재구성 점토의 반복전단강도 및 전단탄성계수의 재하 주파수 의존성

Loading Frequency Dependencies of Cyclic Shear Strength and Elastic Shear Modulus of Reconstituted Clay

이시가키 시게나오* • 연규석** • 김용성**,

Ishigaki, Shigenao* • Yeon, Kyu Seok** • Kim, Yong Seong**,*

ABSTRACT

In the present study, the loading frequency dependencies of cyclic shear strength and elastic shear modulus of reconstituted clay were examined by performing undrained cyclic triaxial tests and undrained cyclic triaxial tests to determine deformation properties. The result of undrained cyclic triaxial test of reconstituted and saturated clay shows that a faster frequency leads to higher stress amplitude ratio, but when the frequency becomes fast up to a certain point, the stress amplitude ratio will reach its maximum limit and the frequency dependence becomes insignificant. And also, the result of undrained cyclic triaxial deformation test shows a fact that a faster loading frequency leads to higher equivalent shear modules and smaller hysteresis damping ratio, and confirms the frequency dependence of cohesive soil. Meanwhile, the result of the creep test shows that continuing creep is created in the undrained cyclic triaxial test with slow loading frequency rate, and since loading rate becomes slower at the vicinity of the maximum and the minimum deviator stress due to sine wave loading, the vicinity of the maximum and the minimum deviator stress shall be more influenced by creep.

Keywords: Frequency; Elastic shear modulus; Cyclic shear strength; Triaxial test; Clay

1. 서 론

최근 세계적으로 계속되는 대형지진 (칠레, 2010; 아이티, 2010; 파키스탄, 2008; 중국, 2008; 인도네시아, 2006)의 영향으로 우리나라에서도 지진에 대한 관심이 높아져 많은 연구결과들이 보고되고 있다 (Seo et al., 2009; Park, 2008; Jeong et al., 2008; Kim et al., 2008).

지금까지 지진에 의한 지반의 거동 문제는 주로 사질토 재료에 대해 초점이 맞춰져 이에 대한 많은 논의가 있어 왔으나 최근의 지진 재해에서 점성토 지반에서의 피해도 다수 보고되어 점성토 지반의 내진대책 수립의 중요성이 매우 강조되고 있다. 사질토 지반에서의 반복하중에 의한 피해로는 액상화가 대표적이고 점성토 지반에서는 반복하중으로 인하여 액상화에 이르지는 않지만 강도 및 강성의 저하, 과잉간극수압의 소산에

의한 경시적 침하 등의 여러 문제가 발생한다 (Kim, 2006).

1985년 Mexico 지진과 1989년 Loma Prieta 지진은 연약점성토지반의 동적변형특성에 대한 중요성을 새삼 인식하게 해주었으며, 1995년 발생한 일본 효고현 남부지진의 경우 액상화피해가 발생한 대부분의 지역 (Port Island와 Rokko Island등과 같은 인공매립지)이 사질토 지반 내에 점성토층이 존재하는다층지반임으로 인해 지진시 지반거동의 정확한 해석을 위해서는 점성토층의 거동에 대한 평가 필요성이 강조되기도 하였다(Shibata et al., 1996).

이러한 지반의 동적 거동 특성 연구의 흐름속에서 지진시 자연지반에서의 지진파는 사질토층 뿐만 아니라 점성토층의 거동에도 중요한 역할을 담당하고 있음을 알 수 있었으며, 점성토의 동적 응력-변형특성은 지반동역학 분야의 중요한 일부분으로 자리 잡는 계기가 되었다.

외국에서는 점성토와 관련한 다양한 동적 거동 문제들이 연구되고 있는데 점성토의 비배수 진동삼축시험에 있어서, 반복 재하 횟수가 증가하면 과잉간극수압이 증대되어 유효구속압 (effective confining pressure)이 저하되므로 전단탄성계수 (G)는 재하횟수의 증가와 더불어 저하되고 이력감쇠율 (h)은 증가하게 되며, 이러한 현상은 변형률 진폭이 클수록 현저하게 나타

E-mail address: yskim2@kangwon.ac.kr

2010년 4월 7일 투고 2010년 5월 11일 심사완료

2010년 5월 12일 게재확정

^{* (}株)大林組 (Obayashi Corporation, Japan)

^{**} 강원대학교 지역건설공학과

[†] Corresponding author. Tel.: +82-33-250-6463 Fax: +82-33-251-6463

나고, 이러한 지반의 응력-변형 거동을 비선형 강성을 고려하여 극미소변형 (전단변형률 (γ) 0.001 % ~ 0.0001 % 이하), 미소변형 $(0.001 \sim 0.0001 \% \leq \text{전단변형률} (\gamma) \leq 1.0 \%$ 그리고 중간 및 대변형 (전단변형률 (γ) 1.0 % 이상)으로 분류하고 있다 (Atkinson and Sallfors, 1991).

점성토의 전단변형계수 및 이력감쇠율의 변형률 속도 효과에 대해서 Shibuya et al. (1995)은 주파수를 (0.005) ~ (0.1) Hz로 달리하여 전단변형률 (0.005) 유가전단탄성계수와 이력감쇠율에 대한 거동 특성을 분석한 결과 등가전단탄성계수는 주파수 변화에 민감하지 않으나 이력감쇠율은 민감하게 반응하는 것으로 보고하였다.

Hyodo et al. (1994)는 정규압밀점토에 대하여 반복재하주 파수를 변화시켜 진동삼축실험을 실시한 결과 재하주파수가 높은 경우 반복 강도가 크게 나타나는데 이러한 주파수 의존성은 공시체 내의 간극수압과 변위 발생의 균일성에 관련됨을 보고한 바 있다.

국내의 경우 지진 등 반복하중에 의한 점성토의 변형이 크지 않은 특성이 있어 미소변형률 영역에서의 변형 특성에 대한 연구가 활발한 실정이나 (Kim et al., 2008; Jeong et al., 2008; You et al., 2006; Doh et al., 1993), 주파수 영향에 따른 지반재료의 거동 특성에 관한 연구는 미미한 실정이다.

본 연구에서는 재구성 점성토를 이용하여 재하속도가 다른 진동삼축시험 및 동적삼축변형시험을 수행하여 점성토 거동에 대한 재하속도 영향성을 확인하고, 반복재하 도중 크리프시험 을 수행하여 점성토의 크리프 거동 특성을 구명하고자 하였으 며, 파괴에 이르는 동안의 점성토의 응력-변형특성 등을 분석 하여 점성토 지반을 포함하는 다층지반에서의 내진대책 수립에 기초적 자료로서 제공될 수 있도록 하였다.

Ⅱ. 재료 및 방법

1. 실험 시료

본 연구에 이용된 시료는 재구성 점토로서 0.42 mm체를 통과시킨 후 액성한계의 1.7배가 되도록 증류수와 혼합한 후 98 kPa로 예비 압밀을 실시하였으며, 재구성 점토의 물리적 성질은 Table 1과 같다.

Table 1 Physical properties of the specimen

Soil type	Specific gravity	Water content W (%)	Liquid limit W _L (%)	Grain size			Plastic
				sand (%)	silt (%)	clay (%)	\inf_{I_p}
CL	2.69	62	39.4	8.3	64.4	27.3	13

2. 실험 방법

점성토 지반의 동적파괴는 구조물이나 성토지반의 주변에 발생하는 특징이 있는데 구조물의 자중에 의한 지반 내에서의 초기전단응력 위에 지진 등 동적외력에 의한 반복전단응력이 작용한 결과 발생하게 되는 것이다. 이러한 파괴형태는 포화사질 토지반의 액상화와 같은 유효응력이 손실되는 파괴에 이르는 현상과는 달리 유효응력의 일부가 잔류된 상태에서도 전단파괴에 의하여 전단변형률이 축적되어 파괴에 이르는 것으로 반복전단파괴라 한다.

진동삼축시험은 동적 응력진폭비와 과잉 간국수압비의 특정 값 또는 양진폭 축변형률의 특정 값에 도달할 때의 반복횟수와 관계를 결정하는 시험이다. 비배수 진동삼축시험은 고정된 주 파수 상태에서 등방압밀된 포화시료에 특정한 진폭을 대칭형의 동적 축하중으로 주어 시험하게 된다. 일반적으로 사질토의 경우 간국수압이 구속압과 같아질 때 즉 유효응력이 0으로 되어 파괴에 이르게 되나, 점성토의 거동은 사질토와는 많은 차이가 있어 유효응력이 0으로 되는 경우는 거의 희박하므로 축변형률이 양진폭 10 %에 이르면 파괴 (전단파괴)에 이른 것으로 판단한다 (Hyodo and Uchida, 1998).

본 연구에 사용된 진동삼축시험기는 일본 Seikensha (DTC-367)의 공압서보식 진동삼축시험기를 사용하였으며 진동주파수의 범위는 0.001 ~ 1 Hz이고, 삼축압축실의 내구속압은 1 MPa, 내축하중은 5 kN이다.

본 연구에서는 재구성 시료를 트리머에 설치하여 와이어 톱으로 ϕ 50 mm \times H100 mm 공시체를 성형하여 삼축셀에 설치하고 이중부압법에 의해 공시체를 완전히 포화시켜 측압 400 kPa, 배압 200 kPa로 20시간 등방압밀한 후 다음의 조건으로 실험을 수행하였다.

가. 정적삼축시험

0.05, 0.1, 0.5 (% / min)의 3종류의 변형률속도에 의해 정적 삼축시험을 수행하였다.

나. 진동삼축시험

0.001, 0.01, 0.1, 0.5 Hz의 4종류의 재하 주파수로 진폭비 0.23, 0.25, 0.3 등의 조건으로 양축변형률 10 %에 이르기까지 정현파하중을 재하하는 방법으로 진동삼축시험을 수행하였다.

다. 동적삼축변형시험

0.01, 0.1, 0.5 Hz의 3종류의 재하주파수로 응력진폭비 $2.0 \times 10^{-3} \sim 3.2 \times 10^{-1}$ 까지 28stage에 걸쳐 재하하는 방법으로 동 적삼축변형시험을 실시하였다.

라. 반복 크리프시험

응력진폭비 0.25로 수동 재하 및 소정의 축차응력에 있어서 재하 중지 후 크리프 거동을 관찰한 후 재재하하는 방법으로 반복 크리프 시험을 수행하였다.

Ⅲ. 결과 및 고찰

Fig. 1은 0.05, 0.1, 0.5 (%/min)의 3종류의 변형률속도를 달리 하였을 경우에 대한 정적삼축시험의 유효응력 경로, 응력 -변형률 관계를 나타낸 것이다. Fig. 1(a)에 도시한 응력경로 상에서 시험 재료의 파괴응력비 (M)가 1.2임을 확인할 수 있 었다. Fig. 1(b)의 응력-변형률 관계에서는 0.5, 0.1, 0.05의 순서로 축차응력의 값이 커지는 변형률속도 효과를 확인하였다.

Fig. 2는 0.001, 0.01, 0.1, 0.5 Hz 등 4종류의 재하 주파수일 때 진폭비를 각각 0.23, 0.25, 0.3 등으로 하여 양진폭 축변형률이 10 %에 이를 때까지 정현파하증을 재하시킨 진동삼축시험을 통해 얻어진 반복강도 곡선 결과를 나타낸 것이다. Fig. 2에서 재하주파수가 빠를수록 반복강도 곡선은 위에 위치하고 같은 응력진폭비의 경우 재하주파수가 늦은 쪽이 재하횟

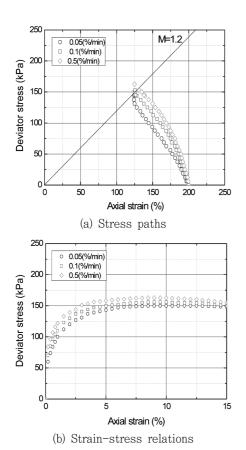


Fig. 1 The results of the static triaxial tests

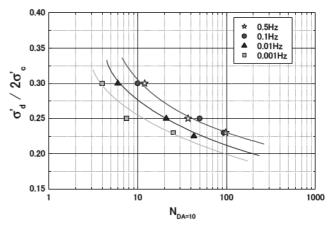


Fig. 2 Relationship between cyclic number and stress amplitude ratio

수가 적을 때 축변형률 10%에 달하는 것을 알 수 있다.

Hyodo et al. (1994)은 0.01 ~ 0.1 Hz의 주파수를 이용하여 진동삼축시험을 수행하고 시험종료 후의 공시체 내의 함수비 분포를 계측한 결과에서 주파수 의존성은 공시체 내의 간극수압과 변위 발생의 균일성에 일정정도의 원인이 있음을 지적하였다.

본 연구에서도 점성토의 재하주파수 의존성을 재구성 점토를 이용하여 수행된 진동삼축시험을 통해 확인 하였다. 그러나 0.5 Hz와 0.1 Hz에서는 그다지 차이가 나타나지 않은 것에서 점성 토의 재하주파수 의존성은 어느 정도의 한계가 존재한다고 할수 있다. 이러한 한계 재하주파수 범위 밖에서는 공시체 내의 간극수압 및 변위가 전체 영역에 있어서 불균일하게 분포하고 한계 재하주파수 내에서는 거의 균일하게 분포하기 때문에 점성토의 주파수 의존성이 발생되는 것으로 판단된다.

Fig. 3은 응력진폭비 0.3 및 0.23, 재하주파수 0.1 Hz 및 0.001 Hz로 수행된 진동삼축시험의 응력-변형률 관계 및 유효 응력경로를 나타낸다. Fig. 3의 응력-변형률 관계에서는 압축 측 보다 신장측의 변형량이 많은 전형적인 점성토의 진동삼축시험 결과와 동일한 결과를 보이고 있으며, 전단파괴 상태에 이르기 까지 히스테리시스 루프가 뾰족한 타원형에서 평행사변형과 유사한 형태로 바뀌어 가고 있다.

Fig. 3의 유효응력경로에서 압축, 신장의 최대 축차응력을 경험한 1싸이클의 유효응력경로는 재하주파수가 늦을수록 크게 좌측으로 이동되어 가는 것을 볼 수 있다. 또한 신장측 재하시에는 재하주파수가 빠를수록 압축과 신장측의 최대치를 기록한이후 리턴 과정의 응력경로 곡선이 뾰족해지는 것에 비하여 재하주파수가 늦을수록 둥근 형상을 갖는 것으로 나타났다. 또한 재하과정에서 과잉간극수압의 하강 (+축차응력)과 상승 (-축차응력)이 0.001 Hz보다 0.1 Hz에서 더 확연하여 유효응력경로

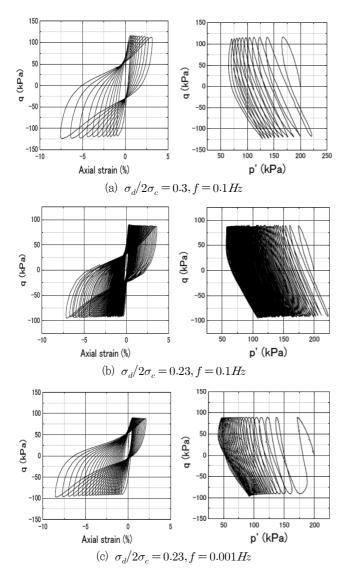


Fig. 3 The results of the cyclic undrained triaxial tests

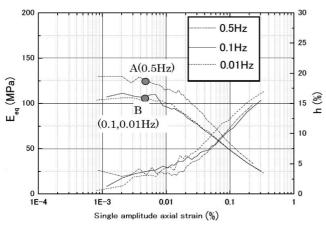
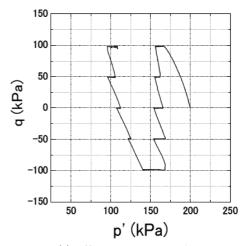


Fig. 4 Strain level dependencies of E_{eq} and h

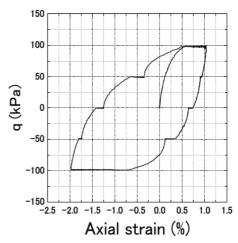
가 경사진 형태를 나타내고 있다.

Fig. 4는 3종류의 재하주파수로 수행한 동적삼축변형시험의 등가전단탄성계수 및 이력감쇠율을 나타낸다. Fig. 4에서 등가전단탄성계수에 관하여 0.01 Hz와 0.1 Hz에 대해서는 현저한 차는 발견할 수 없었으나 빠른 재하주파수의 0.5 Hz에는 큰 차이가 발생 하였다. 이력감쇠율에 있어서 초기 stage (극미소 변형률)에 있어서 0.5 Hz와 0.1 Hz에는 현저한 차이가 나지 않지만, 0.01 Hz의 것은 두 개의 시험 결과보다도 커지고 있다.

Joh (2002)는 높은 가진주파수를 사용하는 공진주 실험에서 측정한 재료감쇠비가 낮은 가진주파수를 사용하는 비틂전단실 험에 의해서 측정한 재료감쇠비보다 더 크게 측정되는데, 이는 두 실험에서 사용하는 주파수의 차이에 기인한 것이며, 탄성임 계전단변형률을 초과한 고전단변형률에서는 저전단변형률에서



(a) Effective stress path



(b) strain-stress relation

Fig. 5 The results of the cyclic creep tests

보다 가진주파수의 영향이 작고, 전단변형률이 증가할수록 그 영향은 더욱 감소하는데 이는 전단변형률이 증가할수록 사이클 경화 (cycle stiffening) 현상이 더욱 증가하기 때문인 것으로 지적하였다.

본 연구에서도 이력감쇠율에 있어서 주파수가 낮은 쪽이 높은 쪽보다 더 크게 측정되었으며 탄성임계전단변형률을 초과한 고전단변형률 영역의 등가탄성계수의 결과에서 주파수의 영향이 점차 줄어드는 것을 알 수 있었다.

Fig. 5는 응력진폭비 0.25로 수동 재하 및 소정의 축차응력에 있어서 재하 중지 후 크리프 거동을 관찰한 후 재재하하는 방법으로 수행된 반복 크리프시험의 응력경로 및 응력-변형률관계를 나타낸다. 크리프 시험은 하중 재하 후 소정의 축차응력에서 재하 중지 후 시간에 따른 점성토의 변형 거동을 측정하는 방식으로 수행하였다. Fig. 5에서 반복재하 도중에 크리프시험을 수행하면 최대축차응력의 50 % 이하에서는 크리프에의한 축변형률은 0으로 돌아오는 방향으로 향하는 것을 알 수 있다. 또한 유효응력경로에서 축차응력이 압축측의 최대점에서 신장측으로 갈 때는 과잉간극수압이 증가하며 신장측에서 압축 측으로 갈 때는 과잉간극수압이 감소하였다.

반복 크리프시험 결과에서 재하 주파수속도가 늦은 진동삼축 시험은 연속적인 크리프가 발생하고 있으며 최대 및 최소축차 응력 근방에는 재하속도가 정현파 재하로 인해 더 늦게 되므로 크리프 영향을 보다 더 많이 받게 되는 것으로 판단된다. 이로 인해 Fig. 3에 나타낸 0.001 Hz의 진동삼축시험의 신장시에 0.1 Hz 재하시에 발생하는 부의 과잉간극수압이 발생하지 않 고 응력경로 하단에 둥근 모양을 띠는 것으로 판단된다.

반복강도곡선의 재하주파수의존성은 미소변형률 영역에서 대변형률 영역까지 이르지만 Fig. 4에 나타낸 동적삼축변형시험은 미소변형률 영역에서의 문제이며 이 영역에서의 등가전단탄성계수의 현저한 주파수의존성은 정적시험에 있어서 확인되어온 변형률 의존성 거동과 유사함을 알 수 있다. 여기서 정적시험의 응력-변형률 곡선과 대응되게 하기 위해 Fig. 1에 나타낸정적시험의 응력-변형률 관계를 미소변형률 영역으로 확장시켜 Fig. 6에 나타내었다.

동적삼축변형시험과 같이 정적시험에 있어서도 변형률속도가 높은 경우 초기전단탄성계수가 높지만 일정 변형률속도 보다 늦 은 경우 초기전단탄성계수에 그다지 차이가 발생하지 않았다. 동적시험과 정적시험에 있어서 매우 양호하게 일치하는 것을 나 타내고 있는 것에서 진동삼축시험에 있어서도 정적시험에 걸친 변형률속도 의존성 거동과 같은 현상이 있는 것으로 판단된다.

점성토의 동적 전단거동에 대한 주파수 의존성과 관련하여 Proctor and Khaffaf (1984)는 주파수가 증대함에 따라 일정 변형률에 도달하기 위한 동적 재하횟수는 증가하는 것을 확인

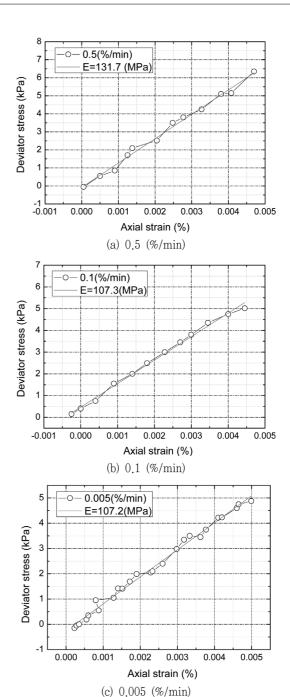


Fig. 6 The stress-strain relations of the monotonic triaxial tests in small strain level

하였으며, Shibuya et al. (1997)은 $0.005 \sim 0.1$ Hz의 주파수에서 전단변형률 $\gamma = 10^{-6}$ 에서의 초기 전단탄성계수 (G_0) 및 이력감쇠율 (h)에는 영향이 없지만, $\gamma > 10^{-4}$ 에서는 전단변형률 속도가 증가함에 따라 이력감쇠율 (h)은 연속적으로 감소함을 보고하였다. Degoshi et al. (1993)은 교란점토시료를 이용하여중공비틂전단시험을 수행한 후 G/G_0 관계에서는 주파수의존성

은 확인할 수 없었지만, 이력감쇠율(h)은 명확하게 의존하는 것 이 나타나 주파수 증가에 따라 이력감쇠율 (h)은 감소하는 것 을 확인하였다.

본 연구 결과, 재구성 점토의 경우에는 0.001 Hz ~ 0.1 Hz 의 진동삼축시험 결과 응력진폭비와 재하횟수의 관계가 주파수의 영향이 확연하게 나타나 주파수 의존성이 있음을 알 수 있었고, 이는 Hyodo et al. (1994)의 연구 결과와도 일치한다. 다만 이러한 현상은 초기재하 수 싸이클 이내에서 그 영향이크게 나타났으며 재하횟수가 많아질수록 점차 영향이 줄어드는 것으로 나타났다.

Ⅳ. 결 론

본 연구에서는 재구성 점성토를 이용하여 재하속도가 다른 진동삼축시험 및 동적삼축변형시험을 수행하여 점성토 거동에 대한 재하속도 영향성을 확인하고, 반복재하 도중 크리프시험 을 수행하여 점성토의 크리프 거동 특성을 구명하고자 하였으 며, 주요한 결론은 다음과 같다.

- 1. 재구성 포화점토의 진동삼축시험 결과 주파수가 빠를수록 반복강도는 크나 어느 정도 주파수가 빠르게 되면 반복강도는 한계치에 도달하여 주파수 의존성이 미미해지는 것으로 나타났 다.
- 2. 동적삼축변형시험 결과 재하주파수가 빠를수록 등가전단 탄성계수는 크게 되고 이력감쇠율은 작게 나타나 점성토의 주 파수 의존성을 확인하였다. 단 0.1 Hz이하에서는 등가전단탄 성계수의 주파수 의존성은 거의 나타나지 않았다.
- 3. 반복 크리프시험 결과 재하 주파수속도가 늦은 진동삼축 시험은 연속적인 크리프가 발생하고 있으며 최대 및 최소축차 응력 근방에는 재하속도가 정현파 재하로 인해 더 늦게 되므 로 크리프 영향을 보다 더 많이 받게 되는 것으로 판단된다.
- 4. 본 연구에서 수행된 주파수 범위 (0.1 ~ 0.001 Hz)는 점 성토의 동적 재하 주파수 의존성 거동과 같은 이론적 구조를 설명하는 데 적정함을 확인하였다.
- 이 논문은 강원대학교 농업생명과학연구원의 기자재 지원 및 강원대학교 석재복합건설신소재연구소의 시설을 이용하 여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

REFERENCES

1. Atkinson, J. H. and G. Sallfors, 1991. Experimental determination of soil properties. General Report to

- Session 1, Proc. the 10th ECSSMFE 3: 915-956.
- Degoshi, T., S. Mino, T. Mitachi, S. Shibuya and F. Fukuda, 1993. Effects of various factors on undrained deformation characteristics of clay by torsional cyclic loading tests. *Proc. the 28th JSSMFE* 1: 1047-1050 (in Japanese).
- 3. Doh, D. H., P. W. Chang and J. M. Koh, 1993. A study on evaluation of dynamic behavior and liquefaction caused by earthquake of sea dike structures on the ground, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 35(2): 43-56 (in Korean).
- 4. Hyodo M., M. Sugiyama, Y. Yamamoto and Y. Kawata, 1994. Evaluation of pore pressure and strain of normally consolidated and overconsolidated clay subjected to cyclic shear stress. *Journal of the JSCE* 487(3): 79–88 (in Japanese).
- 5. Hyodo M. and K. Uchida, 1998. Dynamic properties of clay. Tsuchi to Kiso 46(6): 53-58 (in Japanese).
- Jeong, C. G., D. Y. Kwak and D. H. Park, 2008. Verification of Frequency-dependent equivalent linear method, *Journal of the Korean Geotechnical Society* 24(12): 113–120 (in Korean).
- 7. Joh, S. H., 2002. Q & A, Geotechnical Engineering, *KGE* 18(10): 50–53 (in Korean).
- 8. Kim, U. G., T. B. Ahn and M. Hyodo, 2008. Effect of fines content on the cyclic shear characteristics of sand-clay mixtures, *Journal of the Korean Geotechnical Society* 24(1): 51-59 (in Korean).
- 9. Kim, Y. S., 2006. Frequency dependence in large strain range during cyclic triaxial tests of clay, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 48(5): 63–71 (in Korean).
- Park, S. S, 2008. Liquefaction evaluation of reclaimed sites using an effective stress analysis and an equivalent linear analysis, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* 28(2): 83–94 (in Korean).
- 11. Proctor, D. C. and J. H. Khaffaf, 1984. Cyclic triaxial tests on remolded clay, *ASCE* 110(10): 1431-1445.
- 12. Seo, M. W., C. G. Sun and M. H. Oh, 2009. LPI-basesd assessment of liquefaction potential on the west coastal region of Korea, *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea* 13(4): 409-412 (in Korean).
- 13. Shibata, T., F. Oka and Y. Ozawa, 1996. Characteristics

- of ground deformation due to liquefaction, *Special Issue of Soils and Foundations*: 65–79.
- Shibuya, S., T. Mitachi, F. Fukuda and T. Degoshi, 1995. Strain rate effects on shear modulus and damping of normally consolidated clay, *Geotechnical Testing Journal* 18(3): 365–375.
- Shibuya, S., T. Mitachi, F. Fukuda and A. Hosomi, 1997. Modeling of strain-rate dependent deformation of clay at small strains, Proc. of the 14Th ICSMFE, Balkema, 409-412.
- 16. You, H. Y., J. Y. Lee and Y. T. Park, 2006. Site response analysis in time domain using finite element, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 48(6): 45–56 (in Korean).