

그라우트 주입을 변화에 따른 사질토의 동적계수 특성

Characteristics of Dynamic Parameter of Sandy Soil According to Grout Injection Ratio

안 광 국[†] · 박 준 영¹⁾ · 오 종 근²⁾ · 이 준 대³⁾ · 한 기 환⁴⁾

Ahn, Kwangkuk · Park, Junyoung · Oh, Jonggeun · Lee, Jundae · Han, Kihwan

ABSTRACT : Ground dynamic parameter such as shear elastic modulus and damping ratio is a very important variable in design of ground-structure with repeated load and dynamic load. Shear elastic modulus and damping ratio on small strain below linear limit strain is constant regardless of strain. Shear elastic modulus as the maximum shear elastic modulus and damping ratio as the minimum damping ratio were considered. As a lot of experiment related to the maximum shear elastic modulus, which is in dynamic deformation characteristics, have been conducted, many factors including voiding ratio, over consolidation ratio(OCR), confining pressure, geology time, PI, and the number of load cycle affect to dynamic soil characteristic. However, the research of ground dynamic characteristic improved with grout is absent such as underground continuous wall construction, deep mixing method, umbrella arch method. In order to investigate the dynamic soil characteristics improved with grout, in this study, resonant column tests were performed with changing water content(20%, 25%, 30%) and injection ratio of grout(5%, 10%, 15%), cure time(7th day, 28th day) As a result, shear elastic modulus and damping ratio, which are ground dynamic parameter, are affected by the injection ratio of milk grout, cure time and water content.

Keywords : Shear elastic modulus, Damping ratio, Dynamic soil characteristics

요 지 : 전단탄성계수와 감쇠비와 같은 동적지반계수는 반복하중과 동적하중을 받는 지반구조물 설계에서 중요한 요소이다. 선형 한계변형률 내에서 미소변형률에 관한 전단탄성계수와 감쇠비는 변형률과 관계없이 일정하다. 전단탄성계수는 최대전단탄성계수로 감쇠비는 최소 감쇠비로 고려하였다. 동적변형특성 범주내의 최대선형탄성계수에 관련된 많은 시험들이 수행되고 동시에 간극비, 과압밀비, 구속압, 지질이력, PI 그리고 하중주기수에 관련된 많은 인자들이 동적지반특성에 영향을 미친다. 그러나 그라우팅에 의해 향상된 지반동적특성에 관한 연구는 지하연속벽시공, 심층혼합처리공법, 강관다단그라우팅과 같이 미비한 실정이다. 본 논문에서는 그라우팅에 의해 향상된 동적지반특성을 연구하기 위하여 함수비(20%, 25%, 30%), 그라우트 주입율(5%, 10%, 15%), 양생기간(7일, 28일)을 변화시키면서 공진주시험을 실시하였다. 그 결과, 밀크 그라우트의 주입율과 재령, 함수비에 따라 동적계수인 전단탄성계수와 감쇠비가 영향을 받는 것으로 나타났다.

주요어 : 전단탄성계수, 감쇠비, 동적지반특성

1. 서 론

기초침하, 도심지 굴착, 지진 등 지반에 외력이 작용할 시 지반에 미소변형이 발생하게 된다. 외력에 의해 발생한 진동이 지반의 주파수와 일치하게 되면 증폭 현상이 발생하게 되어 변형이 증가하는 문제점이 일어난다. 이러한 문제점을 해소하기 위해 최근 미소변형률과 전단탄성계수의 중요성이 널리 인식되고 있다.

반복하중이나 동하중을 받는 지반-구조물계의 설계에서 전단탄성계수 및 감쇠비로 표현되는 지반의 동적 변형물성은 매우 중요한 변수이다. 선형 한계변형률 이하의 저변형

률 영역에서의 전단탄성계수와 감쇠비는 변형률의 크기에 무관하여 일정한 값을 가지고, 전단탄성계수는 최대값인 최대전단탄성계수로서 감쇠비는 최소값인 최소감쇠비로 고려된다. 지진하중이 작용할 경우 변형률 크기가 커져서, 변형률 크기에 따른 전단탄성계수와 감쇠비 값의 변화가 중요한 결정 요소가 된다.

화강풍화토 및 비점성토 지반, 암시편, 사질토의 동적 물성치에 대한 연구는 많이 수행되어 왔다. 또한 저변형률 변형특성인 최대전단탄성계수에 대한 많은 시험연구들이 수행되어 간극비, 과압밀비, 구속응력, 지질학적 연도, 소성지수(PI) 등 다양한 요소들의 영향을 받는다는 연구결과들이

† 정회원, 충북대학교 공과대학 토목공학과 조교수(E-mail : akk@chungbuk.ac.kr)

1) 비회원, 충북대학교 대학원 토목공학과 석사

2) 정회원, 충북대학교 대학원 토목공학과 박사과정

3) 정회원, 세명대학교 토목공학과 교수

4) 비회원, 안동대학교 지구환경학과 박사과정

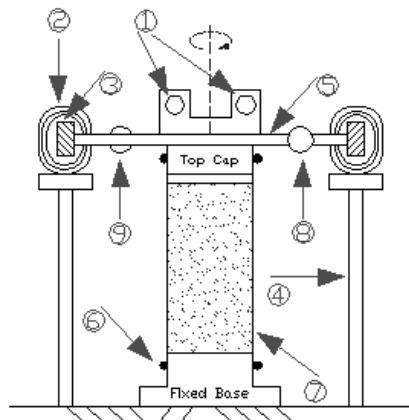
발표되었다(Hardin 등, 1963; Hardin 등, 1968; Dobry 등, 1987). 비선형 전단탄성계수와 감쇠비에 대한 시험연구 또한 많이 수행되어 왔다(Seed 등, 1986; Rollins 등, 1998). 이러한 많은 연구의 결과로 변형률 크기에 따른 전단탄성계수의 감소곡선과 감쇠비 곡선은 구속응력, 간극비, 소성지수(PI), 하중반복횟수 등의 많은 영향요소를 가진다는 것이 밝혀지게 되었다. 하지만 국내에 연약지반의 개량 목적으로 지하연속벽공법, 심층혼합처리공법, 강관단단 그라우팅 등 차수 및 지반보강을 위하여 광범위하게 사용하고 있지만, 그라우트로 보강된 지반의 동적 변형물성에 대한 연구는 미비한 실정이

다. 따라서 본 논문에서는 그라우트로 보강된 지반에 대한 동적변형특성을 공진주시험기를 이용하여 알아보았다.

2. 시험내용 및 방법

2.1 시험 장치

본 시험에서 사용된 공진주시험기는 공시체를 원통형으로 성형하여 바닥을 고정시키고, 상부를 자유조건으로 유지하여 비틀력을 재하하는 방식이다. 동적 시험인 공진주 시험을 같은 공시체로 구속압을 달리하여 수행하기 때문에 시험결과와 효율적인 비교가 된다. 그림 1은 공진주시험기(Resonant Column)를 모식화한 개요도이다. ②드라이브 코일에 전자기 신호를 주게 되면 ③자석이 진동을 하는 원리이다.



① Proximitors Probe ② Drive Coil ③ Magnet
④ Coil Support System ⑤ Drive Plate ⑥ O-ring(봉인)
⑦ Membrane ⑧ Accelerometer ⑨ Counter Weight

그림 1. 공진주 시험기 개요도

2.2 공시체의 제원

본 연구에서는 공시체 형성 시 지반재료로는 사질토와 그라우트재료는 일반포틀랜드시멘트를 이용하여 주입율 및 함수비변화에 따라 성형하여 사용하였다. 또한 공시체는 공진주 용 다짐몰드를 이용하여 직경 50mm, 높이 100mm로 제작하였고, 제작 시 과소 다짐법에 의하여 5단으로 제작하였다. 표 1은 함수비가 20%와 25%, 30%일 때 주입율에 따른 Silt와 Water, Cement의 중량비를 나타내었다.

표 1. 공시체의 Sandy soil와 Water, Cement 혼합율

Case NO.	Water Content, %	Grout Injection Ratio, %	Sandy soil, g	Water, g	Cement, g	Cure time
Case 1	20	5	1000	200	60	7
Case 2		10	1000		120	7
Case 3		15	1000		180	7
Case 4	25	5	1000	250	62.5	7
Case 5		10	1000		125	7
Case 6		15	1000		187.5	7
Case 7	30	5	1000	300	65	7
Case 8		10	1000		130	7
Case 9		15	1000		195	7
Case 10	20	5	1000	200	60	28
Case 11		10	1000		120	28
Case 12		15	1000		180	28
Case 13	25	5	1000	250	62.5	28
Case 14		10	1000		125	28
Case 15		15	1000		187.5	28
Case 16	30	5	1000	300	65	28
Case 17		10	1000		130	28
Case 18		15	1000		195	28

3. 시험결과 및 분석

3.1 공시체에 대한 매개변수

Ramberg-Osgood 모델은 R과 C, 두 개의 매개변수를 가지고 정규화한다. 전단변형률과 G/Gmax을 식 (1)에 대입하여 구한 x와 y를 추세선의 기울기와 상수가 매개변수인 R과 C가 된다. 각각의 Case에 따른 매개변수 R과 C는 표 2에 나타내었다.

$$x = \log(G/G_{max}) \times \gamma \quad (1)$$

$$y = \log \gamma - (G/G_{max}) \times \gamma$$

G/Gmax : 공진주 시험을 수행하여 얻은 정규화 곡선

3.2 G/Gmax 감소곡선과 감쇠비 곡선

3.2.1 G/Gmax 감소곡선 비교

그림 2와 같이 사질토의 G/Gmax 감소곡선보다 그라우트를 주입한 공시체가 상당히 증가한 것을 볼 수 있다. 전단변형률이 1×10⁻³%일 때 7일 양생한(Case 1, Case 2, Case 3)공

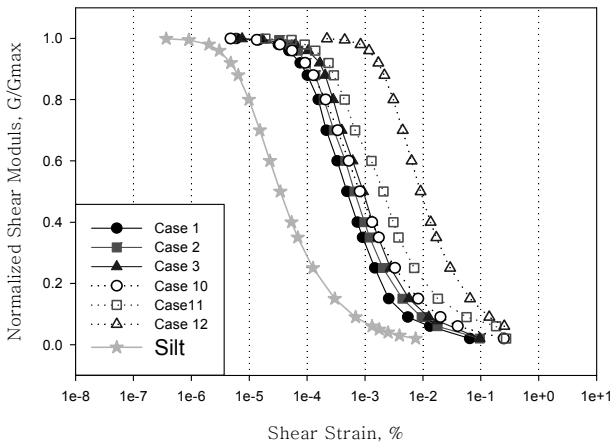


그림 2. 전단변형률에 따른 정규화 전단탄성계수의 상관관계 (함수비 20%일 경우, 주입률 변화에 따른 그래프)

시체의 평균 G/Gmax는 0.4이고, 28일 양생한(Case 10, Case 11, Case 12)공시체의 평균 G/Gmax는 7일 양생한 경우에 비해 0.24 증가한 0.68이다. 사질토에 밀크 그라우트 주입율이 증가함에 따라 G/Gmax가 증가하는 양상으로 나타나 양생일이 증가할수록 G/Gmax가 증가하였다.

그림 3과 같이 사질토의 G/Gmax 감소곡선보다 그라우트를 주입한 공시체가 상당히 증가한 것을 볼 수 있다. 전단변형률이 1×10⁻³%일 때 7일 양생한(Case 4, Case 5, Case 6)공시체의 평균 G/Gmax는 0.34이고, 28일 양생한(Case 13, Case 14, Case 15)공시체의 평균 G/Gmax는 7일 양생한 경우보다 0.06 증가한 0.4이다. 사질토에 밀크 그라우트 주입율이 증가함에 따라 G/Gmax가 증가하는 양상이 나왔으며, 양생일이 증가할수록 G/Gmax가 증가하였다.

그림 4와 같이 사질토의 G/Gmax 감소곡선보다 그라우트를 주입한 공시체가 상당히 증가한 것을 볼 수 있다. 전단변형률이 1×10⁻³%일 때 7일 양생한(Case 7, Case 8, Case 9)공시체의 평균 G/Gmax는 0.33이고, 28일 양생한(Case 16, Case 17, Case 18)공시체의 평균 G/Gmax는 7일 양생한 경우에 비해 0.14 증가한 0.47이다. 사질토에 밀크 그라우트 주입율이 증가함에 따라 G/Gmax가 증가하는 양상으로 나타났으

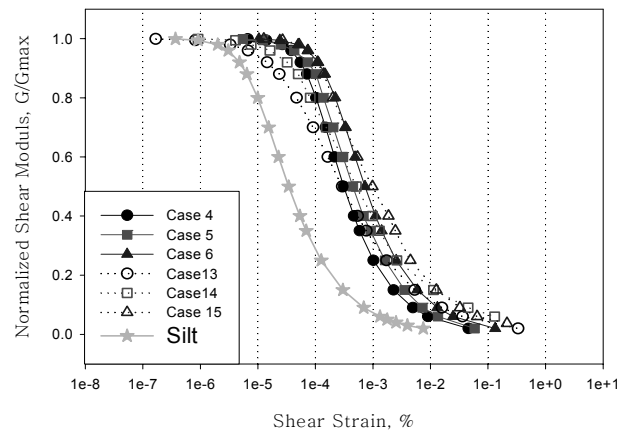


그림 3. 전단변형률에 따른 정규화 전단탄성계수의 상관관계 (함수비 25%일 경우, 주입률 변화에 따른 그래프)

표 2. 공진주 시험 결과에 대한 Ramberg-Osgood curve fitting 매개변수

Case NO.	R	C	Case NO.	R	C
Case 1	2.815	3.04×10 ⁶	Case 10	2.553	1.84×10 ⁵
Case 2	2.946	9.38×10 ⁷	Case 11	1.569	2.15×10 ⁶
Case 3	3.015	1.05×10 ⁷	Case 12	3.275	2.16×10 ⁵
Case 4	2.948	5.08×10 ⁷	Case 13	2.020	8.15×10 ³
Case 5	3.192	2.25×10 ⁸	Case 14	1.665	3.93×10 ⁴
Case 6	3.015	4.00×10 ⁷	Case 15	3.165	3.99×10 ⁷
Case 7	4.485	5.73×10 ⁷	Case 16	1.583	2.34×10 ⁴
Case 8	3.541	6.15×10 ⁷	Case 17	1.785	3.12×10 ⁴
Case 9	3.024	6.54×10 ⁷	Case 18	2.154	2.84×10 ⁴

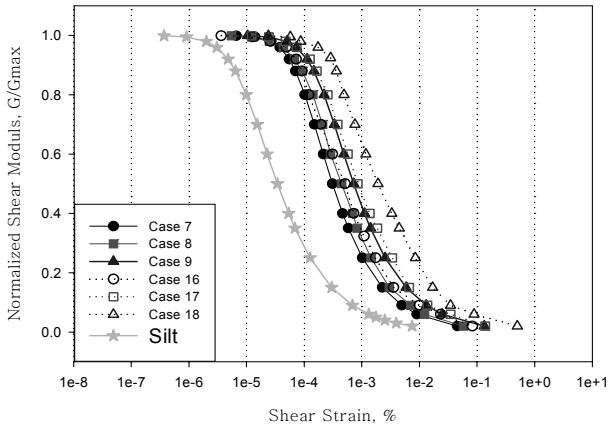


그림 4. 전단변형률에 따른 정규화 전단탄성계수의 상관관계 (함수비 30%일 경우, 주입률 변화에 따른 그래프)

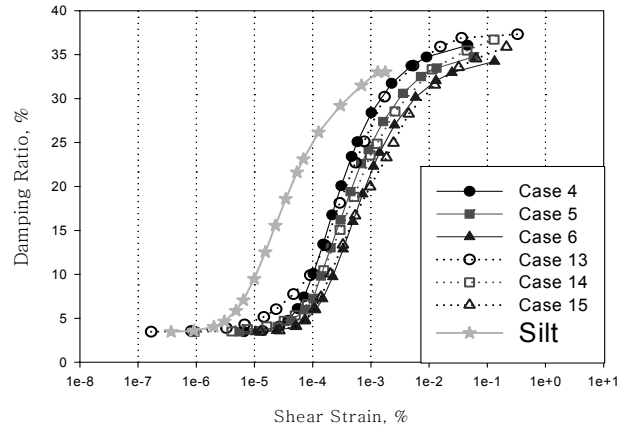


그림 6. 전단변형률에 따른 정규화 전단탄성계수의 상관관계 (함수비 25%일 경우, 주입률 변화에 따른 그래프)

며 양생일이 증가할수록 G/Gmax가 증가하였다.

3.2.2 감쇠비 곡선 비교

그림 5와 같이 사질토의 감쇠비보다 그라우트를 주입한 공시체가 상당히 감소한 것을 볼 수 있다. 전단변형률이 $1 \times 10^{-3}\%$ 일 때 7일 양생한(Case 1, Case 2, Case 3)공시체의 평균 감쇠비는 21.9%이고, 28일 양생한(Case 10, Case 11, Case 12) 공시체의 평균 감쇠비는 11% 감소한 10.9%이다. 사질토에 밀크 그라우트 주입율이 증가함에 따라 감쇠비가 감소하는 양상이 나왔으며 양생일이 증가 할수록 감쇠비가 감소하였다.

그림 6에서 나타나듯이 사질토의 감쇠비보다 그라우트를 주입한 공시체가 상당히 감소한 것을 볼 수 있다. 전단변형률이 $1 \times 10^{-3}\%$ 일 때 7일 양생한(Case 4, Case 5, Case 6)공시체의 평균 감쇠비는 24.9%이고, 28일 양생한(Case 13, Case 14, Case 15)공시체의 평균 감쇠비는 1.5% 감소한 23.4%이다. 사질토에 밀크 그라우트 주입율이 증가함에 따라 감쇠비가 감소하는 양상이 나왔으며 양생일이 증가 할수록 감쇠

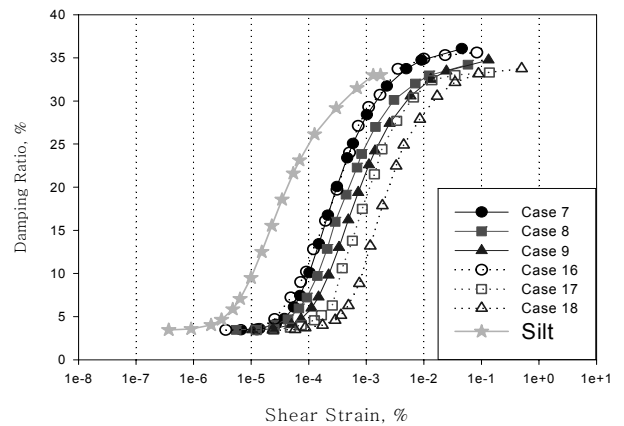


그림 7. 전단변형률에 따른 정규화 전단탄성계수의 상관관계 (함수비 30%일 경우, 주입률 변화에 따른 그래프)

비가 감소하였다.

그림 7과 같이 사질토의 감쇠비보다 그라우트를 주입한 공시체가 상당히 감소한 것을 볼 수 있다. 전단변형률이 $1 \times 10^{-3}\%$ 일 때 7일 양생한(Case 7, Case 8, Case 9)공시체의 평균 감쇠비는 25.1%이고, 28일 양생한(Case 16, Case 17, Case 18) 공시체의 평균 감쇠비는 5.4% 감소한 19.7%이다. 사질토에 밀크 그라우트 주입율이 증가함에 따라 감쇠비가 감소하는 양상이 나왔으며, 양생일이 증가할수록 감쇠비가 감소하였다.

표 3과 표 4는 전단변형률이 $1 \times 10^{-3}\%$ 일 때 각 공시체의 G/Gmax와 감쇠비를 나타낸 것이다. 그라우트의 양이 증가할수록 G/Gmax는 증가하였으나 감쇠비는 감소하였다. 공시체의 재령이 증가할수록 G/Gmax는 증가하였다. 7일 양생한 함수비 20%(Case 1, Case 2, Case 3)와 28일 양생한 함수비 20%(Case 10, Case 11, Case 12)의 감쇠비를 비교하면 확연히 감소하였지만, 함수비 25%와 30%에서는 20%의 변화만큼 차이는 보이지 않았다.

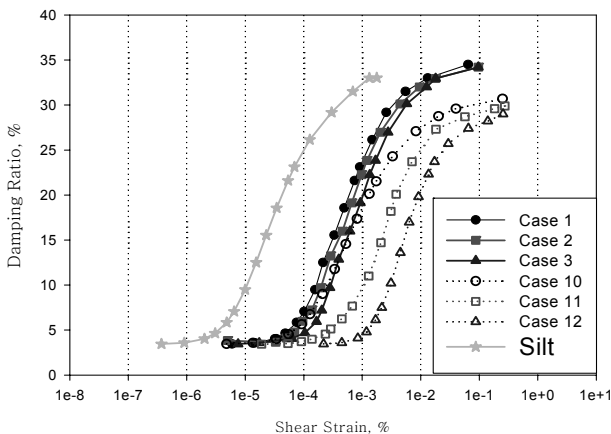


그림 5. 전단변형률에 따른 정규화 전단탄성계수의 상관관계 (함수비 20%일 경우, 주입률 변화에 따른 그래프)

표 3. 전단변형률 1×10^{-3} %일 때 G/Gmax

Case NO.	G/Gmax	Case NO.	G/Gmax
Case 1	0.33	Case 10	0.45
Case 2	0.39	Case 11	0.63
Case 3	0.48	Case 12	0.97
Case 4	0.26	Case 13	0.31
Case 5	0.33	Case 14	0.39
Case 6	0.42	Case 15	0.50
Case 7	0.25	Case 16	0.33
Case 8	0.32	Case 17	0.46
Case 9	0.42	Case 18	0.64

표 4. 전단변형률 1×10^{-3} %일 때 Damping Ratio

Case NO.	Damping Ratio, %	Case NO.	Damping Ratio, %
Case 1	24.1	Case 10	18.7
Case 2	22.2	Case 11	9.7
Case 3	19.5	Case 12	4.4
Case 4	28.4	Case 13	26.8
Case 5	24.8	Case 14	23.4
Case 6	21.4	Case 15	20.0
Case 7	28.3	Case 16	28.8
Case 8	25.2	Case 17	18.8
Case 9	21.7	Case 18	11.4

4. 결 론

본 연구에서는 밀크 그라우트로 보강된 사질토 지반의 동적특성을 알아보기 위하여 공진주 시험을 수행하였다. 동일한 함수비(20%, 25%, 30%)를 갖는 실트에서 밀크 그라우트의 주입율을 5%, 10%, 15%로 변화시켜 공진주 시험을 수행하였으며 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 순수 실트의 전단변형률은 기계진동이나 소규모 지진에 의해 변형률을 야기하는 소변형 영역인 $10^{-6} \sim 10^{-3}$ %에서 정규화 전단탄성계수 감소곡선이 나타났고, 밀크 그라우트를 주입한 모든 공시체는 향타, 발파 등의 건설진동과 중규모의 지진에서 변형률을 야기하는 중변형률인 $10^{-4} \sim 10^{-1}$ %에서 거동하였다.
- (2) 전단변형률이 1×10^{-3} %에서 실트의 G/Gmax는 0.07, 감

쇠비는 34.2%였으며, 7일 양생한 공시체와 28일 양생한 공시체 모두 전단탄성계수는 증가하였고 감쇠비는 감소하였다. 그라우트 주입율이 전단탄성계수와 감쇠비에 영향을 주는 것으로 판단된다.

- (3) 7일 경과한 공시체와 28일 경과한 공시체의 G/Gmax는 재령의 늘어날수록 증가하였으며, 감쇠비는 함수비가 20%인 공시체만 확연하게 감소하였다. G/Gmax와 감쇠비가 양생기간에 영향을 받는 것으로 판단되고 향후 양생기간에 대한 연구가 필요하다고 생각된다.

본 연구에서 동적 물성치는 밀크 그라우트의 주입율과 재령, 함수비에 따라 변화되는 것을 확인하였으며 향후 더 다양한 조건에서의 공진주 시험을 수행하여 보강된 지반에 대한 동적특성을 파악하는 것이 필요하다고 생각된다.

감사의 글

이 논문은 2009년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비지원에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

1. Dobry, R. and Vucetic, M.(1987), State-of-the-art Report: Dynamic Properties and Resonance of Soft Clay Deposits, *Proc. Int. Symp. On Geotechnical Engineering of Soft Soil*, Vol. 2, pp. 51 ~87.
2. Hardin, B. O. and Richart, F. E.(1963), Elastic Wave Velocities in Granular Soil, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations*, Vol. 9, No. SM1, pp. 33 ~65.
3. Hardin, B. O. and Black, W .L.(1968), Vibration Modulus of Normally Consolidated Clay, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations*, Vol. 94, No. SM2, pp. 353 ~369.
4. Rollins, K. M., Evans, M. D., Diehl, N. B. and Daily, W. D. (1998), Shear Modulus and Damping Relationship for Gravels, *Journal pf Geotechnical and geoenvironmental Engineering*, Vol. 124, No. 5, pp. 396 ~405.
5. Seed, H. B., Wang, R. T., Idriss, I. M. and Tokimatsu, K. (1986), Modulus and Damping Factors for Dynamic Analysis of Cohesionless Soil, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations*, Vol. 112, No. 11, pp. 1016 ~1032.

(접수일: 2011. 3. 29 심사일: 2011. 4. 1 심사완료일: 2011. 4. 14)