



저작자표시-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권으로부터 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](#)

공 학 석 사 학 위 청 구 논 문

흙-시멘트 혼합토의 강도특성에 관한
연구



2007년 08월

부 경 대 학 교 산 업 대 학 원

토 목 공 학 과

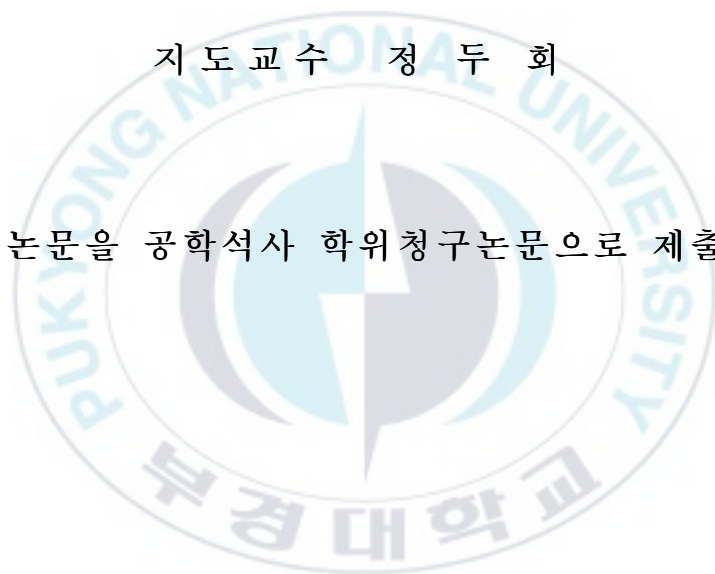
박 재 담

공 학 석 사 학 위 청 구 논 문

흙-시멘트 혼합토의 강도특성에 관한
연구

지도교수 정 두 회

이 논문을 공학석사 학위청구논문으로 제출함



2007년 08월

부 경 대 학 교 산 업 대 학 원

토 목 공 학 과

박 재 담

박재담의 공학석사 학위논문을 인준함

2007년 08월 30일



주 심	김 명 식	인
-----	-------	---

위 원	정 진 호	인
-----	-------	---

위 원	정 두 회	인
-----	-------	---

목 차

	page
표 목 차	i
그 립 목 차	ii
Abstract	iv
제1장 서 론	1
1.1 연구의 배경	1
1.2 연구의 동향	2
1.3 연구의 목적	2
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	21
제4장 시험결과의 고찰	26
4.1 재령과 혼합방식에 의한 영향	26
4.2 일축압축강도와 변형계수의 관계	31
4.3 파괴변형율과 일축압축강도의 관계	33
4.4 점토-시멘트 건조중량비에 의한 영향	34

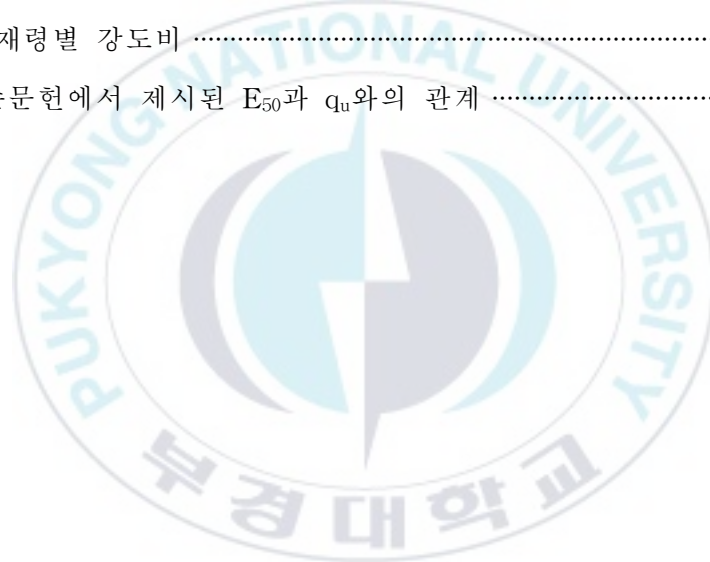
목 차 (계 속)

4.5 물-시멘트비(w/c)에 대한 영향	43
4.6 (원지반 점토+물)-시멘트비(wc/c)에 의한 영향	47
4.7 교반회전속도에 의한 영향	52
4.8 교반 시간에 의한 영향	56
 제5장 결 론	 59
참고문헌	60



표 목 차

	page
표 2.1 각 재령간의 강도관계(실내개량토)	15
표 3.1 원지반 시료의 물리적 특성	19
표 3.2 시험조건 및 방법 (부산신항)	22
표 3.3 시험조건 및 방법 (낙동강 염막지구)	23
표 3.4 시험조건 및 방법 (김해 장유지구)	24
표 3.5 시험조건 및 방법 (김해 화목지구)	25
표 4.1 각 재령별 강도비	29
표 4.2 기존문헌에서 제시된 E_{50} 과 q_u 와의 관계	31



그 립 목 차

	page
그림 2.1 고화원리	4
그림 2.2 점성토와 안정제의 반응	5
그림 2.3 재령경과에 따른 개량토의 조직변화(배율:20,000배)	6
그림 2.4 개량토의 강도에 영향을 미치는 주요 요인	7
그림 2.5 실내개량토의 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 첨가량과 q_u 의 관계 ($\omega=100\%$, $T_c=91$ 일)	8
그림 2.6 개량전 흙의 함수비와 실내개량토의 이론상 함수비의 관계	10
그림 2.7 현 위치개량토의 함수비 측정 예 (일본 동경만)	10
그림 2.8 개량전 흙의 함수비와 실내개량토의 이론상 혼합밀도의 관계	12
그림 2.9 현 위치개량토의 밀도 측정 예 (일본 동경만)	12
그림 2.10 시멘트 첨가량에 따른 강도비교	13
그림 2.11 재령에 따른 실내 개량토의 일축압축강도	14
그림 2.12 일축압축강도 q_{u7} 과 q_{u28} 의 관계	16
그림 2.13 일축압축시험에서 개량토와 무개량토의 응력-변형을 관계	17
그림 2.14 실내개량토의 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	27
그림 4.2 습윤 및 건조혼합방식에서 일축압축강도 q_{u7} 과 q_{u28} 의 관계	28
그림 4.3 습윤 및 건조혼합방식에서 변형계수와 재령과의 관계	30
그림 4.4 습윤 및 건조혼합방식에서 일축압축강도와 변형계수와의 관계 ..	32
그림 4.5 습윤 및 건조혼합방식에서 일축압축강도와 파괴변형율과의 관계 ..	34

그 립 목 차 (계 속)

그림 4.6	시멘트 함량과 일축압축강도와의 관계	35
그림 4.7	습윤혼합방식에서의 재령별 시멘트함량과 일축압축강도의 관계 ..	37
그림 4.8	건조혼합방식에서의 재령별 시멘트함량과 일축압축강도의 관계 ..	38
그림 4.9	습윤혼합방식으로 제작한 시료의 시멘트함량비와 변형계수와의 관계 ..	40
그림 4.10	건조혼합방식으로 제작한 시료의 시멘트함량비와 변형계수와의 관계 ..	42
그림 4.11	축방향 변형율과 축하중과의 관계	43
그림 4.12	물-시멘트비와 일축압축강도와의 관계	45
그림 4.13	습윤혼합방식에서 물-시멘트비(w/c)와 변형계수와의 관계	47
그림 4.14	재령별 (원지반점토+물)-시멘트비와 일축압축강도와의 관계 ..	49
그림 4.15	재령별 (원지반점토+물)-시멘트비와 일축압축강도와의 관계(기준문헌과의 비교) ..	50
그림 4.16	재령별 (원지반점토+물)-시멘트비(wc/c)와 변형계수와의 관계 ..	52
그림 4.17	교반회전속도와 일축압축강도와의 관계	54
그림 4.18	교반회전속도와 변형계수도와의 관계	56
그림 4.19	교반 시간과 일축압축강도와의 관계	57
그림 4.20	교반 시간과 변형계수와의 관계	58

Strength Characteristics of Clay-Cement Mixtures

Jae-Dam Park

*Department of Civil Engineering, Graduate School of Industry
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 soil-cement specimens fabricated in the laboratory. Factors evaluated in the study include sand and water content in the base clay, quantity of cement, mixing method, degree of mixing, and curing time. The amount of sand and the water content in the base clay has significantly affected the unconfined compressive strength of soil-cement specimens. In addition, the rotation speed of mixing blades has also a considerable effect on the strength of soil-cement specimens. The water-clay to cement ratio showed a better correlation with a unconfined compressive strength of soil-cement specimens compared to the water-cement ratio used in concrete industry.

Keywords : Deep cement mixing method, Factors, Unconfined compressive strength, Failure strain, Water-cement ratio, Clay-water-cement ratio, Stress-strain, Elastic modulus

제1장 서론

1.1 연구의 배경

흙과 안정처리제의 심층혼합에 의한 연약지반 개량공법이 유럽과 일본에서 기술이 개발되어 1975년 이후 건설현장에서 다양하게 상용화되어 왔다.

심층혼합공법(Deep Cement Mixing Method, 이하 DCM 공법)은 연약지반 내에 시멘트와 물을 혼합한 안정처리제(슬러리)를 저압으로 주입하면서 회전 날개가 장착된 교반기를 회전시켜 교반혼합하고 시멘트의 경화반응을 이용하여 원지반내 토층 전반을 소정의 균일한 강도로 개량체를 조성하는 공법으로, 해상 및 육상 연약지반에 이용되며, 토목 및 건축 구조물 기초지반의 지지력 증가, 연약지반상 성토체의 안정성 증대 또는 액상화 대책공법 등으로 광범위하게 사용되고 있다. DCM 공법의 가장 중요한 지반공학적 특징은 강도의 증가이다. 소정의 강도의 확보는 충분한 변형계수와 장기적 안정성을 제공한다. 일반적으로 많은 인자들이 DCM 공법으로 처리된 지반의 안정화에 영향을 미치고 있다. 대표적인 인자들로는 원지반의 물성치, 지반을 구성하는 흙의 균질성, 안정처리제의 종류와 양 그리고 양생기간 및 양생온도, 교반속도 등이 있다. 따라서 단순히 공법적용에 앞서 지반조사만으로는 안정처리된 지반의 전단강도를 정확하게 예측하는 것이 어려우므로 안정처리제, 양생기간 그리고 교반속도 등을 다양화하면서 시료의 압축강도를 측정함으로써 표준화된 배합 설계조건을 정립하는 것이 매우 중요한 실정이다. 또한 이러한 배합설계과정은 실제 건설현장에서 소정의 강도를 얻는데 중요한 역할을 하고 있다. 실제 건설현장에서의 흙의 강도와 실험실에서 측정된 동일한 흙의 강도와는 상이한 차이가 있음은 당연하다. DCM 공법 설계시 개량지반의 변형해석에 실내배합 시험의 일축압축시험을 통해서 평가한 변형계수를 적용한다. 그러나 현재까지 보고된 각종의 문헌자료에 의하면 국내의 점토지반에 적용한 개량토의 변형계

수가 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, 최근에 일본을 중심으로 흙-시멘트 기둥의 거동을 분석하기 위한 원심모형 실험을 수행하였으며, Kivelo(2000), Filz(2004, 2005) 등은 해석적 방법을 통하여 흙-시멘트 기둥의 거동을 분석하는 연구를 수행하였다. 그러나 국내의 경우에는 1990년대 중반에 DCM 공법을 도입한 이래 시공실적이 증가하고 있으나 현재까지 주로 외국의 연구결과와 시공경험을 토대로 설계 및 시공을 하고 있으며 국내의 토질특성을 고려한 연구가 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

DCM공법은 국내의 경우 시공실적은 많으나 배합설계에 대한 연구가 미흡하므로 국내 연약점토의 특성을 반영하지 못하여 DCM공법의 신뢰성과 경제

성에 대한 의문이 대두되고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 실내시험을 통하여 개량토의 강도에 영향을 미치는 주요 인자(혼합방식, 원지반 함수비, 시멘트 첨가량, 교반속도)에 대한 평가를 실시하여 배합설계법의 토대를 제시하고자 한다.



제2장 이론적 고찰

2.1 DCM 공법의 고화원리

개량토는 시멘트와 물과의 수화반응에 의한 생성물과 점토광물의 포졸란 반응에 의해 고화된다. 그림 2.1은 고화원리를 설명하고 있다.

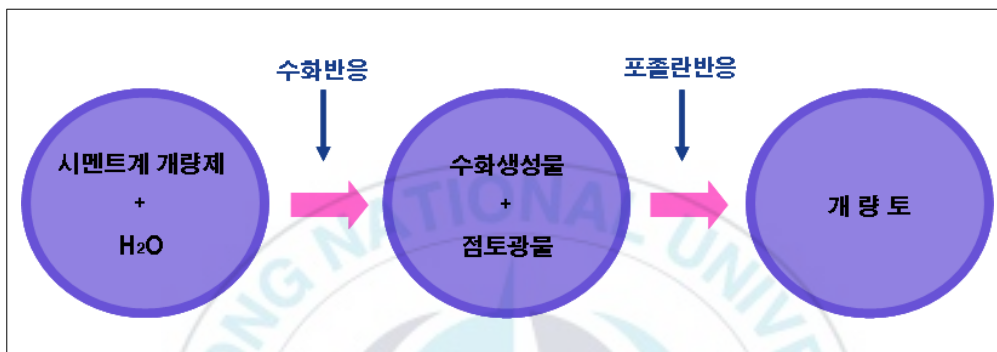


그림 2.1 고화원리

2.2 DCM 개량 지반의 공학적 성질

본 장에서는 개량토가 고화되어 강도를 발휘시키는 구조를 설명하고 일본 및 국내 물리적, 역학적 시험결과를 참조하여 개량토의 공학적 성질에 대해 설명하고자 한다.

2.2.1 개량토의 고화구조

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

① 시멘트와 물과의 반응(수화반응)에 의해 수화 생성물로 되는 경화체 (그림

2.2의 ㉔, ㉕)

㉔ 시멘트의 수화에 의해 생성된 수산화 칼슘($\text{Ca}(\text{OH})_2$)과 점성토가 반응(포졸란 반응)한 반응생성물이 되는 경화체 (그림 2.2의 ㉔)

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

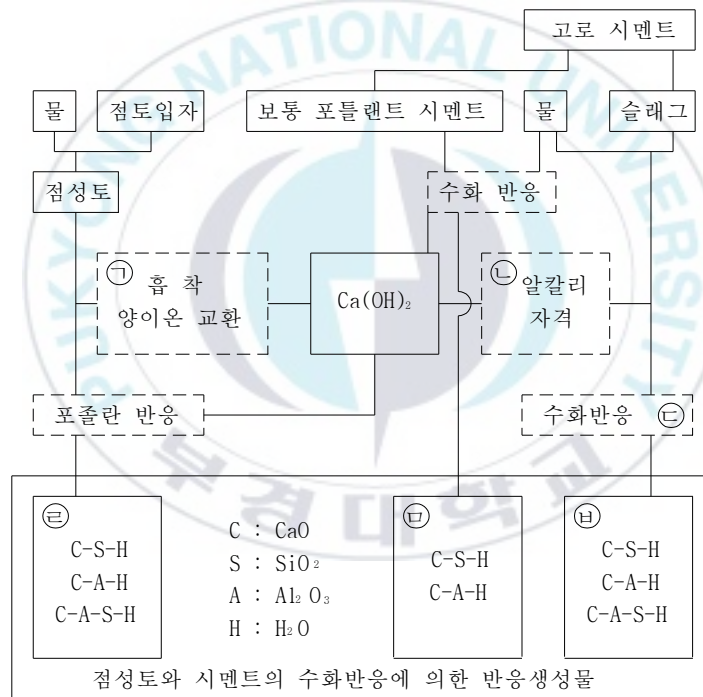
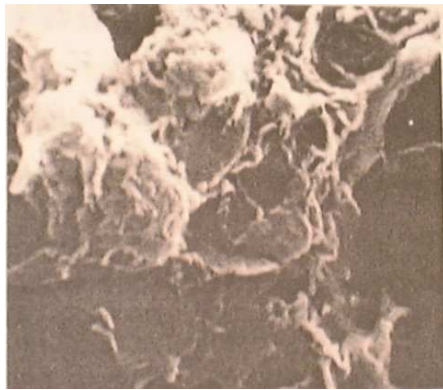
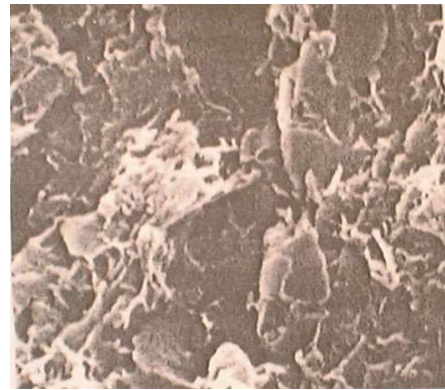


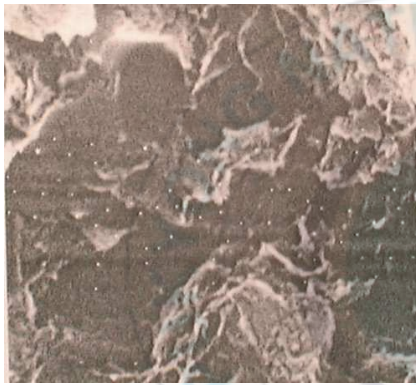
그림 2.2 점성토와 안정제의 반응



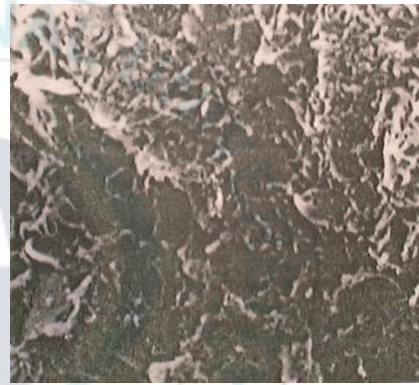
(a) 재령 1일



(b) 재령 3일



(c) 재령 7일



(d) 재령 28일

그림 2.3 재령경과에 따른 개량토의 조직변화(배율:20,000배)

2.2.2 개량토의 공학적 성질에 영향을 미치는 요인

개량토의 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 개량토의 강도는 달라진다. 이는 대상토의 포졸란 반응성의 차이 때문으로 대상토의 포졸란 반응성을 파악한다면 개량토의 경화 특성을 예측할 수도 있다.

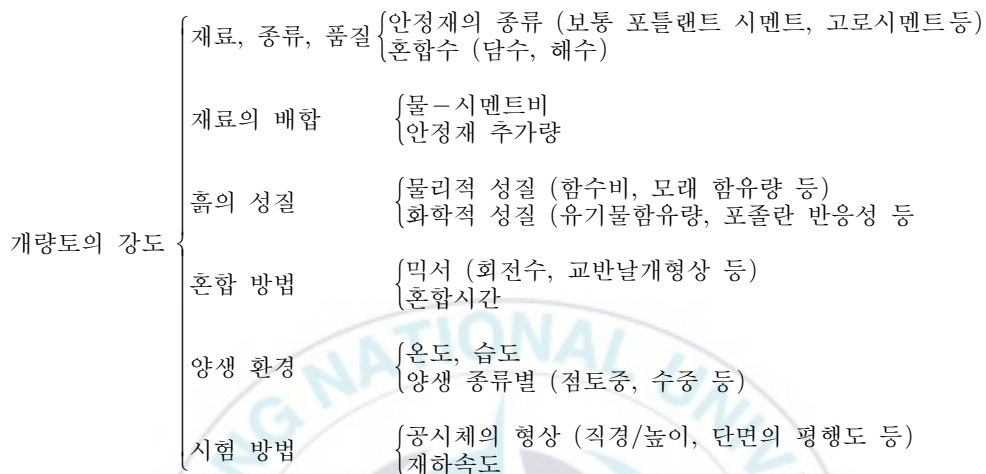


그림 2.4 개량토의 강도에 영향을 미치는 주요 요인

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

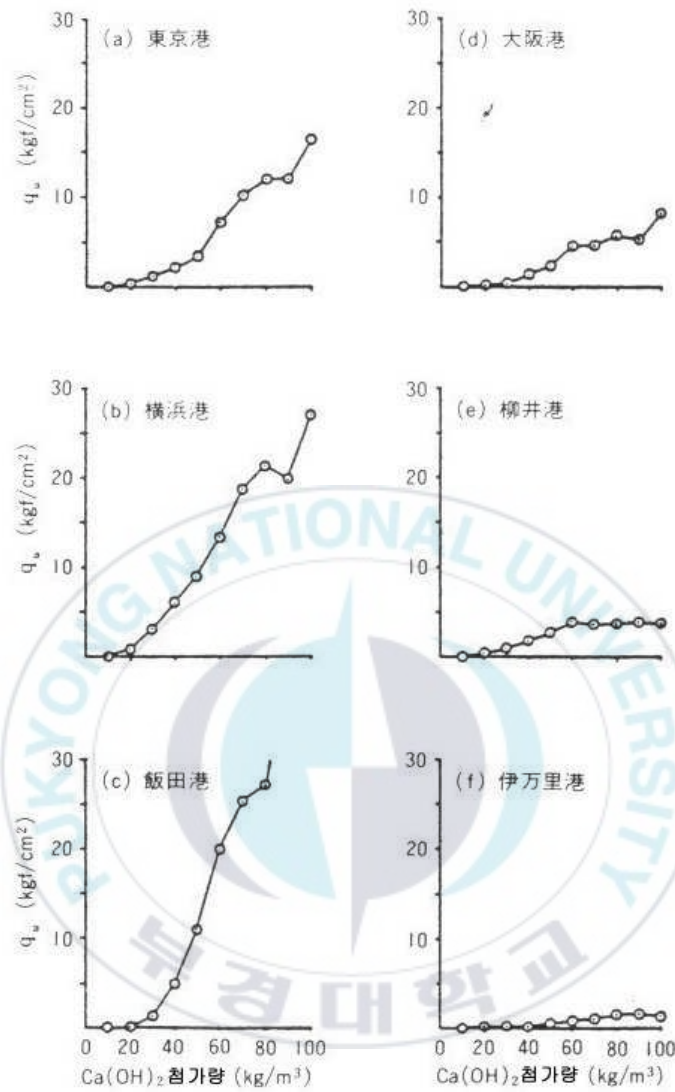


그림 2.5 실내개량토의 Ca(OH)_2 첨가량과 q_u 의
관계 ($\omega=100\%$, $T_c=91$ 일)

2.2.3 개량토의 물리적 성질

1) 함수비

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

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

여기서, ω_s : 개량토의 함수비 (%)

G_s : 토립자 비중

G_w : 물의 비중

a : 안정재 첨가량 (kg/m^3)

β : 물시멘트비 (W/C)

ω_o : 대상토의 함수비 (%)

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

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

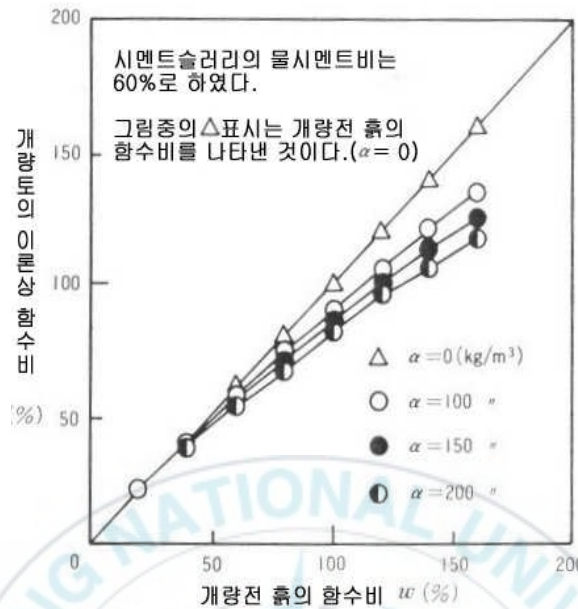


그림 2.6 개량전 흙의 함수비와 실내 개량토의 이론상 함수비의 관계

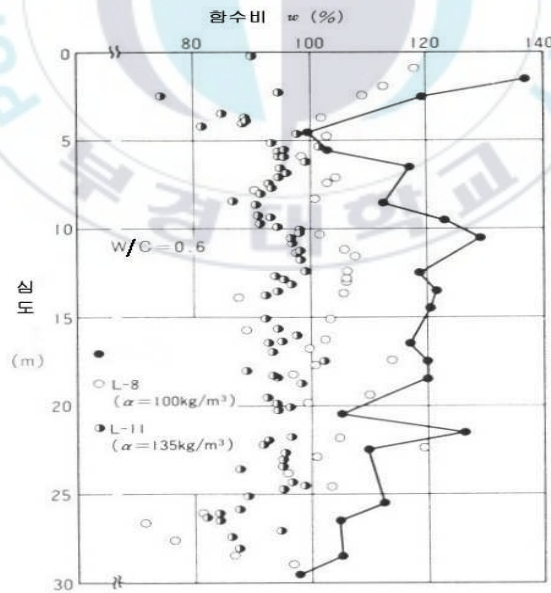


그림 2.7 현 위치개량토의 함수비 측정 예(일본 동경만)

2) 밀도

개량토의 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

a : 안정재 첨가량 (kg/m^3)

β : 물시멘트비 (W/C)

ρ_w : 물의 밀도 (t/m^3)

ρ_t : 개량토의 밀도 (t/m^3)

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

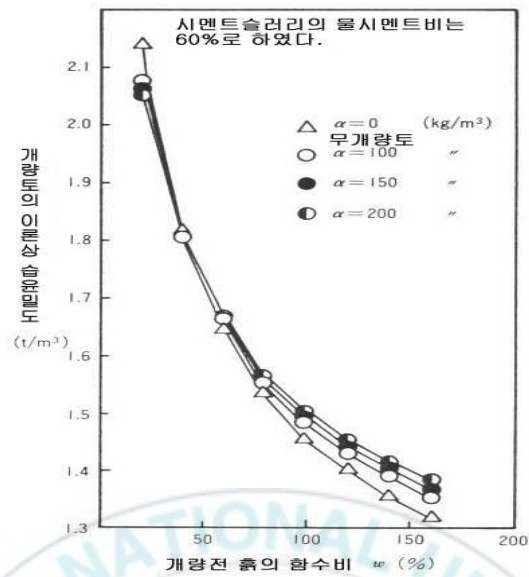


그림 2.8 개량전 흙의 함수비와 실내 개량토의 이론상 혼합밀도의 관계

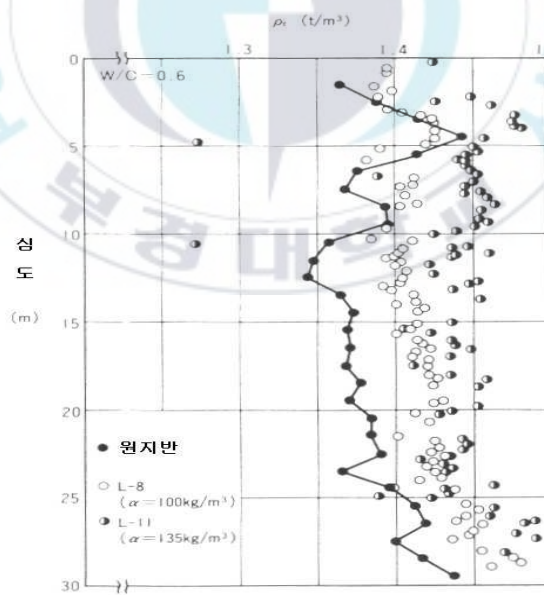


그림 2.9 현 위치개량토의 밀도 측정 예 (일본 동경만)

2.2.4 개량토의 역학적 성질

1) 일축압축강도

(1) 개량토의 일축압축강도 q_u 와 관련된 특성

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

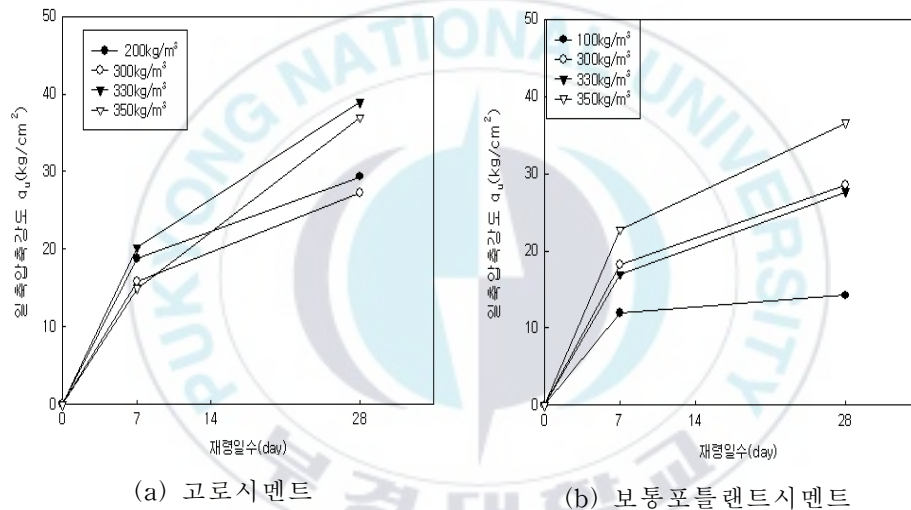
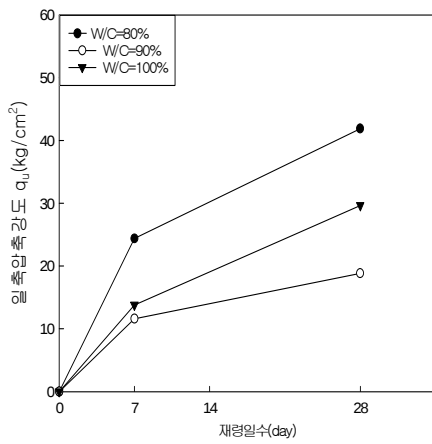
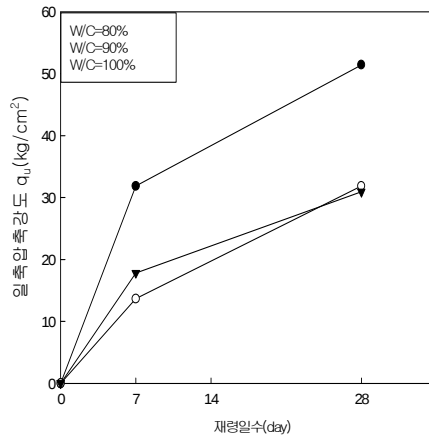


그림 2.10 시멘트 첨가량에 따른 강도비교



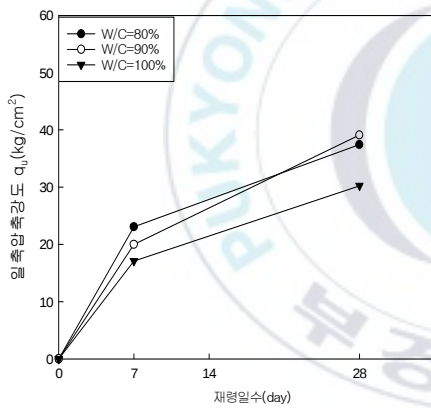
(a) 고로시멘트 첨가량 300 kg/m^3



(b) 고로시멘트 첨가량 330 kg/m^3

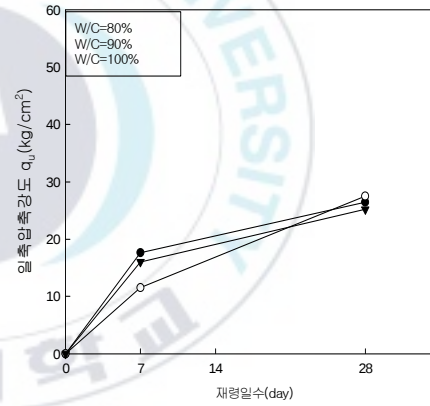
(부산신항 민자2-1단계-소형선부두)

(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 개량토의 일축압축강도

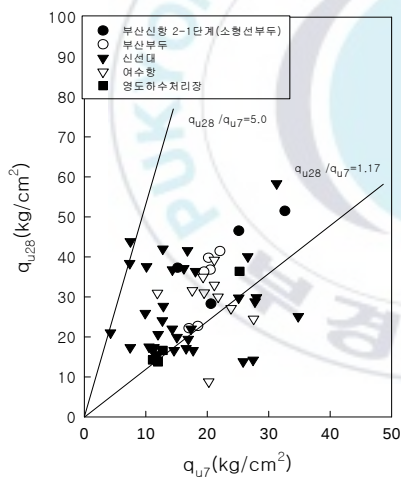
(2) 각 재령시 개량토의 일축압축강도 상호관계

그림 2.12는 고로시멘트 및 보통포틀랜드시멘트를 사용한 실내개량토의 일

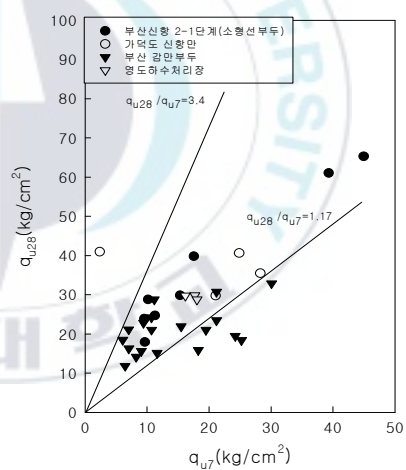
축압축강도 q_{u7} 과 q_{u28} 의 관계(첨자는 재령을 나타낸다)를 나타낸 것이고, 표 2.1은 시멘트 종류 및 첨가량에 따른 각 재령간의 개량토 강도와의 관계를 정리한 것이다.

표 2.1 각 재령간의 강도관계(실내개량토)

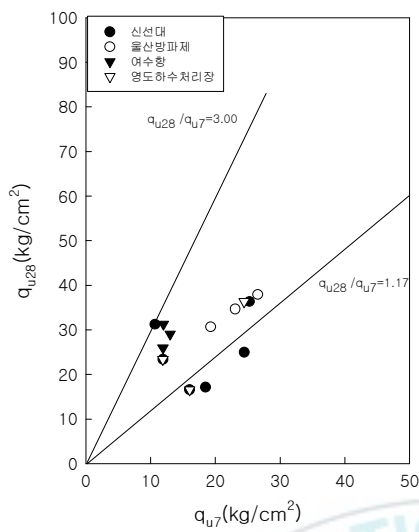
시멘트 첨가량	시멘트의 재령	시멘트 종류	
		보통포틀랜드시멘트	고로시멘트
300kg/m^3	q_{u7} 과 q_{u28}	$q_{u28} = 1.17 \sim 5.00 q_{u7}$	$q_{u28} = 1.17 \sim 3.40 q_{u7}$
330kg/m^3	q_{u7} 과 q_{u28}	$q_{u28} = 1.17 \sim 3.00 q_{u7}$	$q_{u28} = 1.77 \sim 3.50 q_{u7}$



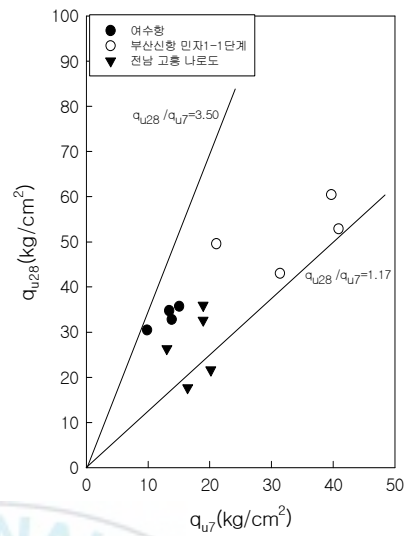
(a) 보통포틀랜드시멘트(300 kg/m^3)



(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 개량토의 응력-변형율 관계를 비교한 것이다. 개량전 지반과 비교해보면 개량지반의 강도와 변형계수는 증가하는 반면에 파괴 변형율은 감소한다.

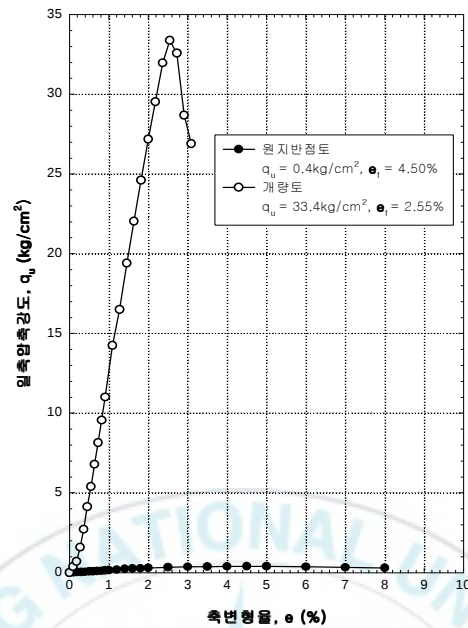


그림 2.13 일축압축시험에서 개량토와 무개량토의
응력-변형률 관계

(2) 개량토의 변형계수

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

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

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

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

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

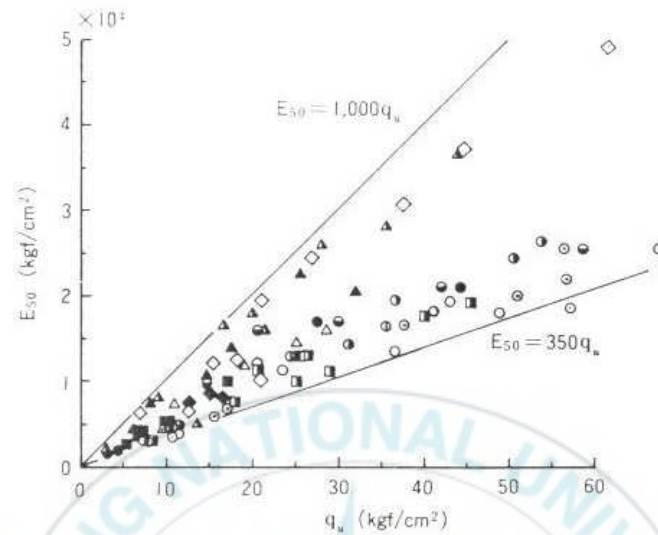


그림 2.14 실내개량토의 E_{50} 과 q_u 의 관계

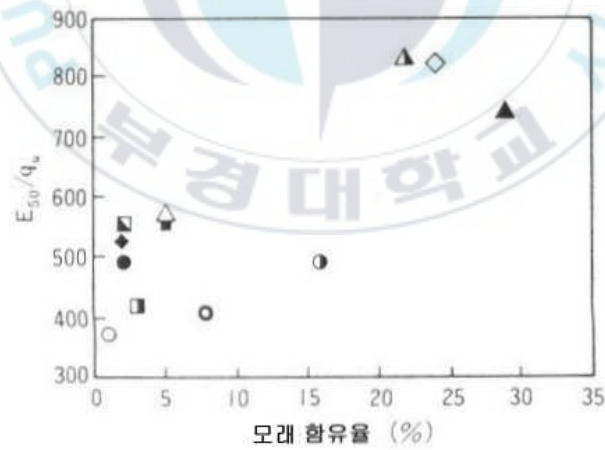


그림 2.15 모래 함유율과 E_{50}/q_u 의 관계(실내개량토)

제3장 시험조건 및 방법

3.1 시험조건

본 연구에 사용된 시료는 4개 종류의 연약점토로 부산신항(시료 1), 낙동강
염막지구(시료 2), 김해 장유지구(시료 3), 김해 화목지구(시료 4)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
단위중량(gf/cm^3)		1.82	1.84	2.14	1.89
액성한계(%)		42.4	29.1	41.0	28.95
소성한계(%)		27.64	20.0	20.0	13.89
소성지수		14.76	9.1	21.3	15.06
액성지수		0.97	1.11	0.46	1.30
함수비(%)		45.22	41.48	28.67	33.41
비중		2.670	2.671	2.681	2.704
pH		-	4.67	5.29	6.58
입도 분포	모 래	8%	6%	15%	21.7%
	실 트	43.3%	45.7%	40.7%	46.6%
	점 토	48.7%	39.2%	31.7%	31.7%

실내시험에서 시료 성형을 위해 보통포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 두
가지 방법으로 시료를 제작하였다.

첫 번째 방법은 시멘트와 점토와의 건조중량비에 의한 것이고 다른 하나는
미개량토 1m^3 에 대한 시멘트비로 정의된 제조방법으로 시료를 제작하였다. 습
윤방식에서의 물-시멘트비는 미개량토에 시멘트를 섞어 만든 시멘트 슬러리의
물-시멘트비로 나타낸다.

3.1.1 시멘트 슬러리를 안정제로 사용한 습윤혼합방식

원지반 점토의 함수비는 시료 1은 45.22%, 시료 2는 41.48% 시료 3은 28.67%, 그리고 시료 4는 33.41%이다. 원지반 점토시료를 시료튜브에서 추출한 후 일주일동안 함수비 변화없이 보관하였다. 물-시멘트 비는 50~300% 범위에서 시멘트 슬러리와 원지반 점토를 믹싱기를 이용하여 25~120r.p.m.으로 10분간 혼합하였으며, 시멘트 양은 건조중량비 5, 8, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40%로 하였다.

혼합된 시료는 30분 이내에 PVC플라스틱 몰드(D=50mm, H=100mm)에 부어넣어 시료를 성형하였으며, 3층 다짐으로 PVC몰드를 바닥에서 10cm 높이로 100회 진동다짐시켜 혼합시료내의 공기를 제거하였다. 함수비의 변화를 예방하기위해 몰드 끝단을 고무마개로 밀봉한 상태에서 24시간 방치하였다. 24시간 후에는 몰드상하면을 매끄럽게 처리한 후 시료를 몰드에서 탈형하였고, 시료는 22~26°C를 유지하면서 수중 양생하였다. 양생된 시료는 차후에 일축압축강도 시험을 하였다.

3.1.2 시멘트가루를 안정제로 사용한 건조혼합방식

점토에 대한 시멘트양은 건조 중량비 5, 8, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40%로 하였고 시료는 10분간 혼합하였다.

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

3.1.3 교반 회전속도를 다양화한 습윤혼합방식

점토에 대한 시멘트양은 건조중량비 10%로 하고 물-시멘트비를 100%로 하여 교반기 회전속도를 25, 30, 60, 90, 120, 150, 180회/분(r.p.m.)으로 하고 시료를 10분간 혼합하였다.

혼합된 시료는 습윤방식에서와 같은 방법으로 시료를 성형하였고 차후에 일

축압축강도 시험을 하였다.

3.1.4 일축압축강도시험(*ASTM D2166*)

강도는 ASTM D2166에 의한 일축압축강도를 측정하였다. 측정방법은 지름에 대한 높이비가 1:2(지름10cm, 높이20cm)인 시료에 수직하중만을 재하하고 재하속도는 1mm/min로 하였다. 파괴는 최대 강도일 때로 하였으며, 신뢰성을 높이기 위해 시료를 3개로 제작하여 시험하였다.

3.1 시험방법

점토종류, 혼합방식, 재령, 물-시멘트비, 시멘트함량, 일축압축강도와 기타 물리적 특성에 미치는 영향을 평가하기 위해 시료1~4를 각각 표 3.2~3.5에 나타난 조건으로 시료를 제작하였다.

시험 1은 혼합방식이 강도와 기타 물리적 특성에 미치는 영향을 평가하기 위해 점토와 시멘트 건조중량비를 10%, 물-시멘트비를 100%, 재령 3, 7, 14, 28, 56일의 조건으로 시료 1, 2, 3, 4에 건조 및 습윤 혼합방식의 조건으로 시료를 성형하였다. 시험 2는 시멘트와 점토의 건조중량비에 의한 건조 및 습윤 혼합방식이 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, 2, 3을 이용해서 제작하였다. 시험 3은 물-시멘트비에 의한 습윤혼합방식이 강도와 기타 물리적 특성에 미치는 영향을 평가하기 위해 점토와 시멘트의 건조중량비 10%, 물-시멘트 비를 50, 100, 150, 200, 300%, 재령 7, 14, 28일의 조건으로 원지반 시료 1, 2, 3을 이용해서 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 2, 3을 이용해서 제작하였다. 시험 5는 교반기의 회전속도가 강도와 기타 물리적 특성에 미치는 영향을 평가하기 위해 점토와 시멘트의 건조중량비 10%, 물-시멘트 비 100% 조건에서 교반시 교반기의 회전속도를 25, 30, 60, 90, 120, 150, 180(회/분, r.p.m.)으로 하여 채령 7, 14, 28일의 조건으로 시료 2, 3, 4를 이용하여 제작하였다. 시험 6은 교반 시간이 강도와 기타 물리적 특성에 미치는 영향을 평가하기 위해 점토와 시멘트의 건조중량비 10%, 물-시멘트 비 100% 조건에서 교반시 교반 시간을 5분, 10분으로 하여 채령 3, 7, 14일의 조건으로 시료 5를 이용하여 제작하였다.

표 3.2 시험조건 및 방법 (부산신항)

시험	혼합 방식	시료 수	원지반점토			물-시멘트비(%)	시멘트 (g)	물(g)	혼합후 점토의 함수비 (%)	혼합시료		
			습윤 중량 (g)	함수 비 (%)	건조 중량 (g)					시멘트와 점토의 건조중량비	물, 점토-시멘트비	함수비 (%)
1	습윤	10	4000	45.22	2754.44	100	275.44	275.44	55.22	10	5.52	50.20
	건조	10				100	275.44	275.44	55.22	10	5.52	50.20
2	습윤	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	314.32	314.32	72.71	20	3.64	60.59
3	습윤	6	2400	52.71	1571.61	50	157.16	78.58	57.71	10	5.77	52.46
		6				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				300	157.16	78.58	82.71	10	8.27	75.19

표 3.3 시험조건 및 방법 (낙동강 염막지구)

시 험	혼합 방식	시료 수	원지반점토			물-시 멘트비 (%)	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	15	6750	41.48	4770.99	100	120	477.10	477.10	10	3.87	35.15
	건조	15				100	120	477.10	477.10	10	3.87	35.15
2	습윤	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	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	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	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	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	120	286.26	286.26	10	5.15	46.80

표 3.4 시험조건 및 방법 (김해 장유지구)

시 험	혼합 방식	시료 수	원지반 점토			물-시멘 트비 (%)	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	15	6750	28.67	5245.98	100	120	524.60	524.60	10	3.87	35.15
	건조	15				100	120	524.60	524.60	10	3.87	35.15
2	습윤	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	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	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	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	9	4050	28.67	3147.59	100	120	314.76	314.76	10	3.87	35.15
		9				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	180	314.76	314.76	10	3.87	35.15

표 3.5 시험조건 및 방법 (김해 화목지구)

시 험	혼 합 방 식	혼 합 시 간 (분)	시 료 수	원지반 점토			물-시멘 트비 (%)	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	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	359.79	359.79	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



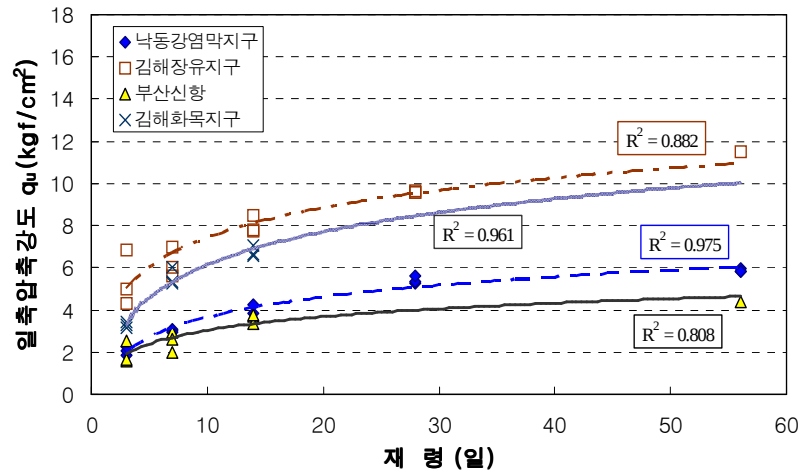
제4장 시험결과와 고찰

4.1 재령과 혼합방식에 의한 영향

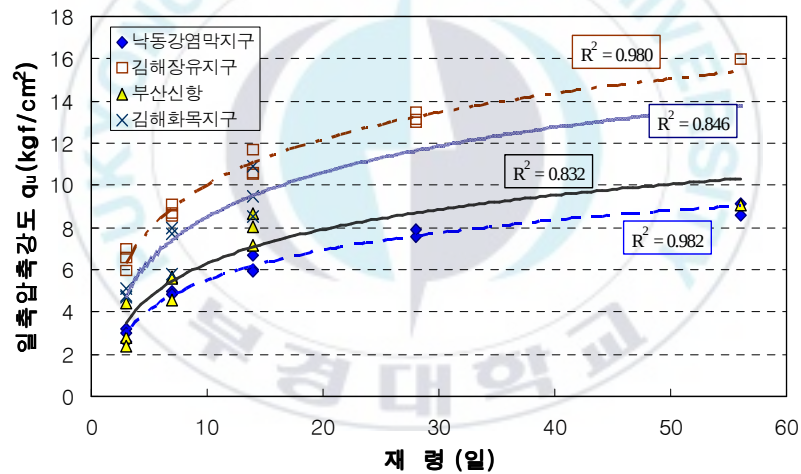
4.1.1 재령과 혼합방식에 따른 일축압축강도

양생기간과 혼합방식이 흙-시멘트 혼합토의 일축압축강도에 미치는 영향을 그림 4.1에 나타내었다. 혼합방식에 상관없이 일축압축강도는 양생기간에 따라 증가하는 경향을 보이고 있으며, 건조혼합방식으로 제작한 혼합토의 일축압축강도가 습윤혼합방식으로 제작한 시료에 비해서 크게 나타났다. 그러나 재령 일에 따른 변형계수의 증가추이는 재령 28일까지는 일축압축강도가 크게 증가하지만, 28일 이후로는 일축압축강도의 증가율이 둔화되는 것으로 나타났다.

모래함유량이 상대적으로 높은 김해 장유지구와 김해 화목지구에서 채취한 시료를 이용해서 제작한 혼합토의 강도가 모래함유량이 상대적으로 낮은 부산 신행과 낙동강 염막지구보다 더 높은 것으로 나타났으며, 이는 김해 장유지구와 김해 화목지구에서 채취한 시료의 모래함유량이 높기 때문인 것으로 판단된다.



a) 습윤혼합방식

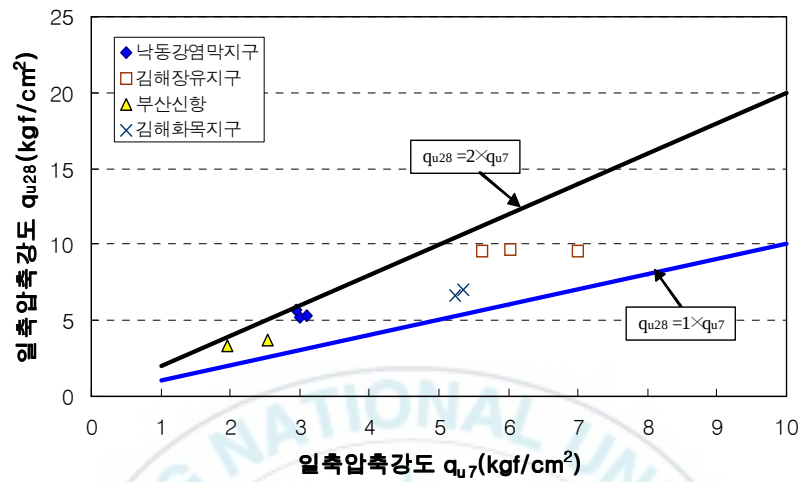


b) 건조혼합방식

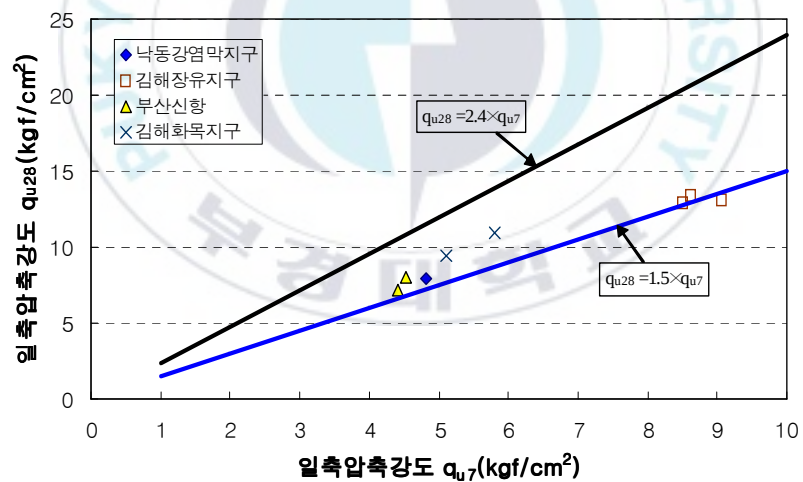
그림 4.1 습윤 및 건조혼합방식에서 일축압축강도와 재령과의 관계

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

위를 제시하였다. 그림 4.2, 표 4.1에 나타난 바와 같이 본 연구에서 산출된 값은 Bruce가 제시한 범위에 포함된다.



a) 습윤혼합방식



b) 건조혼합방식

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

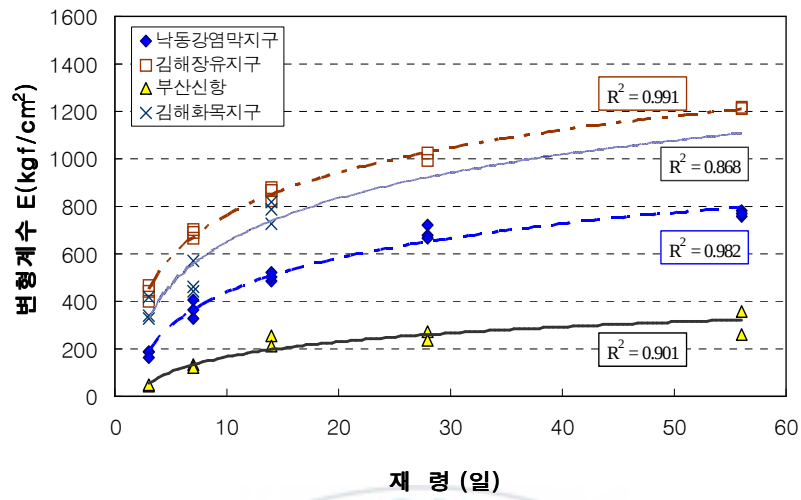
표 4.1 각 재령별 강도비

채취지역 혼합방식 항목	부산신항		낙동강염막지구		김해장유지구		김해화목지구	
	습윤	건조	습윤	건조	습윤	건조	습윤	건조
Q_{u28}	$Q_{u28} = 1.20 \cdot q_{u7}$	$Q_{u28} = 1.70 \cdot q_{u7}$	$Q_{u28} = 1.46 \cdot q_{u7}$	$Q_{u28} = 1.65 \cdot q_{u7}$	$Q_{u28} = 1.60 \cdot q_{u7}$	$Q_{u28} = 1.45 \cdot q_{u7}$	$Q_{u28} = 1.30 \cdot q_{u7}$	$Q_{u28} = 1.87 \cdot q_{u7}$

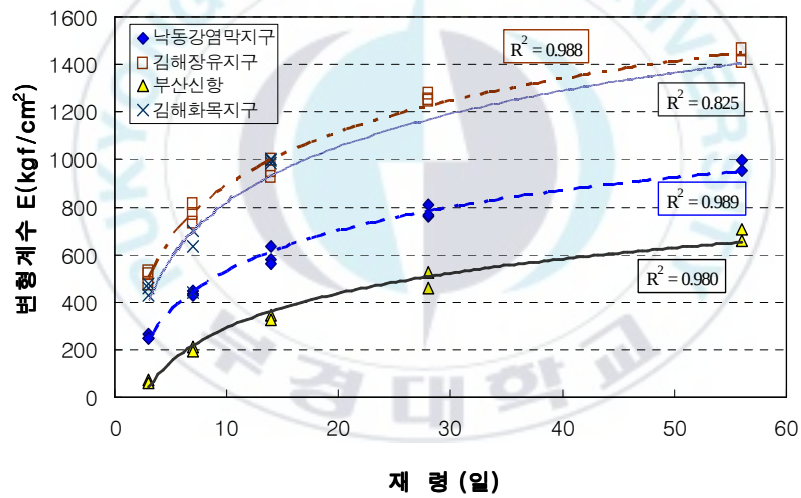
4.1.2 재령과 혼합방식에 따른 변형계수

양생기간과 혼합방식이 흙-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 변형계수가 크게 증가하지만, 7일 이후로는 변형계수의 증가율이 둔화되는 것으로 나타났다.

습윤혼합방식에서는 김해 장유지구 시료의 변형계수가 다른 지역의 시료에 비해서 크게 나타났으며, 건조혼합방식에서는 김해 장유지구와 김해 화목지구 시료의 변형계수가 부산신항과 낙동강염막지구의 시료에 비해서 크게 나타났다.



a) 습윤혼합방식



b) 건조혼합방식

그림 4.3 습윤 및 건조혼합방식에서 변형계수와 재령과의 관계

4.2 일축압축강도와 변형계수의 관계

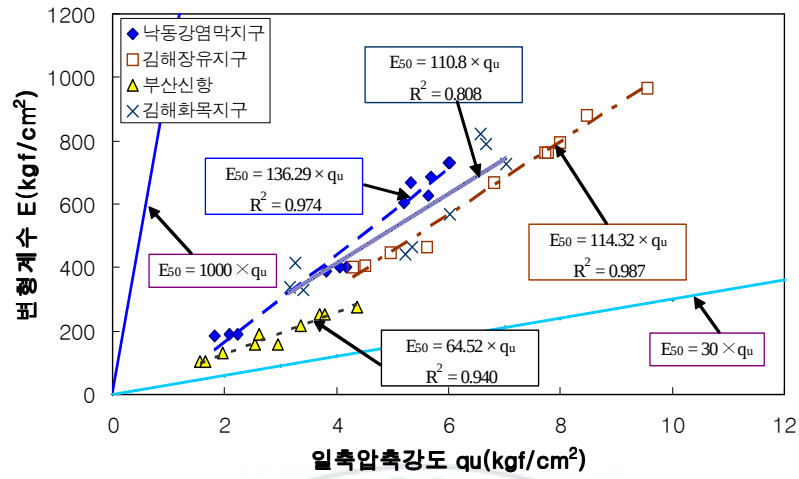
일반적으로 개량토의 일축압축강도와 변형계수의 관계는 표 4.2에 제시한 바와 같이 안정제의 종류와 혼합방식에 따라 국가별로 다양하게 나타나는 것으로 보고되고 있다.

건조혼합방식에 의한 개량토의 변형계수는 일축압축강도의 50~250배 정도인 것으로 알려져 있지만, 습윤혼합방식에 의한 개량토의 변형계수는 30~1,000배까지 그 변동의 폭이 큰 것으로 보고되어 있다.

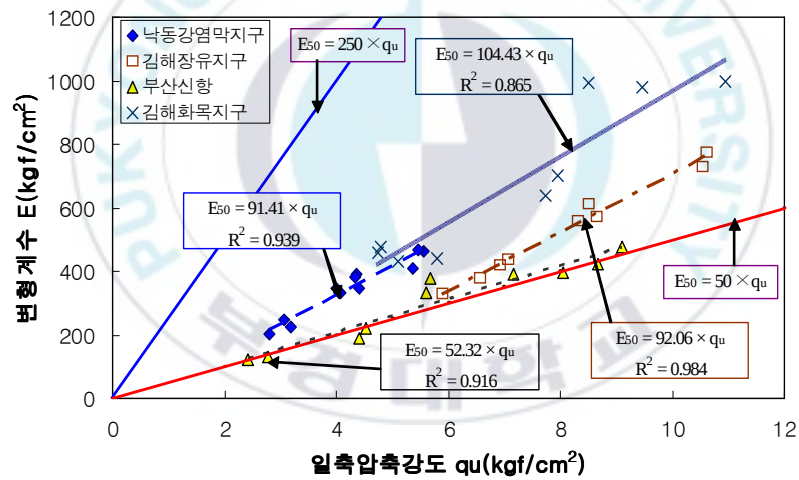
표 4.2 기존 문헌에서 제시된 E_{50} 과 q_u 의 관계

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 개량토의 경우 변형계수가 일축압축강도의 65~136배 정도(그림 4.4(a))인 것으로 나타났으며, 건조혼합방식으로 제작한 개량토의 경우에도 변형계수는 일축압축강도의 52~104배 정도(그림 4.4(b))로 나타났다. 이는 기존의 문헌에서 보고된 값에 비해서 비교적 낮은 값을 나타내고 있다.



a) 습윤혼합방식



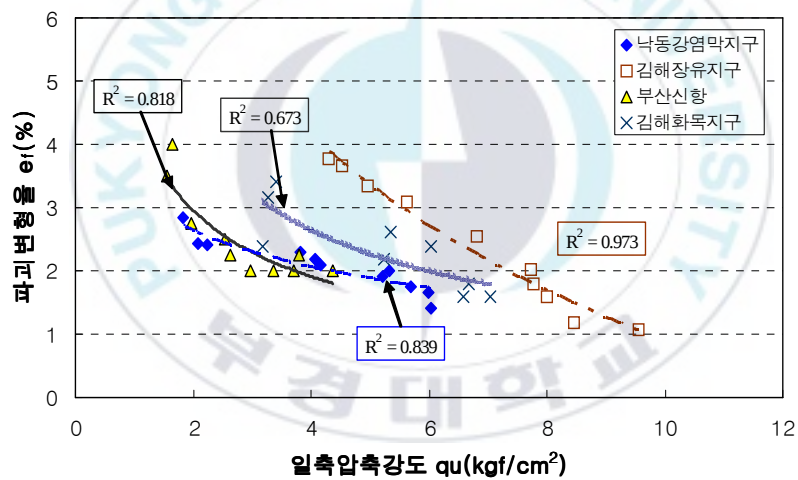
b) 건조혼합방식

그림 4.4 습윤 및 건조혼합방식에서 일축압축강도와 변형계수와의 관계

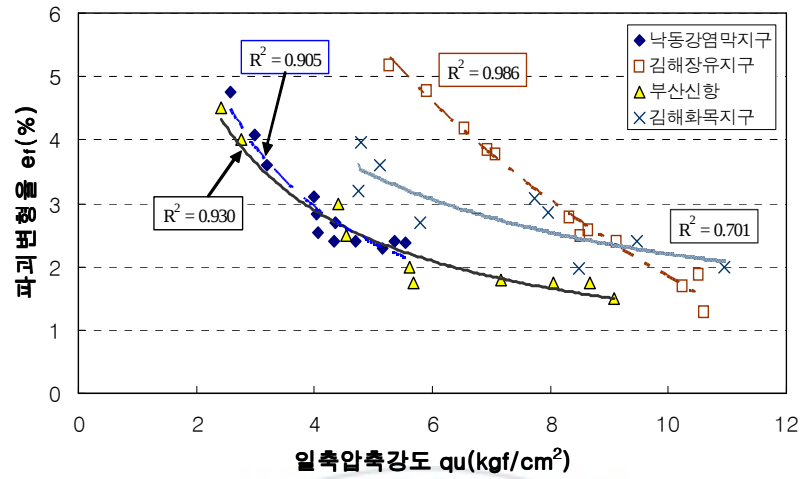
4.3 파괴변형률과 일축압축강도의 관계

파괴변형률과 일축압축강도와와의 관계를 그림 4.5에 나타내었으며, 개량토의 일축압축강도가 높을수록 파괴변형률이 감소하는 것으로 나타났다. 건조혼합 방식에 비해서 습윤혼합방식으로 제작한 개량토의 파괴변형률이 작게 나타났다.

모래함유량이 높은 김해 장유지구 시료의 경우 낙동강지구, 부산신항 시료에 비해서 파괴변형률이 작은 것으로 나타났으며, 모래함유량이 유사한 낙동강지구, 부산신항의 경우 일축압축강도와 파괴변형률의 관계가 유사하게 나타났다.



a) 습윤혼합방식



b) 건조혼합방식

그림 4.5 습윤 및 건조혼합방식에서 일축압축강도와 파괴변형률과의 관계

4.4 점토-시멘트 건조중량비에 의한 영향

4.4.1 시멘트 함량에 따른 일축압축강도

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

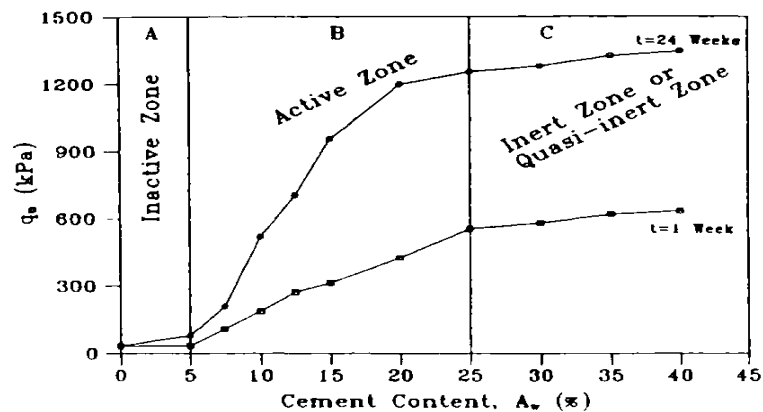


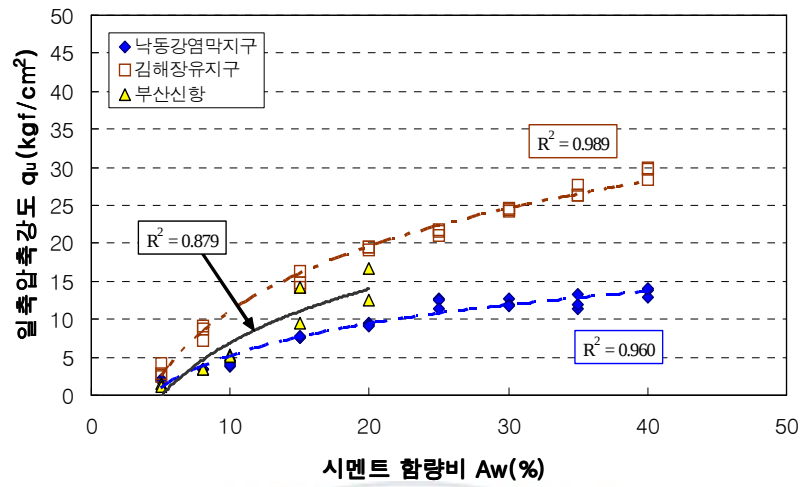
Fig. 6.10 Influence of Cement Content on Unconfined Compressive Strength

그림 4.6 시멘트 함량과 일축압축강도와와의 관계

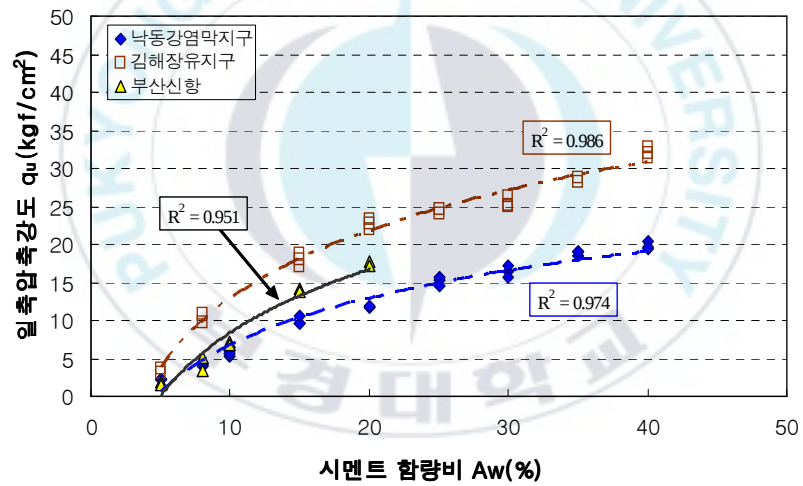
(Bergado et al., 1996)

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

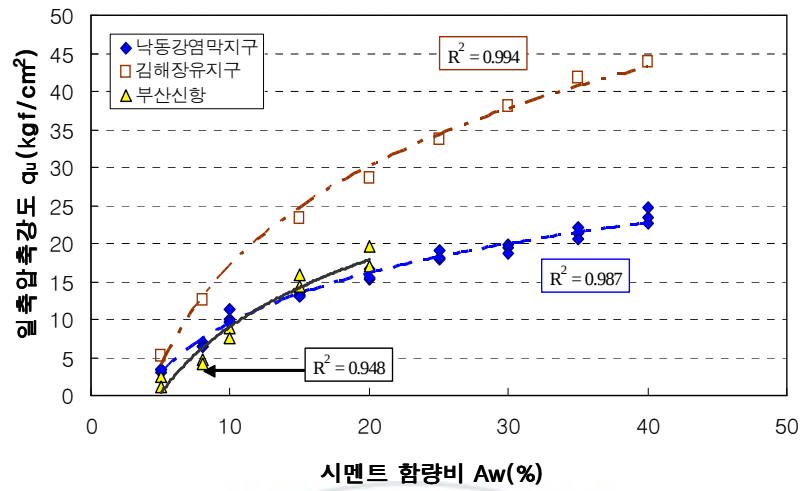
혼합토의 시멘트 함량과 일축압축강도의 관계를 분석해보면 Bergado(1996)가 제시한 자료와는 다소 상이한 결과가 나타났다. 그림 4.7, 그림 4.8에 나타난 결과에 의하면 원지반 점토의 특성에 따라 차이는 있지만, 김해 장유지구의 경우 시멘트 함량이 25%를 초과하더라도 강도증가현상이 뚜렷하게 나타난다. 또한 낙동강 염막지구의 경우에는 Bergado가 제시한 바와 같이 시멘트 함량이 25%를 초과하면 강도증가율이 다소 둔화되는 것으로 나타났다.



a) 7일 재령

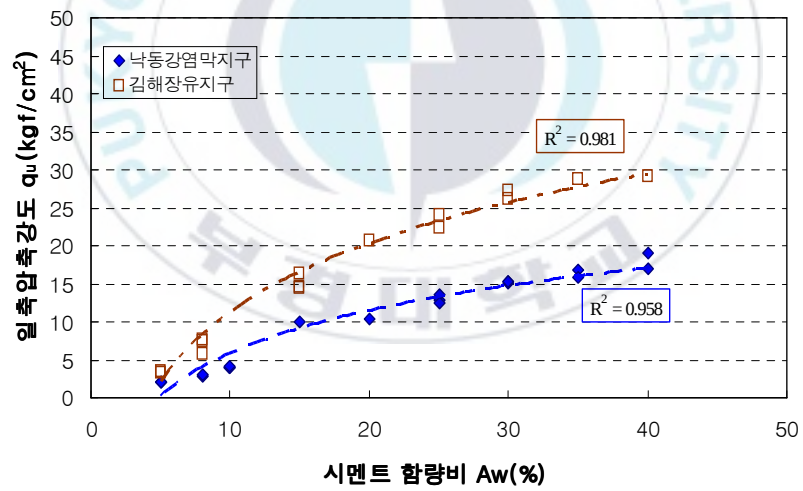


b) 14일 재령

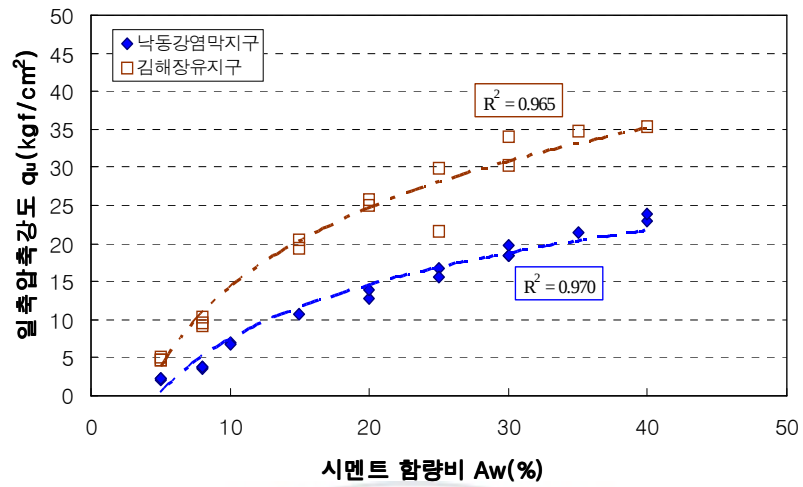


c) 28일 재령

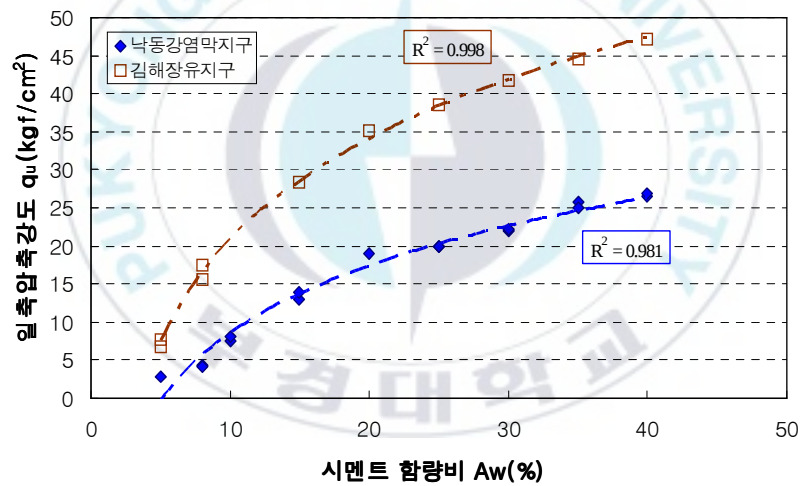
그림 4.7 습윤혼합방식에서 재령별 시멘트함량과
일축압축강도의 관계



a) 7일 재령



b) 14일 재령



c) 28일 재령

그림 4.8 건조혼합방식에서의 재령별 시멘트함량과
일축압축강도의 관계

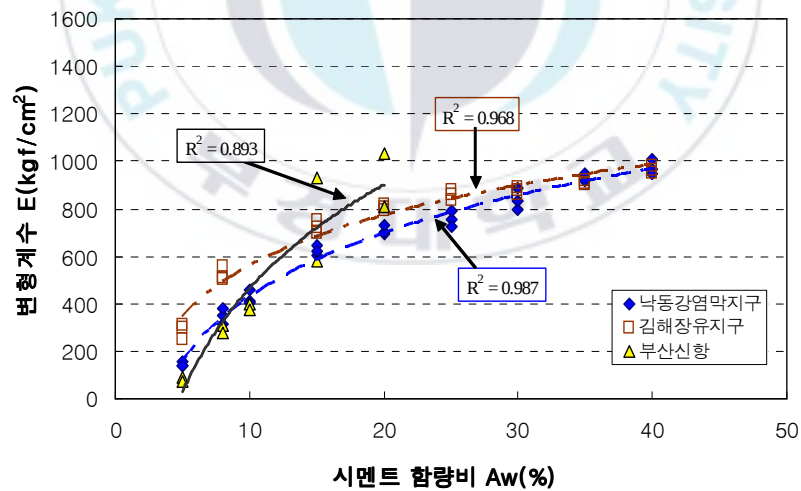
4.4.2 시멘트 함량에 따른 변형계수

시험 2의 방법을 사용하여 습윤혼합방식으로 제작한 개량토의 변형계수와

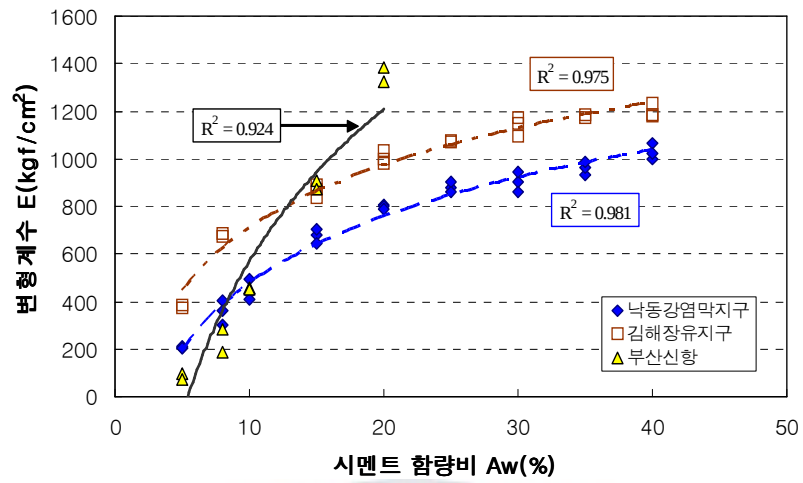
시멘트 함량비와의 관계를 그림 4.9에, 건조혼합방식으로 제작한 개량토의 변형계수와 시멘트 함량비와의 관계를 그림 4.10에 나타내었다.

습윤혼합방식으로 제작한 개량토의 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 부산신항의 경우 낙동강염막지구와 김해장유지구와는 다소 상이한 결과가 나타났다. 그 원인은 함수비, 모래함유량 그리고 점토함유량 등 물리적 성질의 차이로 판단된다.

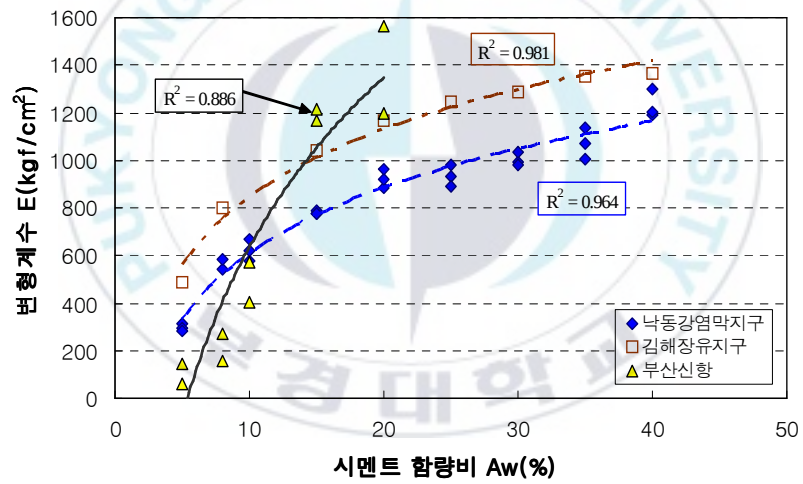
건조혼합방식으로 제작한 개량토의 변형계수와 시멘트 함량비의 관계도 습윤혼합방식으로 제작한 개량토와 유사한 경향을 보였고, 습윤혼합방식에 비해 건조혼합방식의 변형계수가 크게 나타났다. 그리고 건조혼합방식도 습윤혼합방식처럼 시멘트 함량비가 15%까지는 변형계수가 크게 증가하지만, 시멘트 함량비가 15%를 초과하면 변형계수의 증가율이 다소 둔화되는 경향을 나타내고 있다.



a) 7일 재령

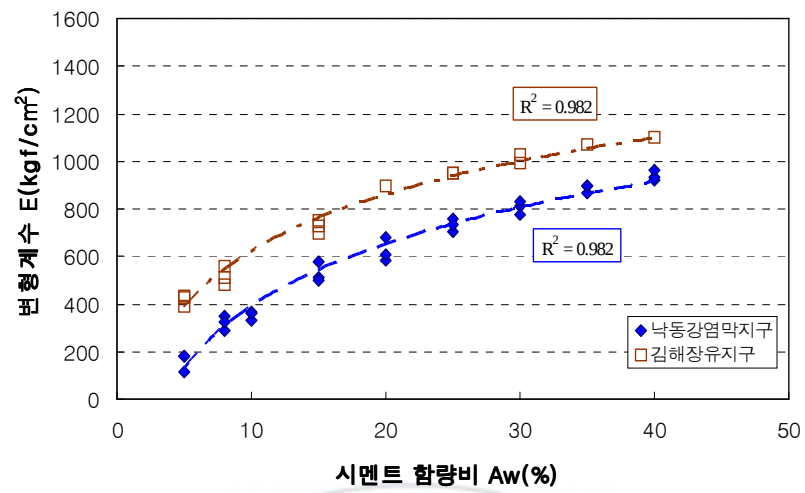


b) 14일 재령

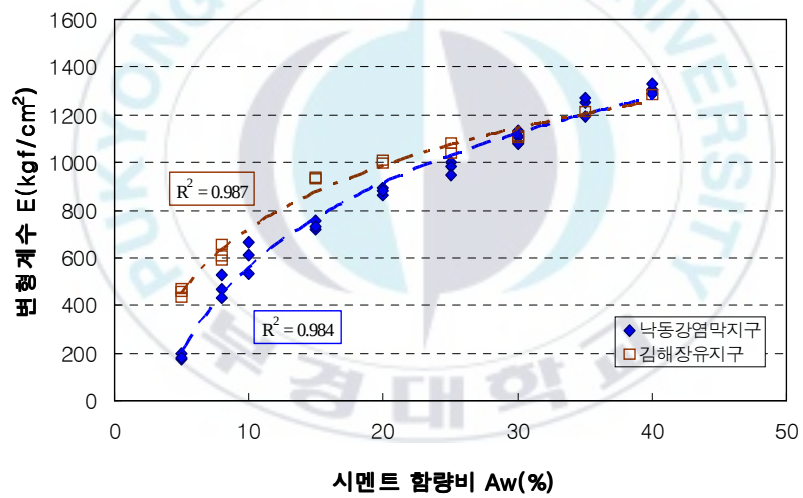


c) 28일 재령

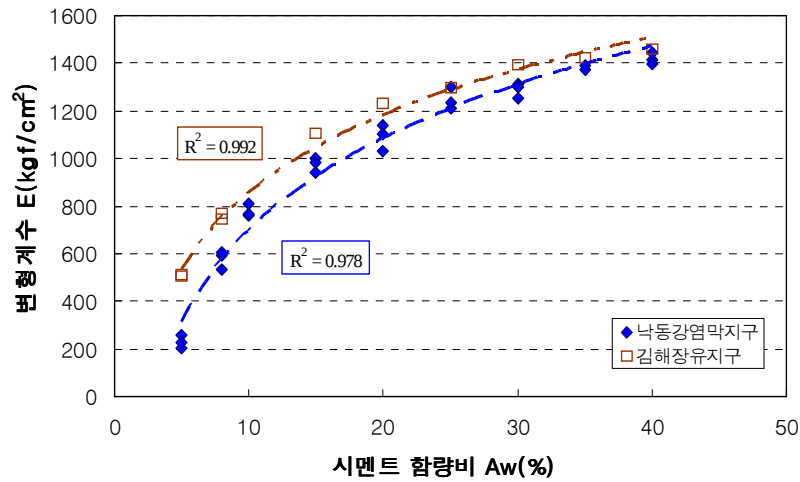
그림 4.9 습윤혼합방식으로 제작한 시료의 시멘트함량비와 변형계수와의 관계



a) 7일 재령



b) 14일 재령



c) 28일 재령

그림 4.10 건조혼합방식으로 제작한 시료의 시멘트함량비와 변형계수와의 관계

4.4.3 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 개량토의 파괴변형률이 감소하고, 시멘트 함량이 25~40%일 때 파괴변형율은 1.5~2.5%정도로 무개량토에 비해서 현격하게 감소하는 것으로 나타났다.

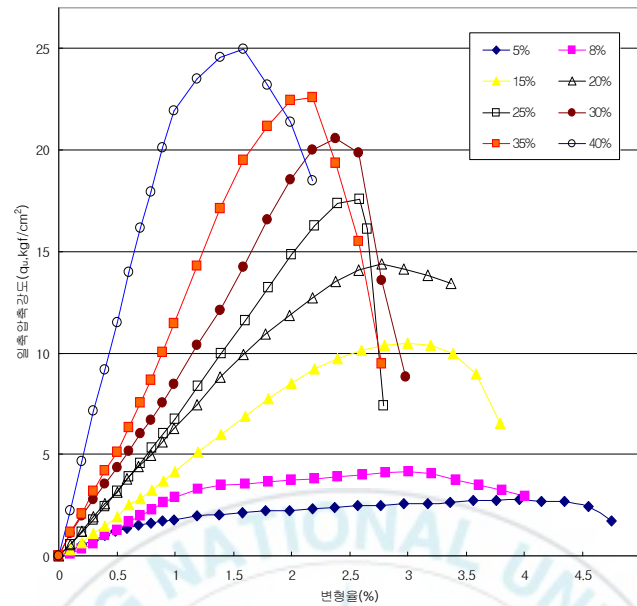


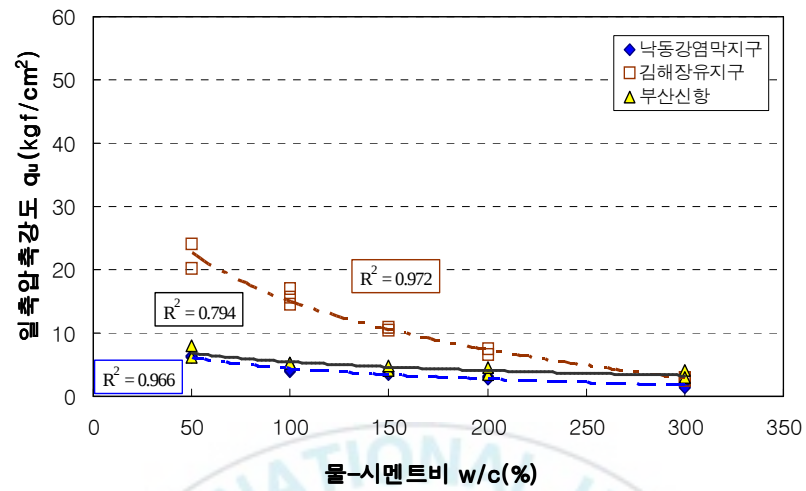
그림 4.11 축방향 변형율과 축하중과의 관계

4.5 물-시멘트비(w/c)에 대한 영향

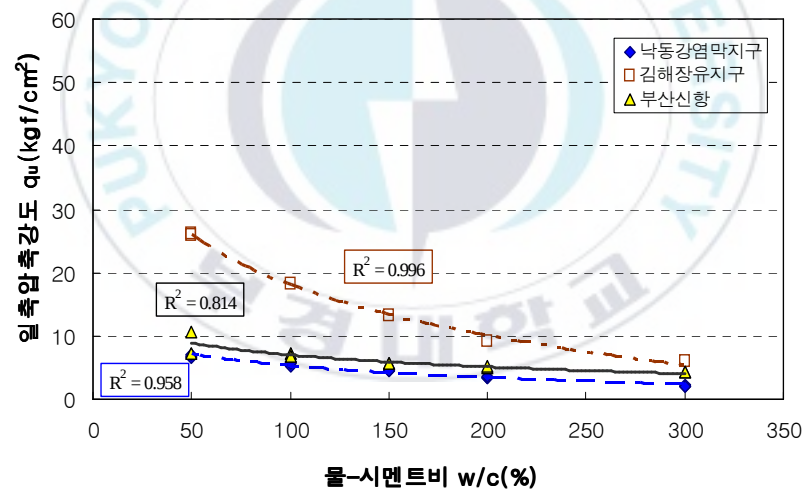
4.5.1 물-시멘트비에 따른 일축압축강도

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, 2, 3에 대해 재령 7, 14, 28일에 해당되는 일축압축강도시험을 하여 그 결과를 그림 4.12에 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 물-시멘트 비가 클수록 일축압축강도가 감소하는 경향을 보인다. 지역별로는 모래함량이 낮은 부산신항과 낙동강염막지구의 시료는 비슷한 경향으로 감소하는 관계를 보이거나, 이에 비해 모래함량이 상대적으로 높은 김해 장유지구 시료의 강도는 상대적으로 큰 감소폭을 나타내고 있다. 이는 모래함량이 낮은 점토지반을 시멘트로 심층혼합하는 경우 물-시멘트비를 이용해서 개량토의

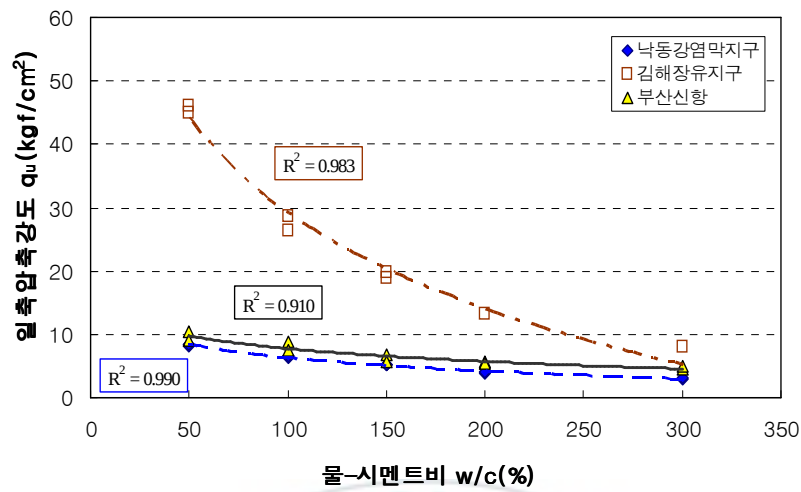
일축압축강도를 예측하는 것이 부적합하다는 사실을 의미한다.



a) 7일 재령



b) 14일 재령

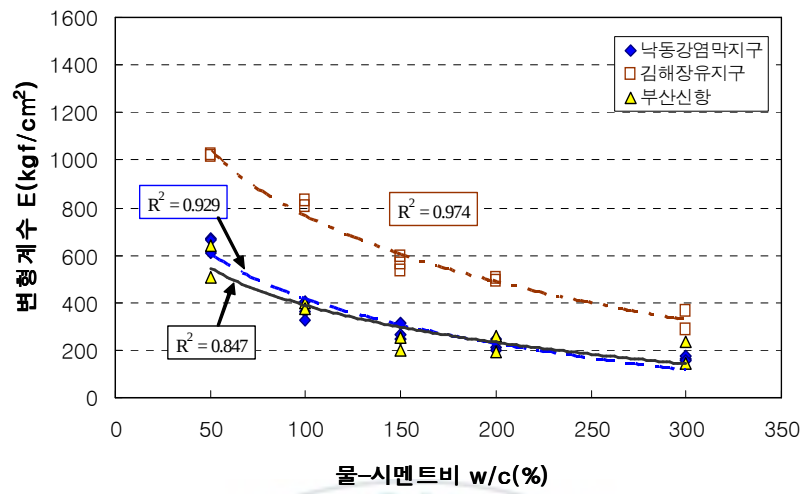


c) 28일 재령

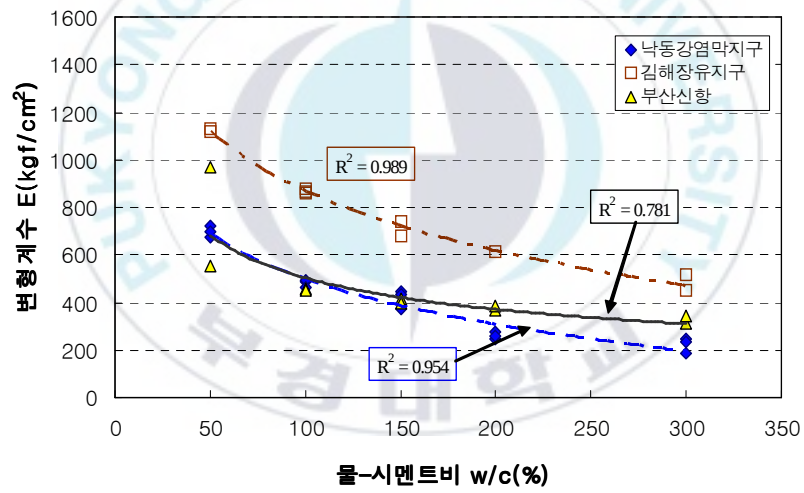
그림 4.12 물-시멘트비와 일축 압축강도와의 관계

4.5.2 물-시멘트비에 따른 변형계수

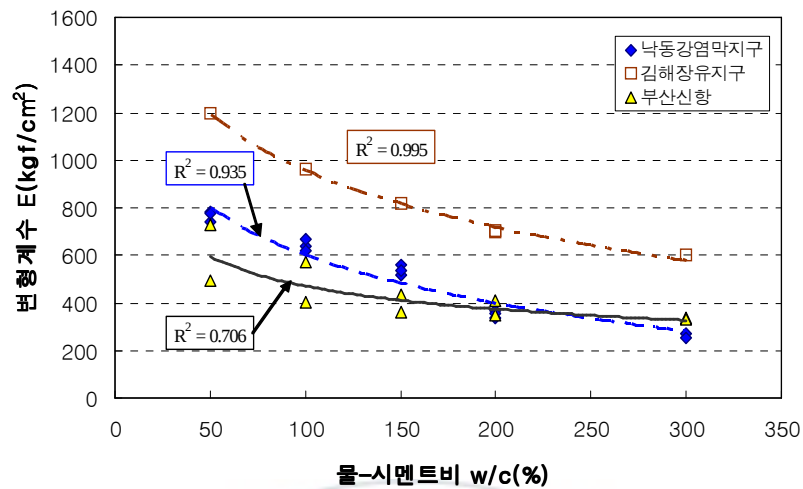
변형계수와 물-시멘트비(w/c)와의 관계를 그림 4.13에 나타내었다. 물-시멘트비가 높을수록 변형계수가 감소하는 경향을 보이며 물-시멘트비에 따른 변형계수의 감소율도 시료의 종류에 상관없이 유사하게 나타났다.



a) 7일 재령



b) 14일 재령



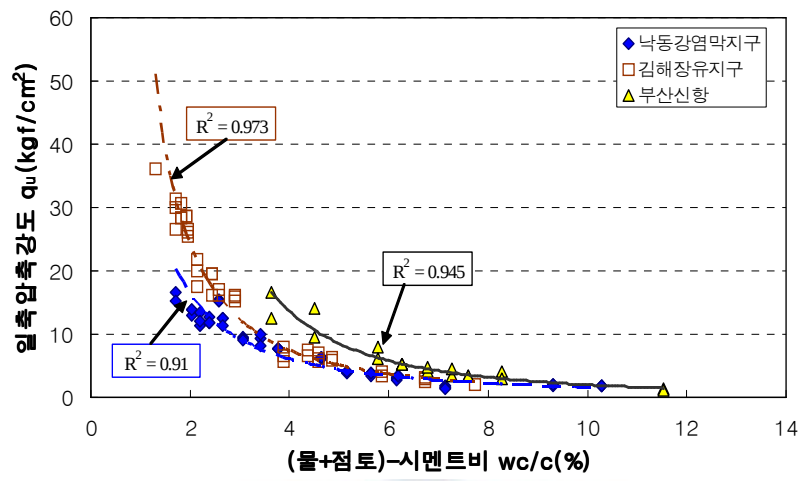
c) 28일 재령

그림 4.13 습윤 혼합방식에서 물-시멘트비(w/c)와
변형계수와의 관계

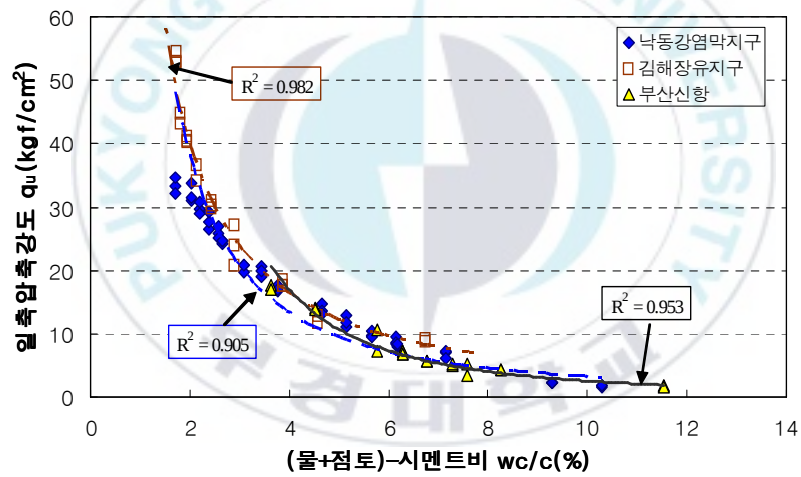
4.6 (원지반 점토+물)-시멘트비(wc/c)에 의한 영향

4.6.1 (원지반 점토+물)-시멘트비에 따른 일축압축강도

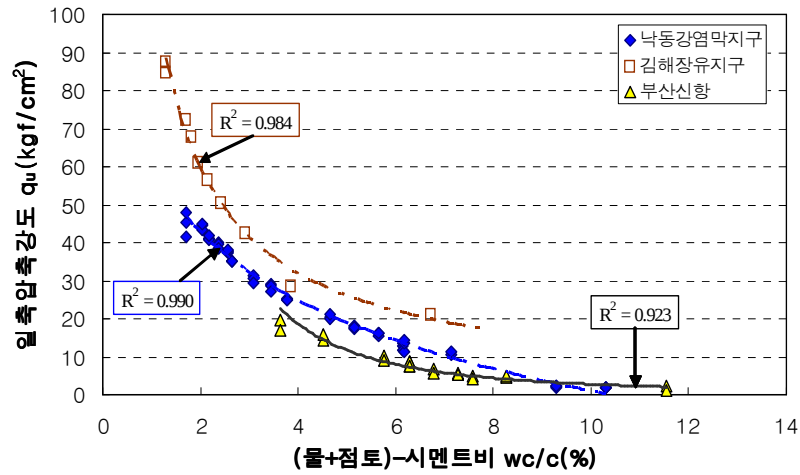
(원지반 점토+물)-시멘트 비(wc/c)가 일축압축강도에 미치는 영향은 그림 4.14에 나타난 바와 같이 비선형적 성질을 나타내며, wc/c가 증가할수록 일축압축강도가 감소하는 경향을 나타낸다. 또한 3개 지역을 비교시 점토의 특성에 따라 약간의 차이는 있지만 전반적으로 비슷한 경향을 보이고 있는 것으로 나타났다. 이는 흙-시멘트 혼합토의 경우 wc/c의 함수만으로도 요구되는 강도를 예측할 수 있음을 보여준다.



a) 7일 재령



b) 14일 재령



c) 28일 재령

그림 4.14 재령 별 (원지반점토+물)-시멘트비와
일축압축강도와 의 관계

기존문헌에 나타난 자료에 의하면 재령 28일에 해당하는 일축압축강도와 wc/c 의 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.

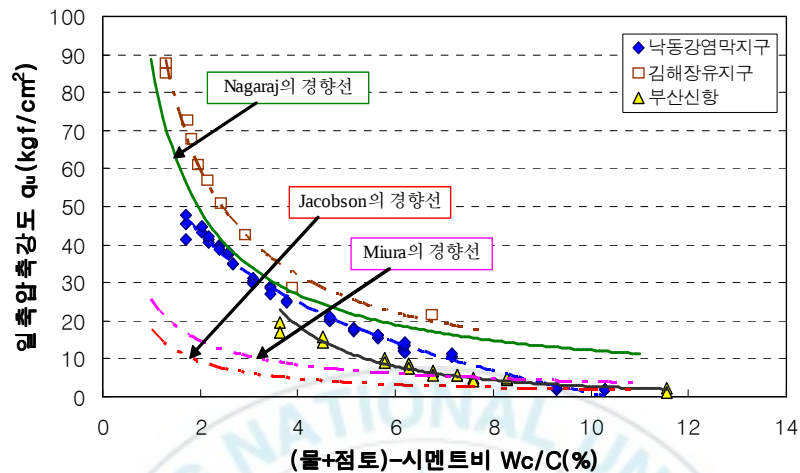


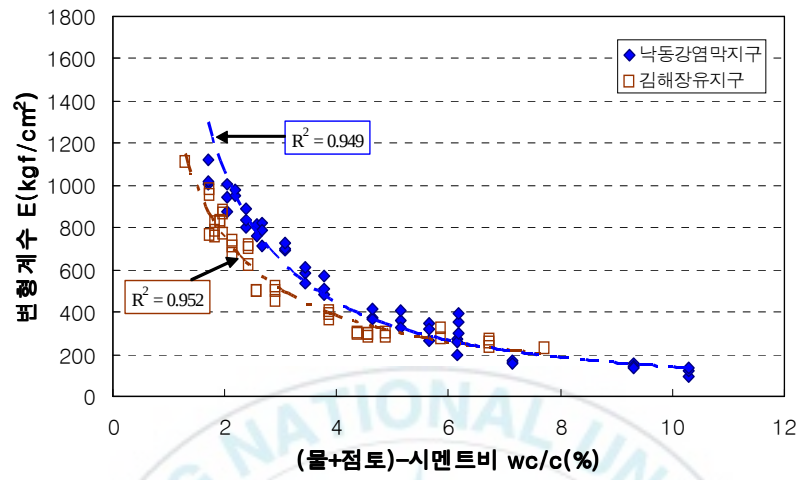
그림 4.15 재령별 (원지반점토+물)-시멘트비와 일축압축강도와와의 관계(기 존문헌과의 비교)

4.6.2 (원지반점토+물)-시멘트비에 따른 변형계수

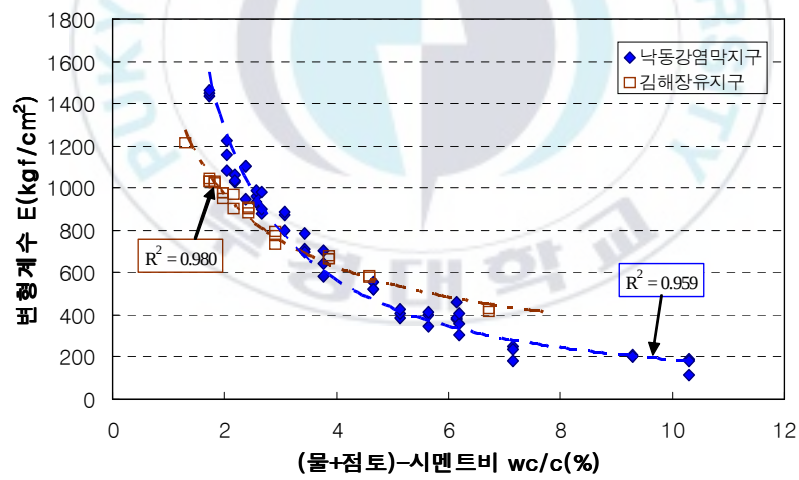
(원지반점토+물)-시멘트 비(wc/c)가 변형계수에 미치는 영향을 재령별로 그림 4.16에 나타내었다. wc/c의 값이 증가할수록 변형계수가 감소하는 것으로 나타났다. 재령 7일과 재령 14일의 경우 낙동강 염막지구와 김해 장유지구 시료의 변형계수와 wc/c의 관계는 유사하게 나타나지만, 재령 28일의 경우 변형계수와 wc/c의 관계가 상이하게 나타났다. 28일 양생한 개량토의 경우 wc/c가 변형계수의 크기에 미치는 영향이 모래함유량이 높은 김해 장유지구의 시료가 낙동강 염막지구의 시료에 비해서 다소 낮은 것으로 나타났다. 이것으로 보아 설계시 콘크리트 구조물에 적용하는 물-시멘트비(w/c)를 DCM공법에 적용함에 한계가 있음을 보인다.

따라서 변형계수 산정시 (원지반점토 함수비+물)-시멘트 비(wc/c)의 도입이

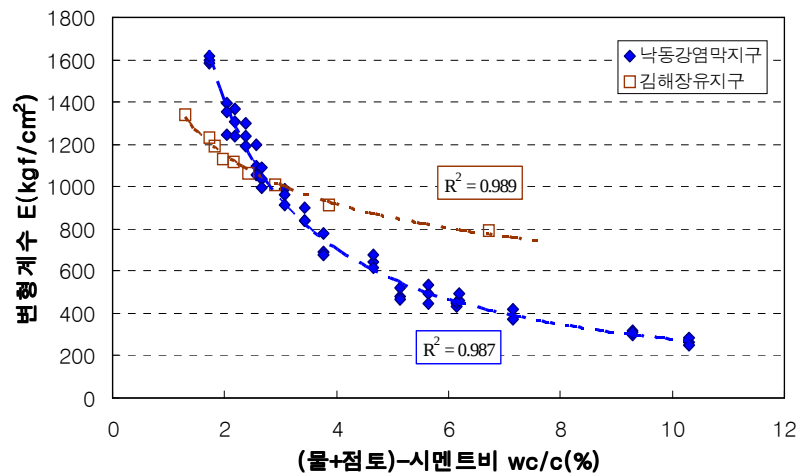
합리적인 설계방안이라 판단된다.



a) 7일 재령



b) 14일 재령



c) 28일 재령

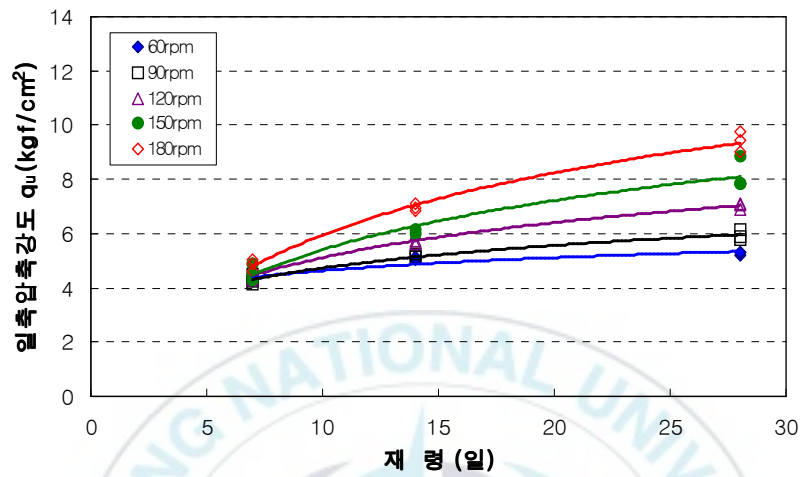
그림 4.16 재령별 (원지반점토+물)-시멘트비(w/c)와
변형계수와의 관계

4.7 교반회전 속도에 의한 영향

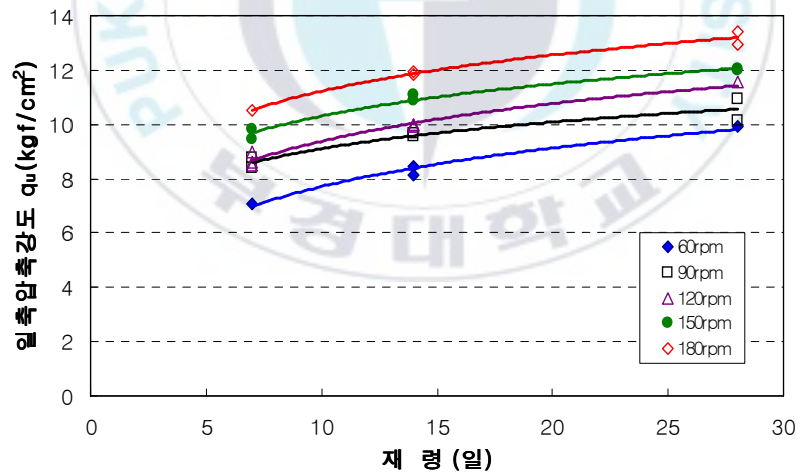
4.7.1 교반회전 속도에 따른 일축압축강도

낙동강 염막지구, 김해 장유지구, 김해 화목지구의 점토를 시멘트와 교반회전속도를 다양화하여, 재령별 일축압축강도의 변화를 그림 4.17에 나타내었다. 모든 시료에서 교반회전속도가 증가함에 따라 일축압축강도가 증가하는 경향을 보이고 있다. 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)). 그러나 모래함량이 많은 김해 장유지구와 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)).

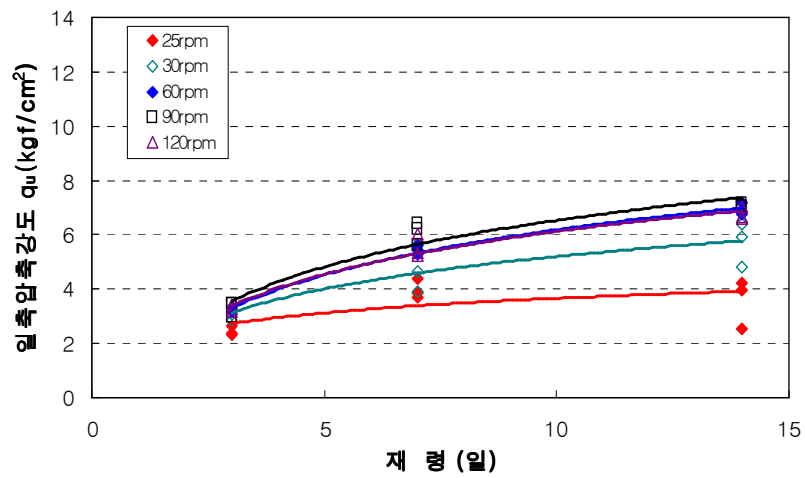
따라서 DCM 공법 적용시 교반속도를 고려한 시공이 이루어져야 하겠으며, 원지반의 물리적 특성(모래함량, 함수비 등)을 고려해서 교반속도의 조절 또한 필요할 것으로 판단된다.



a) 낙동강 염막지구



b) 김해 장유지구

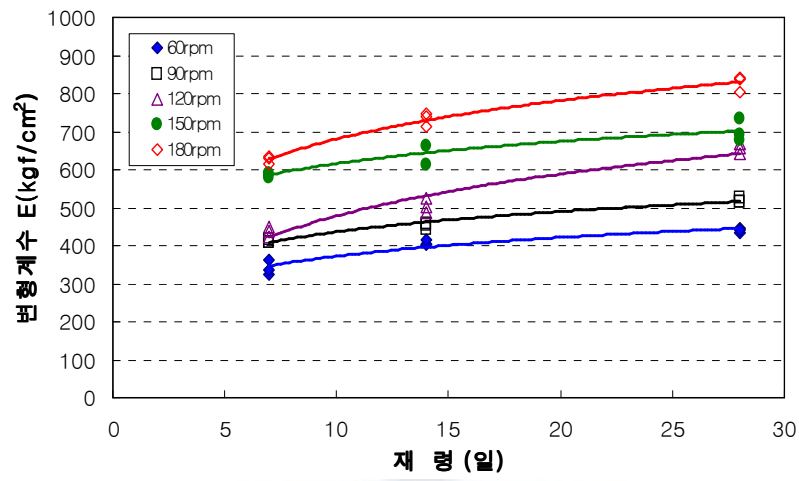


c) 김해 화목지구

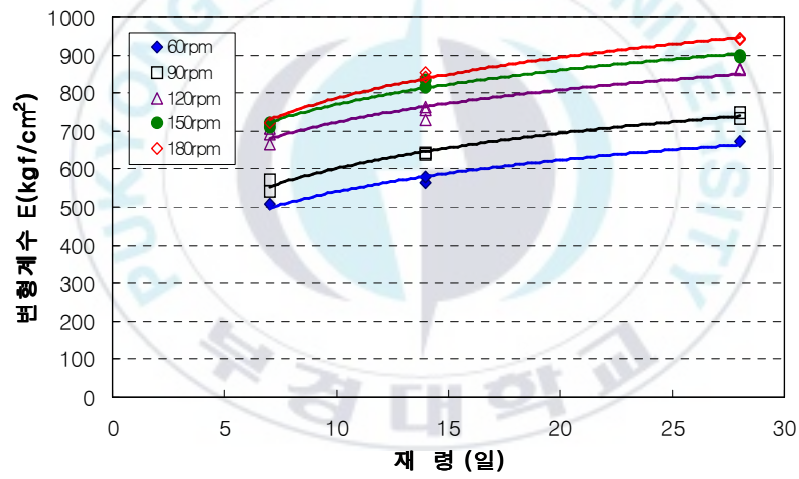
그림 4.17 교반회전속도와 일축압축강도와의 관계

4.7.2 교반회전속도에 따른 변형계수

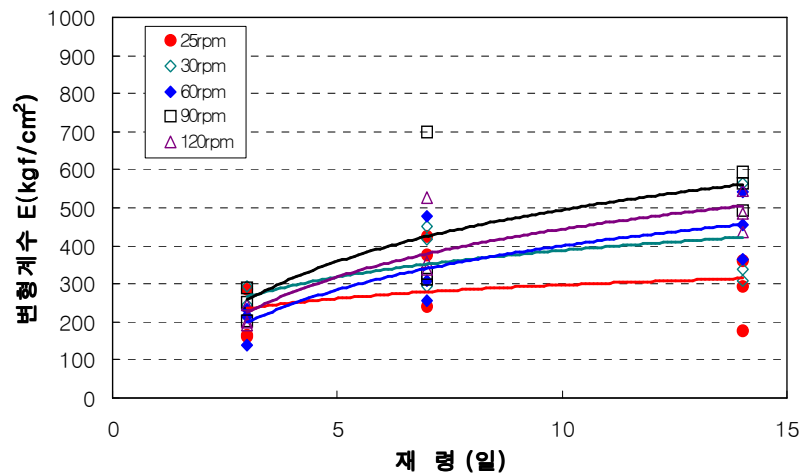
개량토 혼합시 교반회전속도에 따른 변형계수와 재령과의 관계를 그림 4.18에 각각 나타내었다. 교반회전속도가 증가할수록 변형계수가 증가하는 것으로 나타났다.



a) 낙동강 염막지구



b) 김해 장유지구



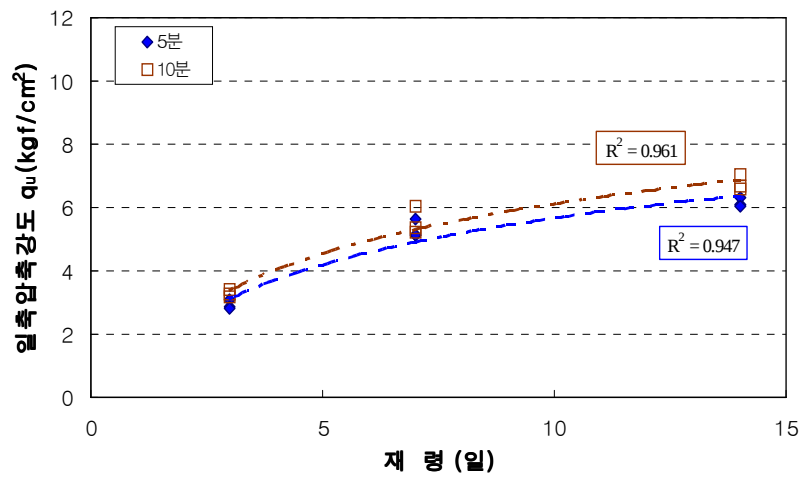
c) 김해 화목지구

그림 4.18 교반회전속도와 변형계수와의 관계

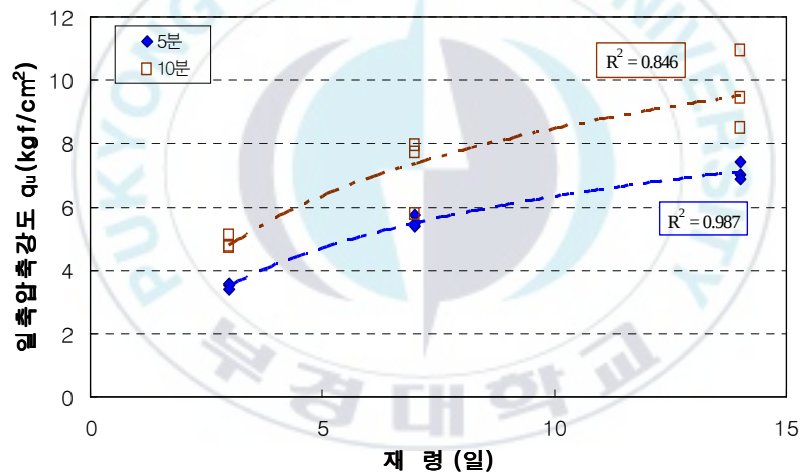
4.8 교 반 시간에 의한 영향

4.8.1 교 반 시간에 따른 일축압축강도

김해 화목지구의 점토를 시멘트와 교반시 혼합 시간을 다양화하여, 재령별 일축압축강도의 변화를 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



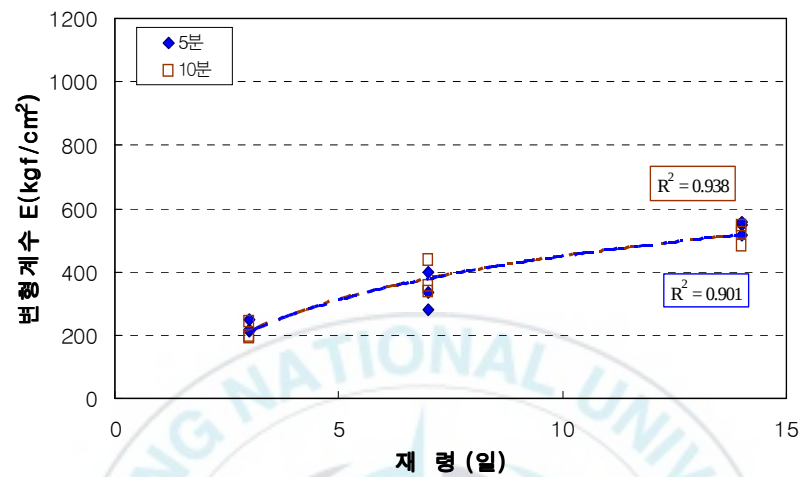
b) 건조혼합방식

그림 4.19 교반 시간과 일축압축강도와의 관계

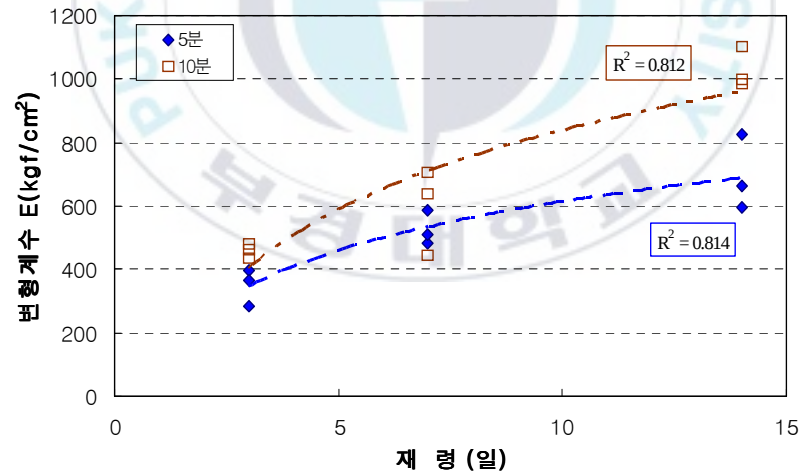
4.8.2 교반회전속도에 따른 변형계수

개량토 혼합시 교반 시간에 따른 변형계수와 재령과의 관계를 그림 4.20에 각각 나타내었다. 교반 시간이 증가할수록 변형계수가 증가하는 것으로 나타

났으며, 습윤혼합방식으로 제작한 혼합토의 변형계수는 교반 시간에 따른 차이가 크게 나타나지 않으나 건조혼합방식으로 제작한 혼합토의 일축압축강도는 교반 시간의 영향이 크게 나타났다.



a) 습윤혼합방식



b) 건조혼합방식

그림 4.20 교반 시간과 변형계수와의 관계

제5장 결 론

흙과 시멘트를 혼합한 개량토의 역학적 특성에 영향을 미치는 인자에 대한 실험적 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 원지반 점토시료(부산신히, 낙동강 염막지구, 김해 장유지구, 김해 화목지구)에 대해 습윤 및 건조 혼합방식으로 시료를 제작한 결과 건조혼합방식으로 제작한 시료의 일축압축강도와 변형계수가 더 크게 나타난다.
- 2) 개량토의 일축압축강도와 변형계수는 비례하며, 일축압축강도와 파괴변형율은 반비례한다.
- 3) 개량토의 시멘트 함량이 높고 재령이 길수록 변형계수가 크게 나타나며, 파괴변형율이 작게 나타나는 취성파괴적 거동을 보인다.
- 4) 물-시멘트비(w/c)와 (원지반 점토+물)-시멘트 비(wc/c)가 증가할수록 일축압축강도와 변형계수는 감소한다.
- 5) 원지반 점토와 시멘트 교반시 회전속도가 클수록 일축압축강도와 변형계수가 증가하는 것으로 나타났다.
- 6) 원지반 점토와 시멘트의 교반시 교반 시간이 길수록 일축압축강도와 변형계수가 증가하며, 습윤혼합방식에서는 교반시간에 따른 일축압축강도와 변형계수의 차이가 크게 나타나지 않지만, 건조혼합방식에서는 교반시간의 영향이 크게 나타났다.
- 7) 원지반 점토 시료의 모래함량이 높고 함수비가 낮을수록 개량토의 일축압축강도와 변형계수가 크게 나타났다.
- 8) DCM 공법 설계시 물-시멘트 비(w/c)로만 설계하기보다는 지반의 물리적 성질을 고려한 (원지반 점토+물)-시멘트 비(wc/c)를 설계에 반영하는 것이 합리적인 방안이라고 판단되며, 교반시 회전속도와 교반 시간에 따른 설계강도 및 변형계수가 도입되어야 한다.

참고문헌

1. 오남수 (2006). “흙-시멘트 혼합토의 강도특성에 관한 연구.” 석사학위 청구논문, 부경대학교, p.43.
2. 한승구 (2006). “흙-시멘트 개량토의 변형특성에 영향을 미치는 인자에 관한 연구.” 석사학위 청구논문, 부경대학교, p.39.
1. Akbulut, A. and Saglamer, 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, 341-918.
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 Coastal 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.
- 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

설레는 마음과 희망을 간직하고 시작한 대학원 생활은 또 하나의 도전정신을 깨우쳐주어 소중한 결실을 맺게해준 감사의 시간이었습니다.

본 논문이 완성되기까지 부족한 저를 위해 끈임없이 지도와 격려를 아끼지 않으신 정두희 지도교수님께 진심으로 감사드립니다. 그리고 바쁘신 와중에도 저에 논문심사를 맡아주신 김명식 교수님, 정진호 교수님 감사드리며, 석사과정 동안에 많은 지도와 가르침으로 학업을 마칠 수 있도록 도와주신 건설공학부 모든 교수님께 진심으로 감사드립니다.

또한 대학원 생활과 논문준비에 많은 도움을 준 연구실의 도영, 중식, 찬우의 모든이께 감사드리며, 특히 바쁜 학업속에서도 자신의 일처럼 논문작성을 도와주신 애숙양에게 고개숙여 고마움을 전하고, 더불어 아낌없이 격려와 믿음을 준 국토25호선 대체우회도로 현장의 소장님이하 직원 여러분에게도 진심어린 감사에 마음을 전합니다.

오늘에 저를 있게 해주신 부모님께 존경과 사랑을 담아 감사에 마음을 전하며, 끝으로 바쁜 생활속에 항상 늦은 귀가를 하여도 남편에 대한 배려와 사랑으로 학업을 마칠수 있도록 힘이 되어 주었던 사랑하는 아내와 이제 고교 1이 되어 속이 깊은 딸 유진과 해맑은 웃음으로 아빠에게 용기를 북돋워준 딸 유영에게 이 논문으로서 사랑의 마음을 전합니다.