



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시, 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리, 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지, 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

점토-시멘트 혼합토의 강도특성에
영향을 미치는 배합조건에 관한 연구



토 목 공 학 과

정 애 숙

공 학 석 사 학 위 청 구 논 문

점토-시멘트 혼합토의 강도특성에
영향을 미치는 배합조건에 관한 연구

지도교수 정 두 회

이 논문을 공학석사 학위청구논문으로 제출함

2008년 02월

부경대학교 대학원

토 목 공 학 과

정 애 숙

정애숙의 공학석사 학위논문을 인준함

2008년 02월 26일



주 심	김 명 식	인
-----	-------	---

위 원	정 진 호	인
-----	-------	---

위 원	정 두 회	인
-----	-------	---

목 차

표 목 차	i
그 립 목 차	ii
제1장 서 론	1
1.1 연구의 배경	1
1.2 연구의 동향	2
1.3 연구의 목적	3
제2장 이론적 고찰	4
2.1 DCM 공법의 고화원리	4
2.2 DCM 개량 지반의 공학적 성질	4
제3장 시험조건 및 방법	19
3.1 시험조건	19
3.2 시험방법	22
제4장 시험결과의 고찰	27
4.1 재령과 혼합방식에 의한 영향	27
4.4 점토-시멘트 건조중량비에 의한 영향	35
4.5 물-시멘트비(w/c)에 대한 영향	44
4.6 (원지반 점토+물)-시멘트비(wc/c)에 의한 영향	48

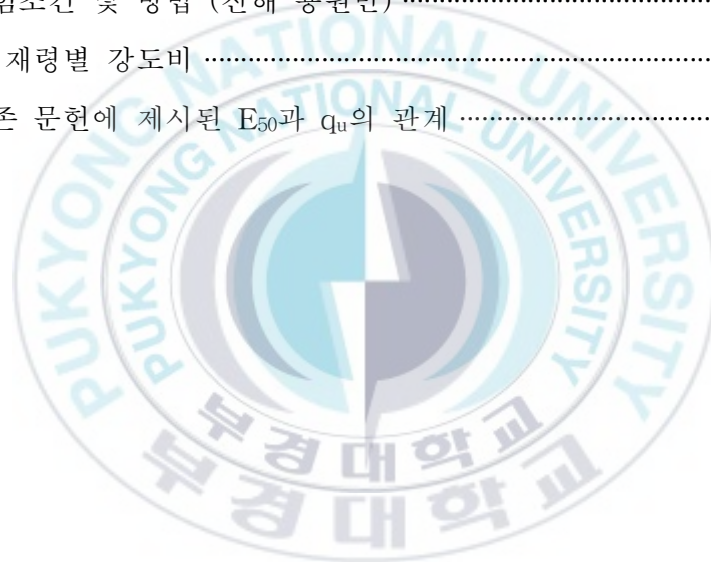
목 차 (계 속)

4.7 교반회전속도에 의한 영향	53
4.8 교반시간에 의한 영향	59
4.9 모래 첨가량에 의한 영향	62
제5장 결 론	67
참고문헌	69



표 목 차

표 2.1 각 재령간의 강도관계(실내혼합토)	15
표 3.1 원지반 시료의 물리적 특성	19
표 3.2 시험조건 및 방법 (부산신항)	23
표 3.3 시험조건 및 방법 (김해 화목지구)	23
표 3.4 시험조건 및 방법 (낙동강 염막지구)	24
표 3.5 시험조건 및 방법 (김해 장유지구)	25
표 3.6 시험조건 및 방법 (진해 용원만)	26
표 4.1 각 재령별 강도비	30
표 4.2 기존 문헌에 제시된 E_{50} 과 q_u 의 관계	32



그 립 목 차

그림 2.1 고화원리	4
그림 2.2 점성토와 안정제의 반응	5
그림 2.3 재령경과에 따른 혼합토의 조직변화(배율:20,000배)	6
그림 2.4 혼합토의 강도에 영향을 미치는 주요 요인	7
그림 2.5 실내혼합토의 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 첨가량과 q_u 의 관계 ($\omega=100\%$, $T_c=91$ 일)	8
그림 2.6 개량전 흙의 함수비와 실내혼합토의 이론상 함수비의 관계	10
그림 2.7 현 위치 혼합토의 함수비 측정 예(일본 동경만)	10
그림 2.8 개량전 흙의 함수비와 실내혼합토의 이론상 혼합밀도의 관계	12
그림 2.9 현 위치 혼합토의 밀도 측정 예(일본 동경만)	12
그림 2.10 시멘트 첨가량에 따른 강도비교	13
그림 2.11 재령에 따른 실내 혼합토의 일축압축강도	14
그림 2.12 일축압축강도 q_{u7} 과 q_{u28} 의 관계	16
그림 2.13 일축압축시험에서 혼합토와 무혼합토의 응력-변형률 관계	17
그림 2.14 실내혼합토의 E_{50} 과 q_u 의 관계	18
그림 2.15 모래함유율과 E_{50}/q_u 의 관계(실내개량토)	18
그림 4.1 습윤 및 건조혼합방식에서 일축압축강도와 재령과의 관계	28
그림 4.2 습윤 및 건조혼합방식에서 일축압축강도 q_{u7} 과 q_{u28} 의 관계	29
그림 4.3 습윤 및 건조혼합방식에서의 변형계수와 재령과의 관계	31
그림 4.4 습윤 및 건조혼합방식에서 일축압축강도와 변형계수와의 관계	33
그림 4.5 습윤 및 건조혼합방식에서 일축압축강도와 파괴변형률과의 관계 ...	35
그림 4.6 시멘트 함량과 일축압축강도와의 관계	36

그 립 목 차 (계 속)

그림 4.7 습윤혼합방식에서 재령별 시멘트함량과 일축압축강도의 관계	 38
그림 4.8 건조혼합방식에서 재령별 시멘트함량과 일축압축강도의 관계	 39
그림 4.9 습윤혼합방식에서 재령별 시멘트함량과 변형계수와의 관계	 41
그림 4.10 건조혼합방식에서 재령별 시멘트함량과 변형계수와의 관계	 43
그림 4.11 축방향 변형율과 축하중과의 관계	 44
그림 4.12 습윤혼합방식에서 물-시멘트비와 일축압축강도와의 관계	 46
그림 4.13 습윤혼합방식에서 물-시멘트비와 변형계수와의 관계	 48
그림 4.14 재령별 (원지반점토+물)-시멘트비와 일축압축강도와의 관계	 50
그림 4.15 재령별 (원지반점토+물)-시멘트비와 일축압축강도와의 관계(기존문 헌과의 비교)	 51
그림 4.16 재령별 (원지반점토+물)-시멘트비와 변형계수와의 관계	 53
그림 4.17 교반회전속도와 일축압축강도와의 관계	 56
그림 4.18 교반회전속도와 변형계수와의 관계	 58
그림 4.19 교반시간과 일축압축강도와의 관계	 60
그림 4.20 교반시간과 변형계수와의 관계	 61
그림 4.21 습윤혼합방식에서의 재령별 모래 함량과 일축압축강도와의 관계	 64
그림 4.22 습윤혼합방식에서의 재령별 모래 함량과 변형계수와의 관계	 66

Mixing factors affecting the strength characteristics of Clay-Cement Mixtures

Ae-Sook Jeong

*Department of Civil Engineering, Graduate School,
Pukyong National University*

Deep cement mixing method (DCM) has been frequently employed to increase a bearing capacity and to reduce a settlement of soft foundation soils. The magnitude of strength increase of soil stabilized with the deep cement mixing method is influenced by several factors because the basic mechanism of strength increase is closely related to the chemical reaction between soil and cement. The factors can be divided into four categories such as characteristics of binder, soil conditions, mixing conditions, and curing conditions.

The objective of this study is to investigate the effect of various factors on the strength characteristics of clay-cement specimens fabricated in the laboratory. Factors evaluated in the study include sand and water content in the base clay, mixing method, quantity of cement, degree of mixing, mixing time, mixing velocity, quantity of sand, and curing time. The unconfined compressive strengths of clay-cement specimens fabricated with a wet mixing method were appeared to be smaller than those fabricated with a dry mixing method. The unconfined compressive strengths of clay-cement specimens tended to decrease as the water-cement ratio was increased. The amount of sand and the water

content in the base clay has significantly affected the unconfined compressive strength of clay-cement specimens. In addition, the rotation speed of mixing blades and mixing time has also a considerable effect on the strength of clay-cement specimens. The water-clay to cement ratio showed a better correlation with a unconfined compressive strength of clay-cement specimens compared to the water-cement ratio used in concrete industry.

Keywords : Deep cement mixing method, Factors, Unconfined compressive strength, Clay-water-cement ratio, mixing time, mixing velocity, quantity of sand



제1장 서론

1.1 연구의 배경

연약지반 개량공법의 하나인 심층혼합공법이 유럽과 일본에서 개발된 이후 1975년 이후부터 건설현장에서 다양하게 상용화되어 왔다.

심층혼합공법(Deep Cement Mixing Method, 이하 DCM 공법)은 연약지반 내에 시멘트와 물을 혼합한 안정처리재(슬러리 또는 시멘트 분말)를 저압으로 주입하면서 회전날개가 장착된 교반기를 회전시켜 교반혼합하고 시멘트의 경화반응을 이용하여 원지반내 토층 전반을 소정의 균일한 강도로 개량체를 조성하는 공법이다. DCM 공법은 해상 및 육상 연약지반에 이용되며, 최저 2m에서 최고 70m(수심포함)까지 시공이 가능하며, 소음, 진동 등의 공해와 주변지반의 교란이 적은 공법이다. 토목 및 건축 구조물 기초지반의 지지력 증가, 연약지반위 성토체의 안정성 증대, 침하 경감 등으로 광범위하게 사용되고 있다.

DCM 공법의 가장 중요한 지반공학적 특징은 강도의 증가이다. 충분한 변형계수와 장기적 안정성을 위해 일정한 강도가 필요하다. DCM 공법으로 처리된 지반의 안정화에 영향을 미치는 요인으로는 원지반의 물성치, 지반을 구성하는 흙의 입도조성 및 점토광물, 안정처리재의 종류와 양, 양생기간 및 양생온도, 교반속도 등이 있다. 단순히 지반조사만으로는 안정처리된 지반의 전단강도를 정확하게 예측하는 것이 어려우므로 안정처리재, 양생기간, 교반속도 그리고 교반시간 등을 다양화하면서 시료의 압축강도를 측정함으로 표준화된 배합설계조건을 정립하는 것이 매우 중요하다. 이러한 배합설계과정을 이용한 실험은 실제 건설현장에서 소정의 강도를 얻는데 중요한 역할을 하고 있다. 실제 건설현장의 흙의 강도와 실험실에서 동일한 지역의 흙으로 제작한 혼합토 시료의 강도와는 상이한 차이가 있다. DCM 공법 설계시 개량지반의 변형

해석에 실내배합시험의 일축압축시험을 통해서 평가한 변형계수를 적용한다. 그러나 현재까지 보고된 각종의 문헌자료에 의하면 국내의 점토지반에 적용한 혼합토의 변형계수가 지나치게 낮게 평가되어 외국의 사례에 비해서 과다 설계가 되고 있는 실정이다.

1.2 연구의 동향

DCM 공법은 혼합방식에 따라 건조혼합방식(Dry Mixing Method)과 습윤혼합방식(Wet Mixing Method)으로 구분하고 있다. 건조혼합방식은 시멘트 분말을 고압으로 분사하면서 교반날개를 이용해서 시멘트와 흙을 혼합하는 방법이고, 습윤혼합방식에서는 물과 시멘트를 혼합한 슬러리를 주입하여 교반날개를 이용해서 혼합하는 방법이다.

DCM 공법에 관한 외국의 연구는 주로 실내시험을 통해서 혼합토의 물리적, 역학적 특성에 영향을 미치는 인자들에 관한 연구가 주류를 이루고 있으며, 일본을 중심으로 점토-시멘트 기둥의 거동을 분석하기 위한 원심모형실험을 수행하였으며, Kivelo(2000), Filz(2004, 2005) 등은 해석적 방법을 통하여 점토-시멘트 기둥의 거동을 분석하는 연구를 수행하였다. 국내의 경우에도 1990년대 중반에 DCM 공법을 도입한 이래 시공실적은 증가하고 있으나 현재까지 주로 외국의 연구결과와 시공경험을 토대로 설계 및 시공을 하고 있으며, 국내의 토질특성을 고려하고 배합방법 및 교반방법을 다양하게 하는 연구가 실시되고 있으나 아직 미흡한 실정이다.

최근 일본의 표준화된 교반장치는 약 120~300rpm의 회전속도로 시공이 이루어지는 장비를 채택하고 있으며, 교반하는 동안 교반기의 상·하 왕복이 가능하도록 장치되어 있다. 그러나 국내에서는 교반기의 회전속도에 대한 표준화는 아직 미흡한 실정이다.

1.3 연구의 목적

국내에 DCM 공법이 도입된 이래로 시공실적은 양적으로 증가하였으나 배합설계에 대한 연구가 미흡하여 외국의 연구결과와 시공경험을 토대로 설계 및 시공을 하고 있어 국내 연약점토의 특성을 반영하지 못하여 DCM 공법의 신뢰성과 경제성에 대한 의문이 대두되고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 실내시험을 통하여 혼합토의 강도에 영향을 미치는 주요 인자인 혼합방식, 원지반 함수비, 시멘트 첨가량, 교반속도, 교반시간, 모래 첨가 등에 대한 평가를 실시하여 배합설계법의 토대를 제시하고자 한다.



제2장 이론적 고찰

2.1 DCM 공법의 고화원리

혼합토는 시멘트와 물의 수화반응에 의한 수화생성물과 점토광물의 포졸란 반응에 의해 고화된다. 그림 2.1은 고화원리를 설명하고 있다.

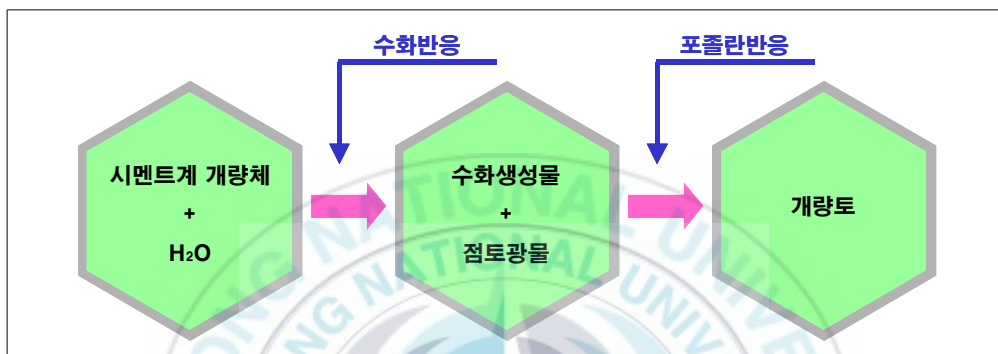


그림 2.1 고화원리

2.2 DCM 개량 지반의 공학적 성질

본 장에서는 혼합토가 고화되어 강도를 발휘시키는 구조를 설명하고 일본 및 국내의 물리적, 역학적 시험결과를 참조하여 혼합토의 공학적 성질에 대해 설명하고자 한다.

2.2.1 혼합토의 고화구조

점성토와 시멘트슬러리의 반응 및 그 반응생성물의 개요를 그림 2.2에 나타내었다. 점토와 시멘트 슬러리와 혼합에 의해 만들어진 혼합토는 다음 두 가지 경화체로 성립된다.

- ㉠ 시멘트와 물과의 반응(수화반응)에 의해 수화 생성물로 되는 경화체 (그림

2.2의 ㉠, ㉡)

㉢ 시멘트의 수화에 의해 생성된 수산화 칼슘(Ca(OH)_2)과 점성토가 반응(포졸란 반응)한 반응생성물이 되는 경화체 (그림 2.2의 ㉣)

그림 2.3 (a)~(d)는 재령 일에 따른 주사형 전자현미경에 의한 혼합토의 마이크로 단위 조직변화를 나타낸 것이다. 재령이 진행됨에 따라 혼합토의 조직이 치밀하게 되어가는 양상을 알 수 있다.

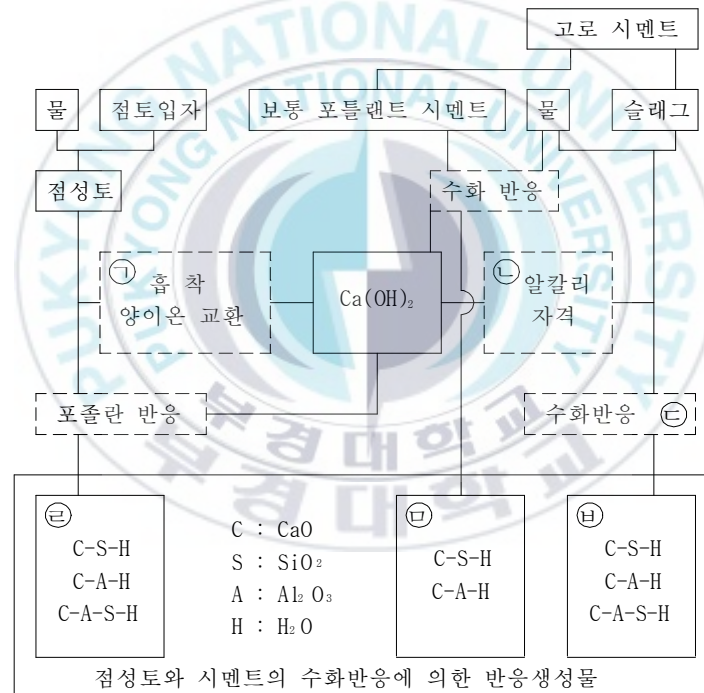
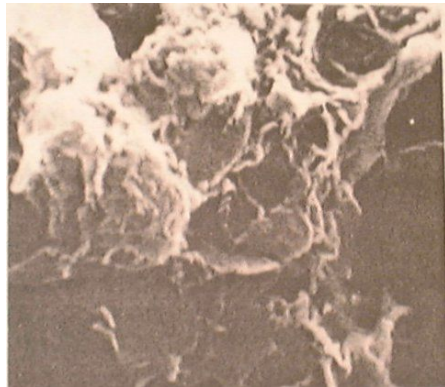
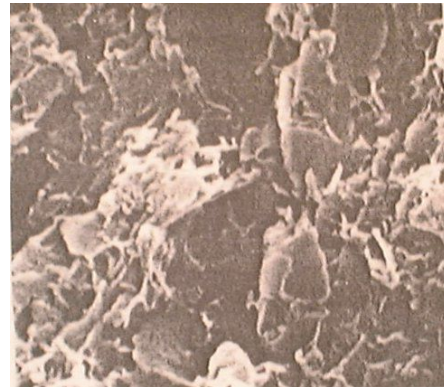


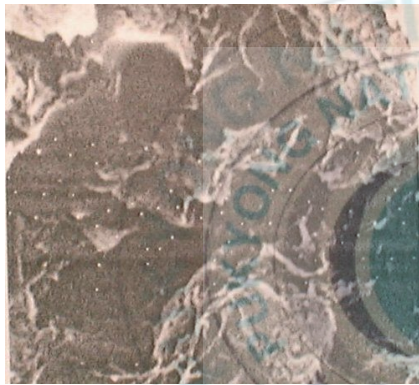
그림 2.2 점성토와 안정제의 반응



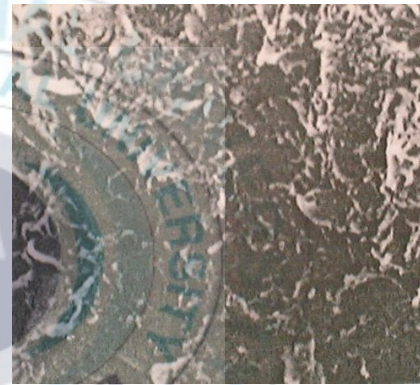
(a) 재령 1일



(b) 재령 3일



(c) 재령 7일



(d) 재령 28일

그림 2.3 재령경과에 따른 혼합토의 조직변화(배율:20,000배)

2.2.2 혼합토의 공학적 성질에 영향을 미치는 요인

혼합토의 공학적 성질(특히 강도)은 그림 2.4에 나타낸 바와 같이 재료, 배합비, 원지반 흙의 특성, 혼합방법, 양생환경, 시험방법 등 다양한 인자들에 의하여 영향을 받는 것으로 알려지고 있다.

일본의 경우 해상공사에는 보통포틀랜드시멘트 또는 고로시멘트(B종)을 사용하여 만족할만한 성과를 이루었지만 시멘트의 종류, 혼합의 조건이 동일하

다 하더라도 대상토에 따라 혼합토의 강도는 달라진다. 이는 대상토의 포졸란 반응성의 차이 때문으로 대상토의 포졸란 반응성을 파악한다면 혼합토의 경화 특성을 예측할 수도 있다.

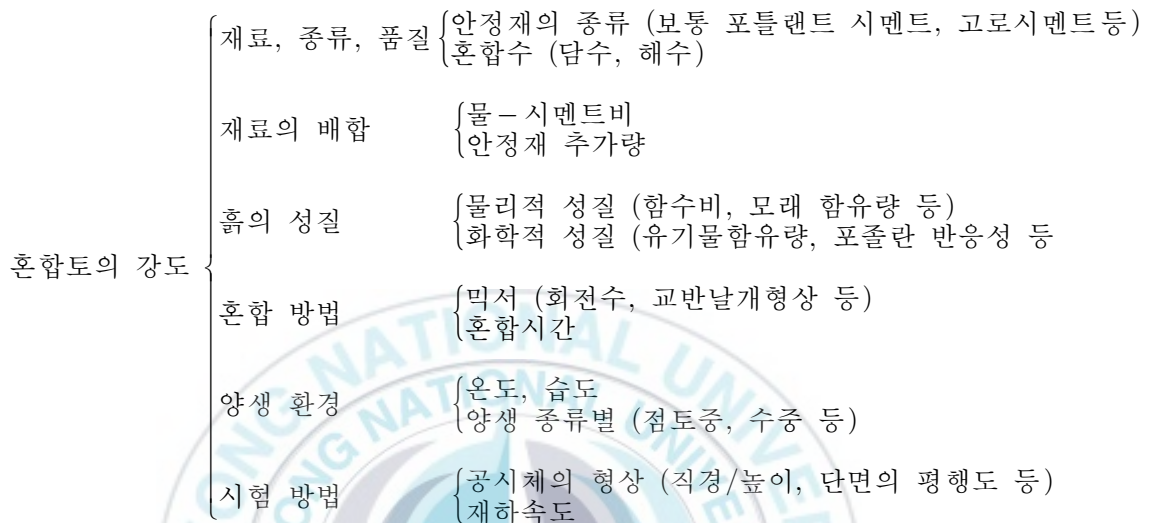


그림 2.4 혼합토의 강도에 영향을 미치는 주요 요인

대상토의 포졸란 반응성을 파악하는 확실한 방법은 Ca(OH)_2 에 의한 고화시험이 있지만 보다 간단한 방법도 필요하다. 그림 2.5에는 일본 내 일부지역의 대상토에 대하여 Ca(OH)_2 첨가량과 일축압축강도(q_u)와의 관계를 나타내었다. 동일한 조건이라도 대상토의 특성에 따라 혼합토의 강도특성에 뚜렷한 차이가 나는 것을 알 수 있다.

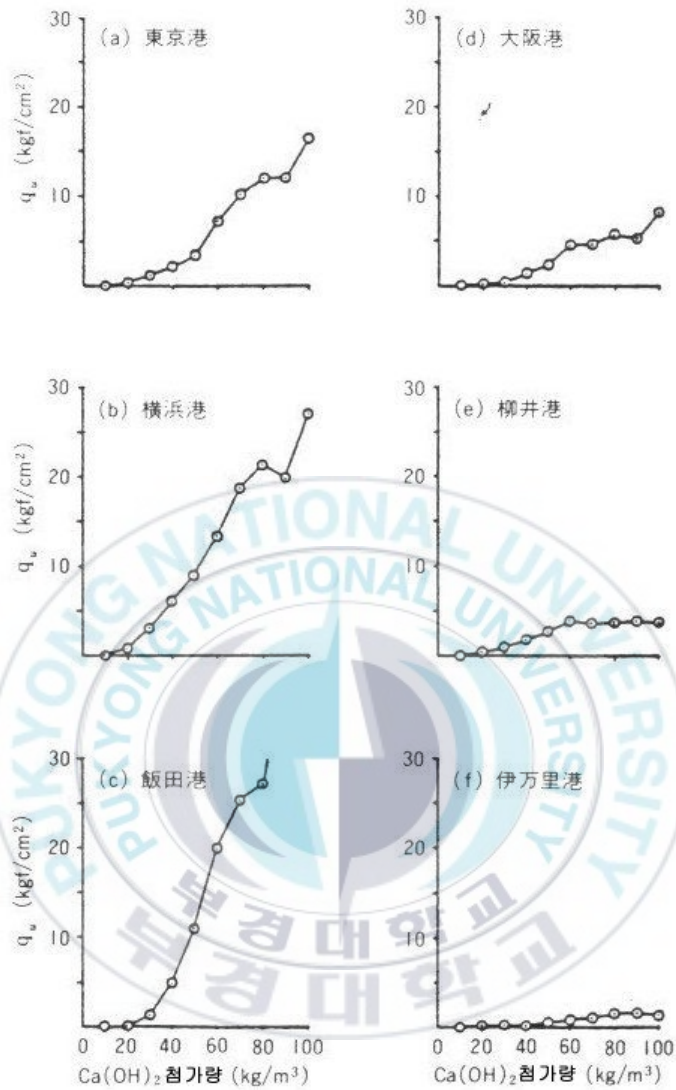


그림 2.5 실내 혼합토의 Ca(OH)_2 첨가량과 q_u 의
관계 ($\omega=100\%$, $T_c=91$ 일)

2.2.3 혼합토의 물리적 성질

1) 함수비

혼합토의 이론상 함수비는 시멘트가 그 중량 1/4의 물과 화학적으로 혼합한다고 가정한 경우, 다음 근사식으로 나타낼 수 있다.

$$\omega_s = \frac{\frac{\omega_o}{100} + (\beta - 0.25) \left(\frac{1}{G_s} + \frac{\omega_o}{100} \cdot \frac{1}{G_w} \right) \times \frac{\alpha}{1000}}{1 + 1.25 \times \left(\frac{1}{G_s} + \frac{\omega_o}{100} \cdot \frac{1}{G_w} \right) \times \frac{\alpha}{1000}} \times 100 \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

여기서, ω_s : 혼합토의 함수비 (%)
 G_s : 토립자 비중
 G_w : 물의 비중
 α : 안정재 첨가량 (kg/m^3)
 β : 물시멘트비 (W/C)
 ω_o : 대상토의 함수비 (%)

그림 2.6은 개량전 대상토의 함수비와 식 (2.1)에 의한 혼합토의 함수비와의 관계를 나타낸 것이다. 그림 2.7은 현 위치 혼합토의 함수비 측정 예를 나타내었다.

혼합토의 함수비는 개량전 대상토의 함수비보다 일반적으로 낮게 평가된다. 그러나 그 저하량은 개량전 대상토의 함수비가 저하함에 따라서 작게 된다. 이것은 혼합토가 많은 수분을 가진 채 고화한다는 것을 의미하며, 혼합토의 압축특성 및 전단특성에 큰 영향을 미친다.

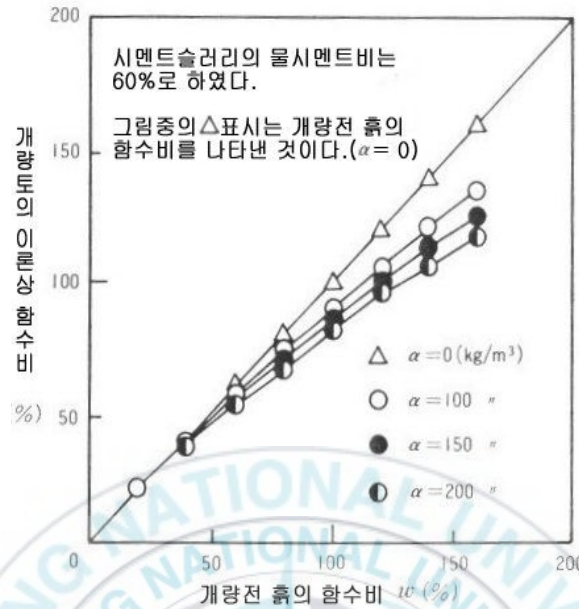


그림 2.6 개량전 흙의 함수비와 실내 혼합토의 이론상 함수비의 관계

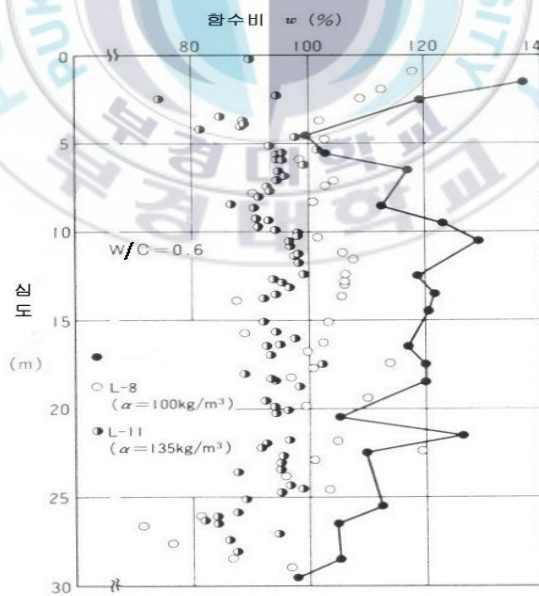


그림 2.7 현 위치 혼합토의 함수비 측정 예(일본 동경만)

2) 밀도

혼합토의 이론상 밀도는 시멘트의 수화에 따른 수축은 없다고 가정한 경우, 다음 근사식으로 나타낼 수 있다.

$$\rho_t = \frac{100 + \omega_o + (1 + \beta) \left(\frac{100}{G_s} + \frac{\omega_o}{G_w} \right) \times \frac{a}{1000}}{\frac{100}{G_s} + \left(\frac{1}{G_c} + \frac{\beta}{G_w} \right) \left(\frac{100}{G_s} + \frac{\omega_o}{G_w} \right) \times \frac{a}{1000} + \frac{\omega_o}{G_w}} \times \rho_w \quad \dots (2.2)$$

여기서, ω_c : 대상토의 함수비 (%)

G_s : 토립자 비중

G_c : 안정재의 비중

G_w : 물의 비중

α : 안정재 첨가량 (kg/m^3)

β : 물시멘트비 (W/C)

ρ_w : 물의 밀도 (t/m^3)

ρ_t : 혼합토의 밀도 (t/m^3)

그림 2.8은 개량전 대상토의 함수비와 식 (2.2)에 의한 혼합토의 밀도와 관계를 개량전 흙의 함수비에 대해 나타낸 것이며, 혼합토의 밀도는 개량전 대상토의 밀도보다 확실히 크게 된다. 그러나 설계상에서는 밀도의 증가를 무시하므로, 혼합토의 밀도를 개량전 대상토의 밀도와 같이 취급하는 경우가 많다. 그림 2.9에 현 위치 혼합토의 밀도 측정 예(일본 동경만)를 나타내었다.

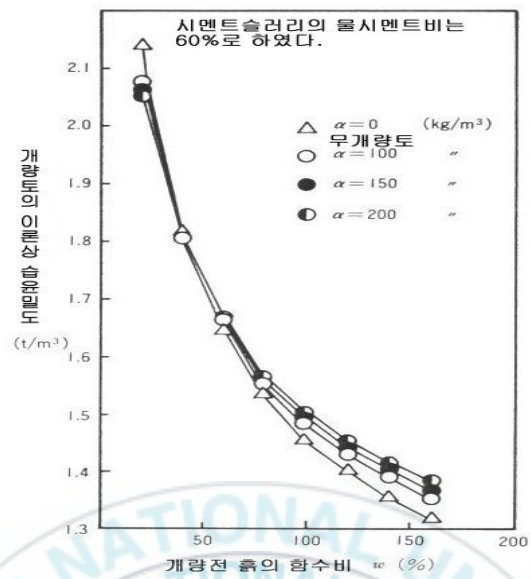


그림 2.8 개량전 흙의 함수비와 실내 혼합토의 이론상 혼합밀도의 관계

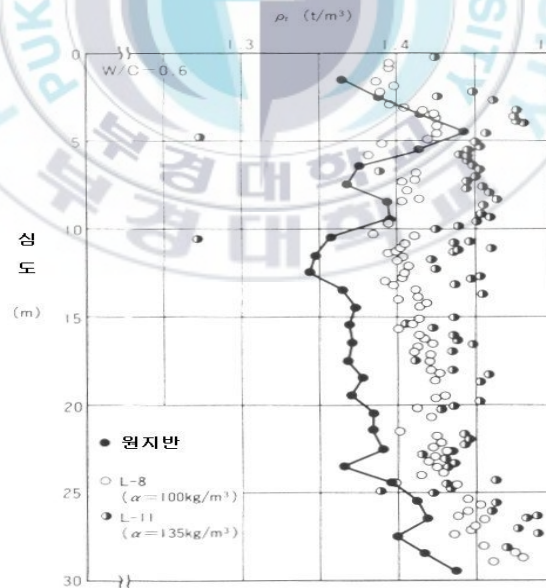


그림 2.9 현 위치혼합토의 밀도 측정 예 (일본 동경만)

2.2.4 혼합토의 역학적 성질

1) 일축압축강도

(1) 혼합토의 일축압축강도 q_u 와 관련된 특성

그림 2.10 (a), (b)는 국내현장에서 고로시멘트 및 보통포틀랜드 시멘트의 첨가량에 따른 혼합토의 일축압축강도를 비교한 것이고, 그림 2.11은 물-시멘트비에 따른 혼합토의 일축압축강도를 비교한 것이다. 시멘트의 종류에 상관없이 첨가량에 따라 강도가 증가하고 물-시멘트비가 낮을수록 강도가 증가하는 경향을 나타낸다.

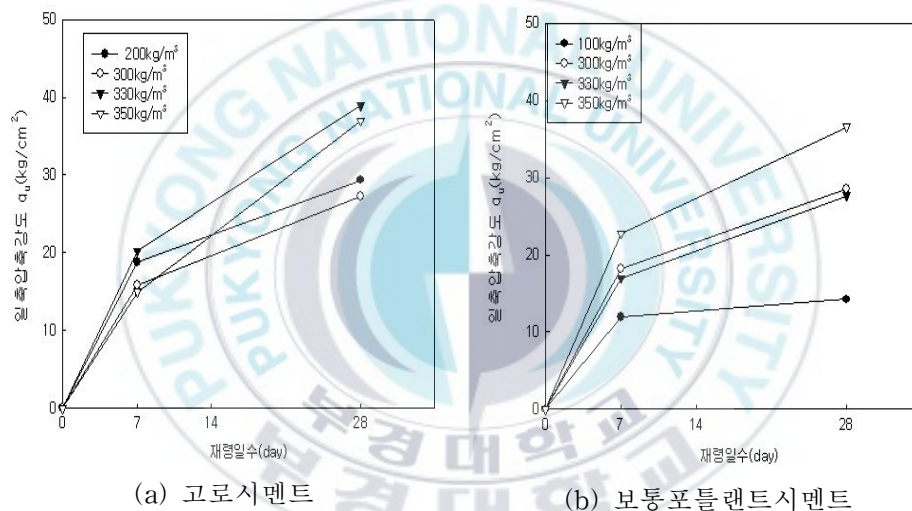
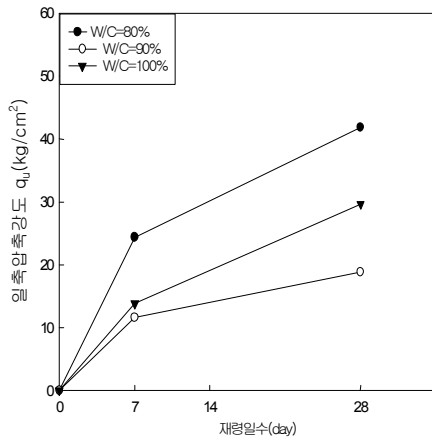
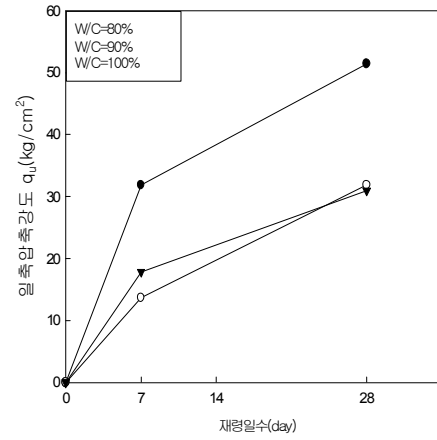


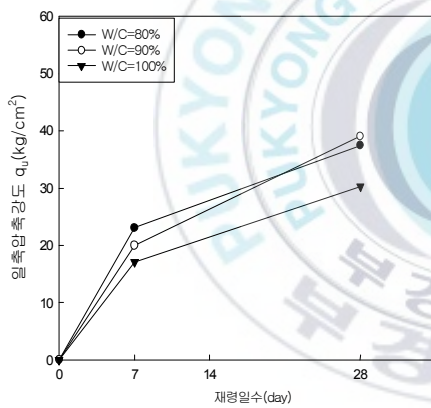
그림 2.10 시멘트 첨가량에 따른 강도비교



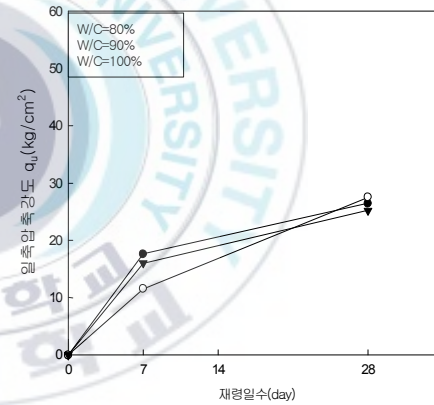
(a) 고로시멘트 첨가량 300 kg/m^3
(부산신항 민자2-1단계-소형선부두)



(b) 고로시멘트 첨가량 330 kg/m^3
(부산신항 민자 1-1단계)



(c) 보통시멘트 첨가량 300 kg/m^3
(여수항)



(d) 보통시멘트 첨가량 330 kg/m^3
(울산방파제)

그림 2.11 재령에 따른 실내 혼합토의 일축압축강도

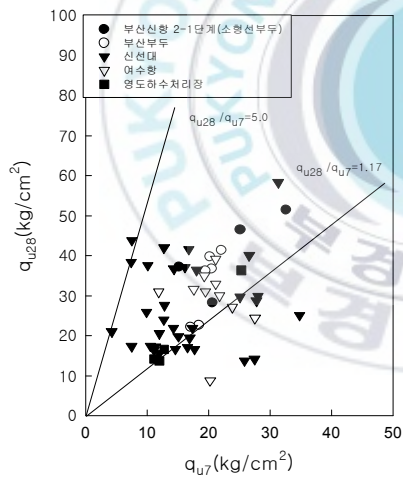
(2) 각 재령시 혼합토의 일축압축강도 상호관계

그림 2.12는 고로시멘트 및 보통포틀랜드시멘트를 사용한 실내혼합토의 일

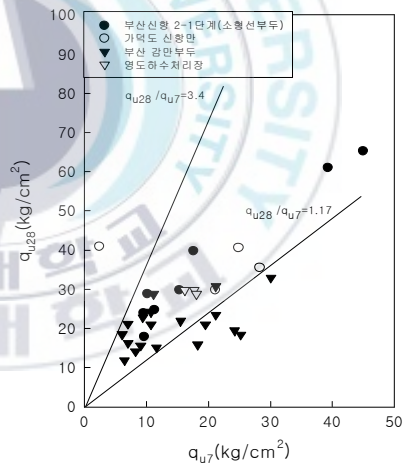
축압축강도 q_{u7} 과 q_{u28} 의 관계(첨자는 재령을 나타낸다)를 나타낸 것이고, 표 2.1은 시멘트 종류 및 첨가량에 따른 각 재령간의 혼합토 강도와의 관계를 정리한 것이다.

표 2.1 각 재령간의 강도관계(실내 혼합토)

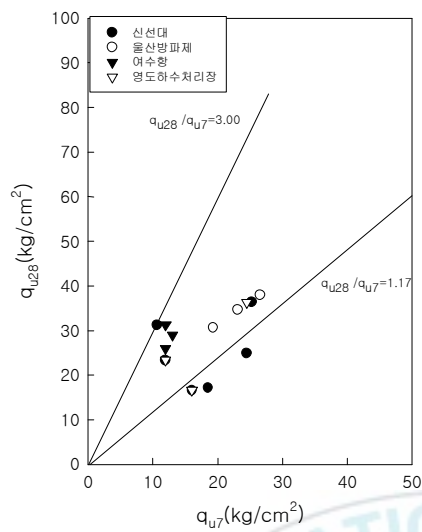
시멘트 첨가량	시멘트의 재령	시멘트 종류	
		보통포틀랜드시멘트	고로시멘트
300kg/m^3	q_{u7} 과 q_{u28}	$q_{u28} = 1.17 \sim 5.00 q_{u7}$	$q_{u28} = 1.17 \sim 3.40 q_{u7}$
330kg/m^3	q_{u7} 과 q_{u28}	$q_{u28} = 1.17 \sim 3.00 q_{u7}$	$q_{u28} = 1.77 \sim 3.50 q_{u7}$



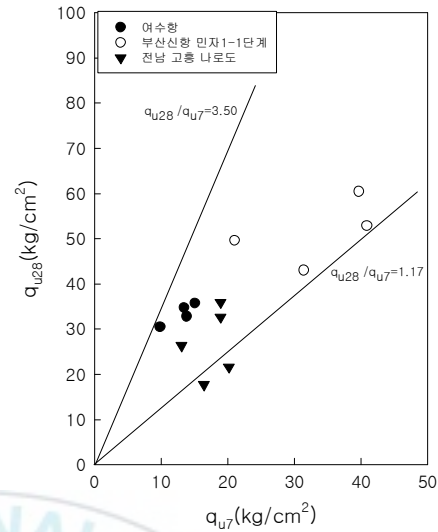
(a) 보통포틀랜드시멘트(300 kg/m^3)



(b) 고로시멘트 (300 kg/m^3)



(c) 보통포틀랜드시멘트 (330 kg/m³)



(d) 고로시멘트 (330 kg/m³)

그림 2.12 일축압축강도 q_{u7} 과 q_{u28} 의 관계

2) 변형특성

(1) 응력-변형율 관계

그림 2.13은 개량전 지반과 혼합토의 응력-변형율 관계를 비교한 것이다. 개량전 지반과 비교해보면 개량지반의 강도와 변형계수는 증가하는 반면에 파괴 변형율은 감소한다.

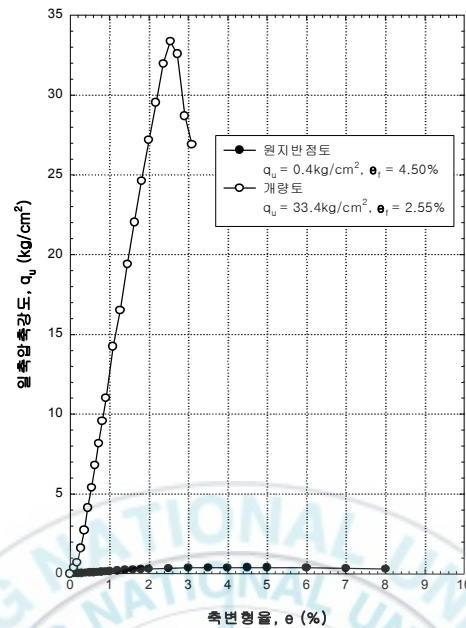


그림 2.13 일축압축시험에서 혼합토와 무혼합토의
응력-변형률 관계

(2) 혼합토의 변형계수

그림 2.14는 각종 혼합토의 일축압축강도 q_u 와 탄성계수 E_{50} 의 관계를 나타낸 것이다. 그림 2.15은 대상토의 모래 함유율과 그 혼합토의 E_{50}/q_u 와의 관계를 나타낸 것이다.

① 혼합토의 일축압축강도 q_u 가 증대함에 따라, 혼합토의 탄성계수 E_{50} 은 증대한다.

② 대상토의 모래 함유율이 증대함에 따라, 혼합토의 탄성계수 E_{50} 은 증가하는 경향이 있다.

③ 대상토의 모래 함유율이 10~15% 인 경우 혼합토의 탄성계수 E_{50} 은 개략 식 (2.3)과 같다.

$$E_{50} = (400 \sim 600) q_u \text{ kgf/cm}^2 \dots\dots\dots (2.3)$$

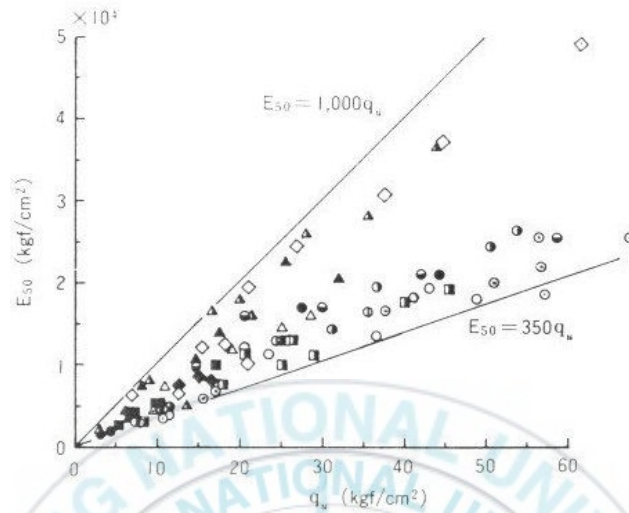


그림 2.14 실내 혼합토의 E_{50} 과 q_u 의 관계

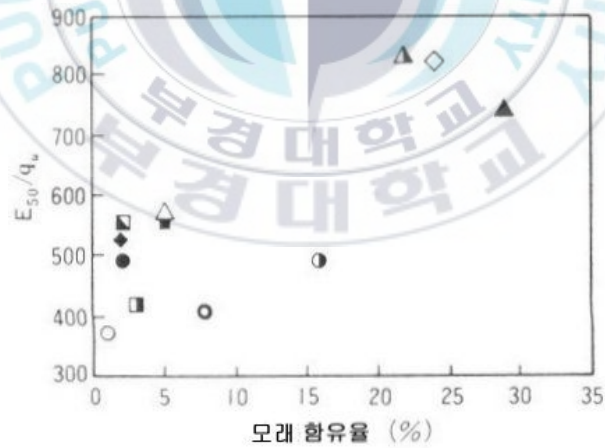


그림 2.15 모래 함유율과 E_{50}/q_u 의 관계(실내 혼합토)

제3장 시험조건 및 방법

3.1 시험조건

본 연구에 사용된 시료는 5개 지역의 연약점토로 부산신항(시료 1), 김해 화목지구(시료 2), 낙동강 염막지구(시료 3), 김해 장유지구(시료 4), 진해 용원만 해상(시료 5)에서 채취한 교란시료를 사용하였으며, 원지반 시료의 물리적 특성은 표 3.1에 나타내었다.

표 3.1 원지반 시료의 물리적 특성

구 분		시료 1	시료 2	시료 3	시료 4	시료 5
단위중량(gf/cm^3)		1.82	1.89	1.84	2.14	1.52
액성한계(%)		42.4	28.95	29.1	41.0	57.7
소성한계(%)		27.64	13.89	20.0	20.0	16.71
소성지수		14.76	15.06	9.1	21.3	40.99
액성지수		0.97	1.30	1.11	0.46	1.64
함수비(%)		45.22	33.41	41.48	28.67	83.86
비중		2.670	2.704	2.671	2.681	2.690
pH		-	6.58	4.67	5.29	
입도 분포	모 래	8%	21.7%	6%	15%	0.46%
	실 트	43.3%	46.6%	45.7%	40.7%	59.25%
	점 토	48.7%	31.7%	39.2%	31.7%	40.29%
	USCS	ML	CL	CL	CL	CH

원지반 점토시료를 튜브를 이용하여 채취한 후 튜브에서 추출하여 일주일동안 함수비 변화없이 보관한 후 혼합토 시료를 성형하였다. 혼합토 시료 성형에는 보통포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 두 가지 방법으로 시료를 제작하였다.

첫 번째 방법은 시멘트와 점토와의 건조중량비에 의한 것이고 다른 하나는

미혼합토 1m³에 대한 시멘트비로 정의된 제조방법으로 시료를 제작하였다. 습윤방식에서의 물-시멘트비는 미혼합토에 시멘트를 섞어 만든 시멘트 슬러리의 물-시멘트비로 나타낸다.

3.1.1 시멘트 슬러리를 안정제로 사용한 습윤혼합방식

물-시멘트 비를 50~300% 범위 안에서 시멘트 슬러리와 원지반 점토를 믹싱기에서 120회/분(r.p.m.)으로 10분간 혼합하였으며, 시멘트 양은 건조중량비의 5, 8, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40%로 하였다.

혼합된 시료는 30분 이내에 PVC플라스틱 몰드(D=50mm, H=100mm)로 부어넣어 시료를 성형하였으며, PVC몰드를 바닥에서 10cm 높이로 들어올려 100회 자유낙하시키는 방법으로 3층 다짐하여 혼합시료내의 공기를 제거하였다. 함수비의 변화를 방지하기 위해 몰드 끝단을 고무마개로 밀봉한 상태에서 24시간 방치한 후에 몰드상하면을 매끄럽게 처리한 후 시료를 몰드에서 탈형하여 22~26°C를 유지하면서 수중 양생하였다. 양생된 시료는 차후에 일축압축강도 시험을 하였다.

3.1.2 시멘트가루를 안정제로 사용한 건조혼합방식

물-시멘트 비를 100%로 하고 시멘트 분말, 물 및 원지반 점토를 믹싱기에서 120r.p.m.으로 10분간 혼합하였으며, 점토에 대한 시멘트양은 건조 중량비의 5, 8, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40%로 하였다.

혼합된 시료는 습윤방식에서와 동일한 방법으로 시료를 성형하였으며 차후에 일축압축강도 시험을 하였다.

3.1.3 모래 첨가량을 다양화한 습윤혼합방식

점토에 대한 시멘트양을 건조중량비의 10%, 물-시멘트비를 100%로 하여 시멘트 슬러리, 모래(입경 0.075mm~4.75mm) 및 원지반 점토를 믹싱기에서

120r.p.m.으로 10분간 혼합하였으며, 점토에 대한 모래의 양은 건조 중량비의 5, 8, 10, 12, 15, 20, 25%로 하였다.

혼합된 시료는 습윤방식에서와 같은 방법으로 시료를 성형하였으며 차후에 일축압축강도 시험을 하였다.

3.1.4 교반 회전속도를 다양화한 습윤혼합방식

점토에 대한 시멘트양은 건조중량비의 10%, 물-시멘트비를 100%로 하여 시멘트 슬러리와 원지반 점토를 믹싱기에서 교반기 회전속도 25, 30, 60, 90, 120, 150, 180r.p.m.으로 하여 시료를 10분간 혼합하였다.

혼합된 시료는 습윤방식에서와 같은 방법으로 시료를 성형하였으며 차후에 일축압축강도 시험을 하였다.

3.1.5 교반 시간을 다양화한 습윤혼합방식

점토에 대한 시멘트양은 건조중량비의 10%, 물-시멘트비를 100%로 하여 시멘트 슬러리와 원지반 점토를 믹싱기에서 120r.p.m.으로 교반 시간을 5, 10 분으로 하여 시료를 혼합하였다.

혼합된 시료는 습윤방식에서와 같은 방법으로 시료를 성형하였으며 차후에 일축압축강도 시험을 하였다.

3.1.6 일축압축강도시험(ASTM D2166)

강도는 ASTM D2166에 의한 일축압축강도 시험을 실시하였다. 시험방법은 지름에 대한 높이비가 1:2(지름5cm, 높이10cm)인 시료에 수직하중만을 재하하고 재하속도는 1mm/min로 하였다. 파괴는 최대 강도일 때로 하였으며, 신뢰성을 높이기 위해 시료를 3개씩 제작하여 시험하였다.

3.2 시험방법

점토종류, 혼합방식, 재령, 물-시멘트비, 시멘트함량, 교반시간, 교반속도, 모래 첨가량 등이 일축압축강도와 기타 물리적 특성에 미치는 영향을 평가하기 위해 시료 1~5를 각각 표 3.2~3.6에 나타낸 조건으로 시료를 제작하였다.

시험 1은 혼합방식이 강도와 기타 물리적 특성에 미치는 영향을 평가하기 위해 점토와 시멘트의 건조중량비는 10%, 물-시멘트비는 100% 조건으로 시료 1, 2, 3, 4, 5에 건조 및 습윤혼합방식의 조건으로 시료를 성형하여 재령 3, 7, 14, 28, 56일에 일축압축강도 시험을 하였다.

시험 2는 점토와 시멘트의 건조중량비에 의한 건조 및 습윤혼합방식이 강도와 기타 물리적 특성에 미치는 영향을 평가하기 위해 물-시멘트비 100%, 점토와 시멘트의 건조중량비 5, 8, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40%, 재령 7, 14, 28일의 조건으로 원지반 시료 1, 3, 4, 5를 이용하여 제작하였다.

시험 3은 물-시멘트비에 의한 습윤혼합방식이 강도와 기타 물리적 특성에 미치는 영향을 평가하기 위해 점토와 시멘트의 건조중량비 10%, 물-시멘트비를 50, 100, 150, 200, 300%, 재령 7, 14, 28일의 조건으로 원지반 시료 1, 3, 4, 5를 이용하여 제작하였다.

시험 4는 물-시멘트비 200, 67, 50, 33%에 점토와 시멘트의 건조중량비를 각각 5, 15, 20, 30%로 하여 재령 7, 14, 28일의 조건으로 시료 3, 4을 이용하여 제작하였다.

시험 5는 교반기의 회전속도가 강도와 기타 물리적 특성에 미치는 영향을 평가하기 위해 점토와 시멘트의 건조중량비 10%, 물-시멘트비 100% 조건으로 교반할 때 교반기의 회전속도를 25, 30, 60, 90, 120, 150, 180r.p.m.으로 하여 재령 3, 7, 14, 28일의 조건으로 시료 2, 3, 4, 5를 이용하여 제작하였다.

시험 6은 교반 시간이 강도와 기타 물리적 특성에 미치는 영향을 평가하기 위해 점토와 시멘트의 건조중량비 10%, 물-시멘트비 100% 조건에서 교반시간을 5분, 10분으로 하여 재령 3, 7, 14, 28일의 조건으로 시료 2, 5를

이용하여 제작하였다.

시험 7은 점토와 모래의 건조중량비에 의한 습윤 혼합방식이 강도와 기타 물리적 특성에 미치는 영향을 평가하기 위해 점토와 시멘트의 건조중량비 10%, 물-시멘트비 100%, 점토와 모래의 건조중량비 5, 8, 10, 12, 15, 20, 25%, 재령 7, 14, 28일의 조건으로 원지반 시료 5를 이용해서 제작하였다.

표 3.2 시험조건 및 방법 (부산신항)

시험	혼합 방식	혼합 시간 (분)	시료 수	원지반점토			물-시멘트비(%)	시멘트 (g)	물(g)	혼합후 점토의 함수비 (%)	혼합시료		
				습윤 중량 (g)	함수비 (%)	건조 중량 (g)					시멘트와 점토의 건조중량비	물,점토-시멘트비	함수비 (%)
1	습윤	10	10	4000	45.22	2754.44	100	275.44	275.44	55.22	10	5.52	50.20
	건조	10	10				100	275.44	275.44	55.22	10	5.52	50.20
2	습윤	10	6	2400	52.71	1571.61	100	78.58	78.58	57.71	5	11.54	54.96
			6				100	125.73	125.73	60.71	8	7.59	56.21
			6				100	157.16	157.16	62.71	10	6.27	57.01
			6				100	235.74	235.74	67.71	15	4.51	58.88
			6				100	314.32	314.32	72.71	20	3.64	60.59
			6				100	157.16	78.58	57.71	10	5.77	52.46
3	습윤	10	6	2400	52.71	1571.61	100	157.16	157.16	62.71	10	6.27	57.01
			6				150	157.16	235.74	67.71	10	6.77	61.55
			6				200	157.16	314.32	72.71	10	7.27	66.10
			6				300	157.16	78.58	82.71	10	8.27	75.19
			6										
			6										

표 3.3 시험조건 및 방법 (김해 화목지구)

시험	혼합 방식	혼합 시간 (분)	시료 수	원지반 점토			물-시멘트비 (%)	교반 속도 (rpm)	시멘트 (g)	물 (g)	혼합시료		
				습윤 중량 (g)	함수비 (%)	건조 중량 (g)					시멘트와 점토의 건조중량비	물,점토-시멘트비	함수비 (%)
1	습윤	10	15	6000	33.41	4497.41	100	120	449.74	449.74	10	4.34	39.46
	건조	10	15				100	120	449.74	449.74	10	4.34	39.46
5	습윤	10	12	4800	33.41	3597.93	100	25	359.79	359.79	10	4.34	39.46
			12				100	30	359.79	359.79	10	4.34	39.46
			12				100	60	359.79	359.79	10	4.34	39.46
			12				100	90	359.79	359.79	10	4.34	39.46
			12				100	120	359.79	359.79	10	4.34	39.46
			12				100	120	269.84	269.84	10	4.34	39.46
6	습윤	5	9	3600	33.41	2698.35	100	120	269.84	269.84	10	4.34	39.46
	건조	5	9				100	120	269.84	269.84	10	4.34	39.46

표 3.4 시험조건 및 방법 (낙동강 염막지구)

시험	혼합 방식	혼합 시간 (분)	시료 수	원지반점토			물-시멘트비 (%)	교반 속도 (rpm)	시멘트 (g)	물(g)	혼합시료		
				습윤 중량 (g)	함수비 (g)	건조 중량 (g)					시멘트와 점토의 건조중량 비	물,점토-시멘트비	함수비 (%)
1	습윤	10	15	6750	41.48	4770.99	100	120	477.10	477.10	10	3.87	35.15
	건조	10	15				100	120	477.10	477.10	10	3.87	35.15
2	습윤	10	9	4050	41.48	2862.60	100	120	143.13	143.13	5	9.30	44.27
			9				100	120	229.01	229.01	8	6.19	45.81
			9				100	120	286.264	286.26	10	5.15	46.80
			9				100	120	429.39	429.39	15	3.77	49.11
			9				100	120	572.52	572.52	20	3.07	51.23
			9				100	120	715.65	715.65	25	2.66	53.18
			9				100	120	858.78	858.75	30	2.38	54.98
			9				100	120	1001.91	1001.61	35	2.19	56.65
			9				100	120	1145.04	1145.01	40	2.04	58.20
			9				100	120	143.13	143.13	5	9.30	44.27
	건조	10	9	4050	41.48	2862.60	100	120	229.01	229.01	8	6.19	45.81
			9				100	120	286.26	286.26	10	5.15	46.80
			9				100	120	429.39	429.39	15	3.77	49.11
			9				100	120	572.52	572.52	20	3.07	51.23
			9				100	120	715.65	715.65	25	2.66	53.18
			9				100	120	858.78	858.78	30	3.38	54.98
			9				100	120	1001.91	1001.91	35	2.19	56.65
			9				100	120	1145.04	1145.01	40	2.04	58.20
			9				50	120	286.26	143.13	10	4.65	30.61
			9				100	120	286.26	286.26	10	5.15	35.15
3	습윤	10	9	4050	41.48	2862.60	150	120	286.26	429.39	10	5.65	39.70
			9				200	120	286.26	572.52	10	6.15	44.25
			9				300	120	286.26	858.78	10	7.15	53.34
			9				200	120	143.13	286.26	5	10.30	49.03
			9				67	120	429.39	286.26	15	3.43	44.77
4	습윤	10	9	4050	41.48	2862.60	50	120	572.52	286.26	20	2.57	42.90
			9				33	120	858.78	286.26	30	1.72	39.60
			9				100	60	286.26	286.26	10	5.15	46.80
			9				100	90	286.26	286.26	10	5.15	46.80
5	습윤	10	9	4050	41.48	2862.60	100	120	286.26	286.26	10	5.15	46.80
			9				100	150	286.26	286.26	10	5.15	46.80
			9				100	180	286.26	286.26	10	5.15	46.80
			9				100	120	286.26	286.26	10	5.15	46.80
			9				100	180	286.26	286.26	10	5.15	46.80

표 3.5 시험조건 및 방법 (김해 장유지구)

시험	혼합 방식	혼합 시간 (분)	시료 수	원지반 점토			물-시멘트 비 (%)	교반 속도 (rpm)	시멘트 (g)	물 (g)	혼합시료		
				습윤 중량 (g)	함수비 (%)	건조 중량 (g)					시멘트와 점토의 건조중량 비	물,점토- 시멘트비	함수비 (%)
1	습윤	10	15	6750	28.67	5245.98	100	120	524.60	524.60	10	3.87	35.15
	건조	10	15				100	120	524.60	524.60	10	3.87	35.15
2	습윤	10	9	4050	28.67	3147.59	100	120	157.38	157.38	5	6.73	32.07
			9				100	120	254.81	251.81	8	4.58	33.95
			9				100	120	314.76	314.76	10	3.87	35.15
			9				100	120	472.14	472.14	15	2.91	37.97
			9				100	120	629.52	629.52	20	2.43	40.56
			9				100	120	786.90	786.90	25	2.15	42.94
			9				100	120	944.28	944.28	30	1.96	45.13
			9				100	120	1101.66	1101.66	35	1.82	47.16
			9				100	120	1259.03	1259.03	40	1.72	49.05
			9				100	120	157.38	157.38	5	6.73	32.07
	건조	10	9	4050	28.67	3147.59	100	120	251.81	251.81	8	4.58	33.95
			9				100	120	314.76	314.76	10	3.87	35.15
			9				100	120	472.14	472.14	15	2.91	37.97
			9				100	120	629.52	629.52	20	2.43	40.56
			9				100	120	786.90	786.90	25	2.15	42.94
			9				100	120	944.28	944.28	30	1.96	45.13
			9				100	120	1101.66	1101.66	35	1.82	47.16
			9				100	120	1259.03	1259.03	40	1.72	49.05
			9				50	120	314.76	157.38	10	3.37	30.61
			9				100	120	314.76	314.76	10	3.87	35.15
3	습윤	10	9	4050	28.67	3147.59	150	120	314.76	472.14	10	4.37	39.70
			9				200	120	314.76	629.52	10	4.87	44.25
			9				300	120	314.76	944.28	10	5.87	53.34
			9				200	120	157.38	314.76	5	7.73	36.83
			9				67	120	472.14	314.76	15	2.85	33.63
4	습윤	10	9	4050	28.67	3147.59	50	120	629.52	314.76	20	1.93	32.23
			9				33	120	944.28	314.76	30	1.29	29.75
			9				100	60	314.76	314.76	10	3.87	35.15
			9				100	90	314.76	314.76	10	3.87	35.15
5	습윤	10	9	4050	28.67	3147.59	100	120	314.76	314.76	10	3.87	35.15
			9				100	150	314.76	314.76	10	3.87	35.15
			9				100	180	314.76	314.76	10	3.87	35.15
			9				100	120	314.76	314.76	10	3.87	35.15
			9				100	120	314.76	314.76	10	3.87	35.15

표 3.6 시험조건 및 방법 (진해 용원만)

시험	혼합 방식	혼합 시간 (분)	시료 수	원지반 점토			물-시멘트 비 (%)	교반 속도 (rpm)	모래 (g)/점토와의 건조중량 비 (%)	시멘트 (g)	물 (g)	혼합시료		
				습윤 중량 (g)	함수 비 (%)	건조 중량 (g)						시멘트와 점토의 건조중량 비	물, 점토-시멘트비	함수 비 (%)
1	습윤	10	12	6720	81.42	3704.11	100	120	-	370.41	370.41	10	9.14	83.11
	건조	10	12				100	120	-	370.41	370.41	10	9.14	83.11
2	습윤	10	9	5040	80.73	2788.69	100	120	-	139.43	139.43	5	17.15	81.65
			9				100	120	-	370.41	370.41	10	9.14	82.48
			9				100	120	-	418.30	418.30	15	6.38	83.24
			9				100	120	-	557.74	557.74	20	5.04	83.94
			9				100	120	-	697.17	697.17	25	4.23	84.58
			9				100	120	-	836.61	836.61	30	3.69	85.18
			9				100	120	-	976.04	976.04	35	3.31	85.73
			9				100	120	-	1115.48	1115.48	40	3.02	86.24
3	습윤	10	9	5040	80.73	2788.69	50	120	-	278.87	139.43	10	8.57	77.94
			9				100	120	-	278.87	278.87	10	9.07	82.48
			9				150	120	-	278.87	418.30	10	9.57	87.03
			9				200	120	-	278.87	557.74	10	10.07	91.57
			12				300	120	-	278.87	836.61	10	11.07	100.66
5	습윤	10	12	6720	81.42	3704.11	100	25	-	370.41	370.41	10	9.14	83.11
			12				100	30	-	370.41	370.41	10	9.14	83.11
			12				100	60	-	370.41	370.41	10	9.14	83.11
			12				100	90	-	370.41	370.41	10	9.14	83.11
			12				100	120	-	370.41	370.41	10	9.14	83.11
			12				100	150	-	370.41	370.41	10	9.14	83.11
6	습윤	5	12	6720	81.42	3704.11	100	120	-	370.41	370.41	10	9.14	83.11
	건조	5	12				100	120	-	370.41	370.41	10	9.14	83.11
7	습윤	10	9	5040	74.09	3039.81	100	120	144.75/5	289.51	289.51	10	8.41	76.45
			9			3126.66	100	120	231.60/8	289.51	289.51	10	8.41	76.45
			9			3184.56	100	120	289.51/10	289.51	289.51	10	8.41	76.45
			9			3242.46	100	120	347.41/12	289.51	289.51	10	8.41	76.45
			9			3329.31	100	120	434.26/15	289.51	289.51	10	8.41	76.45
			9			3474.07	100	120	579.01/20	289.51	289.51	10	8.41	76.45
			9			3618.82	100	120	723.76/25	289.51	289.51	10	8.41	76.45

제4장 시험 결과의 고찰

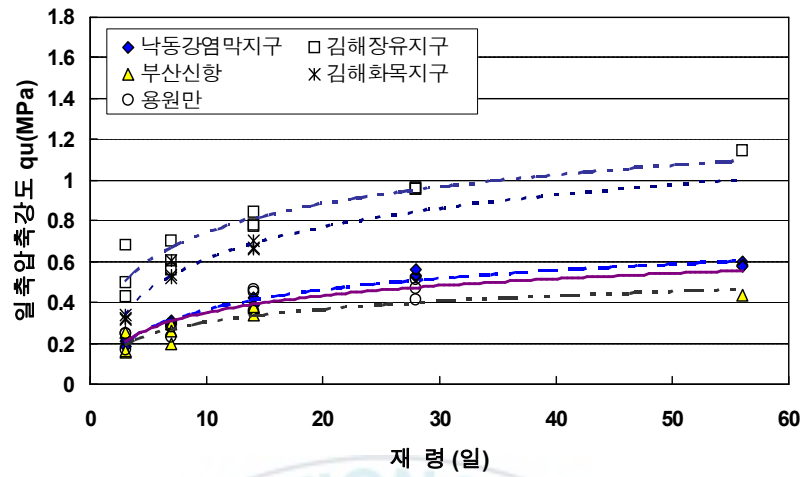
4.1 재령과 혼합방식에 의한 영향

4.1.1 재령과 혼합방식에 따른 일축압축강도

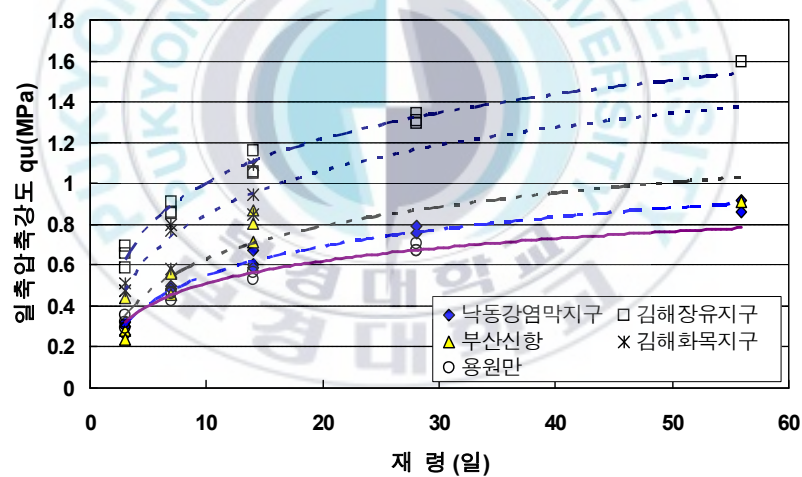
양생기간과 혼합방식이 점토-시멘트 혼합토의 일축압축강도에 미치는 영향을 알아보기 위해 시험 1의 방식, 즉 점토와 시멘트의 건조중량비는 10%, 물-시멘트비는 100% 조건으로 건조 및 습윤혼합방식으로 시료를 성형하여 재령 3, 7, 14, 28, 56일의 일축압축강도를 그림 4.1에 나타내었다.

혼합방식에 상관없이 일축압축강도는 양생기간에 따라 증가하는 경향을 보이고 있으며, 건조혼합방식으로 제작한 혼합토의 일축압축강도가 습윤혼합방식으로 제작한 시료에 비해서 크게 나타났다. 그러나 재령일에 따른 일축압축강도의 증가추이는 재령 28일까지는 크게 증가하지만, 28일 이후로는 증가율이 둔화되는 것으로 나타났다.

모래함유량이 상대적으로 높은 김해 장유지구와 김해 화목지구에서 채취한 시료를 이용해서 제작한 혼합토의 강도가 모래함유량이 상대적으로 낮은 부산 신행, 낙동강 염막지구, 진해 용원만의 시료보다 더 높은 것으로 나타났으며, 이는 김해 장유지구와 김해 화목지구에서 채취한 시료의 모래함유량이 높기 때문인 것으로 판단된다.



a) 습윤혼합방식

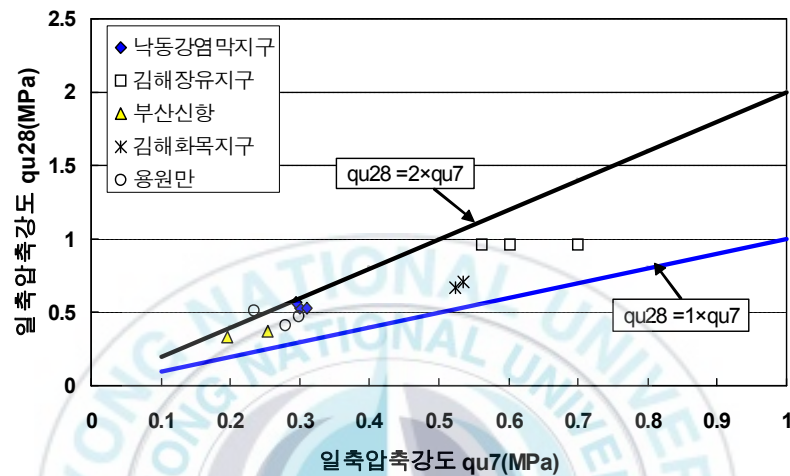


b) 건조혼합방식

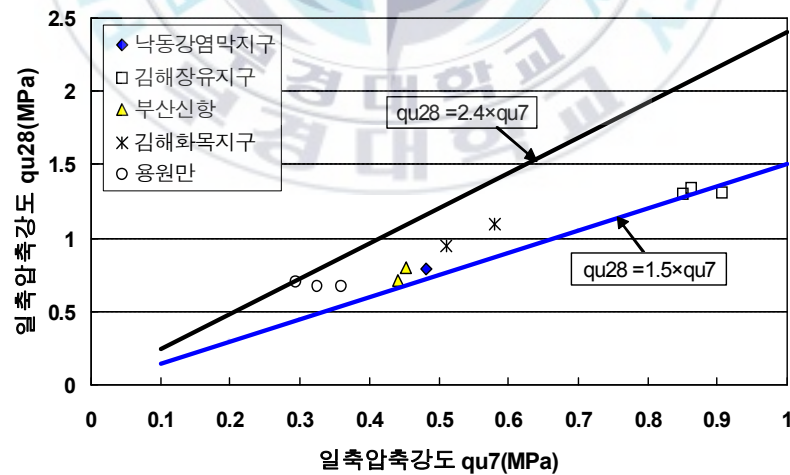
그림 4.1 습윤 및 건조혼합방식에서 일축압축강도와 재령과의 관계

한편 Bruce는 습윤혼합방식으로 제작한 점토-시멘트 혼합토의 28일 강도는 7일 강도의 1~2배, 건조혼합방식으로 제작한 혼합토의 경우는 1.5~2.4배의

범위를 제시하였다. 그림 4.2, 표 4.1에 나타난 바와 같이 본 연구에서 산출된 값은 Bruce가 제시한 범위에 포함된다. 습윤혼합방식으로 제작한 시료의 28일 강도는 7일 강도의 1.20~1.72배, 건조혼합방식으로 제작한 혼합토의 경우는 1.45~1.87배의 범위를 나타낸다.



a) 습윤혼합방식



b) 건조혼합방식

그림 4.2 습윤 및 건조혼합방식에서 일축압축강도 q_{u7} 과 q_{u28} 의 관계

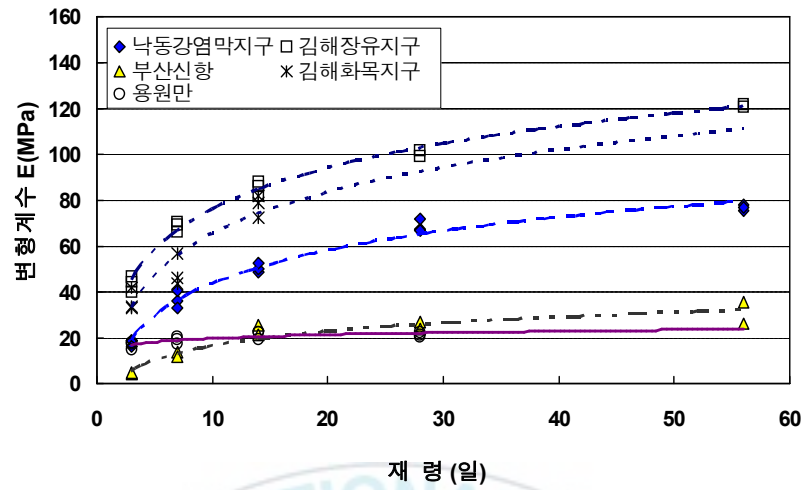
표 4.1 각 재령별 강도비

채취지역 혼합 방식 항목	부산신항		낙동강 염막지구		김해장유지구		김해화목지구		용원만	
	습윤	건조	습윤	건조	습윤	건조	습윤	건조	습윤	건조
q_{u28}	$q_{u28} = 1.20q_{u7}$	$q_{u28} = 1.70q_{u7}$	$q_{u28} = 1.46q_{u7}$	$q_{u28} = 1.65q_{u7}$	$q_{u28} = 1.60q_{u7}$	$q_{u28} = 1.45q_{u7}$	$q_{u28} = 1.30q_{u7}$	$q_{u28} = 1.87q_{u7}$	$q_{u28} = 1.72q_{u7}$	$q_{u28} = 1.52q_{u7}$

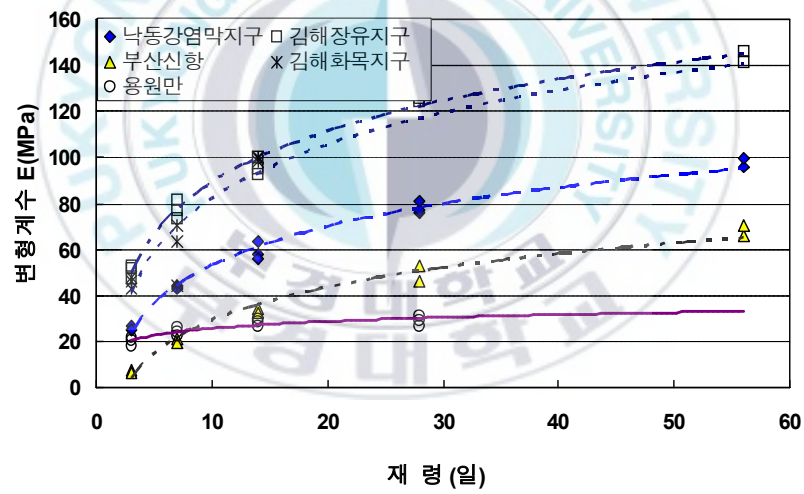
4.1.2 재령과 혼합방식에 따른 변형계수

양생기간과 혼합방식이 점토-시멘트 혼합토의 변형계수에 미치는 영향을 그림 4.3에 나타내었다. 혼합방식에 상관없이 변형계수는 양생기간에 따라 꾸준히 증가하는 것으로 나타났으며, 건조혼합방식으로 제작한 혼합토의 변형계수가 습윤혼합방식으로 제작한 시료에 비해서 크게 나타났다. 그러나 재령일에 따른 변형계수의 증가추이는 재령 7일까지는 크게 증가하지만, 7일 이후로는 증가율이 둔화되는 것으로 나타났다. 진해 용원만의 시료는 변형계수의 증가량이 다른 시료에 비해서 작게 나타났다.

습윤혼합방식에서는 김해 장유지구와 김해 화목지구 시료의 변형계수가 다른 지역의 시료에 비해서 크게 나타났으며, 건조혼합방식에서도 김해 장유지구와 김해 화목지구 시료의 변형계수가 다른 시료에 비해서 크게 나타났다.



a) 습윤혼합방식



b) 건조혼합방식

그림 4.3 습윤 및 건조혼합방식에서 변형계수와 재령과의 관계

4.1.3 일축압축강도와 변형계수의 관계

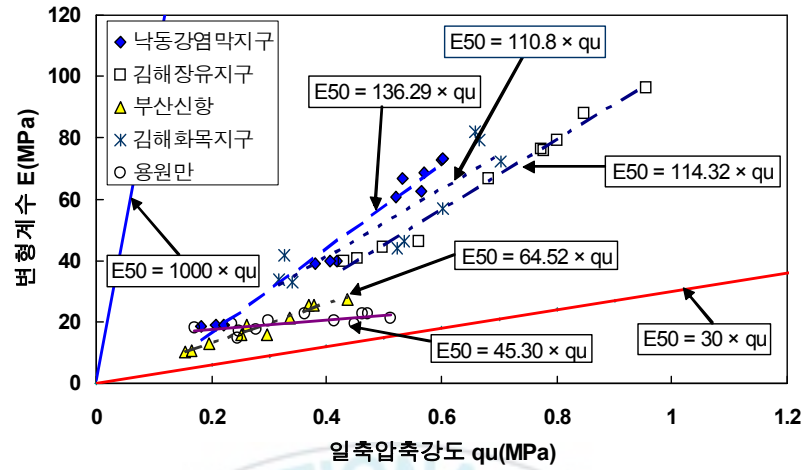
일반적으로 혼합토의 일축압축강도와 변형계수의 관계는 표 4.2에 제시한 바와 같이 안정제의 종류와 혼합방식에 따라 국가별로 다양하게 나타나는 것으로 보고되고 있다.

건조혼합방식에 의한 혼합토의 변형계수는 일축압축강도의 50~250배, 습윤 혼합방식에 의한 혼합토의 변형계수는 30~1,000배까지 그 변동의 폭이 큰 것으로 보고되어 있다.

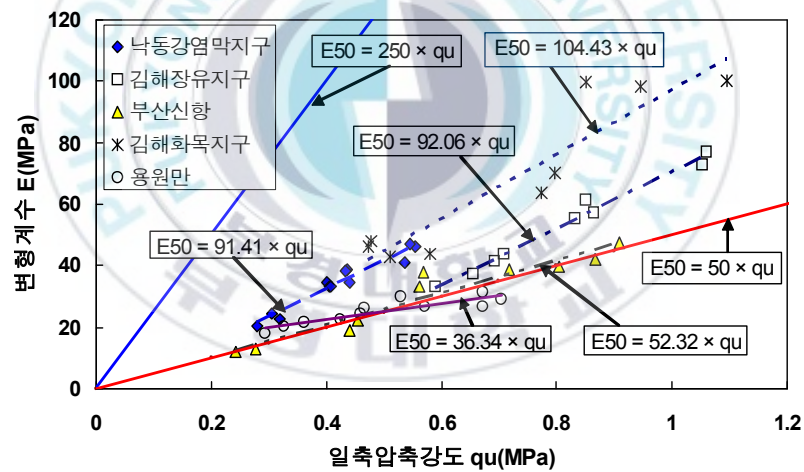
표 4.2 기존 문헌에 제시된 E_{50} 과 q_u 의 관계

혼합방식	E_{50}	참조
건조 시멘트	65~250 q_u	Baker, 2000, Broms, 2003
	50~200 q_u	Yang et al., 1998
습윤 시멘트	350~1,000 q_u	Kawasaki et al., 1981
	100~250 q_u	Futaki et al., 1996
	140~500 q_u	Asano et al., 1996
	30~300 q_u	Fang et al., 2001
	150 q_u	McGinn and O'Rourke, 2003
	150~400 q_u	Tan et al., 2002

습윤혼합방식을 이용해서 제작한 혼합토의 변형계수는 일축압축강도의 45~136배(그림 4.4(a))인 것으로 나타났으며, 건조혼합방식으로 제작한 혼합토의 변형계수는 일축압축강도의 36~104배(그림 4.4(b))로 나타났다. 이는 기존 문헌에서 보고된 값에 비해서 비교적 낮은 값을 나타내고 있다. 건조혼합방식으로 제작한 혼합토의 변형계수와 일축압축강도의 관계가 습윤혼합방식으로 제작한 시료에 비해서 크게 나타났으나, 부산신항과 진해 용원만 시료의 경우는 오히려 습윤혼합방식의 시료가 더 크게 나타났다.



a) 습윤혼합방식



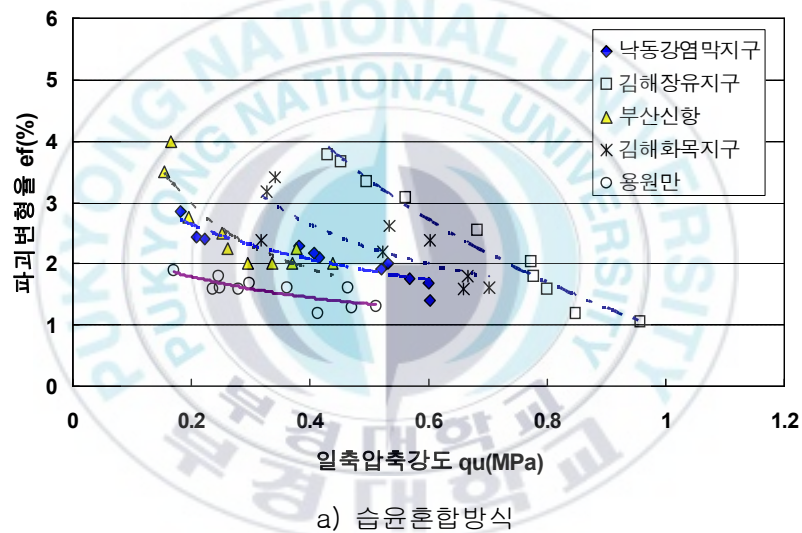
b) 건조혼합방식

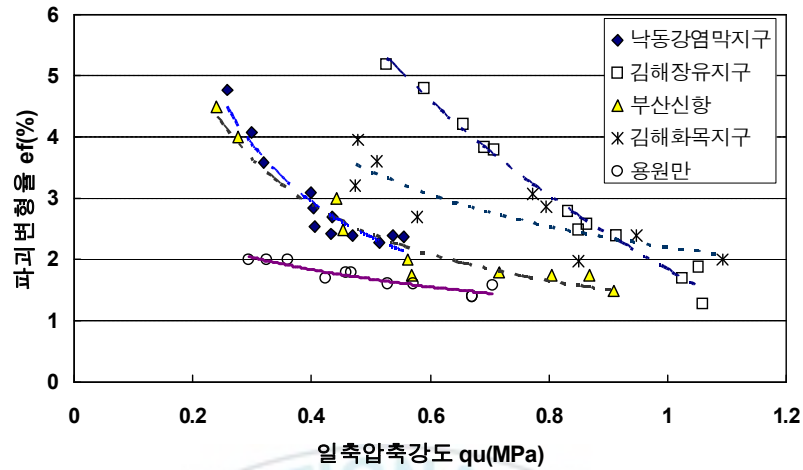
그림 4.4 습윤 및 건조혼합방식에서 일축압축강도와 변형계수와의 관계

4.1.4 파괴변형율과 일축압축강도의 관계

혼합방식에 따른 파괴변형율과 일축압축강도와의 관계를 그림 4.5에 나타내었으며, 혼합토의 일축압축강도가 높을수록 파괴변형률이 감소하는 것으로 나타났다. 건조혼합방식으로 제작한 혼합토의 파괴변형율이 습윤혼합방식으로 제작한 혼합토의 파괴변형율 보다 높게 나타났다.

낙동강 염막지구, 부산신항 혼합토 시료의 일축압축강도와 파괴변형율의 관계가 유사하게 나타났으며, 용원만 시료는 파괴변형율의 범위가 다른 시료에 비해서 좁게 나타났다.





b) 건조혼합방식

그림 4.5 습윤 및 건조혼합방식에서 일축압축강도와 파괴변형률과의 관계

4.2 점토-시멘트 건조중량비에 의한 영향

4.2.1 시멘트 함량에 따른 일축압축강도

시멘트 함량에 따른 일축압축강도의 변화는 그림 4.6에 나타난 것처럼 비활성 영역, 활성영역, 비활성 또는 준 비활성영역 등 3개의 영역으로 나타낼 수 있다. 그림 4.6에서 시멘트 함량 5%까지는 일축압축강도가 천천히 증가하며(비활성영역), 시멘트 함량 5~25%까지는 일축압축강도가 급격히 증가하며(활성영역), 이후에는 일축압축강도가 별다른 증가 없이 어느 일정한 값에 수렴한다(비활성 또는 준 비활성영역).

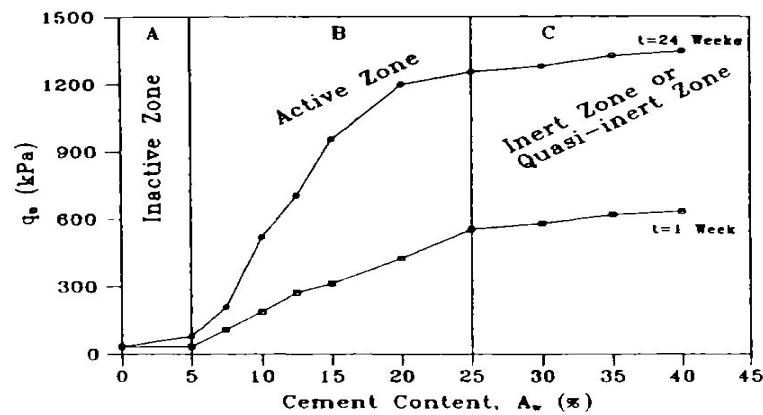
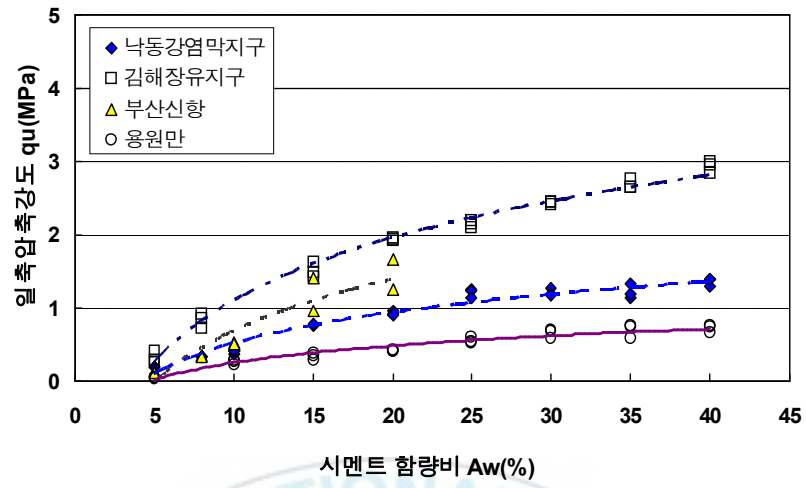


그림 4.6 시멘트 함량과 일축압축강도와의 관계

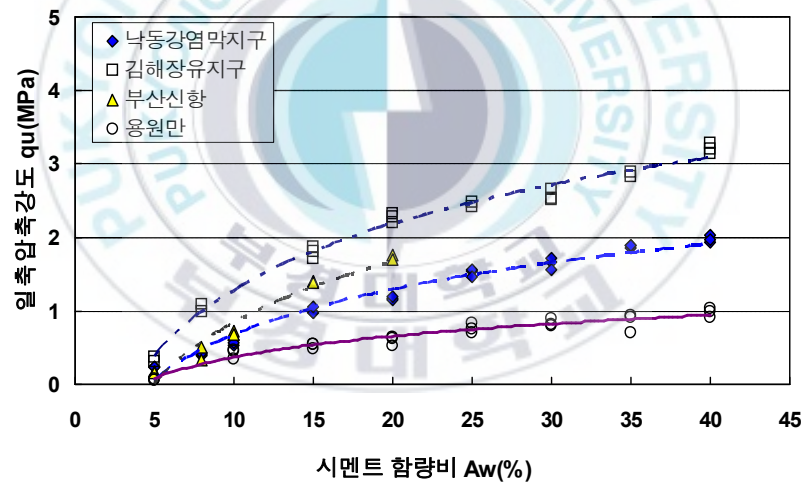
(Bergado et al., 1996)

본 연구에서는 시멘트 함량이 일축압축강도에 미치는 영향을 평가하기 위해 시험 2의 방법으로 실험을 하였다. 그림 4.7은 습윤혼합방식으로 물-시멘트비 100%에 시멘트 함량 5, 8, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40%의 조건으로 혼합하여 재령 7, 14, 28일의 시멘트함량과 일축압축강도에 대한 관계를 나타낸 것이다. 그림 4.8은 건조혼합방식으로 물-시멘트비와 시멘트 함량을 습윤혼합방식과 동일한 조건으로 혼합하여 재령 7, 14, 28일의 시멘트함량과 일축압축강도의 관계를 나타낸 것이다.

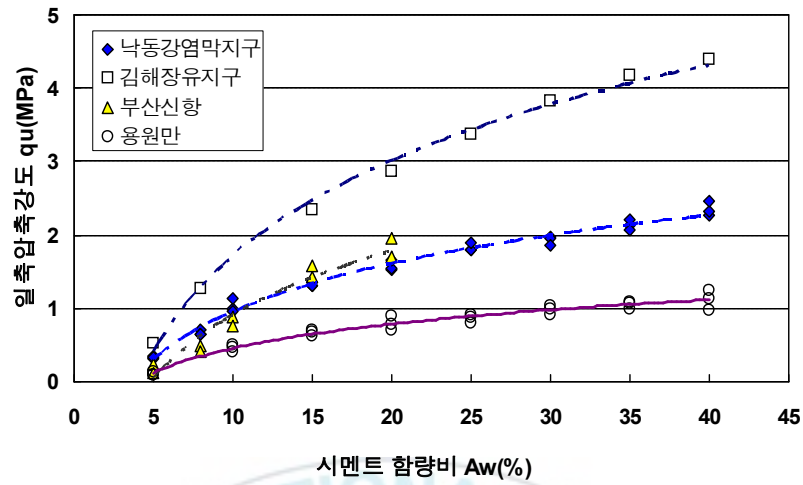
혼합토의 시멘트 함량과 일축압축강도의 관계를 분석해보면 Bergado(1996)가 제시한 자료와는 다소 상이한 결과가 나타났다. 그림 4.7, 그림 4.8에 나타난 결과에 의하면 원지반 점토의 특성에 따라 차이는 있지만, 김해 장유지구의 경우 시멘트 함량이 25%를 초과하더라도 강도증가현상이 뚜렷하게 나타난다. 또한 낙동강 염막지구와 진해 용원만의 경우에는 Bergado가 제시한 바와 같이 시멘트 함량이 25%를 초과하면 강도증가율이 다소 둔화되는 것으로 나타났다.



a) 7일 재령

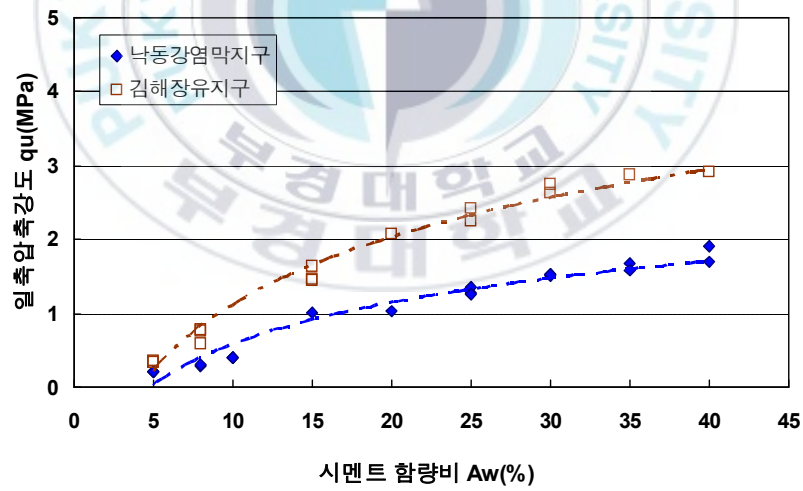


b) 14일 재령

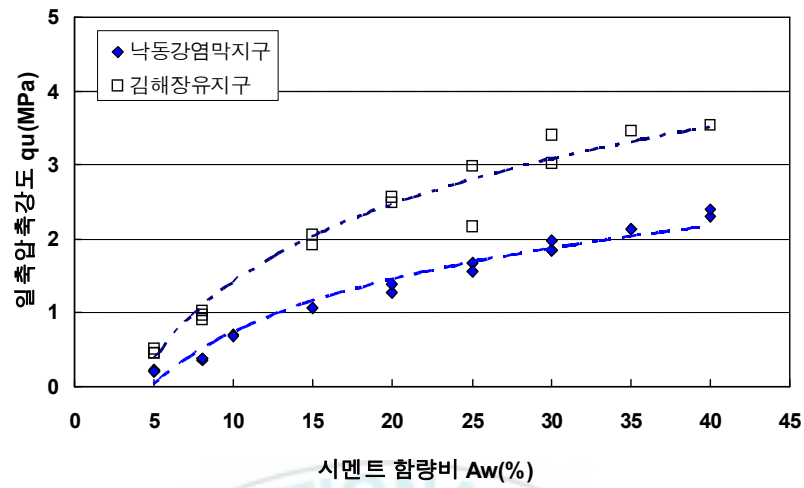


c) 28일 재령

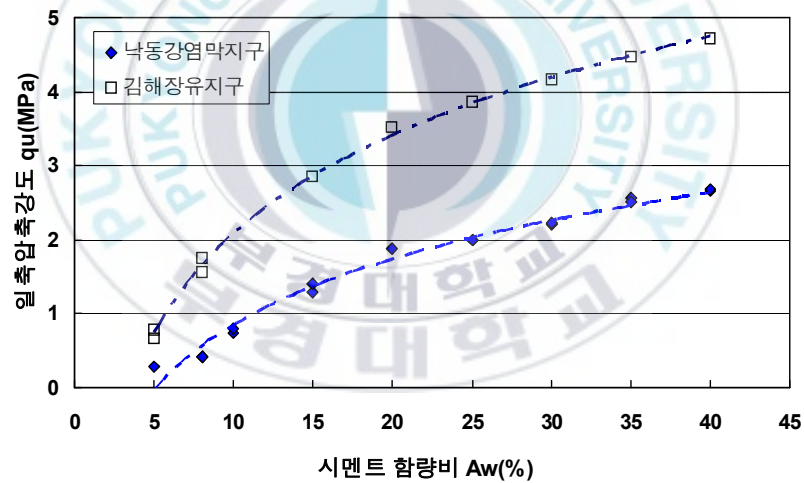
그림 4.7 습윤혼합방식에서 재령별 시멘트함량과 일축압축강도의 관계



a) 7일 재령



b) 14일 재령



c) 28일 재령

그림 4.8 건조혼합방식에서 재령별 시멘트함량과 일축압축강도의 관계

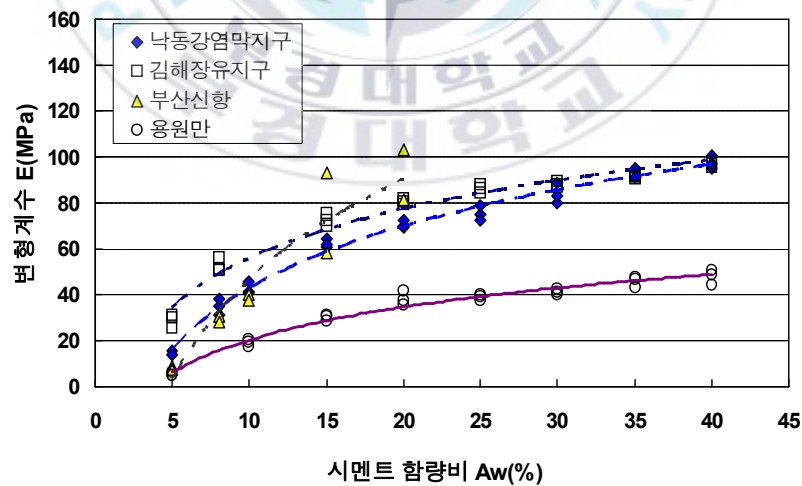
4.2.2 시멘트 함량에 따른 변형계수

시험 2의 방법을 사용하여 습윤혼합방식으로 제작한 혼합토의 시멘트 함량

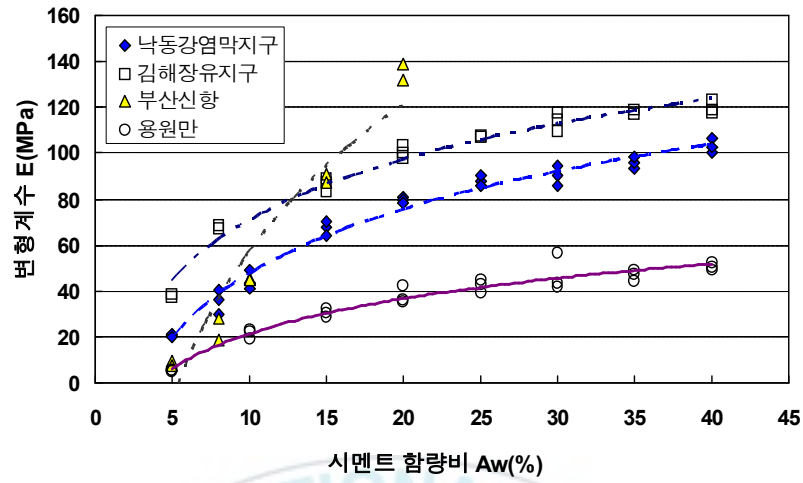
비와 변형계수와의 관계를 그림 4.9에, 건조혼합방식으로 제작한 혼합토의 시멘트 함량비와 변형계수와의 관계를 그림 4.10에 나타내었다.

습윤혼합방식으로 제작한 혼합토의 시멘트 함량비와 변형계수와의 관계는 시멘트 함량비가 높을수록 변형계수가 증가하는 것으로 나타났다. 시멘트 함량비 15%까지는 변형계수가 크게 증가하지만, 시멘트 함량비가 15%를 초과하면 변형계수의 증가율이 다소 둔화되는 경향을 나타내고 있다. 그러나 부산 신행의 경우 낙동강염막지구, 김해장유지구, 진해 용원만과는 다소 상이한 결과가 나타났다. 그 원인은 함수비, 모래함유량 그리고 점토함유량 등 물리적 성질의 차이로 판단된다.

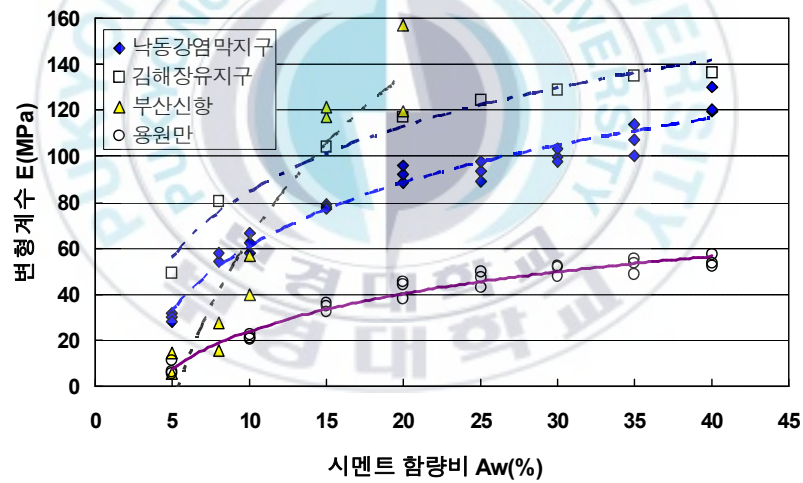
건조혼합방식으로 제작한 혼합토의 변형계수와 시멘트 함량비의 관계도 습윤혼합방식으로 제작한 혼합토와 유사한 경향을 보였고, 습윤혼합방식에 비해 건조혼합방식의 변형계수가 크게 나타났다. 그리고 건조혼합방식도 습윤혼합방식처럼 시멘트 함량비가 15%까지는 변형계수가 크게 증가하지만, 시멘트 함량비가 15%를 초과하면 변형계수의 증가율이 다소 둔화되는 경향을 나타내고 있다.



a) 7일 재령

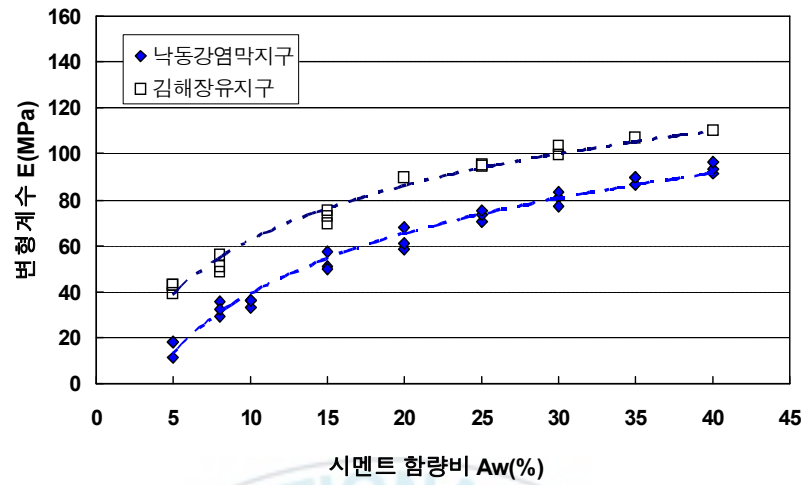


b) 14일 재령

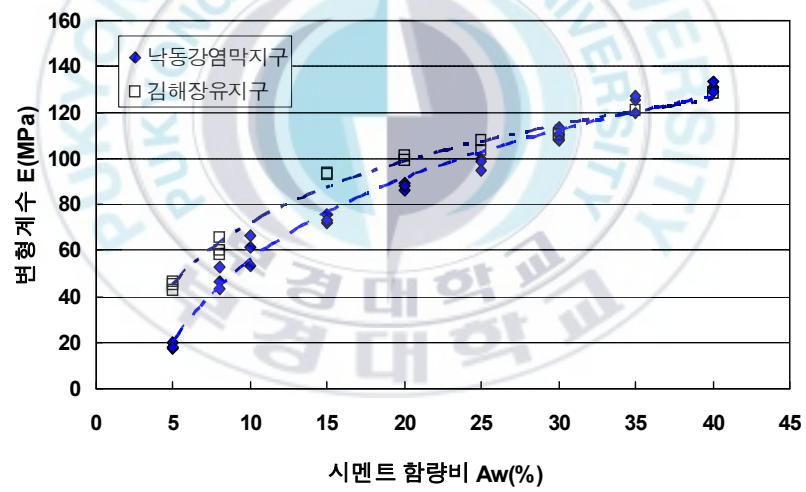


c) 28일 재령

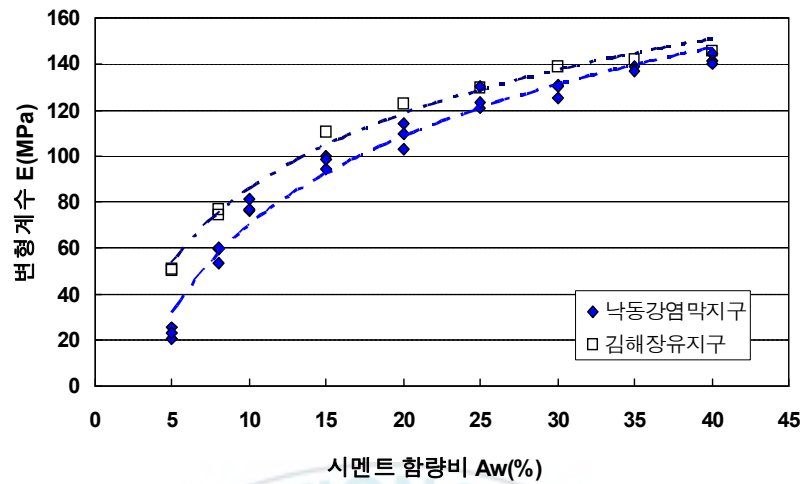
그림 4.9 습윤혼합방식에서 재령별 시멘트함량과 변형계수와의 관계



a) 7일 재령



b) 14일 재령



c) 28일 재령

그림 4.10 건조혼합방식에서 재령별 시멘트함량과 변형계수와의 관계

4.2.3 축차응력과 변형률

그림 4.11은 시멘트 함량에 따른 축차응력-변형률 관계를 도식한 것으로, 시멘트 함량이 25% 이상일 때는 급격한 강도 증가 후 정점에 도달한 후에는 강도가 급격하게 감소하는 취성적인 성질을 나타내는 반면에 시멘트 함량 10% 이하에서는 강도증가에 비해서 변형율이 크게 증가하는 양상을 보이고 있다. 또한 시멘트 함량이 증가할수록 혼합토의 파괴변형률이 감소하고, 시멘트 함량이 25~40%일 때 파괴변형율은 1.5~2.5%정도로 무혼합토에 비해서 현격하게 감소하는 것으로 나타났다.

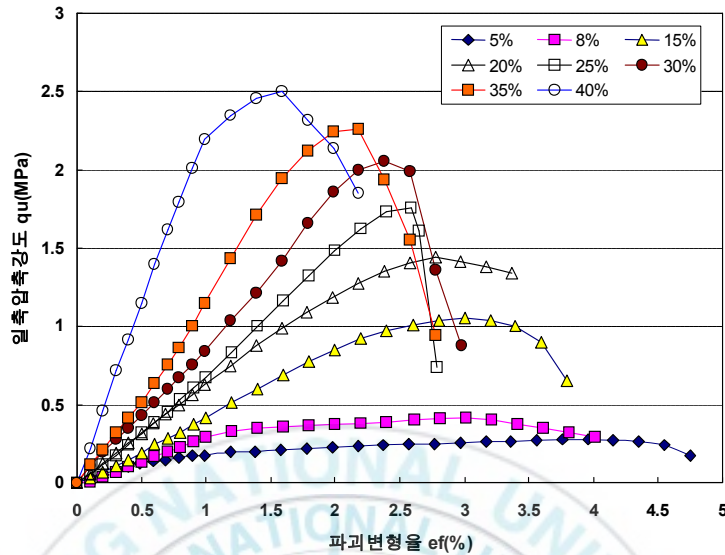


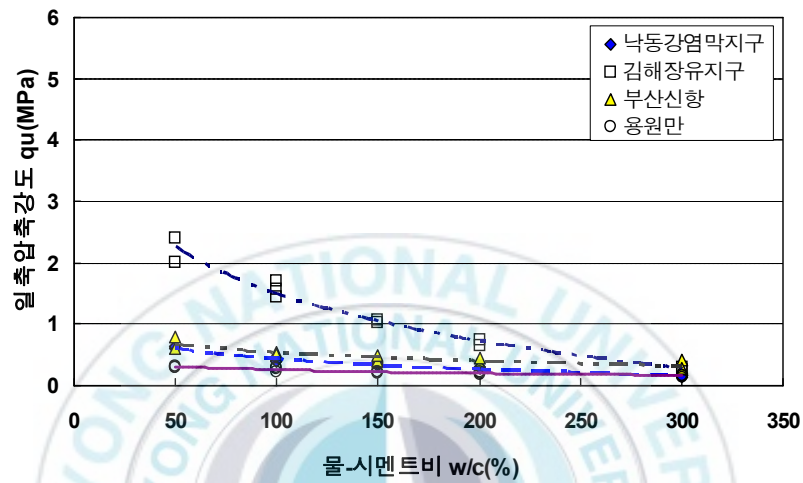
그림 4.11 축방향 변형율과 축하중과의 관계

4.3 물-시멘트비(w/c)에 대한 영향

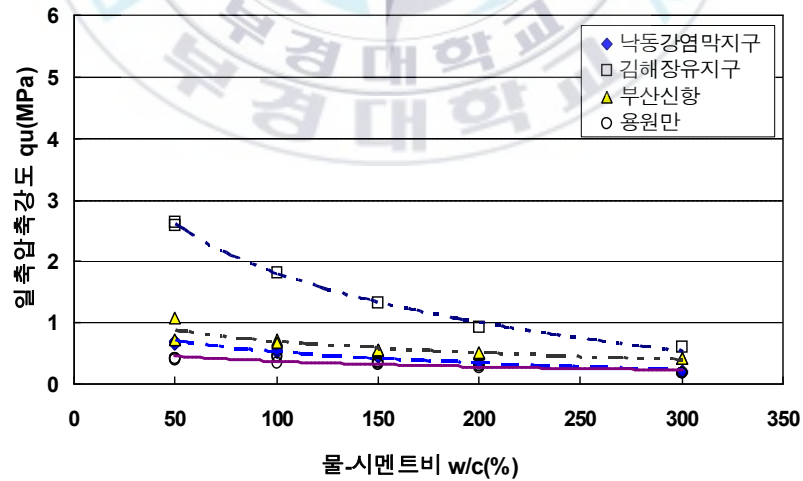
4.3.1 물-시멘트비에 따른 일축압축강도

물-시멘트비가 일축압축강도에 미치는 영향을 평가하기 위해 시험 3의 방법으로 원지반 시료에 대한 시멘트 건조중량비 10%, 물-시멘트 비를 50~300%의 조건으로 원지반 시료 1, 3, 4, 5에 대해 재령 7, 14, 28일의 일축압축강도 시험을 하여 그 결과를 그림 4.12에 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 물-시멘트 비가 클수록 일축압축강도가 감소하는 경향을 보인다. 모래함량이 낮은 부산신탄, 낙동강염막지구, 진해 용원만의 시료는 감소폭이 작으며 서로 비슷한 경향으로 감소하는 관계를 나타내나, 이에 비해 모래함량이 상대적으로

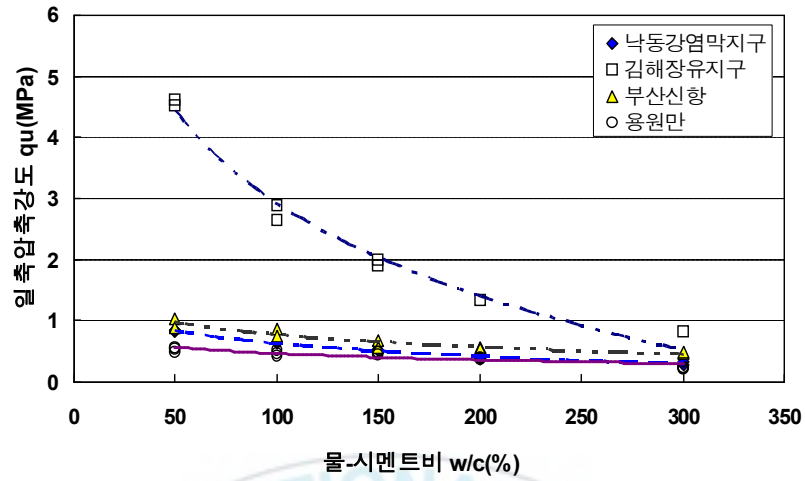
높은 김해 장유지구 시료의 강도는 상대적으로 큰 감소폭을 나타내고 있다. 이는 모래함량이 낮은 점토지반을 시멘트로 침층혼합하는 경우 물-시멘트비를 이용해서 혼합토의 일축압축강도를 예측하는 것이 부적합하다는 사실을 의미한다.



a) 7일 재령



b) 14일 재령

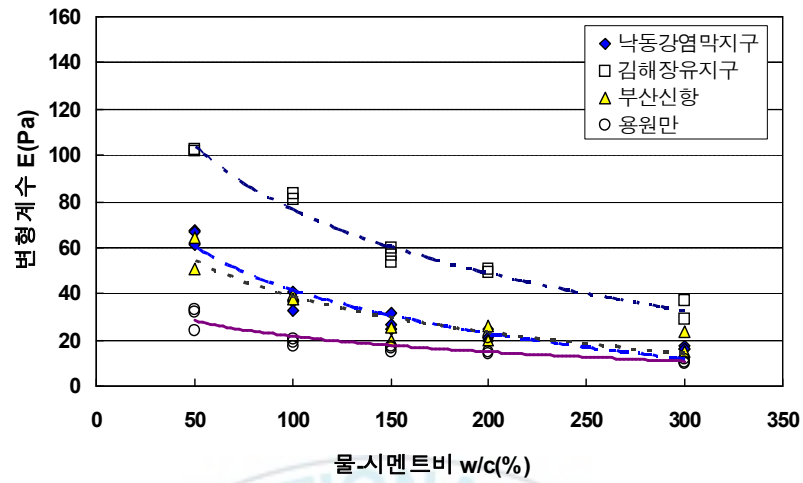


c) 28일 재령

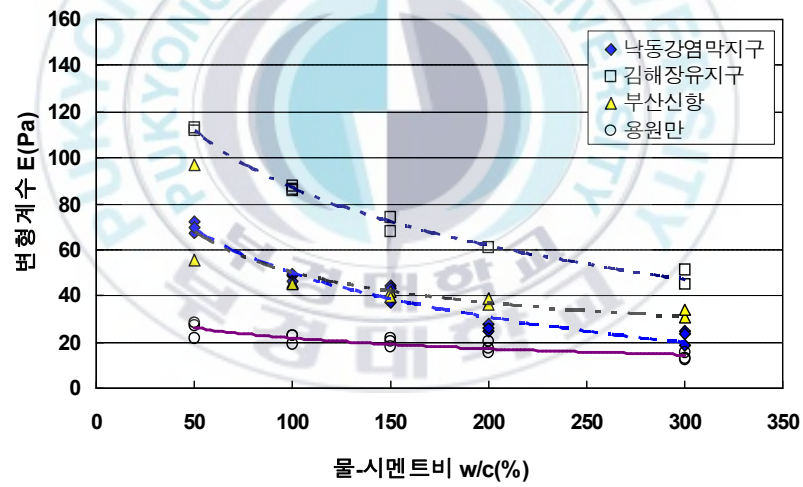
그림 4.12 습윤혼합방식에서 물-시멘트비와 일축압축강도와와의 관계

4.3.2 물-시멘트비에 따른 변형계수

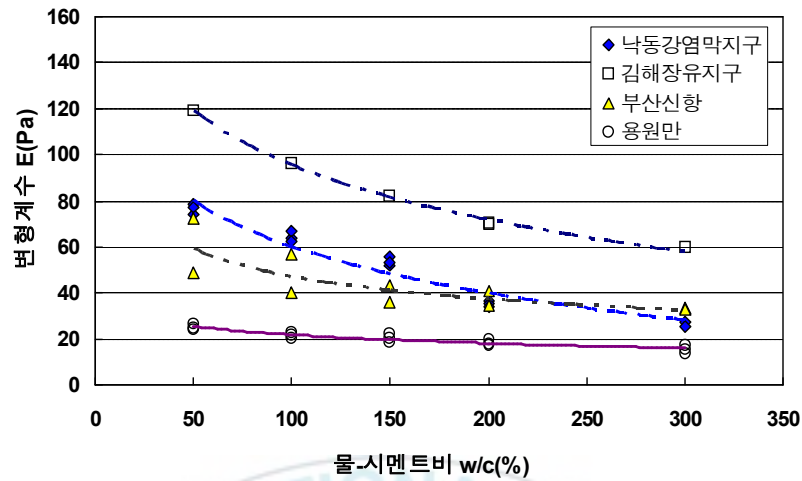
변형계수와 물-시멘트비와의 관계를 그림 4.13에 나타내었다. 물-시멘트비가 높을수록 변형계수가 감소하는 경향을 보이며 물-시멘트비에 따른 변형계수의 감소율도 시료의 종류에 상관없이 유사하게 나타났다.



a) 7일 재령



b) 14일 재령



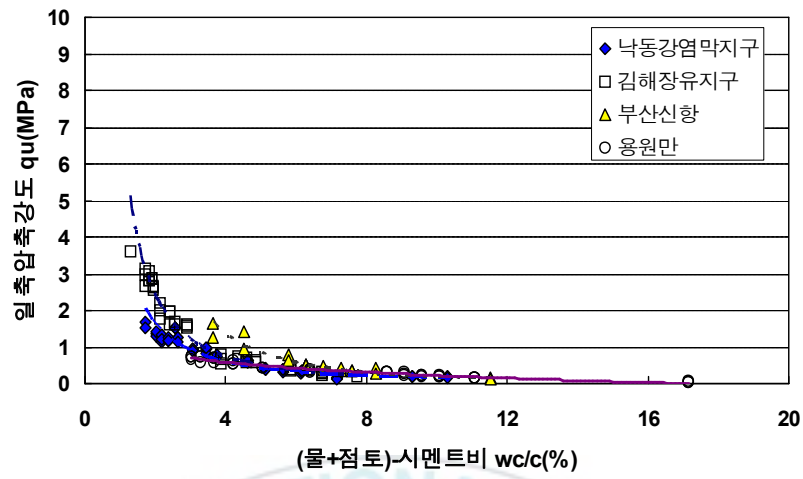
c) 28일 재령

그림 4.13 습윤혼합방식에서 물-시멘트비와 변형계수와의 관계

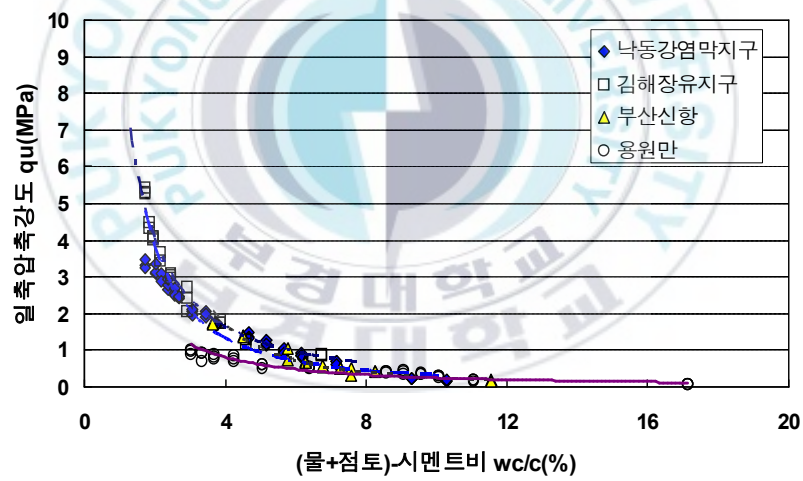
4.4 (원지반 점토+물)-시멘트비(wc/c)에 의한 영향

4.4.1 (원지반 점토+물)-시멘트비에 따른 일축압축강도

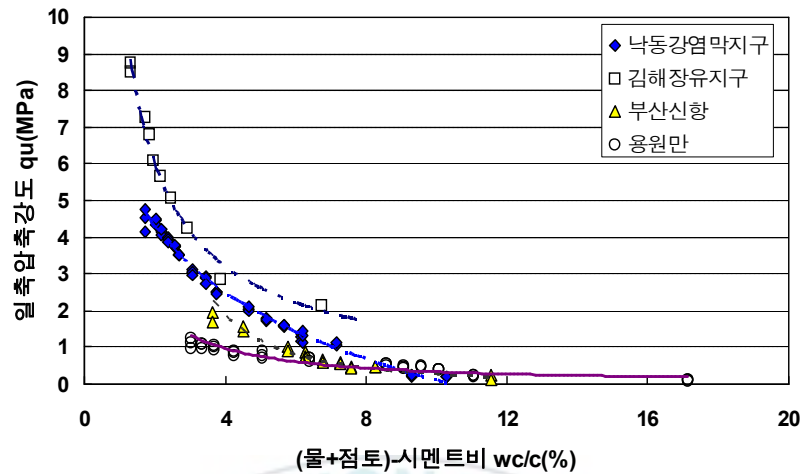
(원지반 점토+물)-시멘트 비(이하 wc/c)가 일축압축강도에 미치는 영향은 그림 4.14에 나타낸 바와 같이 비선형적 성질을 나타내며, wc/c가 증가할수록 일축압축강도가 감소하는 경향을 나타낸다. 또한 4개 지역 비교시 점토의 특성에 따라 약간의 차이는 있지만 전반적으로 비슷한 경향을 보이고 있는 것으로 나타났다. 이는 점토-시멘트 혼합토의 경우 wc/c의 함수만으로도 요구되는 강도를 예측할 수 있음을 보여준다.



a) 7일 재령



b) 14일 재령



c) 28일 재령

그림 4.14 재령별 (원지반점토+물)-시멘트비와 일축압축강도와의 관계

기존문헌에 나타난 자료에 의하면 재령 28일에 해당하는 일축압축강도와 wc/c의 관계는 식(4.1)~식(4.3)과 같으며, 그림 4.15는 이들의 관계를 비교한 것이다.

$$q_{u28} = \frac{2461}{1.22^{wc/c}} \text{ (Miura et al., 2001) } \dots\dots\dots (4.1)$$

$$q_{u28} = 1700 \times 0.79^{wc/c} \text{ (Jacobson, 2002) } \dots\dots\dots (4.2)$$

$$q_{u28} = \frac{8557}{1.24^{wc/c}} \text{ (Nagaraj, 2002) } \dots\dots\dots (4.3)$$

모래함량이 높은 김해장유지구에서 채취한 시료를 이용해서 제작한 혼합토의 경우 Nagaraj의 곡선과 유사한 경향을 보이고 있으나, 모래함량이 상대적으로 낮은 부산신항과 낙동강 염막지구에서 채취한 시료를 이용해서 제작한

혼합토의 경우 Nagaraj와 Miura, Jacobson이 제시한 곡선의 중간정도의 범위에 분포하는 것으로 나타났다. 모래 함량이 제일 낮은 용원만에서 채취한 시료를 이용해서 제작한 혼합토의 경우 Miura가 제시한 곡선과 유사한 경향을 보이고 있다.

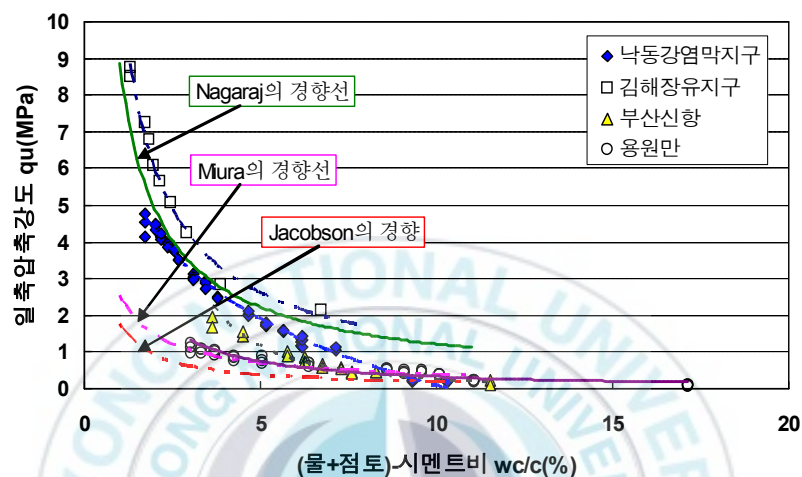


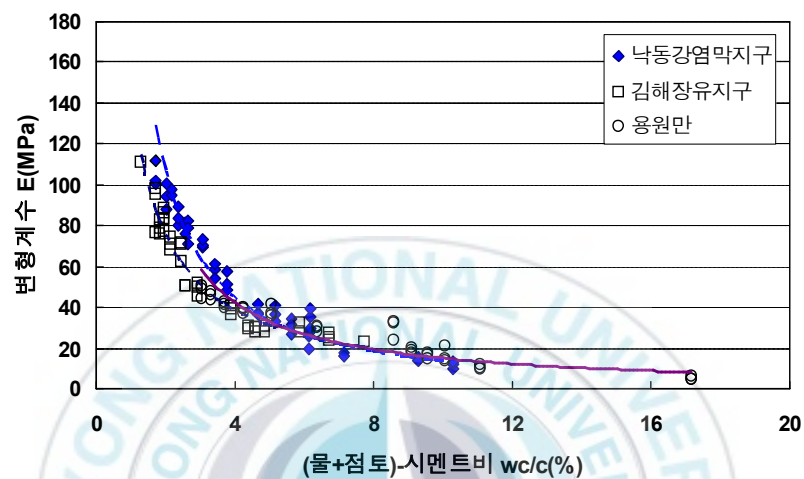
그림 4.15 재령별 (원지반점토+물)-시멘트비와 일축압축강도와와의 관계(기존문헌과의 비교)

4.4.2 (원지반점토+물)-시멘트비에 따른 변형계수

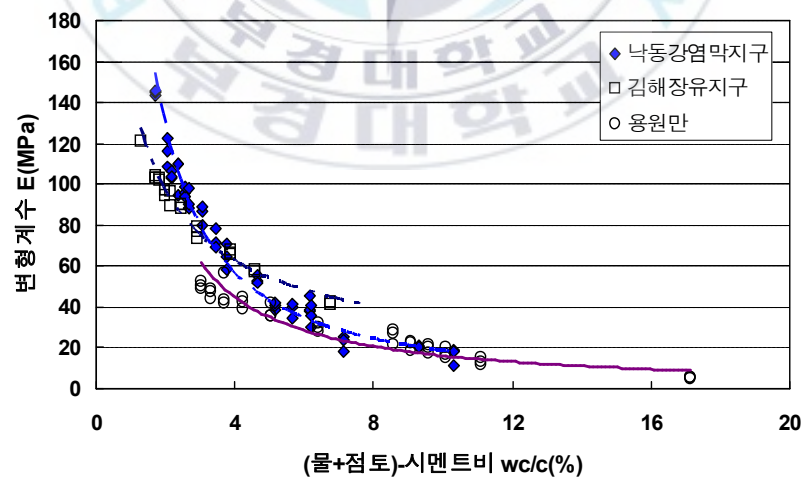
(원지반점토+물)-시멘트 비(wc/c)가 변형계수에 미치는 영향을 재령별로 그림 4.16에 나타내었다. 비선형적인 성질을 나타내며 wc/c의 값이 증가할수록 변형계수가 감소하는 것으로 나타났다. 재령 7일과 재령 14일의 경우 낙동강 염막지구와 김해 장유지구 시료의 변형계수와 wc/c의 관계는 유사하게 나타나지만, 재령 28일의 경우 변형계수와 wc/c의 관계가 상이하게 나타났다. 28일 양생한 혼합토의 경우 wc/c가 변형계수의 크기에 미치는 영향이 모래함유량이 높은 김해 장유지구의 시료가 낙동강 염막지구의 시료에 비해서 다소 낮

은 것으로 나타났다. 이것으로 보아 설계시 콘크리트 구조물에 적용하는 물-시멘트비(w/c)를 DCM공법에 적용함에 한계가 있음을 보인다.

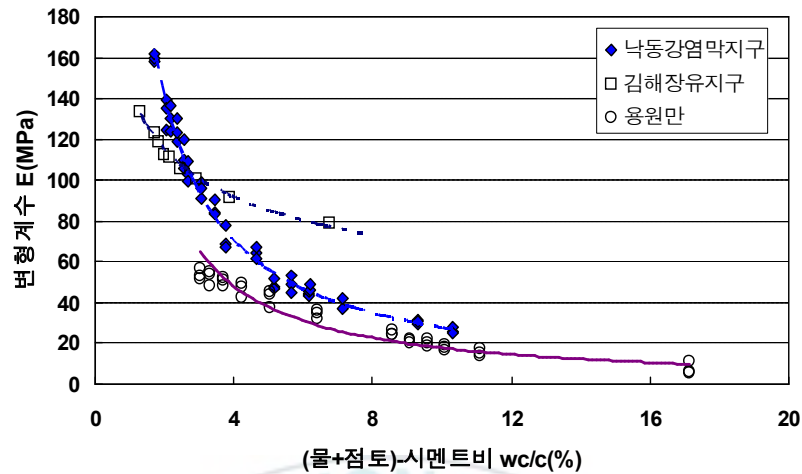
따라서 DCM 공법 설계를 위한 변형계수 산정시 (원지반점토 함수비+물)-시멘트 비(wc/c)의 도입이 합리적인 설계방안이라 판단된다.



a) 7일 재령



b) 14일 재령



c) 28일 재령

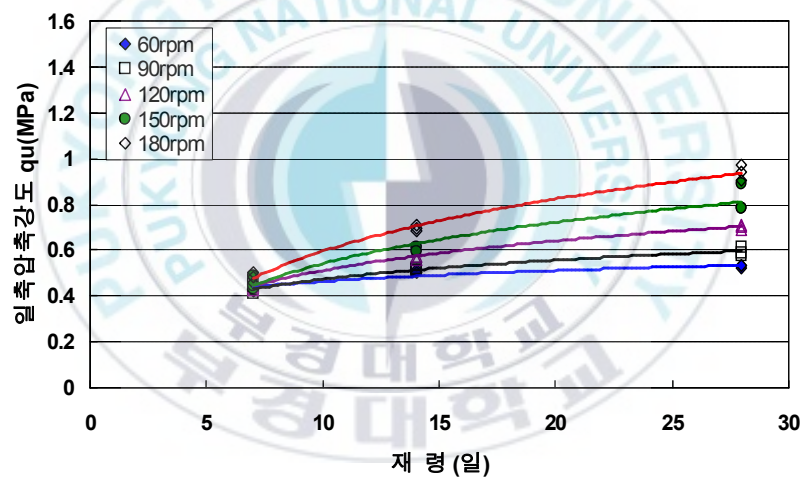
그림 4.16 재령별 (원지반점토+물)-시멘트비(wc/c)와 변형계수와의 관계

4.5 교반회전속도에 의한 영향

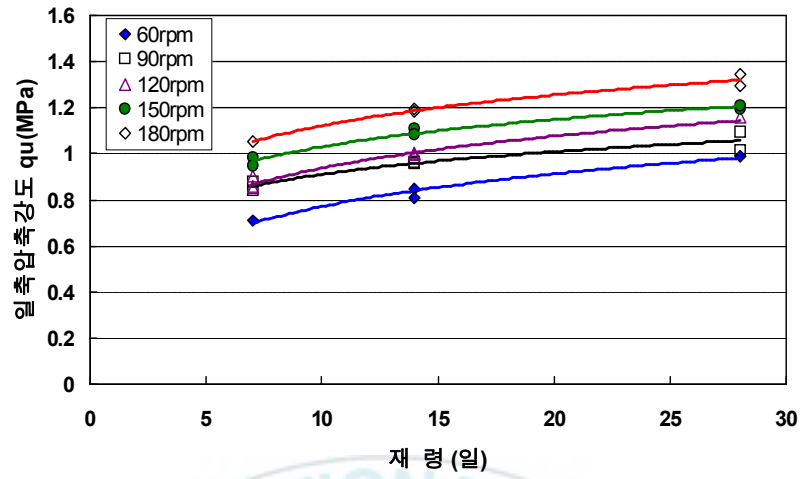
4.5.1 교반회전속도에 따른 일축압축강도

교반기의 회전속도가 강도와 기타 물리적 특성에 미치는 영향을 평가하기 위해 시험 5의 방법으로 실험을 하였다. 낙동강 염막지구, 김해 장유지구, 김해 화목지구, 진해 용원만의 시료를 점토와 시멘트의 건조중량비 10%, 물-시멘트비 100%의 조건으로 교반할 때 교반기의 회전속도를 25r.p.m~180r.p.m으로 다양하게 제작한 시료의 재령별 일축압축강도를 그림 4.17에 나타내었다. 낙동강 염막지구, 김해 장유지구, 김해 화목지구에서는 교반회전속도가 증가함에 따라 일축압축강도가 증가하는 경향을 보이고 있다. 그러나 진해 용원만에서는 오히려 중간 회전속도인 60r.p.m에서 일축압축강도가 제일 높고 120r.p.m에서 가장 낮게 나타났다.

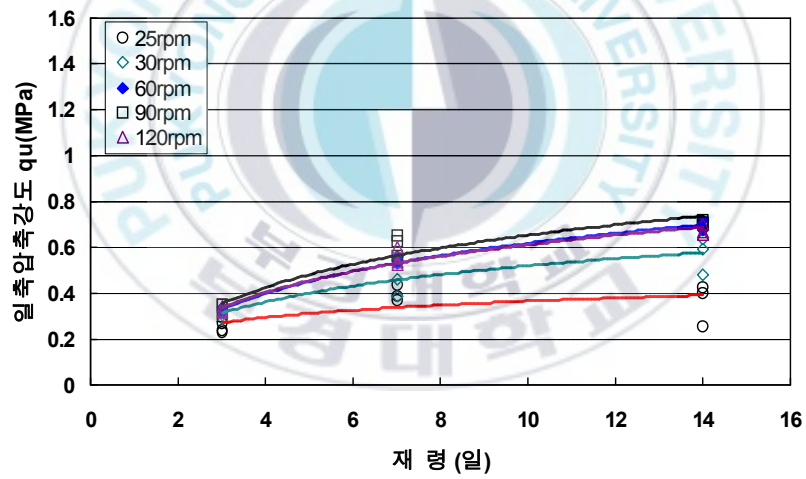
상대적으로 모래함량이 적은 낙동강 염막지구 시료의 7일 재령 일축압축강도는 각각의 rpm변화에도 비슷한 값을 보였으며, 7일 이후 재령에서는 현저한 증가폭을 보이는 것으로 나타났다(그림 4.17(a)). 모래함량이 많은 김해 장유지구, 김해 화목지구 시료의 7일 재령 일축압축강도는 각 rpm변화에 따라 현저한 차이를 보였으며, 7일 이후 재령에서는 낙동강염막지구와 동일하게 증가하는 경향을 보이고 있다(그림 4.17(b), (c)). 그러나 함수비가 높고 모래함량이 작은 진해 용원만 시료는 다른 시료의 교반속도보다 낮은 속도에서 오히려 더 높은 강도를 나타내고 있다(그림 4.17(d)). 따라서 DCM 공법 적용시 교반속도를 고려한 시공이 이루어져야 하겠으며, 원지반의 물리적 특성(모래함량, 함수비 등)을 고려해서 교반속도의 조절 또한 필요할 것으로 판단된다.



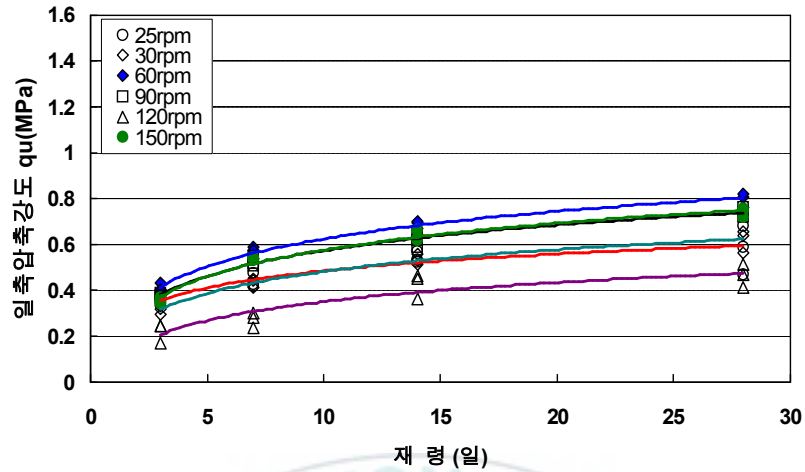
a) 낙동강 염막지구



b) 김해 장유지구



c) 김해 화목지구

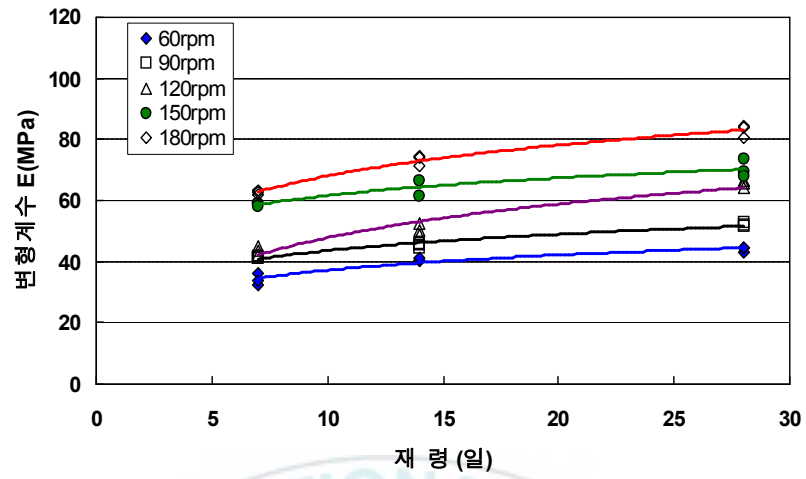


d) 용원만

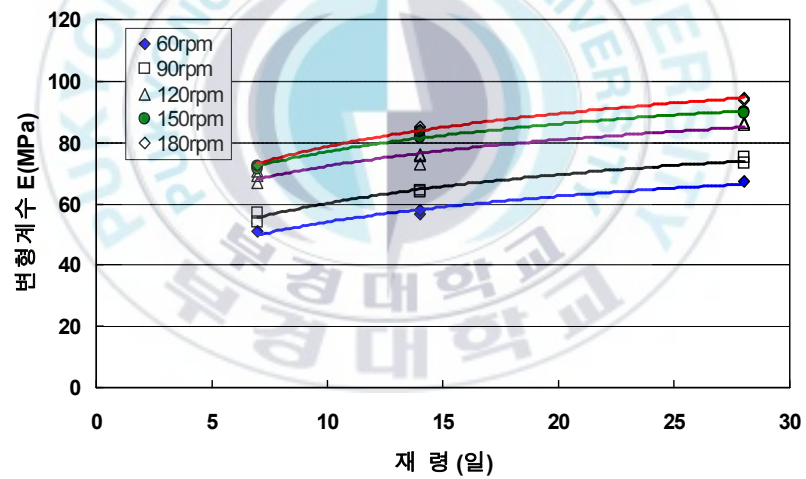
그림 4.17 교반회전속도와 일축압축강도와와의 관계

4.5.2 교반회전속도에 따른 변형계수

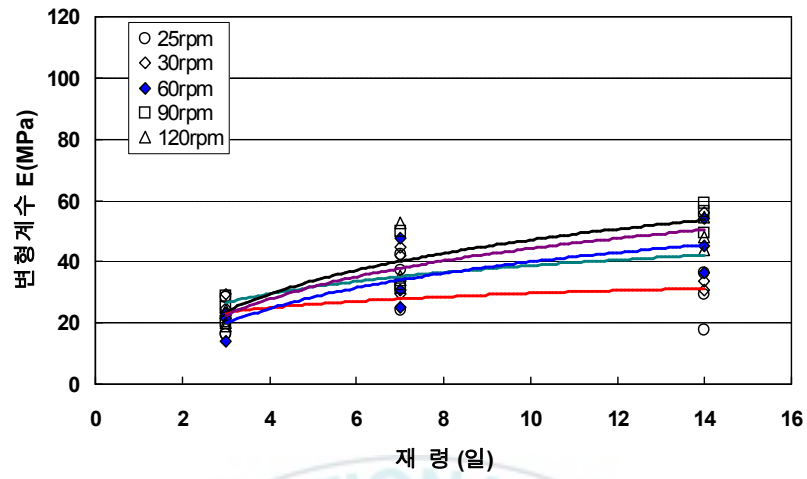
낙동강 염막지구, 김해 장유지구, 김해 화목지구, 진해 용원만의 시료를 점토와 시멘트의 건조중량비 10%, 물-시멘트비 100%의 조건으로 교반할 때 교반기의 회전속도를 25r.p.m~180r.p.m으로 다양하게 제작한 시료의 재령별 변형계수를 그림 4.18에 각각 나타내었다. 낙동강 염막지구, 김해 장유지구, 김해 화목지구에서는 교반회전속도가 증가할수록 변형계수가 증가하는 경향을 보이고 있다. 그러나 진해 용원만에서는 오히려 중간 회전속도인 60r.p.m에서 변형계수가 제일 높고 120r.p.m에서 가장 낮게 나타났다.



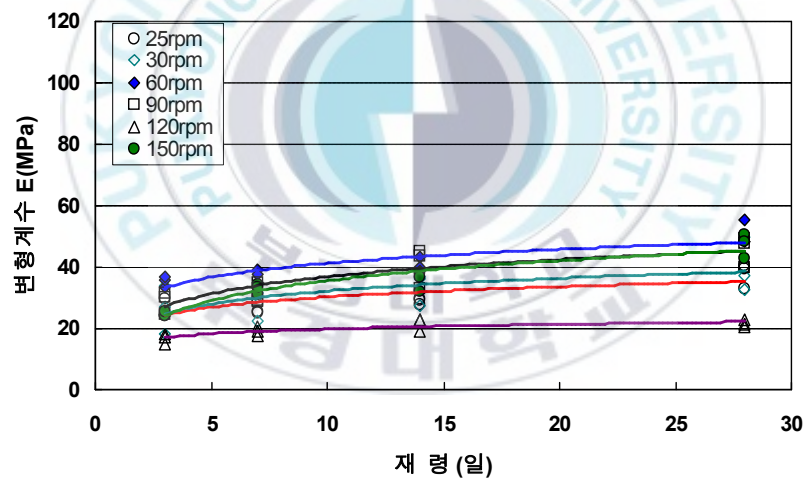
a) 낙동강 염막지구



b) 김해 장유지구



c) 김해 화목지구



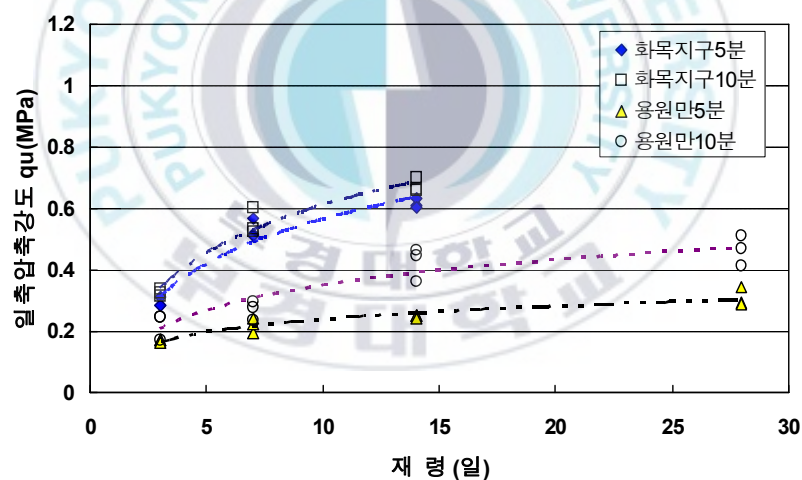
d) 용원만

그림 4.18 교반회전속도와 변형계수와의 관계

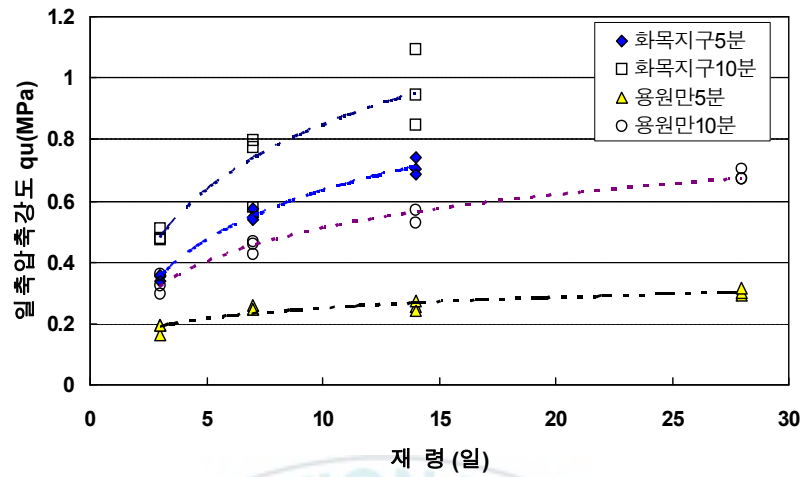
4.6 교반 시간에 의한 영향

4.6.1 교반 시간에 따른 일축압축강도

교반 시간이 강도와 기타 물리적 특성에 미치는 영향을 평가하기 위해 시험 6의 방법으로 실험을 하였다. 김해 화목지구, 진해 용원만의 시료를 점토와 시멘트의 건조중량비 10%, 물-시멘트비 100% 조건으로 혼합하여 교반할 때 혼합 시간을 5분, 10분으로 하여 재령별 일축압축강도를 그림 4.19에 나타내었다. 교반 시간이 증가함에 따라 일축압축강도가 증가하는 경향을 보이고 있으며, 건조혼합방식으로 제작한 혼합토의 일축압축강도가 습윤혼합방식으로 제작한 시료에 비해서 크게 나타났다. 또한 습윤혼합방식으로 제작한 혼합토의 일축압축강도는 교반 시간에 따른 차이가 크게 나타나지 않으나 건조혼합방식으로 제작한 혼합토의 일축압축강도는 교반 시간의 영향이 크게 나타났다.



a) 습윤혼합방식

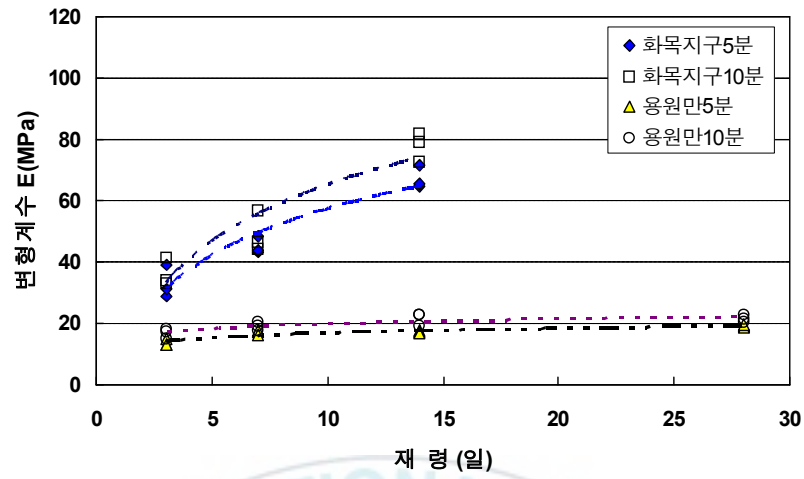


b) 건조혼합방식

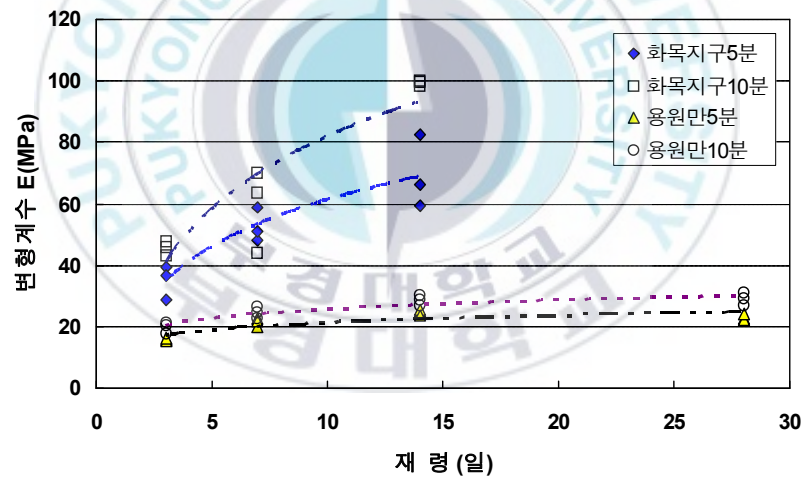
그림 4.19 교반 시간과 일축압축강도와의 관계

4.6.2 교반시간에 따른 변형계수

교반 시간에 따른 변형계수와 재령과의 관계를 그림 4.20에 각각 나타내었다. 교반 시간이 증가할수록 변형계수가 증가하는 것으로 나타났다. 김해 화목지구의 혼합토는 습윤혼합방식으로 제작한 혼합토의 변형계수는 교반 시간에 따른 차이가 크게 나타나지 않으나 건조혼합방식으로 제작한 혼합토의 일축압축강도는 교반 시간의 영향이 크게 나타났다. 그러나 진해 용원만의 혼합토는 혼합방식에 따른 교반 시간에 따른 차이가 크게 나타나지 않았다.



a) 습윤혼합방식



b) 건조혼합방식

그림 4.20 교반 시간과 변형계수와의 관계

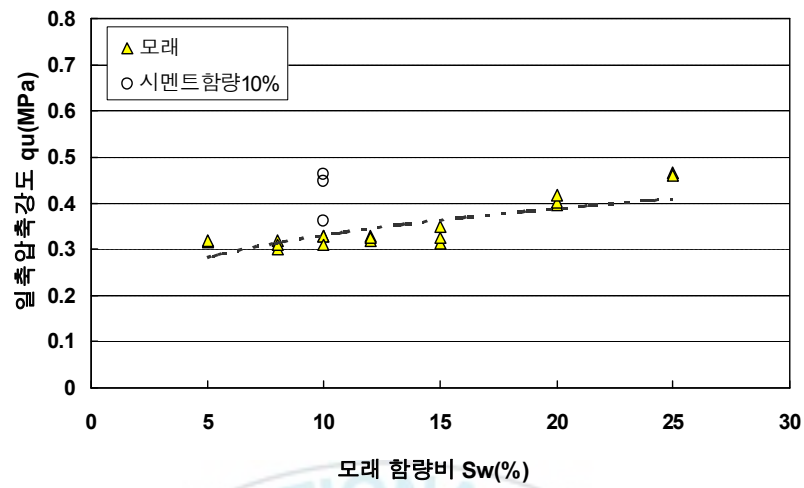
4.7 모래 첨가량에 의한 영향

4.7.1 모래 함량에 따른 일축압축강도

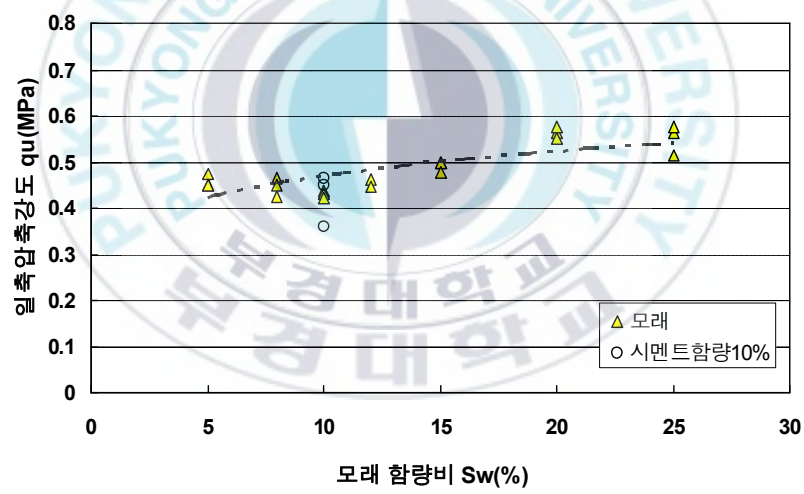
모래 함량이 일축압축강도에 미치는 영향을 평가하기 위해 시험 7의 방법으로 실험을 하였다. 점토와 시멘트의 건조중량비 10%, 물-시멘트비 100%, 모래 함량 5, 8, 10, 12, 15, 20, 25%의 조건으로 혼합하여 재령별 모래 함량과 일축압축강도를 그림 4.21에 나타내었다.

모래 함량비가 증가할수록 일축압축강도가 증가하는 경향을 보이고 있으며, 7일 재령에서 모래를 첨가하지 않은 혼합토와 모래를 첨가한 혼합토의 강도비가 1:2이나, 28일 재령에서는 모래를 첨가하지 않은 혼합토와 모래를 첨가한 혼합토의 강도비가 1:1.4로 시간이 지날수록 모래를 첨가하지 않은 혼합토와 모래를 첨가한 혼합토의 강도 증가량이 둔화됨을 나타내었다.

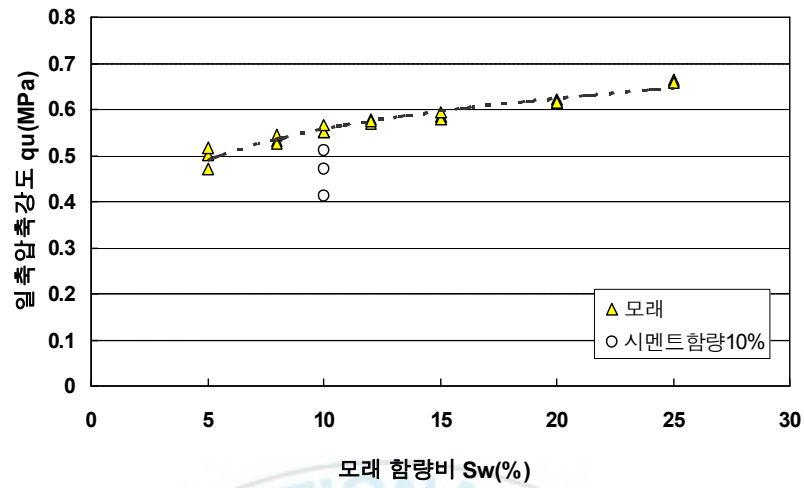
7일 재령에서는 모래 첨가량이 20% 이하에서는 시멘트만 안정제로 혼합한 경우보다 낮은 일축압축강도를 나타내었지만 20% 이상에서는 시멘트로만 혼합한 경우보다 높은 일축압축강도를 나타내었다. 하지만 14일 재령 이후부터는 시멘트로만 혼합한 경우보다 모래를 10% 이상 첨가를 한 경우에서 더 높은 일축압축강도를 나타내었다.



a) 7일 재령



b) 14일 재령

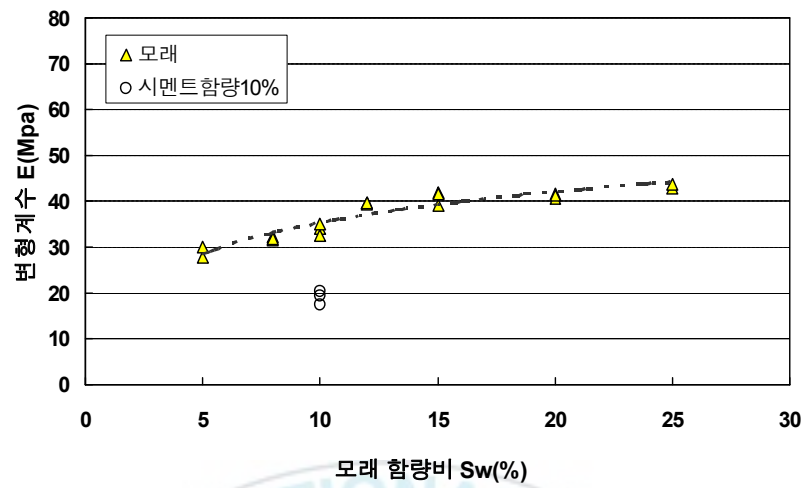


c) 28일 재령

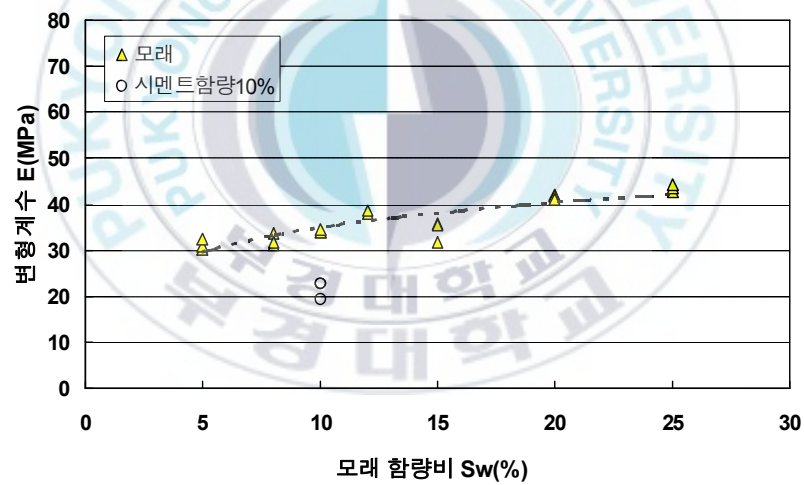
그림 4.21 습윤혼합방식에서 재령별 모래 함량과 일축압축강도와의 관계

4.7.2 모래 함량에 따른 변형계수

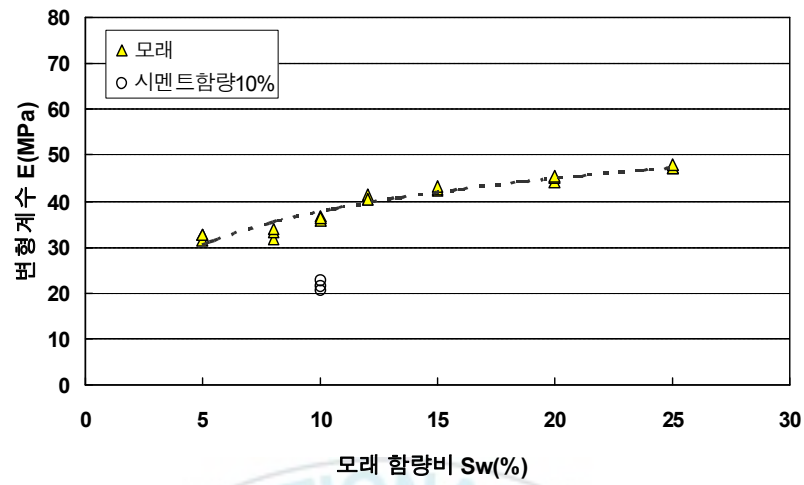
재령별 모래 함량과 변형계수와의 관계를 그림 4.22에 나타내었다. 혼합토의 모래 함량비가 증가할수록 변형계수가 증가하는 것으로 나타났다. 또한 시멘트로만 혼합한 경우보다 모래를 5% 이상 첨가를 하면 더 높은 변형계수를 나타내었다.



a) 7일 재령



b) 14일 재령



c) 28일 재령

그림 4.22 습윤혼합방식에서 재령별 모래함량과 변형계수와의 관계

제5장 결 론

부산신행, 낙동강 염막지구, 김해 장유지구, 김해 화목지구, 진해 용원만 시료로 제작한 혼합토의 강도에 영향을 미치는 인자인 혼합방식, 시멘트 함량, 물-시멘트비, 교반시 회전속도, 혼합시간, 모래 첨가량 등에 대한 실험적 연구를 수행하여 얻은 결과를 다음에 정리하였다.

- 1) 습윤혼합방식보다 건조혼합방식으로 제작한 혼합토의 일축압축강도와 변형계수가 더 크게 나타났으며, 재령 28일까지는 일축압축강도가 크게 증가하지만, 28일 이후로는 증가율이 둔화되는 것으로 나타났다. 습윤혼합방식 시료의 28일 강도는 7일 강도의 1.20~1.72배, 건조혼합방식 시료는 1.45~1.87배의 범위를 나타냈다.
- 2) 재령 7일까지는 변형계수가 크게 증가하지만, 7일 이후로는 증가율이 둔화되는 것으로 나타났다. 습윤혼합방식 혼합토의 변형계수는 일축압축강도의 45~136배, 건조혼합방식 혼합토의 변형계수는 일축압축강도의 36~104배로 나타났다. 건조혼합방식으로 제작한 혼합토의 변형계수와 일축압축강도의 관계가 습윤혼합방식으로 제작한 시료에 비해서 크게 나타났으나, 점토함량이 많은 부산신행과 진해 용원만은 건조혼합방식보다 습윤혼합방식에서 더 크게 나타났다.
- 3) 혼합토의 시멘트 함량이 높고 재령이 길수록 일축압축강도와 변형계수가 크게 나타나며, 파괴변형율이 작게 나타나는 취성파괴적 거동을 보인다. 시멘트 함량이 25%를 초과하면 강도증가율이 다소 둔화되는 것으로 나타났으나, 모래함유량이 높은 김해 장유지구는 시멘트 함량이 25%를 초과하더라도 강도증가현상이 뚜렷하게 나타난다.
- 4) 물-시멘트비(w/c)가 증가할수록 일축압축강도와 변형계수는 감소한다. 모래함량이 낮은 시료는 감소폭이 작으며 서로 비슷한 경향으로 감소하나, 모래함량이 상대적으로 높은 김해 장유지구 시료의 강도는 상대적으로 큰

감소폭을 나타내고 있다.

- 5) (원지반 점토+물)-시멘트 비(wc/c)가 증가할수록 일축압축강도와 변형계수는 감소한다. 점토의 특성에 따라 약간의 차이는 있지만 전반적으로 비슷한 경향으로 감소하는 것으로 나타났다.
- 6) 원지반 점토와 시멘트 교반시 회전속도가 클수록 일축압축강도와 변형계수가 증가하는 것으로 나타났다. 낙동강 염막지구, 김해 장유지구, 김해 화목지구에서는 교반회전속도가 증가함에 따라 일축압축강도가 증가하는 경향을 보이고 있으나 진해 용원만에서는 오히려 중간 회전속도인 60r.p.m에서 일축압축강도가 제일 높고 120r.p.m에서 가장 낮게 나타났다.
- 7) 원지반 점토와 시멘트의 교반시 교반 시간이 5분보다는 10분에서의 일축압축강도와 변형계수가 크게 나타나며, 습윤혼합방식에서는 교반시간에 따른 일축압축강도와 변형계수의 차이가 크게 나타나지 않지만, 건조혼합방식에서는 교반시간의 영향이 크게 나타났다.
- 8) 원지반 점토와 시멘트로만 교반하는 경우보다 첨가하는 모래 함량비가 증가할수록 일축압축강도와 변형계수가 크게 나타난다.
- 9) DCM 공법 설계시 물-시멘트 비(w/c)로만 설계하기보다는 지반의 물리적 성질을 고려한 (원지반 점토+물)-시멘트 비(wc/c), 교반시 회전속도, 교반시간을 설계에 반영하는 것이 합리적인 방안이라고 판단된다.

참고문헌

1. Akbulut, A. and Saglam, A. (2003). "Evaluation of Fly Ash and Clay in Soil Grouting." Grouting and Ground Treatment, Proceedings of the 3rd International Conference, ASCE Special Publication No. 120, New Orleans, 1192-1199.
2. Asano, J., Ban, K., Azuma, K., and Takahashi, K. (1996). "Deep Mixing Method of Soil Stabilization Using Coal Ash." Grouting and Deep Mixing, Proceedings of IS-Tokyo 96, 2nd International Conference on Ground Improvements Geosystems, 14-17 May, Tokyo, 393-398.
3. Amin, A. B., Bakar, I. H., and Besar, J. (1994). "Effect of initial consolidation on the undrained shear response of cement treated soil." Conf. on Deep Foundation and Ground Improvement Schemes, 21-24 November, Bangkok, Thailand, 341-348.
4. Babasaki, R., Terashi, M., Suzuki, T., Maekawa, A., Kawamura, M., and Fukazawa, E., (1997). "JGS TC report: Factors Influencing the strength of Improved Soil." Proceedings of IS-Tokyo 96, 2nd International Conference on Ground Improvement Geosystems, Tokyo, Vol. 2, 913-918.
5. Baker, S. (2000). "Deformation Behaviour of Lime/Cement Column Stabilized Clay." Swedish Deep Stabilization Research Centre, Rapport 7, Chalmers University of Technology.
6. Balasubramaniam, A. S. and Buensuceso. B. R. (1989). "The Overconsolidated Behaviour of Lime Treated Soft Clay" Proc 12th Int. Conf. Soil Mech. And found. Engng., Rio de Janeiro, Brazil, Vol. 2, 1335-1338.
7. Bergado, D. T., Anderson, L. R, Miura, N. and Balasubramaniam, A. S. (1996). Soft Ground Improvement in Lowland and Other Environments,

ASCE press, 1-9., 234-304.

8. Bouazza, A., Kwan, P. S., and Chapman, G. (2004) "Strength Properties of Cement Treated Coode Island Silt by the Soil Mixing Method", Proc. Geotechnical Engineering for Transportation Projects, ASCE press, 1421-1428.
9. Broms, B. B. (2003). Deep Soil Stabilization, Design and Construction of Lime and Lime/Cement Columns. Draft Report.
10. Bruce, D. A. (2000). "An Introduction to the Deep Mixing Methods as used in geotechnical applications - Volume III: The Verification and Properties of Treated Ground." DRAFT Federal Highways Administration, FHWA-RD-99-167.
11. Chun, B. S and Kim, J. C. (2003). "A Study on the Optimal Mixture Ratio for Stabilization of Surface Layer on Ultra-Soft Marine Clay." Grouting and Ground Treatment; Proceedings of the 3rd International Conference, ASCE Geotechnical Special Publication No. 120 New Orleans, 1314-1325.
12. Consoli, N. C., Rotta, G. V., and Prietto, P.D.M. (2000). "Influence of curing under stress on triaxial response of cemented soils." Geotechnique, Vol. 50, No. 1, 99-105.
13. Costas A. A., Evangelos I. S. (2003). "Physical and Engineering Properties of a Cement Stabilized Soft soil Treated with Acrylic Resin Additive." The Electronic Journal of Geotechnical Engineering (EJGE), Vol. 8, 2003
14. den Haan, E J. (2000). "Laboratory Preparation of Test Samples of Soil Stabilized by Cement-Type Materials." Eurosoilstab Design Guide Chp. 6 Report no. 393220/6
15. Ekstrom, J. C., Berntsson, J. A., and Salfors, G. B. (1994) Test fills of clays stabilized with cement columns. Proceedings, 13th International

- Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1183-86.
16. Erdil, R., Tuncer, Adnan, A., and Basma. (1991). "Strength and Stress-Strain Characteristic of a Lime Treated cohesive Soil". Transportation Research Record, No. 1295, Soil Stabilization, Washington D.C.
 17. Esrig, M. I. and MacKenna, P. E. (2001). "Lime Cement Column Ground Stabilization for I-15 in Salt Lake City." Practice Periodical on Structural Design and Construction, ASCE, Vol. 4, No. 3, 104-115.
 18. Fam, M. A. and Santamaria, J. C. (1996). "Study of Clay-Cement Slurries with Mechanical and Electromagnetic Waves." Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 365-373.
 19. Fang, Y. S., Chung, Y. T., Yu, F. J., and Chen, T. J. (2001). "Properties of soil-cement stabilised with deep mixing method." Ground Improvement 5, No. 2, 69-74.
 20. Futaki, M., Nakano, K., and Hagino, Y. (1996). "Design Strength of Soil-Cement Columns as Foundation Ground for Structures" Proceedings of IS-Tokyo 96, 2nd International Conference on Ground Improvement Geosystems, 14-17 May 1996, Tokyo, Vol. 2, 481-484.
 21. Gotoh, M., (1996). "Study on Soil Properties Affecting the Strength of Cement Treated Soils." Proceedings of IS-Tokyo 96, 2nd International Conference on Ground Improvement Geosystems, Tokyo, Vol. 1, 399-404.
 22. Hampton, M. B., and Edil, T. B. (1998). "Strength Gain of Organic Ground With Cement Type Binders." Soil Improvement for Big Digs, Geotechnical Special Publication, ASCE, No. 81, Boston, MA, October, 135-148.
 23. Hayashi, H., Nishikawa, J., Ohishi, K., and Terashi, M. (2003). "Field Observation of Long-Term Strength of Cement Treated Soil." Grouting and Ground Treatment, Proceedings of the 3rd International Conference, ASCE Special Publication No. 120, New Orleans, 598-609.

24. Jacobson, J. R. (2002). "Factors Affecting Strength Gain in Lime-Cement Columns and Development of a Laboratory Testing Procedure." Master Thesis, Virginia Tech. Institute
25. Kamruzzaman, A. H. M., Chew, S. H., and Lee, F. H. (2001). "Behavior of Soft Singapore Marine Clay Treated with Cement." Foundations and Ground Improvement, Proceedings of Specialty Conference, ASCE GSP, No. 113, 472-485.
26. Kawasaki, T., Niina, A., Saitoh, S., Suzuki, Y., and Honjyo, Y. (1981). Deep Mixing Method Using Cement Hardening Agent. Proceedings of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, 721-724.
27. Kitazume, M., Takeshi, N., Terashi, M., and Ohishi, K. (2003). "Laboratory Tests on Long-Term strength of Cement Treated Soil." Grouting and Ground Treatment; Proceedings of the 3rd International Conference, ASCE Geotechnical Special Publication No. 120 New Orleans, 586-597.
28. Lin, K. Q. (2000). "Behaviour of DCM Columns under Highway Embankment at Bridge Approaches." Thesis for the Degree of Doctor of Philosophy, Nanyang Technical University.
29. Lin, K. Q. and Wong, I. H. (1999). "Use of deep cement mixing to reduce settlements at bridge abutments." Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 125, No. 4, 309-320.
30. Locat, J., Berube M.A., Choquette M. (1990). "Engineering Behavior of Cement Treated Bangkok Soft Clay." Canadian Geotechnical Journal, Vol. 27, No. 3, January, 294-304
31. Masaaki, G. (1996). "Study on Soil Properties Affecting the Strength of Cement Treated Soils." Grouting and Deep Mixing, Proceedings of IS-Tokyo 96, 2nd International Conference on Ground Improvement

Geosystems, 14-17 May 1996, Tokyo, 399-404

32. McGinn, A. J. and O'Rourke, T. D. (2003). "Performance of Deep Mixing Methods at Fort Point Channel." Report to Massachusetts Turnpike Authority, Federal Highway Administration, and Bechtel/Parsons Brinckerhoff, Cornell University.
33. Miura, N., Horpibulsuk, S., and Nagaraj, T. S. (2001). "Engineering Behavior of Cement Stabilized Clay at High Water Content." Soils and Foundations. Japanese Geotechnical Society. Vol. 41, No. 5, 33-46.
34. Nagaraj, T. S. (2002). One Day Lecture on Ground Improvement Techniques, Technical committee of Thick Deposit (ATC-7), Dong A University, Busan, Korea, 59-95.
35. Shao, Y., Zhang, C., and Macari M.J. (1998). "The Application of Deep Mixing Pile Walls for Retaining Structures in Excavations", Soil Improvement for Big Digs, Geotechnical Special Publication, ASCE, No.81, Boston, MA, October, 84-95.
36. Shen, S. L., Miura, N., Han, J., and Koga, H. (2003). "Elevation of Property Changes in Surrounding Clays due to Installation of Deep Mixing Columns." Grouting and Ground Treatment; Proceedings of the 3rd International Conference, ASCE Geotechnical Special Publication No. 120, New Orleans, 634-645.
37. Shiells, D. P., Pelnik III, T. W., and Filz, G. M. (2003). "Deep Mixing: An Owner's Perspective." Grouting and Ground Treatment, Proceedings of the 3rd International Conference, ASCE Special Publication No. 120, New Orleans, 489-500.
38. Stocker, P. T. (1975). "Diffusion and diffuse cementation in lime and cement stabilized clayey soils chemical aspects." Australian Road Research, 5: 6-47.
39. Taki, O. (2003). "Strength Properties of Soil Cement Produced by

- Deep Mixing." Grouting and Ground Treatment, Proceedings of the 3rd International Conference, ASCE Special Publication No. 120, New Orleans, 646-657.
40. Taki, O. and Yang, D.S. (1991). "Soil-cement mixed wall technique", ASCE special conference, Denver, CO.
41. Tan, T. S., Goh T. L., Yong K. Y. (2002). " Properties of Singapore Marine Clays Improved by Cement Mixing." *Geotechnical Testing Journal*, Dec. 2002, Vol. 25, No. 4, 422-33.
42. Tatsuoka, F. and Kobayashi, A. (1983). "Triaxial strength characteristics of cement-treated soft clay." *Proceedings of the 8th European Conference of SMFE*, 421-26.
43. Terashi, M. (1997). "Deep Mixing Methods Brief state of-the-art." *14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 4p.
44. Yang, D. S., Yagihashi, J. N., and Yoshizawa, S. S. (1998). "Dry Jet Mixing For Stabilization of Very Soft Soils and Organics Soil.", *Soil Improvement for Big Digs*, Geotechnical Special Publication, ASCE, No.81, Boston, MA, October, 96-110.
45. Zhou, G. Z., Hu, T. A., and Liu, B. C. (1981). "Soft Clay Improvement Technique of Deep Cement Mixing Method." *Journal of Geotechnical Engineering of China*, Nanjing, China, No.4, 1981

감사의 글

회사 생활을 하다가 두렵고 설레는 마음으로 대학원 생활을 시작한지가 벌써 3년이 다 되어가며, 마침내 결실을 보게 되어 더없이 기쁘고 보람을 느낍니다. 논문을 마무리하는 감사의 글을 작성하고 있는 순간 지나간 일들이 스쳐 지나갑니다.

대학원 생활을 시작하면서 많은 사람들과 만나게 되었으며, 그 분들과의 인연이 저에겐 또 다른 추억이며 힘입니다.

본 논문이 완성되기까지 끊임없이 지도와 격려를 아끼지 않으신 정두희 지도교수님께 진심으로 감사드립니다. 그리고 부족한 논문을 심사해 주시고 세심한 지적을 해 주신 김명식 교수님, 정진호 교수님께 감사드리며, 석사과정 동안에 많은 지도와 가르침으로 학업을 마칠 수 있도록 도와주신 토목학과 모든 교수님께 감사드립니다.

익숙하지 않은 대학원 생활의 시작부터 끝까지 살피준 김희준, 연구실 생활을 같이 하면서 정이 든 탐, 또한 논문준비에 많은 도움을 준 김도영, 조중식, 이찬우, 하상진, 김상호, 윤재혁, 정의석 외 모든 이들에게 감사드립니다.

또한 공부할 수 있도록 격려와 배려를 하신 강문기 사장님, 서영훈 부장님 이하 직장 여러분에게도 감사의 마음을 전합니다.

오늘의 저를 있게 해주신 부모님께 존경과 사랑을 담아 감사의 마음을 전하며, 힘들고 지칠 때 많은 격려를 해준 동생 은주와 주현이에게 이 논문으로서 감사의 마음을 전합니다.