

부산 고결점토의 변형률 의존적 동적거동특성에 관한 연구 Strain-dependent dynamic properties of cemented Busan clay

1.

김아람¹⁾, Ah-Ram Kim, 장일한²⁾, Ilhan Chang, 조계춘³⁾, Gye-Chun Cho, 심성현⁴⁾, Sung-Hyun Shim, 강연익⁵⁾, Yeoun-Ike Kang

¹⁾ 카이스트 건설 및 환경공학과 석사과정, Graduate Students, Dept. of Civil and Environment Engineering, KAIST

²⁾ 카이스트 건설 및 환경공학과 박사 후 연구원, Postdoctoral Fellow, Dept. of Civil and Environment Engineering, KAIST

³⁾ 카이스트 건설 및 환경공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil and Environment Engineering, KAIST

⁴⁾ 삼성물산 토목ENG팀 차장, Deputy General Manager, Civil ENG Team, Samsung C&T Corporation

⁵⁾ 삼성물산 토목ENG팀 과장, Manager, Civil ENG Team, Samsung C&T Corporation

SYNOPSIS : Thick soft clay deposits which are generally located at the west and south coast of the Korean peninsula have complicated characteristics according to their orientation and formation history. Thus, several geotechnical problems could possibly occur when those soft clay deposits are used as foundations for marine structures. Deep cement mixing (DCM) method is one of the most widely used soft soil improvement method for various marine structures, nowadays. DCM method injects binders such as cement into the soft ground directly and mixes with the in-situ soil to improve the strength and other geotechnical properties sufficiently. However, the natural impacts induced by dynamic motions such as ocean waves, wind, typhoon, and tsunami give significant influences on the stability of marine structures and their underlying foundations. Thus, the dynamic properties become important design criteria to insure the seismic stability of marine structures. In this study, the dynamic behavior of cemented Busan clay is evaluated. Laboratory unconfined compression test and resonant column test are performed on natural in-situ soil and cement mixed specimens to confirm the strength and strain-dependent dynamic behavior variation induced by cement mixing treatment. Results show that the unconfined compressive strength and shear modulus increase with curing time and cement content increment. Finally, the optimized cement mixing ratio for sufficient dynamic stability is obtained through this study. The results of this study are expected to be widely used to improve the reliability of seismic design for marine structures.

Keywords: Cemented clay, Dynamic properties, Shear modulus, Damping ratio, Shear strain

1. 서 론

우리나라 서·남해안에 10~20 m 상당의 두께로 형성되어 있는 연약 점토지반은 퇴적 상태에 따라 다양한 지반특성을 보이며, 이러한 연약지반 상에 해양구조물을 설치할 경우 과도한 침하 및 안정성 등 다양한 지반공학적 문제들을 야기할 수 있다. 따라서 이러한 연약점토지반의 강도증진을 위해 치환공법,

다짐공법, 혼합처리공법 등 다양한 처리공법이 필요하다.

심층혼합처리공법 (DCM; Deep Cement Mixing)은 원지반에 직접 시멘트 등의 고화재를 슬러리 (Slurry) 형태로 주입하여 교반기로 교반·혼합하여 일정 강도 이상의 지반 개량체를 만드는 저소음·저진동 공법으로 단기간에 연약지반의 개량이 가능하다는 장점을 지니고 있다. 심층혼합처리공법은 1985년 국내 도입 이후 주로 호안, 안벽 등의 항만 구조물의 기초개량에 폭넓게 적용되어 왔으며 현재도 그 추세가 증가하고 있다 (정경환 외, 2006). 이러한 해안 구조물의 경우 파도, 바람, 태풍에 의한 지속적인 동적하중과 최근 한반도에서도 점차 증가하고 있는 지진하중을 받게 된다. 그러나, 상부 구조물의 경우 1988년 내진설계관련 조항이 최초로 추가된 이후로 내진성능 평가 및 보강대책 등이 이루어지고 있으나 (이정환 이원호, 2008), 구조물 하부의 기초에 대한 관련 연구 및 법률기준이 미비한 실정이다. 따라서 구조물의 기초로 사용되는 원지반과 개량지반의 강도와 동적하중에 대한 변형률 의존적 동적거동특성을 파악하여 이를 내진설계에 반영하고 안정성을 검토하는 과정이 반드시 필요하다.

본 연구에서는 부산 연약점토의 건조시료와 다양한 주입 시멘트량을 가지는 고결점토 공시체를 제작하였다. 고결 점토의 강도 특성 및 변형률에 따른 동적 거동 특성을 분석하기 위하여 일축압축강도시험 및 공진주 시험을 실시하였다. 시험 결과를 바탕으로 심층혼합처리공법으로 개량된 부산점토의 최적배합비를 도출하였다.

2. 시험시료

2.1 원지반 시료

본 연구에 사용된 시료는 부산 신항 방파제 보강 현장에서 채취한 연약지반 표층 점토이며 시험에 사용된 시료의 물리적 특성은 표 1과 같다.

표1. 부산 연약지반의 물성치

Properties	비중, G_s	함수비, w_n (%)	초기 간극비, e_0	습윤단위중량, γ_t (t/m^3)
Characteristics Value	2.72	73.3%	1.99	1.57

2.2 공시체 제작 (KS F 2329)

흙-시멘트 압축 및 휨강도시험용 공시체 제작방법 (KS F 2329)을 참고하여 지름 5 cm, 높이 10 cm의 공시체를 제작하였다. 고로시멘트를 고화재로 사용하였으며, 현장에서 가장 널리 사용되는 물-시멘트 비는 0.8을 기준으로 150, 200, 250 kg/m^3 의 다양한 주입 시멘트량에 따른 세 종류의 공시체를 제작 후 $20\pm 3^\circ C$ 의 온도에서 수중 양생하였다.



그림 1. 시료교반 및 수중양생 사진

3. 연구 방법

3.1 일축압축시험

시멘트량 및 양생일에 따른 고결점토의 동적거동특성을 강도특성과 비교해 보기 위해서 일축압축시험을 수행하였다. 수중양생된 공시체는 일회용 몰드를 분리한 뒤 시료의 두부를 정리하고 시료의 초기 상태 파악을 위하여 높이와 지름을 측정하였다. 1 mm/min의 속도로 일축압축시험을 수행하여 응력-변형률 관계 및 극한강도를 산정하였다. 1, 3, 7, 28일 양생된 공시체로 시험을 수행하였으며 각 양생일별로 3개의 공시체로 수행한 후 평균 일축압축강도를 구하였다.

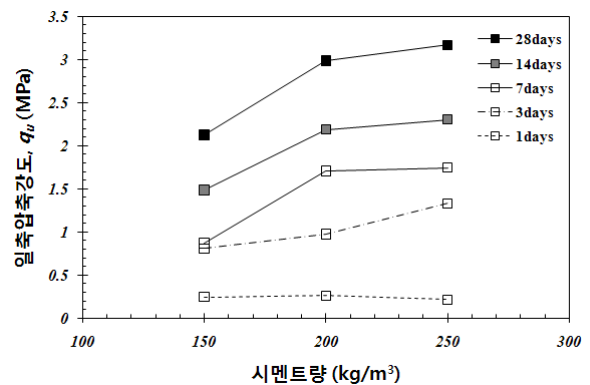
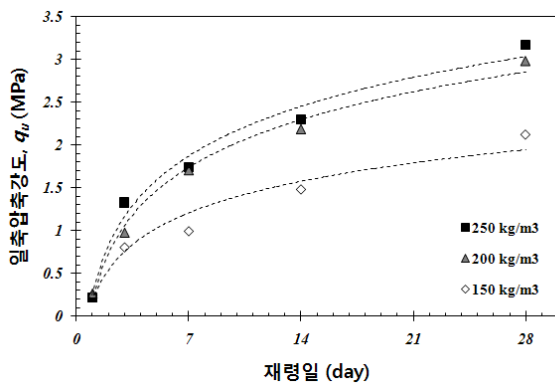
3.2 공진주 시험

본 연구에서는 Stokoe식 공진주 시험기 (Kim and Stokoe, 1992; 김동수와 추연욱, 2004)를 사용하였다. 공진주 시험은 원지반 시료와 공시체의 특성에 맞게 각각 다른 방법으로 시험기 본체에 거치하였다. 원지반 재성형 시료의 경우 건조 후 분쇄하여 현장 단위중량을 고려하여 시료를 조성하였다. 공진주 시험은 주파수 스위핑 (sweeping)을 통해 공시체에 비틀자극 (Torsional excitation)을 가하여 공진주파수 (f_r)와 진동 크기 (A_r)를 측정하고 공시체의 크기, 무게를 이용하여 변형률 (γ)에 따른 전단탄성계수 (G) 및 감쇠비 (D)를 구하였다 (김동수 외, 1997).

4. 연구 결과

4.1 강도특성

일반적으로 시멘트 고화토의 경우 양생일에 따라 강도가 증가하는데 초기에 큰 강도 증가율을 보이다가 시간에 따라 강도 증가율은 점점 감소한다. 장기거동의 경우 강도는 반대수 양생 시간과 선형관계를 보인다 (Hayashi et al. 2003). 부산 고결점토의 경우, 강도 거동특성은 그림 2와 같다. 일축압축강도는 시멘트량에 관계 없이 양생 시간에 따라 모두 증가하는 경향을 보였다. 동일한 시멘트 주입량의 증가에도 불구하고 28일 강도의 경우, 시멘트량 200 kg/m³ 공시체의 일축압축강도는 시멘트량 150 kg/m³의 시료의 일축압축강도보다 약 1 MPa 정도의 큰 증가를 보이지만 250 kg/m³과는 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 또한, 시멘트량 150 kg/m³ 공시체는 양생 후 1-3일 사이의 큰 초기 강도증가를 보이는 반면 200 kg/m³, 250 kg/m³ 공시체는 3일 이후에 강도 증가율이 커짐을 알 수 있다.



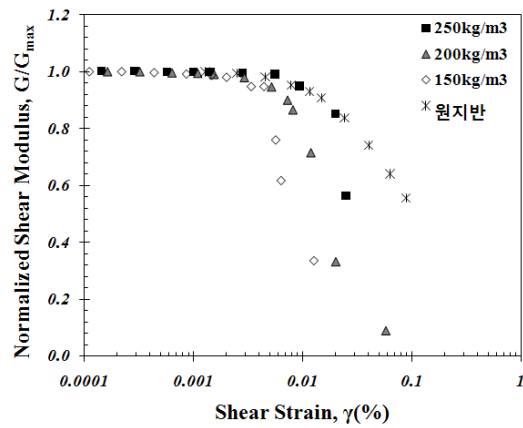
(a) 양생일에 따른 일축압축강도

(b) 시멘트량에 따른 일축압축강도

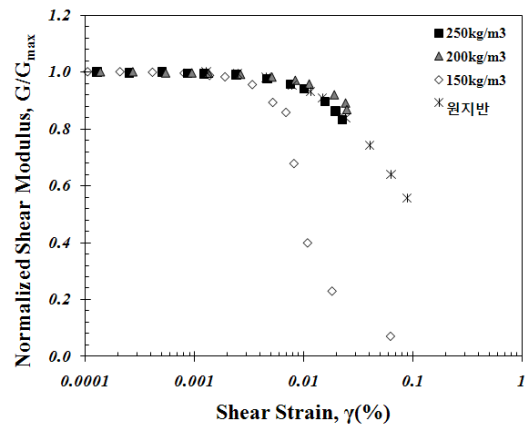
그림 2. 고결점토의 강도거동특성

4.2 동적거동특성

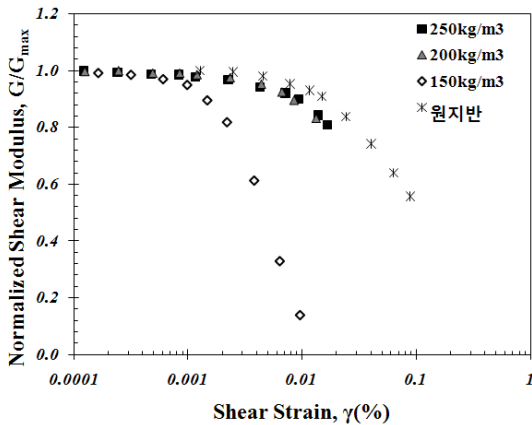
재성형 원지반 시료와 고결점토의 변형률에 따른 정규화 전단탄성의 변화를 그림 3에 도시하였다. 또한 $G_{max}=0.99G$ 일 때의 변형률을 공시체의 탄성한계변형률로 하여 그림 4에 나타내었다 (Santamarina et al. 2001). 양생 7일 이후, 시멘트량 150 kg/m^3 시료의 탄성한계변형률 (γ_e , elastic threshold strain)은 0.001% 정도로 시멘트량 200 kg/m^3 과 250 kg/m^3 시료의 탄성한계변형률에 비하여 매우 작게 나타났으며, 이에 반해 200 kg/m^3 과 250 kg/m^3 시료의 탄성한계변형률은 0.01% 정도로 150 kg/m^3 시료의 탄성한계변형률과 대략 10배 정도의 차이를 보였다. 시멘트의 고결화에 따라 고결점토는 취성거동을 보이며 각 조건에서 탄성한계변형률은 양생 시간에 따라 감소하는 모습을 보였다 (그림 4). 이러한 특성은 그림 5에 나타나있는 감쇠비 곡선에서도 확인할 수 있다. 전단변형으로 인한 시료 내부의 미세 균열 발생에 의하여 감쇠비의 급격한 증가가 관찰되며, 이때의 변형률은 양생일에 따라 감소한다. 감쇠비 곡선의 기울기는 고화 초기 단계에서는 완만하다가 양생 기간에 따라서 급격해짐을 알 수 있다.



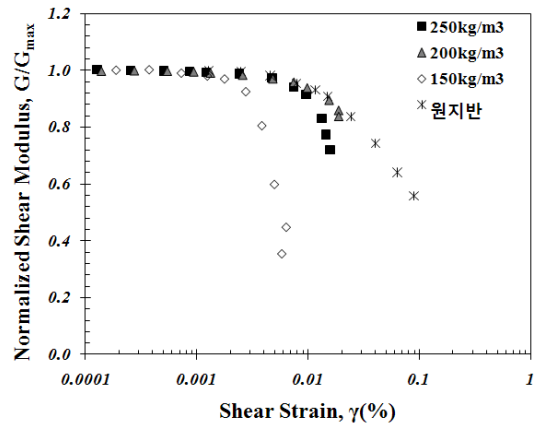
(a) 양생 5일



(b) 양생 7일



(c) 양생 14일



(d) 양생 21일

그림 3. 부산 고결점토의 정규화 전단계수 감소곡선

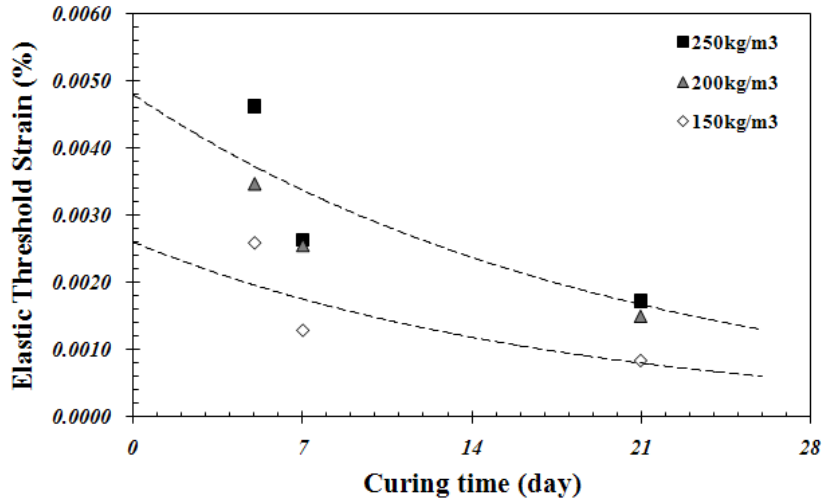
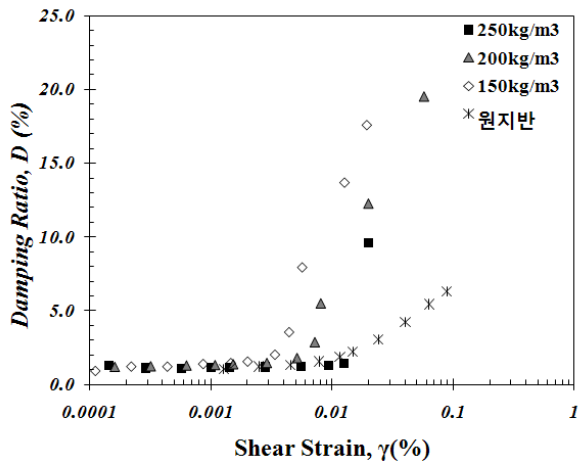
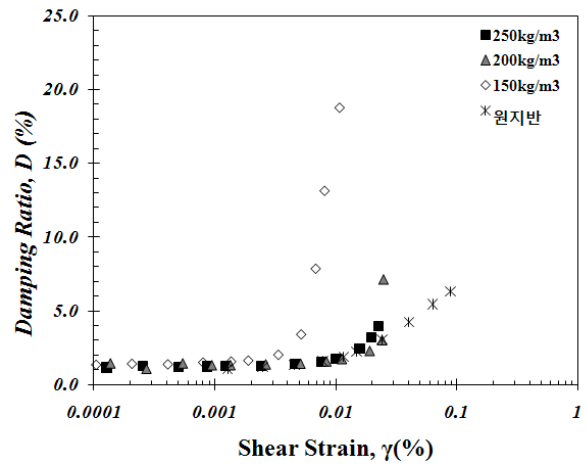


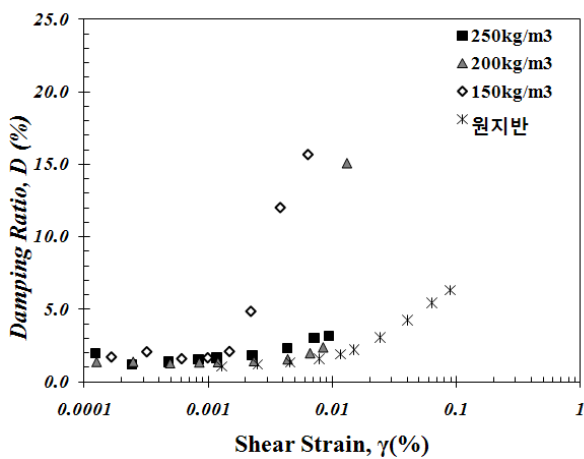
그림 4. 양생일에 따른 탄성한계변형률



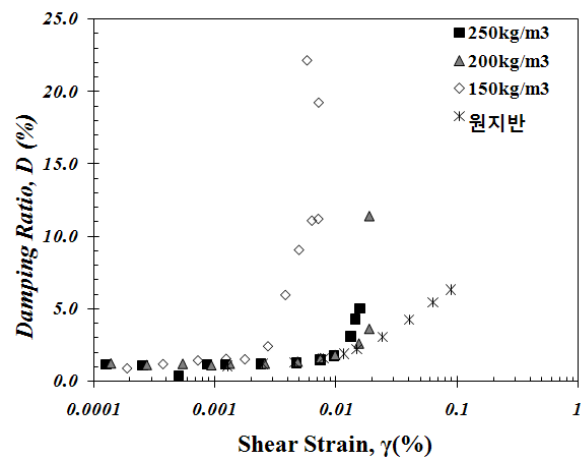
(a) 양생 5일



(b) 양생 7일



(c) 양생 14일



(d) 양생 21일

그림 5. 부산 고결점토의 감쇠비 곡선

시멘트로 고화된 지반의 경우 시멘트량 및 양생일에 따라 강도뿐만 아니라 강성 역시 크게 증가한다 (Saxena et al., 1987; Sharma and Fahey, 2003). 부산 고결점토의 양생일에 따른 최대 전단탄성계수를

그림 6에 나타내었다. 양생 21일 이후의 고결점토의 강성은 원지반 강성에 비해 시멘트량에 따라 400~600 MPa 증가했으며 강도특성과 유사하게 초기에 급격히 증가하고 양생기간이 길어질수록 점차 수렴하는 모습을 보인다. 또한 시멘트량 200 kg/m³, 250 kg/m³ 공시체의 최대 전단탄성계수 값은 거의 유사한 반면 150 kg/m³ 은 200 MPa 정도 낮은 전단강성을 가진다.

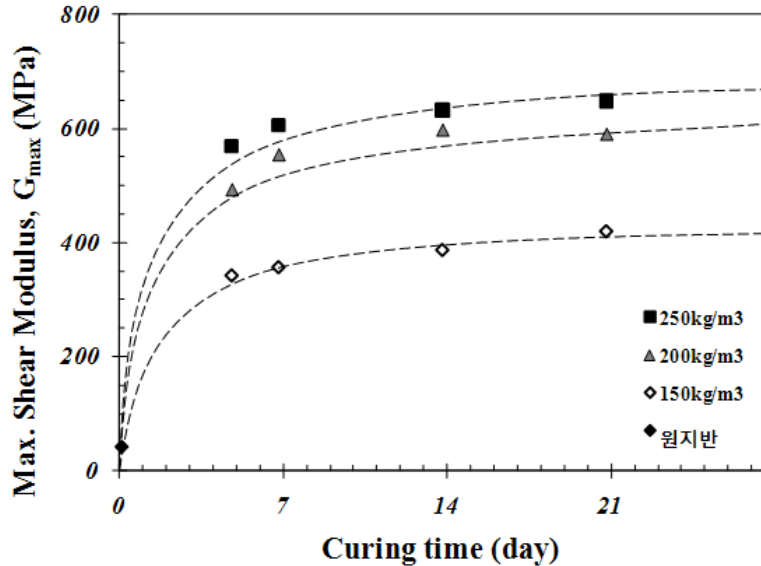


그림 6. 고결점토의 양생일에 따른 최대 전단탄성계수

5. 요약 및 결론

부산 연약지반의 개량 전·후의 강도와 동적거동특성 그리고 최적 배합비를 알아보기 위하여 일축압축 시험 및 공진주 시험을 통해 본 연구를 수행하였다. 시멘트량 150, 200, 250 kg/m³의 공시체를 제작하여 항온 수조에서 양생시켜 고화시간에 따라 고결화 시료를 조성하여 공시체의 강도 및 변형률에 따른 전단탄성계수와 감쇠비를 구하였다. 주요 사항을 요약하면 다음과 같다.

- 부산고결점토의 일축압축강도는 양생일 및 시멘트량에 따라 증가하며, 28일 강도의 경우, 시멘트량 200 kg/m³ 공시체의 일축압축강도는 시멘트량 150 kg/m³의 시료의 일축압축강도 보다 약 1 MPa 정도의 큰 증가를 보이지만 250 kg/m³과는 유사한 경향을 보인다.
- 시멘트량 150 kg/m³ 시료의 경우 탄성 한계변형률이 200 kg/m³과 250 kg/m³에 비해 대략 10배 정도 낮은 값을 보인다.
- 전단변형에 의한 시료 내의 미세 균열 발생에 의하여 감쇠비의 급격한 증가가 관찰되며, 이때의 변형률은 양생일에 따라 감소한다.
- 양생 21일 고결점토의 최대전단강성은 원지반 전단강성에 비해 시멘트량에 따라 400~600 MPa 이상의 큰 값을 보인다. 주입 시멘트량에 관계없이 최대 전단탄성계수는 시간에 따라 양생 초기에 급격한 증가를 보인다, 약 14일 이후 점차 수렴하는 모습을 보인다.

종합적인 검토 결과, 부산점토에 대한 강도 및 경제성을 고려한 최적 배합조건은 200kg/m³으로 판단되며, 미소변형영역 ($\gamma < 10^{-3}\%$)에서 중간변형률 ($10^{-3} < \gamma < 1\%$) 영역까지의 동적거동특성을 도출하였다. 이러한 변형률에 따른 동적거동특성은 향후 부산 개량점토의 내진설계시 신뢰도와 안정성 향상을 위한 중요 설계변수로 사용될 것이라 기대된다.

6. 감사의 글

본 연구는 (주)삼성물산 건설부문의 “대심도 연약지반 개량공법(DCM)의 설계 및 시공기술개발” 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 김동수, 권기철, 정순용, 박재영(1997), “실내시험 및 현장시험을 통한 지반의 비선형 변형특성 평가, 한국지반공학회, 제 13권, pp.89~100.
2. 김동수, 추연욱(2004), “간극수압증가와 동적변형특성 변화에 근거한 사질토 지반의 반복한계 전단변형률”, 대한토목학회논문집, 제 24권, 제 3C호, pp.193-203.
3. 이정환, 이원호(2008), “국내 조적조 건축물의 지진방재 실태“, 대한건축학회 학술저널, pp.38~48.
4. 정경환, 문준배, 신민식, 황정순(2006), “DCM공법(Deep Cement Mixing Method)의 설계와 환경”, 지반환경, 제 7권, 제 4호, pp.37~48.
5. Iida, K., Cox, D.C., and Pararas-Carayannis, G. (1967), "Preliminary catalog of tsunamis occurring in the Pacific Ocean," *Report No. HIG-67-10, Hawaii Institute of Geophysics, Univ. of Hawaii, Honolulu, Hawaii.*
6. Kim, D.S., and Stokoe, K.H. (1992), "Characterization of resilient modulus of compacted subgrade soils using resonant column and torsional shear tests." *In Transportation Research Record 1369, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp.83~91.*
7. Santamarina, J.C., Klein, K.A., and Fam, M.A. (2001), *Soils and Waves - Particulate Materials Behavior, Characterization and Process Monitoring, John Wiley and Sons, New York*
8. Saxena, S.K., Avramidis, A.S., Reddy, K.R. (1988), "Dynamic moduli and damping ratios for cemented sands at low strain", *Canadian Geotechnical Journal, Vol. 25, pp.353~368*
9. Sharma, S.S., and Fahey, M. (2003), "Degradation of stiffness of cemented calcareous soil in cyclic triaxial tests", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 129, No. 7, pp. 619~629*