentonite-water mixtures. HRR, 139, 42-60 (1966)
 30. 佐藤勝久, 福手勤, 佐藤峰夫 : 石灰安定處理材の舗装上層路盤としての適用性. 第11回 土質工學研究發表會, 1069-1072 (1976)
 31. Shen, C.K., and Li, S.K. : Lime stabilization of clay-sand mixtures. HRR, 315, 91-101 (1970)

<32~36 省略>