함수비 증가에 따른 심층혼합지반의 강도특성

The Strength Characteristics of Deep Mixing Ground According to Increasing Water Contents

박 춘 식 Park, Choon-Sik 최 준 삼 Choi, Jun-Sam

Abstract

A laboratory test on uniaxial compressive strength was carried out by making 640 specimens in total, which were divided into two groups by their curing time of 7 and 28 days for 3 water content conditions of a water content at 100% saturation level and 10% and 20% increased water content from the state with clay, sand and gravel mixed grounds of 20 ground conditions of 4 types of stabilizer mixing conditions which were 8%, 10%, 12%, 14%, to understand laboratory strength characteristics for strength design of deep mixing ground. In case of clayey grounds, although the strength increased depending on the increase of stabilizer content, it showed to be analogous regardless of the curing time. And the impact on the strength development of deep mixing specimen according to water content was considered to be comparatively little compared to other grounds. For sandy grounds, the strength increment amount clearly showed to increase as stabilizer content increased, and also the increase of water content was determined to be decreasing the strength increment effect. For gravel mixed grounds, at 14% or over of stabilizer content, the effect on strength development was big making a large increase in strength, but compared to sandy grounds, the strength ratio depending on the curing time showed to be small.

요 지

심층혼합지반의 강도설계를 위한 실내강도 특성을 파악하고자 점토질, 모래질, 자갈질의 20가지 지반조건, 8%, 10%, 12%, 14%의 4가지 안정재 혼합비조건, 포화도 100%에 대한 함수비와 그 때의 함수비에 10%, 20% 증가된 3가지 함수비조건에 대하여 7일 및 28일 양생기간 별로 두 개씩 총 640개의 공시체를 제작하여 일축압축강도에 대한 실내시험을 수행하였다. 점토질 지반의 경우 안정재 혼합비가 증가함에 따라 강도가 증가하지만 양생기간에는 관계없이 비슷하게 나타났으며, 심층혼합시료의 강도발현에 함수비에 대한 영향이 다른 지반에 비해 비교적 적을 것으로 판단되었다. 모래질 지반은 안정재 혼합비가 증가할수록 강도증가량이 뚜렷하게 증가하는 것으로 나타났고, 또한함수비 증가가 강도증가 효과를 감소시키는 것으로 판단되었다. 자갈질 지반은 안정재 혼합비 14% 이상에서는 강도발현에 영향이 커서 강도증가가 크게 나타났지만 모래질 지반에 비하여 양생에 따른 강도비는 작게 나타났다.

Keywords: Deep mixing ground, Strength characteristics, Stabilizer, Water contents, Curing time

Copyright © 2019 by the Korean Geotechnical Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

¹ 정회원, 창원대학교 공과대학 토목환경화공융합공학부 교수 (Member, Prof., School of Civil, Environmental and Chemical Engrg., Changwon National Univ., Tel: +82-55-213-3772, Fax: +82-55-285-9491, pcs@changwon.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

² 정회원, 공학박사, 금보건설 대표이사 (Member, Doctor of Engrg., CEO of Kumbo Construction)

^{*} 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2019년 9월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서 론

1960년대 후반에 심층혼합처리공법이 개발된 이후로 여러 학자들에 의해 그 특성에 대한 연구가 이루어졌고 (Terashi and Tanaka, 1981, 1983; Terashi et al., 1979, 1980, 1983a, 1983b; Pendola et al., 1969; Moh, 1970), 국내에서도 Yang et al.(2000), Chun et al.(2000)은 심층 혼합처리공법에서 강도와 변형계수에 관한 연구를, Oh (2006)는 심층혼합처리공법에 관한 강도특성에 대한 실 험적 연구를 수행하였고, Koo(2001)는 혼합수의 심층혼 합처리공법의 개량토 강도에 대한 영향을, Park and Lee (2012)는 DCM 공법에 대한 해수의 영향에 대한 연구를 수행하였다. 또한 Park et al.(2014)은 동일한 함수비 조 건에서 다양한 지반 및 혼합비 조건에 따른 심층혼합시 료의 강도특성에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 하지 만 이러한 연구들에도 불구하고 국내 실정에 맞는 심층 혼합처리공법에 대한 강도 특성에 대한 객관적인 자료 가 많이 부족한 상황이다.

심층혼합처리공법은 다양한 지반 및 함수비 조건에 서 필요한 지반강도를 발현시키는 것이 그 목적이며 강 도발현에 가장 중요한 인자는 지반 종류, 함수비, 안정 재의 혼합비 등이 있다. 심층혼합처리공법으로 시공하 여 지반의 압축강도를 확인하는 확실한 방법은 시공 후 시료를 채취하여 강도를 직접 측정하는 방법이지만 이 를 수행하기는 여러 가지 어려움이 있고, 실내배합기준 강도에 따라 다양한 강도 특성이 발현된다. 또한 심층혼 합처리공법은 지하수위 아래의 함수비가 높고 심도가 깊은 층에 대한 지반보강공법으로 주로 사용되므로 본 연구는 실내시험을 통하여 다양한 지반 및 혼합비 조건 에서 함수비 조건을 포화도 100%의 함수비에서 10%, 20%로 증가시켜 함수비 증가에 따른 심층혼합시료의 지반 및 양생, 안정재 혼합비 조건에 따른 강도특성에 대하여 파악하고자 하였다.

2. 시험 조건

실내강도시험에서 사용된 재료는 카오린점토, 안정 재, 낙동강모래, 부순 자갈을 사용하였고, 심층혼합 시 료의 강도측정을 위한 공시체는 지름 10cm, 높이 20cm 의 크기의 몰드에 3층으로 최대한 다져 제작하여 온도 20°C와 습도 90% 이상의 습윤 상태로 7일과 28일 동안 양생을 하였다. 양생 후 각 공시체는 1.0mm/min의 변형 속도로 일축압축시험을 수행하여 강도특성을 파악하였 다. 카오린 점토를 사용한 이유는 분말로 된 시료이므로 타 시료(모래, 자갈, 물 등)와의 배합이 용이하여 점토재 료로 카오린점토를 사용하였다.

지반조건에 따른 배합비는 자갈은 0%, 20%, 40%, 60%로, 모래와 점토는 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 60%, 80%, 100%로 변화시켰으며, 안정재는 재료중량에 대하 여 현장에서 많이 사용되는 8%, 10%, 12%, 14%(160kg/m³, 200kg/m³, 240kg/m³, 280kg/m³)의 혼합비로 결정하였다. 지반의 혼합비에 따라 점토와 자갈 50% 이상의 함유량 은 점토 및 자갈질로, 그 이외는 모래질 지반으로 분류 하였다. 함수비는 다짐시험을 실시하여 포화도 100%의 함수비(w1, Park et al., 2014)에 10%, 20%로 함수비(w2, w3)를 증가시켜 함수비에 따른 심층혼합시료의 강도특 성에 대하여 알아보았다. 심층혼합처리공법은 교반방식 으로 시공되나 본 연구에서는 교반으로 인한 각 시료의 불균질성을 최소화하기 위해 다짐으로 시료를 제작하였 다(다짐에너지는 흙의 다짐시험과 동일한 5.96kgf·cm/cm³ 을 적용하였음). Table 1에는 각 혼합재료에 대하여 변 화하는 혼합비를 나타내었고, Table 2에는 지반 및 함수 비 조건에 따른 혼합비를 나타내었다.

3. 시험결과 및 분석

3.1 일축압축강도 시험결과

함수비에 따른 심층혼합시료의 강도특성을 파악하기

Table 1. Change factors of mixing ratio

Division		Change factors (%)	Remark			
Stabilizer	%	8, 10, 12, 14				
Stabilizei	kg/m ³	160, 200, 240, 280	0.40			
Gravel		0, 20, 40, 60	 Specimens making counts: 240 4 specimens at one time making 			
Sand/Clay		0, 10, 20, 30, 40, 60, 80, 100	(7 and 28 days specimens per 2)			
Water content	w1 : Degree of w2 : w1×1.1 w3 : w1×1.2	saturation (S) = 100% (Park et al., 2014)	· Total specimen number : 640			

Table 2. Mixing ratio for soil type

		Mixing ratio (%)							Mixing ratio						
Case Gra.	Gra	Sand	Clay	Water content		ent	Soil type	Case	Gra.	Gra. Sand	Clay	Water content			Soil type
	Gia.	Sand	Clay	w1	w2	w3	typo		Gia.	Sanu	Clay	w1	w2	w3	1900
1	0	0	100	42.3	46.5	50.7	Clay	11	20	80	0	12.3	13.5	14.7	Sand
2	0	20	80	35.3	38.8	42.3	Clay	12	40	0	60	26.8	29.5	32.1	Clay
3	0	40	60	29.4	32.3	35.3	Clay	13	40	20	40	21.1	23.2	25.3	Sand
4	0	60	40	24.4	26.8	29.3	Sand	14	40	40	20	14.9	16.4	17.9	Sand
5	0	80	20	20.1	22.1	24.1	Sand	15	40	60	0	9.9	10.9	11.9	Sand
6	0	100	0	16.6	18.2	19.9	Sand	16	60	0	40	24.8	27.2	29.7	Gra.
7	20	0	80	31.2	34.4	37.5	Clay	17	60	10	30	19.7	21.7	23.7	Gra.
8	20	20	60	25.2	27.7	30.2	Clay	18	60	20	20	15.5	17.0	18.5	Gra.
9	20	40	40	20.1	22.1	24.1	Sand	19	60	30	10	11.8	12.9	14.1	Gra.
10	20	60	20	15.7	17.3	18.9	Sand	20	60	40	0	7.7	8.5	9.3	Gra.

위하여 포화도 100%의 함수비에서 10%, 20% 증가한 함수비를 적용한 시료에 대한 실내강도시험 결과는 다 음 Table 3 및 Table 4와 같다.

Fig. 1에 함수비 증가에 따른 일축압축강도시험 결과 를 나타내었다. 포화도 100% 함수비의 강도에 대하여 함수비 증가에 따른 강도결과를 정규화하면 Fig. 1(a)에 서 재령 7일 강도는 함수비가 10%, 20%로 증가할수록

77.0%, 53.0%로 감소하였고, Fig. 1(b)에서 재령 28일 강도는 53.0%, 37.0%로 감소하였다. 하지만 강도가 낮 은 경우, 즉, 안정재 혼합비가 적고, 점토질 함유량이 많 은 지반에서는 함수비 증가에 따라 강도 감소현상은 나 타나지 않았고, 포화도 100%일 때와 거의 비슷한 경향 을 나타내었다. 이와 같은 현상은 점토질 지반에서는 안 정재에 의한 강도증가의 화학적 반응이 함수비 증가에

Table 3. Axial compressive strength of curing time 7 days

	Axial compressive strength of 7 days by stabilizer content (kPa)											
	\	w1 (Park e	t al., 2014)	w2				w3			
	8%	10%	12%	14%	8%	10%	12%	14%	8%	10%	12%	14%
1	485.1	618.4	643.9	685.5	516.5	552.7	401.8	590.9	382.7	352.3	500.3	559.1
2	633.1	727.7	858.0	885.0	639.5	792.8	1008.4	942.8	450.8	416.0	860.9	875.6
3	725.7	1430.8	1492.1	1674.8	1000.6	1061.8	1071.1	1391.1	643.4	780.6	1469.5	1960.0
4	991.3	1511.7	2169.3	2406.9	1610.1	1651.8	2126.6	2828.3	771.3	1402.4	3132.6	3283.0
5	1200.5	2148.7	4606.0	4926.5	2060.5	1919.8	3056.6	3387.4	1268.6	2172.2	3771.0	4803.0
6	1310.1	3678.5	4804.5	6445.5	1628.8	2171.2	2132.5	3209.0	955.9	1066.2	3680.4	3125.2
7	346.0	598.8	728.2	757.6	419.0	563.5	640.4	648.8	188.2	307.7	690.4	799.7
8	511.1	763.5	833.0	897.7	645.8	681.6	527.7	779.1	421.9	696.8	1218.6	1896.8
9	1068.2	1309.3	1455.3	2145.3	1076.5	1233.3	2221.2	1268.1	302.3	1625.3	2947.4	4012.6
10	1669.0	2588.2	4749.6	6392.1	3089.0	2996.8	5218.0	5718.3	2483.3	2740.1	5266.5	5346.4
11	2394.2	3530.5	5415.5	7701.3	832.5	2294.2	3939.1	5874.6	1695.4	1676.8	4968.1	4504.1
12	495.4	489.6	577.8	1271.1	435.1	490.0	625.2	637.5	498.3	408.7	692.4	1446.0
13	706.1	1381.4	1377.9	1826.8	1249.0	1589.1	1672.4	1868.9	1250.5	1847.8	2000.7	1452.4
14	1014.3	4146.4	4746.6	6398.9	3482.4	5620.8	4838.3	5728.1	2301.5	2736.7	4072.4	4237.0
15	3286.9	6335.7	8834.7	12745.4	3756.3	5970.2	6327.9	8869.5	2144.7	2740.6	4857.4	6141.2
16	1433.8	1077.0	1162.8	3223.7	1146.6	1670.9	1692.5	1603.8	1268.1	1289.7	2427.5	1425.9
17	2082.5	1689.6	2068.8	3483.4	1215.2	2276.1	3138.5	4364.4	1309.3	1603.8	2118.8	3453.5
18	3174.7	3157.6	3637.8	5915.3	4044.5	4561.9	3865.6	4850.0	1971.8	2601.4	2985.1	4209.1
19	3281.5	6517.0	6510.2	10924.6	4915.7	5353.7	6650.8	10508.1	3124.2	4521.7	5998.6	6132.5
20	6776.7	7000.7	10108.7	11203.4	4302.7	11732.6	9004.2	14103.2	3437.8	2753.3	4781.9	5136.5

Table 4. Axial compressive strength of curing time 28 days

	Axial compressive strength of 28 days by stabilizer content (kPa)											
	,	w1 (Park e	t al., 2014)	w2				w3			
	8%	10%	12%	14%	8%	10%	12%	14%	8%	10%	12%	14%
1	362.6	815.9	643.9	1442.6	678.7	688.0	991.8	1196.6	618.9	703.6	765.9	840.8
2	603.2	934.5	873.7	1835.1	918.8	1204.4	1674.8	1674.3	1091.2	1224.5	1313.2	1536.2
3	831.6	1296.1	2073.7	2803.8	1520.5	1694.9	1858.1	1642.0	1408.3	1325.5	2155.0	2769.5
4	1462.7	2284.4	3257.1	3896.0	2279.5	2724.4	2734.2	3422.2	1938.0	3183.5	3778.9	5618.3
5	1699.8	2574.0	7826.8	8422.6	3931.3	3931.3	4686.4	5164.6	2388.8	3342.3	4706.0	5290.0
6	1760.1	3902.4	8006.1	11605.2	3140.9	4246.8	4282.6	4618.7	1773.8	2899.3	3158.5	4345.8
7	639.5	645.9	869.8	1142.2	748.2	1030.0	1131.4	1218.1	402.3	597.8	1068.2	1082.9
8	1004.0	1112.8	1364.2	1397.0	921.2	1106.9	1056.0	1334.3	779.1	859.0	1168.2	2826.3
9	1563.1	1741.5	1700.3	3452.6	1324.0	1721.4	3199.7	3160.5	1570.0	3538.3	3507.4	4872.6
10	2990.0	3884.7	5884.9	7495.1	3882.8	4658.9	5565.4	5742.3	3873.0	4227.2	4608.5	5192.0
11	4135.1	5549.8	6665.0	12817.0	4432.0	5085.2	6107.4	8283.0	2526.0	2977.7	6421.5	5989.3
12	746.8	658.6	725.2	1857.6	516.0	697.3	988.3	1132.9	577.2	1170.6	1026.6	1863.0
13	1172.6	1619.0	1819.9	2688.7	2063.4	2287.3	2314.8	2762.6	2347.1	2109.0	2852.8	3714.7
14	1944.9	6157.9	6373.9	10781.5	5392.0	6030.9	6752.7	5778.1	3382.0	4192.9	4850.0	5135.7
15	5625.2	9449.2	12471.5	18028.1	4598.7	7076.1	7768.0	10645.3	3952.3	5286.1	5381.7	7912.0
16	950.1	1759.1	1361.7	3399.1	1903.7	2275.1	2448.5	2355.4	1819.9	2250.6	2414.7	3143.8
17	1986.5	2733.7	3322.7	4737.3	2724.4	3968.5	3973.4	4999.0	2154.0	2837.1	2813.6	3498.1
18	3362.9	4402.2	4685.9	11396.5	5267.0	5593.8	5214.6	5304.3	2233.9	3596.6	3559.4	4362.0
19	5026.9	8030.1	8933.2	15058.7	5281.7	5805.0	5935.4	9905.4	4110.6	5402.7	5468.9	5627.2
20	8768.6	9513.4	13333.4	16189.6	5043.1	10162.1	10075.9	15723.6	3718.1	3704.9	4616.8	4979.9

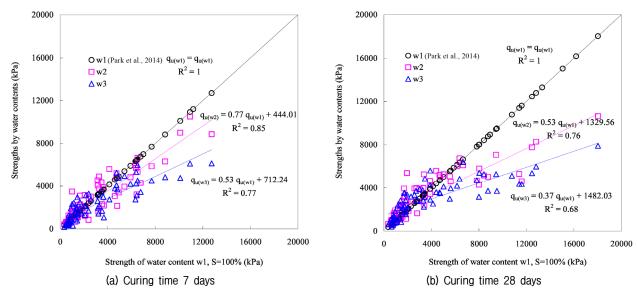


Fig. 1. Strength normalization by water contents

따라 활발하게 발생하지 않기 때문인 것으로 판단할 수 있다. 이는 점토질 함유량이 많고, 안정재 혼합비가 적은 시료의 경우 시료의 공극 사이로 안정재가 제대로 침투하지 못해 강도 증가가 그다지 일어나지 않은 것으로 판단된다.

3.2 재령에 따른 강도특성

함수비에 따른 재령특성은 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2(a)는 함수비 증가에 따른 재령별 강도특성으로 포화도 100%의 함수비(w1)는 28일 강도가 7일 강도보다 44%로 강도가 증가하였고, 함수비가 10%씩 증가(w2,

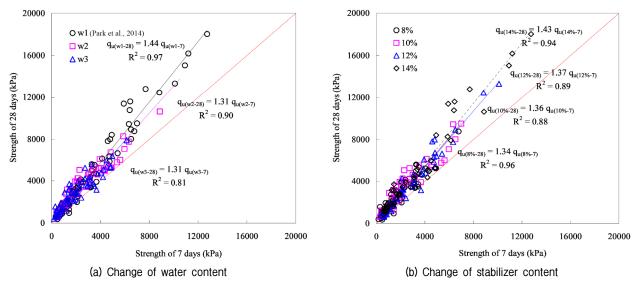


Fig. 2. Strength properties by curing time

w3)할수록 재령에 따른 강도증가는 약 30% 정도로 같은 강도증가를 보였다. Fig. 2(b)는 안정재 혼합비에 따른 재령별 강도특성을 나타낸 것으로 안정재 14%에서 43%로 약간 큰 강도증가를 나타내었지만 안정재 8%, 10%, 12%에서는 34%~37% 증가하여 안정재 혼합비가 증가하여도 강도증가는 안정재 14%에 비해 강도 증가현상이 그다지 뚜렷하게 나타나지 않았다. 함수비가증가할수록 재령에 따른 강도증가 및 안정재 증가에 따른 강도증가 효과는 감소하는 것을 알 수 있다. 위와 같은 현상은 초기에는 포화도 100% 이상의 함수비가 증가가 심층혼합시료의 포졸란 물질(SiO₂, Al₂O₃)이 수화반응에 의해 생성되는 물질과 반응하는 것을 방해하여

강도 감소가 발생하지만 재령에 따른 함수비 및 안정재 증가에 따른 감소에는 크게 영향을 끼치지 않기 때문에 나타난 결과로 판단할 수 있다.

3.3 혼합비 특성에 따른 강도특성

혼합비에 따른 단위중량 및 함수비에 따른 강도특성을 파악하였다. 혼합된 재료의 비율에 따라 점토질→모 래질→자갈질 지반일수록 재료의 혼합비에 따라 비교적 단위중량은 증가하고, 함수비는 감소한다. 단위중량 및 함수비에 따른 강도특성을 파악하면 Fig. 3과 같다. Fig. 3(a)∼(b)에서 단위중량이 증가할수록 7일 및 28일

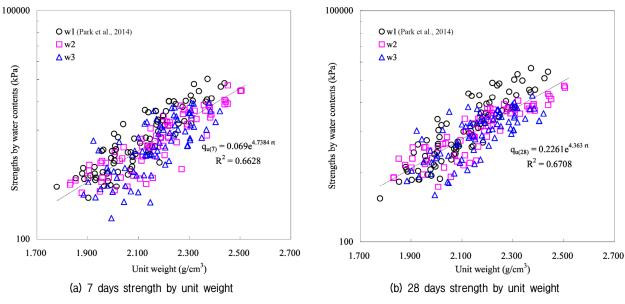


Fig. 3. Strength properties by material characteristics

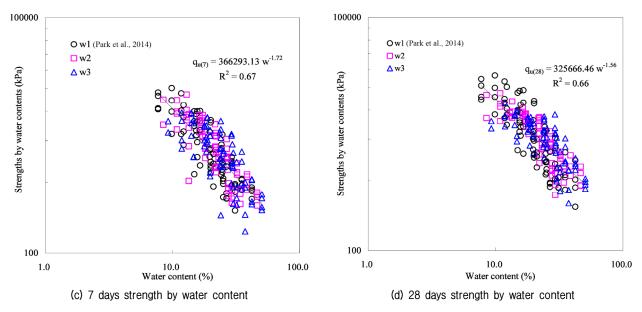


Fig. 3. Strength properties by material characteristics (Continued)

강도는 지수적으로 증가하는 것을 알 수 있고, Fig. 3(c) ~(d)에서는 함수비가 증가할수록 강도가 거듭제곱의 형태로 감소하는 것을 알 수 있다. 즉 점토성분이 많을 수록 단위중량이 작고, 함수비가 높아지므로 강도 증가의 발생이 작아지며, 모래질 및 자갈질 함유량이 많아질 수록 단위중량이 크고, 함수비가 감소하므로 강도가 급격하게 증가하는 것을 알 수 있다.

3.4 지반종류에 따른 강도특성

함수비 증가에 따라 점토질 지반의 경우는 강도변화

에 따른 뚜렷한 특성을 파악할 수 없었다. 즉, 함수비가 증가하여도 강도가 포화도 100%의 함수비(w1)와 비슷한 분포 특성을 나타내었다. 모래질과 자갈질 지반의 경우는 함수비가 증가할수록 포화도 100%의 함수비의 강도보다 작아지는 경향을 파악할 수 있었고, 자갈질 지반은 구성재료 중 자갈이 강도발현에 주로 작용하기 때문에 함수비가 증가하여도 강도감소가 모래질 지반보다는 크게 나타나지 않았지만, 함수비 증가가 클수록 혼합수가 심층혼합시료의 경화작용에 영향을 주어서 강도 감소가 크게 발생하였다. Fig. 4에 재령별로 모래질과 자갈질 지반에 대한 강도를 w1 함수비의 강도에 대하여

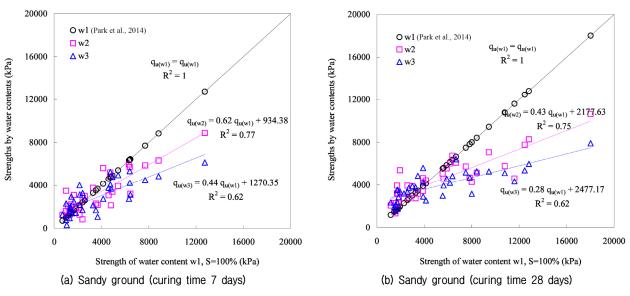


Fig. 4. Normalization for strength of water content, S=100% (w1)

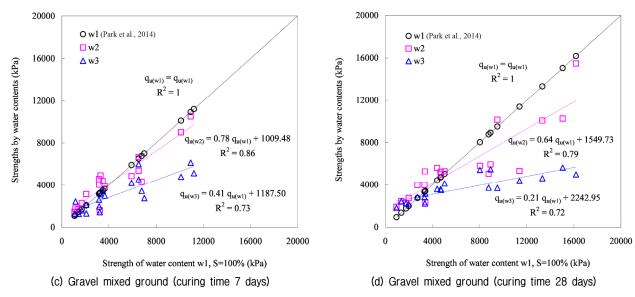


Fig. 4. Normalization for strength of water content, S=100% (w1) (Continued)

Table 5. Strength decreasing ratio by water content increase

Water content	Normalization for strength of water content, S=100% (w1)								
	Sandy	ground	Gravel mixed ground						
	Curing time 7 days	Curing time 28 days	Curing time 7 days	Curing time 28 days					
w1	100.0	100.0	100.0	100.0					
w2	62.0	43.0	78.0	64.0					
w3	44.0	28.0	41.0	21.0					

정규화 하였고, Table 5에는 그 결과에 의한 강도감소율을 나타내었다.

3.5 구성 재료에 따른 강도특성

구성 재료에 따른 강도특성을 파악하기 위하여 모래

와 점토로만 구성된 혼합비에 대하여 강도특성을 파악하였다. 모래를 0%, 20%, 40%, 60%, 80%로 증가한 시료, 즉 점토가 100%, 80%, 60%, 40%, 20%로 구성된 시료 Table 2의 case 1~case 5의 경우에 대하여 강도특성을 파악하였다. 모래 100%의 경우는 순수 모래로 강도가 오히려 감소하는 경향이 나타나 구성 재료 함유량

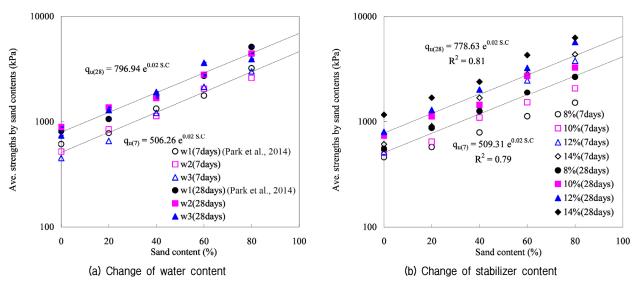
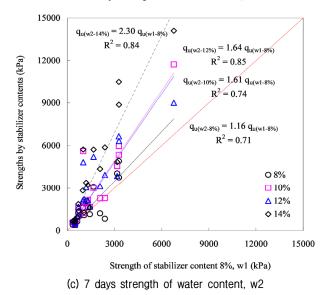


Fig. 5. Strength properties by sand (clay) contents

에 따른 연관성에서 제외하였다. Fig. 5(a)는 모래 함유 량에 따라 재령 7 일 및 28 일 강도특성을 함수비별로 나타낸 것으로 함수증가에 따라서는 점토 성분의 구성비로 인하여 강도차이가 크게 발생하지 않는 것으로 나타났지만 모래 구성비가 증가할수록 평균강도는 지수적으로 증가하는 경향이 나타났다. Fig. 5(b)는 모래 구성비에 따라 안정재 혼합비별로 강도특성을 나타낸 것으로 모래 구성비와 안정재 혼합비가 증가할수록 평균 강도가 지수적으로 증가하는 경향을 나타내었다. 한편이 그림에서 안정재 혼합비가 낮은 8~10%의 경우 모래함유량 기준 약 30%에서 변곡점이 발생하는 것을 확인 할 수 있다. 이는 모래함유량이 낮을 경우 안정재 비율이 최소 12%이상 되어야 안정재 투입대비 경제성이확보되는 것으로 판단된다.

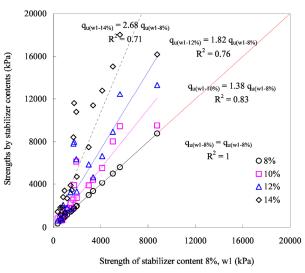
15000 $q_{u(w_{1}-14\%)} = 2.41q_{u(w_{1}-8\%)}$ $R^2 = 0.61$ $q_{u(w1-12\%)} = 1.80 \ q_{u(w1-8\%)}$ $R^2 = 0.68$ 12000 Strengths by stabilizer contents (kPa) $q_{u(w1-10\%)} = 1.34 q_{u(w1-8\%)}$ 9000 $R^2 = 0.65$ 6000 $q_{u(w_1-8\%)} = q_{u(w_1-8\%)}$ $R^2 = 1$ 0.8% 10% 3000 **△** 12% ♦ 14% 3000 6000 9000 12000 15000 Strength of stabilizer content 8%, w1 (kPa)

(a) 7 day strength of water content, w1

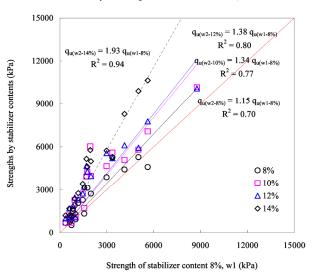


3.6 안정재 혼합비에 따른 강도특성

w1, w2, w3의 각 함수비에 대하여 안정재 증가에 따른 강도특성을 파악하였다. Fig. 6과 같이 w1 함수비의 안정재 8%에 대하여 각 함수비별 안정재 혼합비가 증가할수록 각 함수비에 따라 다양한 증가비를 나타내었고, w3 함수비의 안정재 8%의 경우는 재령 7일 강도는 34%, 재령 28 일 강도는 16%로 w1 함수비의 안정재 8%의 강도보다 감소하는 경향이 나타났다. 또한 안정재 혼합비가 증가될수록 강도 증가비는 증가되지만 재령 7일 강도가 재령 28일 강도보다는 w2, w3 함수비에서는 강도 증가비가 크게 나타났다. 따라서 함수비가 상당히 높은 경우는 안정재의 강도증가효과가 초기강도에 더 큰 영향을 미친다고 판단 할 수 있다. 또한 함수비



(b) 28 days strength of water content, w1



(d) 28 days strength of water content, w2

Fig. 6. Normalization for stabilizer 8% of water content, w1

32

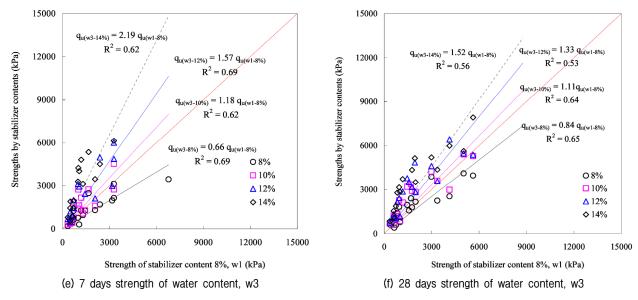


Fig. 6. Normalization for stabilizer 8% of water content, w1 (Continued)

Table 6. Strength increase ratio by stabilizer content

Curing time	\\/atax ===tant	Strength increase ratio by stabilizer content							
Curing time	Water content	8%	10%	12%	14%				
	w1	1.00	1.34	1.80	2.41				
7days	w2	1.16	1.61	1.64	2.30				
	w3	0.66	1.18	1.57	2.19				
	w1	1.00	1.38	1.82	2.68				
28days	w2	1.15	1.34	1.38	1.93				
	w3	0.84	1.11	1.33	1.52				

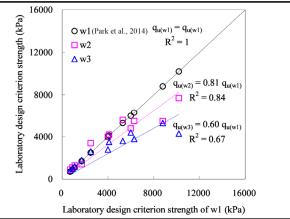
가 증가할수록 강도 증가비도 감소하는 경향이 나타나 지만 그 영향은 안정재에 따른 증가비보다 작게 나타났 다. Table 6에는 재령별로 안정재 8%의 강도에 대하여 정규화한 강도 증가비를 나타내었다.

3.7 함수비에 따른 실내기준강도 제시

Park et al.(2014)의 연구에서 제시된 포화도 100%의 실내기준강도에 대하여 함수비가 증가할수록 감소되는 실내기준강도를 Table 7과 같이 제시하였다. w2 함수비

Table 7. Laboratory design criterion strength by water content

Soil type	Laboratory design criterion strength by stabilizer content (kPa)							
	8%	10%	12%	14%	ctronati			
Clay	700	900	1100	1700	ahonedonu dacim criterion etrenuth (PDs)			
Sand	2500	4100	6000	8800	misely was			
Gravel	4000	5300	6300	10200	I shoret			
· Park et al. (2014)								



에서는 제시된 기준강도에서 약 20% 감소하였고, w3 함수비에서는 약 40% 감소하는 것으로 나타나 함수비 증가량에 따른 실내기준강도를 제시할 수 있다.

4. 결 론

심충혼합처리공법 설계에 대한 기초자료 확보를 위해 실내배합시험을 통하여 지반조건, 안정재 혼합조건 등의 다양한 조건에 대하여 함수비에 따른 심충혼합시료의 일축압축강도 특성에 대하여 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 함수비 증가에 따른 전체시료에 대한 일축압축강도 시험 결과, 포화도 100%의 함수비의 강도에 대하여 함수비 증가에 따라 재령 7일 강도는 77.0%, 53%로 감소하였고, 재령 28일 강도는 53.0%, 37.0%로 감 소하였다. 점토질 지반에서는 함수비 증가에 따라 강도변화에 따른 뚜렷한 특성을 파악할 수 없었고, 자갈질 지반은 자갈에 의해 강도발현이 크게 작용 하기 때문에 모래질 지반보다는 함수비가 증가하여 도 강도감소가 크게 나타나지 않았다.
- (2) 재령이 증가할수록 포화도 100% 함수비의 경우 44%로 강도가 증가하였고, 함수비가 증가할수록 강도증가는 31% 정도로 비슷한 강도증가를 보였으며, 안정재 증가에 따른 재령별 강도증가는 12% 이하에서는 약 35% 정도로 비슷한 증가비를 나타내었고 그 이상에서는 다소 크게 나타났다. 함수비가 증가에 따른 재령에 대한 영향은 비교적 그 영향이 작은 것으로 판단할 수 있었다.
- (3) 혼합된 재료의 비율에 따라 점토질→모래질→자갈 질 지반일수록 재료의 혼합비에 따라 비교적 단위 중량은 증가하고, 함수비는 감소하였으며, 단위중 량 및 함수비가 증가할수록 강도는 지수적으로 증가하는 특성을 나타내었다.
- (4) 구성 재료에 따른 강도특성을 파악하기 위하여 모 래와 점토로만 구성된 혼합비에 대하여 강도특성 을 파악한 결과, 모래 구성비가 증가할수록 함수비 및 안정재 증가에 따라 평균강도는 지수적으로 증 가하였고, 재령에 따라 일정한 관계식을 얻을 수 있 었다.
- (5) 함수비에 따른 안정재 증가에 따른 강도특성은 안

정재 혼합비가 증가할수록 각 함수비에 따라 다양한 증가비를 나타내었고, 안정재의 초기강도 증가에 더 큰 영향을 미친다고 판단 할 수 있다. 함수비가 증가할수록 강도 증가비도 감소하는 경향이 나타나지만 그 영향은 안정재에 따른 영향보다 작은 것으로 판단할 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2013년 2월 창원대학교 박사학위 논문(최 준삼, 2013)에서 발췌하였습니다.

참고문헌 (References)

- Chun, B.S., Lim, H.S., and Jeon, J.G. (2000), "A Study on the Design-parameter of Mixed Ground by Using Cement-type Stabilizer", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.16, No.2, pp.79-81 (in Korean).
- Koo, Y.H. (2001), The Influence on Soil-Cement Strength due to Mixing Water in Deep Cement Mixing Method, Busan Univ., Master's Thesis (in Korean).
- 3. Moh, Z.C., Chin, Y.P., and Ng, S.C. (1970), "Cement Stabilization of Lateritic Soils", *Proc. of Asian Conference Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol.1, pp.42-46.
- Oh, N.S. (2006), Strength Characteristics of Cement-Soil Mixtures, Pukyong Univ., Master's Thesis (in Korean).
- Park, C.S., Kim, J.H., Kim, J.J., and Baek, J.S. (2014), "An Experimental Study on the Strength of Deep Mixing Specimen According to the Stabilizer Content", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.30, No.1, pp.27-26 (in Korean).
- Park, S.S. and Lee, J.W. (2012), "Effect of Sea Water on Curing and Strength of Cemented Sand", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.28, No.6, pp.71-79 (in Korean).
- Pendola, H.J., Kenndy, T.W., and Hudson, W.R. (1969), "Evaluation of Factor Affecting the Tesile Proerties of Cemnet Treated Material", Texas Univ. of Texas at Austin, Research Report, 98-3.
- 8. Terashi, M. and Tanaka, H. (1981), "Ground improved by the deep mixing method", *Proc. of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, pp.777-780.
- 9. Terashi, M. and Tanaka, H. (1983), "Settlement analysis for the deep mixing method", *Proc. of the 8th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, pp.955-960.
- Terashi, M., Tanaka, H., and Kitazume, M. (1983), "Extrusion failure of ground improved by the Deep Mixing Method", Proc. of the 7th Asian Regional conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, pp.313-318.
- Terashi, M., Tanaka, H., Mitsumoto, T., Honma, S., and Ohhashi, T. (1983), "Fundamental properties of lime treated soil (3rd report)", Report of the Port and Harbour Research Institute, Vol.22, No.1, pp.69-96 (in Japanese).
- 12. Terashi, M., Tanaka, H., Mitsumoto, T., Niidome, Y., and Honma,

- S. (1979), "Engineering properties of lime treated marina soils", *Proc. of the 6th Asian Regional conference on soil Mechanics and Foundation Engineering*, pp.191-194.
- Terashi, M., Tanaka, H., Mitsumoto, T., Niidome, Y., and Honma, S. (1980), "Fundamental properties of lime treated soil (2nd report)", Report of the Port and Harbour Research institute, Vol.19, No.1, pp.33-62 (in Japanese).
- 14. Yang, T.S., Jeong, G.H., Yeo, B.G., and Lee, S.S. (2000), "A

Study on Design Strength and Elastic Modulus Using Deep Cement Mixing Method", *KSCE Conference*, Vol.2000, No.2, pp.615-618. (in Korean)

Received: February 26th, 2019 Revised: March 19th, 2019 Accepted: March 20th, 2019