한국해양공학회지 제18권 제4호, pp 46~51, 2004 (ISSN 1225-0767)

준설매립된 해성점성토에서 시멘트계 고화재를 이용한 표층개량

남정만* · 윤중만**
*제주대학교 해양과학대학 토목환경공학전공
**안산공과대학 토목과

The Improvement of Surface Layer Using Cement-hardening Agents in Dredged and Reclaimed Marine Clay

JUNG-MAN NAM* AND JUNG-MANN YUN**
*Dept. of Civil and Environmental Eng., College of Ocean Science, Cheju National University, Cheju, Korea
**Dept. of Civil Eng., Ansan College of Technology, Ansan, Korea

KEY WORDS: Marine Clay 해성점토, Hardening Agents 고화재, Stress-Strain Behavior 응력-변형률 거동, Improvement of Surface Layer 표층개량, Strength Properties 강도특성

ABSTRACT: *The surface layer in dredged and reclaimed marine clay is improved by mixing of shallow soils and hardening agents, which is made of cement, containing some other special admixtures. Tests in both laboratory and field settings are performed to investigate the improvement effect and strength properties of cement-stabilized soils. The test results show that the hardening agent sufficiently improves the soil properties of the surface layer, while increasing the load-carrying capacity. The strength of cement-stabilized soils depends, primarily, on water-to-cement ratio and curing temperature. That is, the higher curing temperature and the longer curing time, the higher the strength in cement-stabilized soils. The high ratio of water-to-cement results in a lower strength.*

1. 서 론

최근 우리나라는 해안을 매립하여 공업단지, 신공항, 항만시설등 사회간접시설 확충에 필요한 부지를 공급하고 있다. 이러한 매립공사는 서, 남해안지역에서 주로 진행되고 있으며, 이전에 활용하지 않았던 해성점성토를 준설하여 해안매립지를 조성하고 있다. 해성점성토로 준설매립된 지반은 대부분 지반개량에 이용되는 건설장비가 진입하지 못할 정도로 매우 연약한 경우가 많으므로 지반 자체의 하중지지능력을 증가시키고, 건설장비에 의해 발생된 물리적인 응력에 저항하기 위해 표층지반을 먼저 개량해야만 한다.

지반의 표층부분을 대상으로 한 표층개량에는 시멘트계 고화재를 사용하여 원지반과 교반혼합한 후 고화재의 고결작용을 이용하여 지반의 강도나 변형특성, 내구성등을 개선하는 표층안정처리공법이 주로 이용된다. 외국에서는 시멘트계 고화재가 이미 상품으로 개발되어 각종 연약지반의 표층개량에 이용되고 있으며 이를 이용한 표층개량지반의 공학적 및 역학적 특성에 대한 연구실적도 많이 축적되어 있다(Littlejohn, 1982; Nyame and Illston, 1980; Schwarz and Krizek, 1992). 특히 일본에서는 포틀랜드 시멘트와 시멘트계 고화재를 이용하여 연약지반의 표층개량에 대한 연구가 활발히 이루어졌으며 (Kuroda et al, 1983; Yoshida, 1991) 연구결과 시멘트계 고화재가 포틀랜드 시멘트 보다 지반개량효과가 뛰어난 것으로 나타났다(Japan Cement Co., 1994). 한편, 국내에서도 시멘트계 고화재가 개발되어, 이 고화재를 표층안정처리공법에 적용하는 사례가 늘어나고 있다. 그리고 실내모형실험(홍원표 등, 1997)이나 현장시험시공(홍원표 등, 1997)을 통하여 시멘트계 고화재로 표층안정처리된 연약지반의 거동, 표층안정처리를 위한 고화재의 최적배합조건(천병식 등, 2002)등의 연구가 진행되어 오고 있다. 그러나 국내외적으로 본 연구의 대상현장과 같이 표준관입저항값(N값)이 0~2이고 자연함수비가 액성한계의 약 3배가 되는 초연약점성토 지반을 대상으로 시멘트계 고화재를 사용한 표층개량지반의 강도특성에 대한 연구는 현재 많이 진행되지 않은 실정이다.

따라서 본 연구에서는 해안지역에 준설매립된 초연약해성점성토 지반에서, 포틀랜드 시멘트보다 개량효과가 우수한 시멘트계 고화재를 사용하여 표층안정처리된 지반의 개량효과 및 강도특성을 조사하고자 한다. 고화재는 보통 포틀랜드 시멘트에 특별한 첨가제를 혼합하여 제작된 것을 사용하였다. 시멘트

제1저자 남정만 연락처: 제주도 제주시 제주대학로 66
064-754-3454 jungman@cheju.ac.kr

계 고화재로 안정처리된 표층지반의 개량효과 및 강도특성을 조사하기 위하여 실내시험 및 현장시험을 실시하였다. 실내시험으로는 일축압축시험 및 휨인장시험을 실시하였으며 현장시험으로는 정적콘관입시험을 실시하였다. 실내시험에 사용된 표층안정처리지반의 공시체는 양생기간, 양생온도, 물-시멘트비를 변화시키면서 제작하였다.

2. 시료채취 현장

2.1 현장개요

표층안정처리현장은 항만과 그 부대시설 및 배후도시 등을 건설하기 위하여, 전라남도 동광양시 부근의 해안지역에서 해성퇴적층을 준설하여 약 120만평의 매립지를 조성한 현장이다. Fig. 1에 나타난 바와 같이 준설매립부지는 중앙에 2개의 임시가토제를 설치하여 A, B, C, D 4개의 구역으로 구분되어 있다. 본 현장의 지층은 N치가 0~2인 매우 연약한 해성점성토로 주로 구성되어 있으며, 이 점성토층의 두께는 약 10.0~25.0m 정도이다. Fig. 2는 A, B구역의 토질주상도를 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 준설매립된 표층지반의 두께는 약 5m 정도이며, 그 하부에는 해성점성토가 13m 깊이까지 존재하고 있다.

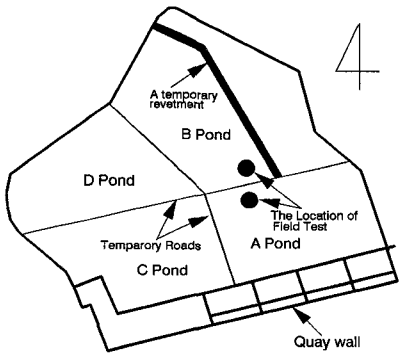


Fig. 1 Layout plan of the site

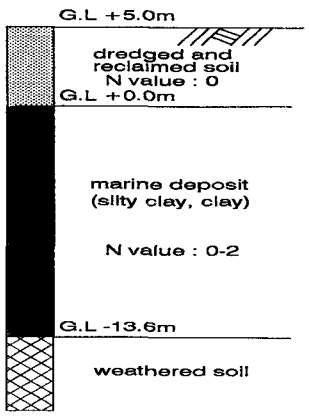


Fig. 2 Typical soil profile

Table 1 Soil properties

Clay sample	A pond	B pond	c pond
Specific gravity(G_s)	2.69	2.57	2.68
Water content(w_n)	69%	125%	130%
Liquid limit(LL)	44.5%	43.5%	49.8%
Plastic limit(PL)	24.7%	21.4%	26.5%
Plasticity index(PI)	19.8	22.1	23.3
Percent passing No. 200 sieve	82.6%	94.4%	93.4%

2.2 시료채취

본 연구에 사용된 시료는 Fig. 1에 나타낸 A, B구역에서 채취하였으며, Table 1은 실내시험을 실시하여 얻은 시료의 물성특성을 정리하여 나타낸 것이다. 이 흙은 통일분류법의 분류기준에 의하면 CL로 분류된다. A, B구역에서 채취한 해성점성토는 현장함수비를 제외하고는 비슷한 특성을 보이고 있다. B 구역은 준설매립기간이 A구역보다 약 15개월정도 더 소요되어, B구역에서 채취한 해성점성토의 함수비는 A구역의 함수비 보다 크다. 준설매립된 해성점성토의 액성한계는 43.5~44.5%이며, 소성지수는 21.4~24.7%이다. 그러므로 A구역에서 채취된 해성점성토의 함수비는 액성한계의 함수비보다 약 1.5배 정도 크며, B구역에서의 함수비는 액성한계의 함수비 보다 약 3배 정도 크다.

2.3 원지반 강도

Fig. 3은 준설매립된 해성점성토의 원지반 강도를 측정하기 위하여 A, B구역의 표층부에서 실시된 정적콘관입시험 결과를 나타낸 것이다. A구역에서 해성점성토의 콘관입저항은 지표면 부근에서 최대값을 보이고 깊이가 깊어질수록 감소하고 있다.

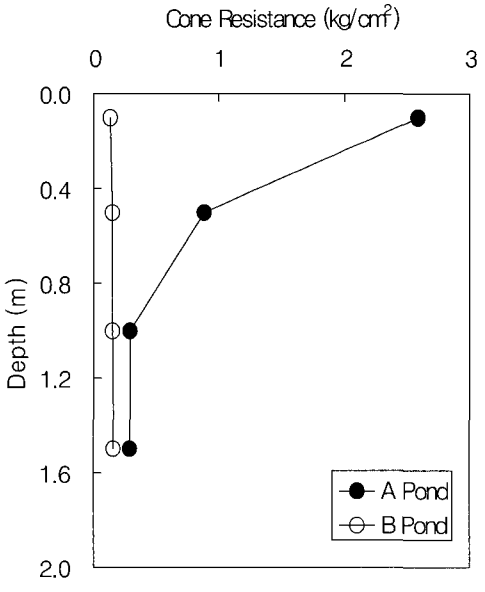


Fig. 3 In-situ cone resistance

그리고 G.L -1.0m 아래 깊이에서는 거의 일정하게 유지되고 있다. 반면 B구역의 콘관입저항은 매우 작은 값을 보이고 있으며 깊이에 따라 거의 변화가 없는 것으로 나타났다. A구역 지표면 부근에서의 콘관입저항은 B구역의 것보다 크다. 이 결과는 표 1에 나타난 바와 같이 함수비와 동일한 경향을 보이고 있다. 이와 같이 지표면 부근에서 콘관입저항의 차이는 두 구역에서의 증발기간의 차이에 의해 야기된 것이다. 즉, A구역에서의 수분 증발기간이 B구역보다 길어서, A구역 지표면 부근에서의 함수비는 감소되고 콘 관입저항이 증가된 것이다.

2.4 시멘트계 고화재의 특성

본 연구에 사용된 고화재는 시멘트계 고화재이며 보통시멘트(120kg)에 포졸란제(30kg), 계면활성제(0.375kg), 그리고 몇가지 혼화제등을 적절히 혼합한 것이다. 본 고화재는 주로 paste 상태로 사용한다. Table 2는 고화재의 화학적 성분을 나타낸 것이다. 표에 나타난 바와 같이 납, 크롬 등, 그밖의 해로운 성분들이 포함되어 있지 않기 때문에 지반이나 바다를 오염시킬 우려는 없다.

Table 2 Chemical components of the hardening agent

Component	Ignition Loss	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Total
Percent	1.0	27.4	8.9	3.2	56.3	1.3	1.9	100.0

3. 공시체 제작 및 시험

시험에 사용된 시료의 함수비는 액성한계의 3배인 130.5~133.5%로 하였다. 시료와 고화재 혼합시 재료의 분리를 방지하기 위하여 Soil mixer를 사용하였으며 혼합시간은 약 3~5분 정도로 하였다. 표층안정처리토 공시체는 몰드내에 5층으로 나누어 다져 제작하였다. 제작된 공시체는 하루가 지난 후 몰드내에서 추출하여 시험이 실시될 때까지 수중에서 양생되었다. 공시체 제작시 시멘트계 고화재량은 원지반 토량의 $1m^3$당 150kg을 사용하였다. 공시체들은 Table 3에 나타난 바와 같이 물-시멘트비, 양생온도를 변화시켜 제작되었다. 제작된 공시체는 수중에서 3일, 7일, 14일, 28일로 양생되었다. 표층안정처리토의 강도특성을 조사하기 위하여 일축압축시험 휨인장시험을 실시하였다. 휨인장시험(Flexural test)은 휨공시체의 보에 휨을 작용시켜 이것에 의해서 발생하는 파괴시의 강도를 측정 하는 것이다. 공시체의 양단 부근을 2점으로 지지 하고 중앙에서 재하하는 3점재하 방법으로 실시하였다(Goodman, 1989).

Table 3 Condition of specimen preparation

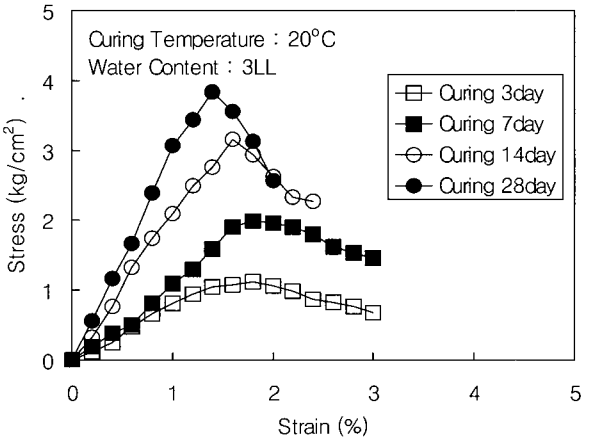
Classification	Condition of specimen preparation
Water-to-cement ratio	0.25 : 1, 0.5 : 1, 0.75 : 1, 1 : 1
Curing temperature	10°C, 20°C, 30°C

4. 시험결과 및 고찰

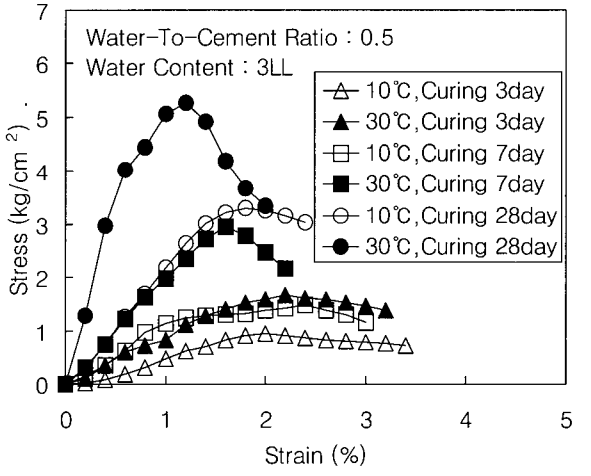
4.1 Stress-strain 거동

Fig. 4는 표층안정처리토 공시체에 대하여 실시된 일축압축시험으로부터 얻은 stress-strain 거동을 나타낸 것이다. Fig. 4(a)는 양생기간이 서로 다른 공시체에 대한 시험결과이고, Fig. 4(b)는 양생온도가 서로 다른 조건에서 제작된 공시체에 대한 시험결과이다.

Fig. 4(a)에서 표층안정처리토의 파괴시 응력-변형률 거동과 파괴전의 응력-변형률 거동은 양생기간에 영향을 받아 명확하게 구분되는 것을 보여주고 있다. 양생기간이 증가함에 따라, 탄성계수와 파괴시의 최대응력은 증가하고 있으나 파괴시의 변형률은 감소하고 있다. 양생기간이 14일, 28일인 공시체에서



(a) Curing times



(b) Curing temperatures

Fig. 4 Stress-strain behavior

는 파괴시 최대응력은 낮은 변형률 아래에서 확실하게 나타나고 있다. 이러한 거동은 표층안정처리토의 재료특성이 시멘트 수화반응에 의해 재령일이 증가할수록 고소성 혹은 취성에 가까워 진다는 것을 설명하고 있다. 양생기간이 14일, 28일인 표층안정처리토의 응력-변형률 거동은 조밀한 모래나 과압밀점토와 비슷한 거동을 보이고 있다. 반면에 양생기간이 3일, 7일인 표층안정처리토의 응력-변형률 거동은 느슨한 모래나 정규압밀점토의 거동과 비슷한 경향을 보이고 있다.

한편, Fig. 4(b)는 표층안정처리토 공시체의 응력-변형률 거동에 대한 양생온도의 영향을 보여주고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 표층안정처리토의 강도특성은 양생온도에 큰 영향을 받고 있다. 양생온도가 높은 표층안정처리토 공시체의 탄성계수와 파괴시의 최대응력은 양생온도가 작은 공시체 보다 크게 나타나고 있다. 그리고 양생기간이 28일인 공시체에 대한 양생온도의 영향은 양생기간이 3일인 공시체보다 크게 나타나고 있다.

Fig. 5는 일축압축강도와 탄성계수와의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 탄성계수 (E_{50})은 표층안정처리토 공시체의 응력-변형률 곡선으로부터 구한 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 표층안정처리토의 탄성계수 증가율은 낮은 압축강도에서 보다 높은 압축강도에서 크게 나타나고 있다. 또한 탄성계수도 물-시멘트비와 양생온도에 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 즉, 탄성계수는 양생온도가 증가함에 따라, 물-시멘트비가 감소함에 따라 증가함을 알 수 있다. 탄성계수와 일축압축강도와의 관계는 $E_{50} = 40e^{q_u/2}$ 같이 나타낼 수 있다.

4.2 강도 특성

Fig. 6은 양생기간에 따른 표층안정처리토 공시체에서 발현되는 강도의 변화거동을 나타낸 것이다. 표층안정처리토 공시체의 일축압축강도는 공시체의 양생기간에 비례하여 증가하고 있다. 각 공시체의 강도는 14일 양생기간 까지는 강도가 급격히 증가하다가 그 이후부터는 시간이 경과할수록 강도증가율은 점차 완만하게 증가하고 있다. 14일 동안 양생된 공시체의 압축강도는 28일 동안 양생된 공시체의 강도에 약 80% 해당된다. 따라서 표층안정처리토 공시체의 강도증가는 양생기간 14일 이전에 대부분 발현되는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 표층안정처리토 공시체의 압축강도에 양생온도가 미치는 영향을 나타낸 것이다. 양생온도의 효과를 조사하기 위하여 공시체의 양생온도는 각각 10°C, 20°C, 30°C를 채택하였다. Fig. 7에서 나타난 바와 같이 공시체의 강도는 양생온도가 높을 수록 증가하는 것으로 나타나고 있다. 28일 동안 30°C에서 양생된 공시체의 강도는 10°C에서 양생된 공시체의 강도보다 거의 2배이상 크게 나타났다. 이러한 경향은 시멘트계 고화재로 교반혼합된 표층안정처리토에서, 양생온도가 높을수록 수화열이 상승하여 물과 시멘트의 수화반응을 촉진시켜 포졸란 반응이 활성화 된다는 것을 의미한다. Havukanen(1983)의 연구결과도 이와 유사한 것으로 나타났다. 따라서 양생온도는 표층안정처리토의 지반안정화 효과를 증가시키는 주요한 요인 가운데 하나로 고려할 수 있다.

Fig. 8은 물-시멘트비가 0.25 : 1에서 1 : 1로 증가함에 따라 표층안정처리토 공시체의 강도는 감소하는 것을 보여주고 있다. 물-시멘트비가 0.25 : 1인 공시체는 물-시멘트비가 0.5 : 1에서 1 : 1인 다른 공시체들 보다 더 큰 강도를 지니고 있다. 그러므로 표층안정처리된 지반의 안정화 효과를 더욱 효과적으로 얻기 위해서는 물-시멘트비를 가능한 한 줄여야하나, 워커빌리티도 물-시멘트비가 감소할수록 감소하므로 교반혼합시 적절한 물-시멘트비를 선정해야 할 필요가 있다.

한편, Fig. 9는 표층안정처리토 공시체의 일축압축강도와 휨인장강도와의 관계를 나타낸 것이다. 그림은 물-시멘트비가 작을수록, 양생온도가 높을수록 일축압축강도에 대한 휨인장강도의 비가 더 크다는 것을 보여주고 있다. 휨인장강도는 일축압축강도의 1/4~1/2사이에 분포하고 있다.

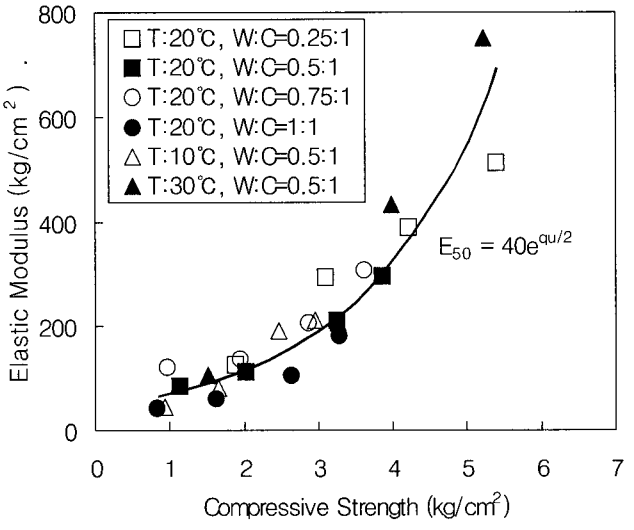


Fig. 5 Relation between unconfined compressive strength and elastic modulus

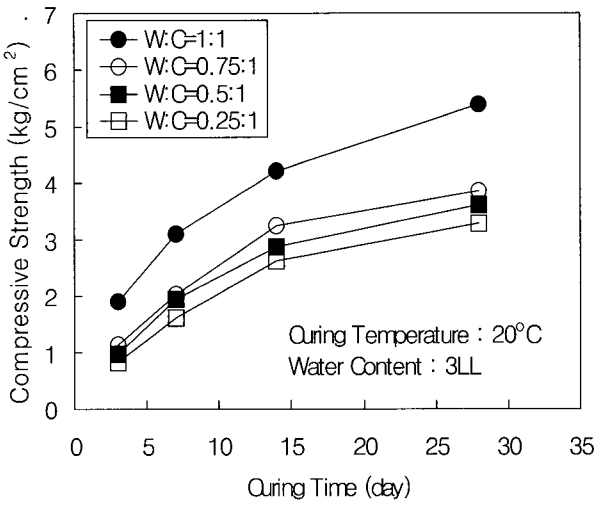


Fig. 6 Increment of strength with curing times

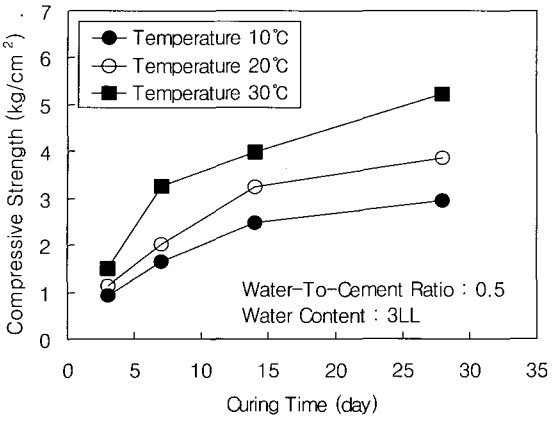


Fig. 7 Increment of strength under different curing temperatures

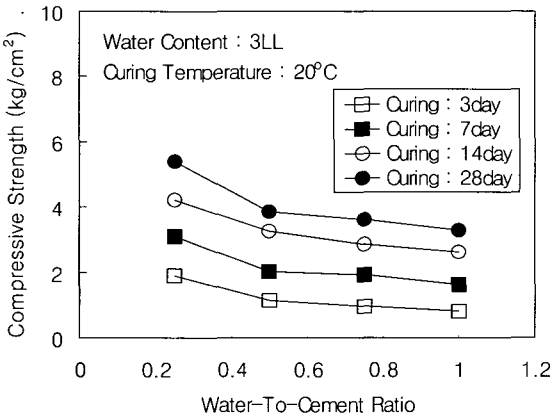


Fig. 8 Variation of strength with water-to-cement ratio

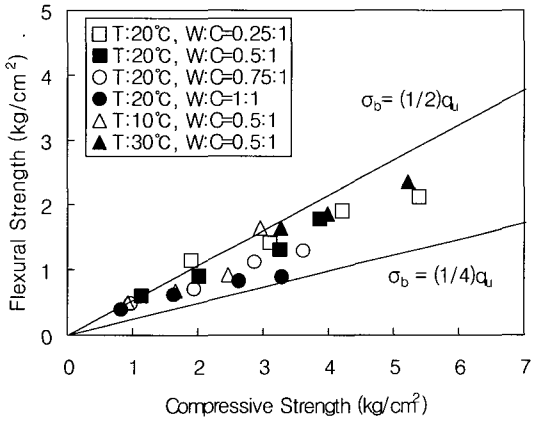


Fig. 9 Relation between compressive strength and flexural strength

4.3 지반개량효과 확인

B구역에서 준설매립된 해성점성토는 표층지반을 개량하기 위하여 현장에서 물-시멘트비를 0.5 : 1로 하여 고화재와 교반 혼합 되었다. Fig. 10은 시멘트계 고화재로 표층안정처리된 지반의 개량효과를 조사하기 위하여, 현장에서 실시된 정적콘관입시험 결과를 나타낸 것이다. 해성점성토로 준설매립된 표층부의 콘관입저항은 0.15kg/cm^{2}였으나, 시멘트계 고화재와 교반 혼합하여 3일이 지난 후 표층부의 콘관입저항은 7.0kg/cm^{2}까지 증가하였다. 교반혼합 후 7일이 지난 후의 표층부의 강도는 3일 강도보다 약간 증가하는 것으로 나타났다. 콘관입저항으로부터 환산된 압축강도는 양생기간이 3일인 경우에는 1.4kg/cm^2 이고, 양생기간이 7일인 경우에는 1.6kg/cm^2 이다. 이 값은 Fig. 6에 나타낸 물-시멘트비가 0.5 : 1인 표층안정처리토 공시체의 압축강도와 거의 비슷하다. 따라서 시멘트계 고화재로 안정처리된 표층지반은 공학적특성이 상당히 개선되었으며 하중지지능력도 증가하는 것으로 나타났다.

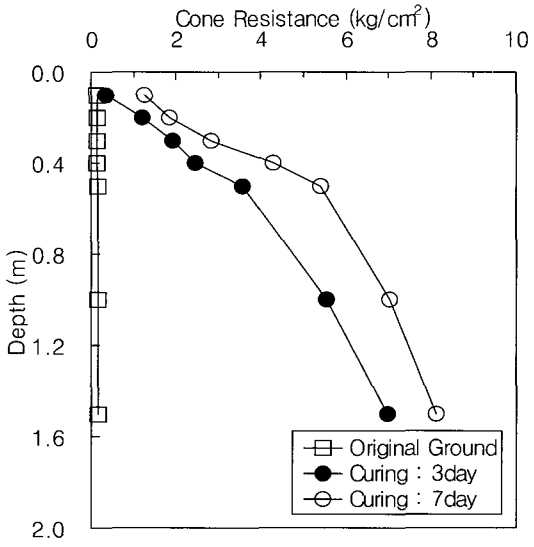


Fig. 10 Soil-stabilizing effect of hardening agent in field

5. 결 론

시멘트계 고화재로 안정처리된 표층지반의 개량효과 및 강도특성을 조사하기 위하여 일련의 실내시험 및 현장시험을 실시하여 얻은 결과를 정리하여 나타내면 다음과 같다.

(1) 표층안정처리토의 파괴시 응력-변형률 거동과 파괴전 응력-변형률 거동은 양생기간과 양생온도에 영향을 받으며, 양생기간이 길수록, 양생온도가 높을 수록 고소성 혹은 취성에 가까운 거동을 보이고 있다.

(2) 표층안정처리토의 강도는 양생기간 14일 이전에 대부분 발현되며. 양생기간이 길고 양생온도가 높을수록 증가하고, 물-시멘트비가 클수록 감소한다.

(3) 표층안정처리토의 탄성계수와 일축압축강도에 대한 휨인장강도 비는 물-시멘드비가 작을수록, 양생온도가 높을수록 더 크게 나타났다.

(4) 시멘트계 고화재로 안정처리된 표층지반은 공학적특성이

상당히 개선되었으며 하중지지능력도 증가하는 것으로 나타났다.

후 기

이 논문은 2004년 두뇌한국 21 사업에 의하여 지원되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

천병식, 고경환, 김진춘 (2002). "초연약 해성점토의 표층고화처리를 위한 최적배합에 관한 연구", 한국지반공학회 논문집, 제18권, 제4호, pp 33-43.

홍원표, 김두영, 윤중만, 유승경 (1997). "표층고화처리된 초연약지반의 거동(Ⅰ) -실내모형실험-", 대한토목학회 논문집, 제17권, 제Ⅲ-4호, pp 425-434.

홍원표, 진성기, 박경태, 이종안 (1997). "표층고화처리된 초연약지반의 거동(Ⅱ) -현장실험-", 대한토목학회 논문집, 제17권, 제Ⅲ-4호, pp 435-442.

Goodman. R.E. (1989) Introduction to Rock Mechanics, 2nd edition. pp 58-66.

Havukanen, J. (1983). "The Utilization of Compacted Coal Ash in Earth Works", Proceedings of the 8th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol 2, pp 773-776.

Japan Cement Corporation (1994). "Soil Improvement Manual by Cement-hardening agent", 2th edition. pp 31-39 (in Japanese).

Kuroda, E. et al., (1983). "Effect of Soil Improvement by Cement-hardening agent" Proceedings of the 18th Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (in Japanese), No 5, pp 28-31.

Littlejohn, G.S. (1982). "Design of Cement Based Grouts", Proceedings of the ASCE Specialty Conference on Grouting in Geotechnical Engineering, New Orleans, pp 35-48.

Nyame, B.K. and Illston, J.M. (1980). "Capillary Pore Structure and Permeability of Hardened Cemented Paste", Proceedings of the Seventh International Congress on the Chemistry of Cement, Paris, France, Vol 3, pp 181-185

Schwarz, L.G. and Krizek, R.J. (1992). "Effect of Mixing on Rheological Properties of Microfine Cement Grout", ASCE Special Technical Publication on Grout, Soil Improvement and Geosynthetics, Vol 1, No 30, New Orleans, pp 512-525.

Yoshida, S. (1991). "Soil Stabilization using Cement Types", Foundation Engineering, Vol 9, No 2, pp 28-37 (in Japanese).

2004년 1월 29일 원고 접수
2004년 7월 15일 최종 수정본 채택