

## 국내 준설매립토 지반의 동적변형특성

### Dynamic Deformation Characteristics of Korean Hydraulic-Fills Soil Deposits

김동수\*

Kim, Dong-Soo

추연욱\*\*

Choo, Yun-Wook

---

#### ABSTRACT

Because of the limited land in Korea, most of the projects require large-scale reclamation. The hydraulic-filled soil deposits are usually loose and susceptible to be liquified during earthquake. The dynamic deformation characteristics, which expressed by shear modulus and damping ratio are important to analyze the earthquake ground motion. In this paper, resonant column tests were performed on five hydraulic filled soils in Korea, and the deformational characteristics at both small and medium strains were investigated. The coefficients in the Hardin equation to predict the representative maximum shear modulus and modulus reduction curve are also proposed.

---

#### 1. 서론

최근 비약적인 경제성장과 더불어 수많은 사회간접시설이 건설됨에 따라 많은 양의 건설부지가 필요하게 되었다. 그러나 공급가능한 양질의 건설부지가 한정되어 있어, 우리나라에서도 이제 본격적으로 열악한 지반상태를 갖는 해안, 간척지, 인공섬 등의 활용이 증대되고 있다. 서해안의 대규모 해안 매립지, 영종도 신공항 부지조성공사등과 같은 경우, 부지조성을 위하여 대규모 준설매립이 이루어지며 이 경우 흙입자가 수중에서 침전됨에 따라 입도분포의 분리현상과 함께 넓은 면적의 느슨한 사질토지반이 형성된다. 이런 느슨한 사질토 지반 위에 항만, 공장, 공항 등을 건설할 경우 시설물의 안정성과 사용성에 문제가 되며, 특히 지진하중 작용시 지반증폭, 지반의 액상화 현상 등에 의해 큰 피해를 입을 수 있다. 따라서, 지반의 지진시 동적거동평가가 필요하며 이때 매립지반의 동적변형특성의 결정은 매우 중요하다.

지반의 변형특성은 전단탄성계수와 감쇠비로 표현되고, 변형울크기에 따라 전단탄성계수는 감소하고 감쇠비는 증가하는 비선형거동을 보인다. 지진해석시 변형울크기 10<sup>-4</sup>%~1%영역에서의 동적변형특성이 필요하며 지반동역학 및 지진공학에서는 지반의 변형특성을 공진주/비틀전단시험기

---

\* 한국과학기술원 토목공학과 부교수, 정회원

\*\* 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

나 진동삼축압축시험을 이용하여 결정한다. 그러나, 이들 시험은 장비가 고가이고 전문적인 기술인에 의해 시험이 수행되므로 실험의 경제성과 가용성에 문제가 있다.

본 연구에서는 국내 5종의 준설패립토에 대하여 공진주시험을 수행하여, 선형영역에서의 최대전단탄성계수( $G_{max}$ )와 최소감쇠비( $D_{min}$ )에 대한 특성을 연구하고, 또한 변형율크기에 따른 전단탄성계수와 감쇠비의 변화를 연구하였다. 이들 연구를 바탕으로 대표적인 경험식을 제안하고자 한다.

## 2. 시료의 기본물성

본 연구에서는 충청남도 대산, 인천 영종도 국제공항부지 및 인천의 LNG인수기지의 준설패립토등, 서해안지역의 준설패립토를 채취한 후 공진주시험을 실시하여 준설패립토에 대한 변형특성을 평가하였다. 본 연구에서 적용한 준설패립토의 입도분포와 기본물성은 그림 1과 표 1에 나타내었다. Stokoe형의 공진주시험기를 사용하였으며, 시험장비 및 측정법은 참고문헌에 잘 설명되었다.(김동수, 1995)

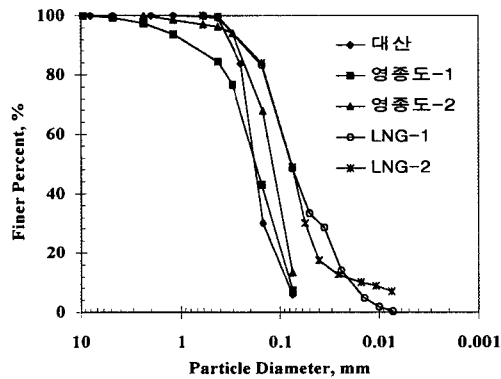


그림 1. 준설패립토의 입도분포

표 1 준설패립토의 기본물성

시료	흙분류	$D_{max}$ (mm)	$D_{95}$ (mm)	$D_{10}$ (mm)	Cc	Cu	PI(%)	#200통과량
대산	SP-SM	1.20	0.37	0.08	1.37	2.47	NP	5.9
영종도-1	SP-SM	9.52	1.45	0.07	0.98	3.0	NP	7.3
영종도-2	SM	2.36	0.35	-	-	-	NP	13.2
LNG-1	SM	0.60	0.36	0.02	1.05	4.88	NP	48.5
LNG-2	SM	0.60	0.36	0.02	1.57	5.07	NP	49.0

## 3. 준설패립토의 동적변형특성

### 3.1 최대전단탄성계수

최대전단탄성계수에 영향을 주는 인자로는, 간극비, 과압밀비, 구속응력, 초기전단응력비등으로 알려져 있다. Hardin(1978)은 최대전단탄성계수 예측식을 식 1과 같이 모델 하였다.

$$G_{\max} = A \cdot F(e) \cdot OCR^K \cdot P_a^{1-n} \cdot \sigma_o'^n \quad (1)$$

여기서,  $G_{\max}$  = 최대전단탄성계수,  $F(e) = 1/(0.3+0.7e^2)$   
 $OCR$  = 과압밀비,  $\sigma_o'$  = 유효 평균주응력  
 $K$  = 소성지수계수,  $A$  = 무차원계수  
 $n$  = 구속압영향계수,  $P_a$  = 대기압

그림 2는 대표적인 구속압-최대탄성계수관계를 나타낸다. 구속압이 증가함에 따라 최대전단탄성계수는 증가하고 대수축에서 선형적인 증가형태를 나타냈다. 또한 밀도가 증가함에 따라 최대전단탄성계수는 증가하였다.

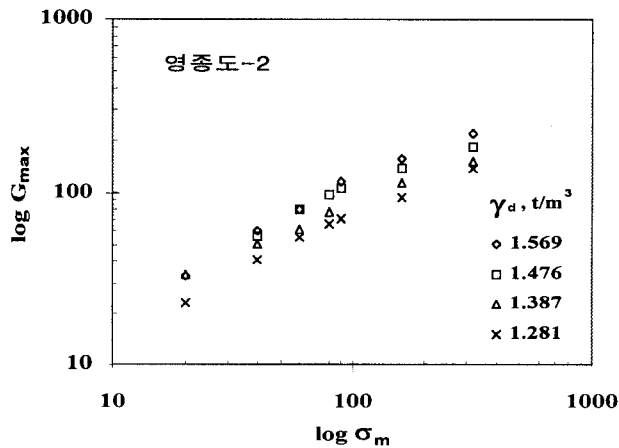


그림 2. 최대전단탄성계수에 대한 구속압과 밀도의 전형적인 영향

준설매립토에 대한 결과를 이용하여 Hardin식의 무차원계수(A)와 구속압영향계수(n)를 추정하였다. 준설매립토는 소성이 없는 사질토이므로, OCR의 영향은 무시하고, 각 시료에 대한 간극비를 고려하여  $G_{\max} \cdot P_a/F(e)$ 를 구할 수 있고, 대수- $G_{\max} \cdot P_a/F(e)$ 와 대수- $\sigma_o'/P_a$ 의 관계를 표시하면 그림 3과 같다. 그림 3에서와 같이 준설매립토시료의 관계가 하나의 선으로 수렴하고 있어서 준설매립토에 대한 대표적인 A, n값을 제안할 수 있었다. 각 시료에 대한 A, n값과 준설매립토 전체에 대한 값을 표 2에 정리하였다. 국내 준설매립지반의 최대전단탄성계수 예측식은 Hardin모형을 적용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$G_{\max} = 688 F(e) \cdot P_a^{0.35} \cdot \sigma_o'^{0.65} \quad (2)$$

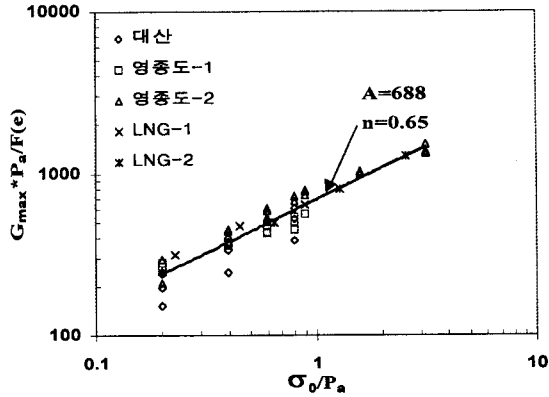


그림 3. 준설패립토의  $G_{max} * Pa / F(e)$ 와  $\sigma_v / Pa$

표 2. 준설패립토지반의 무차원계수 및 구속압영향계수

	대산	영종도-1	영종도-2	LNG-1	LNG-2	전체 준설패립토
A	586	562	745	688	667	688
n	0.68	0.46	0.61	0.51	0.68	0.65

### 3.2 최소감쇠비( $D_{min}$ )

공진주시험을 통해 얻은 저변형률 영역( $\gamma < 10^{-3}$  %)에서 준설패립토의 최소감쇠비는 그림 4와 같다. 준설패립토의 결과를 살펴보면 #200체의 통과량이 40%이상인 큰 LNG-1, 2 시료는 영종도시료보다 감쇠비가 큰 값을 보였다. 모든 시료에서 구속압에 따라 최소감쇠비가 감소하는 경향성을 보이거나 뚜렷하지 않고, 밀도의 영향도 규명하기 어려웠다. 좀더 많은 시료에 대하여 최소감쇠비의 영향을 규명할 필요성이 있다.

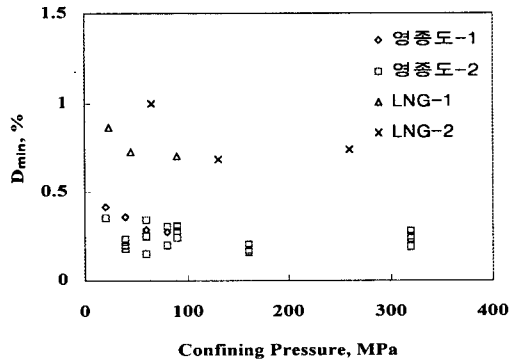


그림 4. 준설패립토의 최소감쇠비

### 3.3 정규화 전단탄성계수 감소곡선( $G/G_{max}$ )

지반의 전단탄성계수-변형율의 관계는 지반의 종류, 함수비, 구속응력, 하중주파수 등 다양한 조건에 따라서 매우 상이하게 나타나게 된다. 그러나 전단탄성계수를 최대전단탄성계수로 정규화한 정규화 전단탄성계수( $G/G_{max}$ )와 전단변형율과의 관계는 시료의 교란, 하중주파수 등에 무관하게 일정하게 나타나며, 시료의 종류(모래, 점토, 자갈 등)에 따라서 일정한 범위에서 결정되는 것으로 알려져 있다.

그림 5는 준설패립토의 전형적인 구속압-정규화 전단탄성계수 관계이다. 구속압 20 - 90 kPa의 영역에서는 정규화 전단탄성계수의 구속압에 따른 변화가 없으나 구속압이 160 kPa, 320 kPa로 증가하면 구속압의 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 따라서 구속압 20 - 90 kPa의 영역에서 하나의 대표곡선을 제안할 수 있다. 대부분의 준설패립지반이 10m미만이고 이 영역에서 지반이 받는 구속압은 대부분의 경우 100 kPa 이하로 판단되므로 제안된 대표곡선을 설계에 적용할 수 있으리라 판단된다.

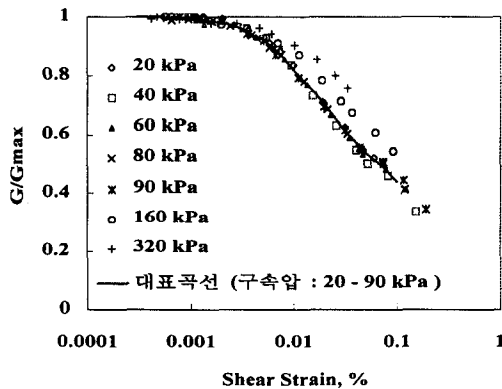


그림 5. 전형적인 구속압-정규화전단탄성계수 감소곡선

그림 6, 그림 7, 그림 8은 각기 다른 시료에 대한 정규화 전단탄성계수 감소곡선의 밀도에 대한 영향을 비교해 보았다. 대산과 영종도-1 시료의 경우에는 정규화 전단탄성계수가 밀도의 영향을 거의 받지 않는 것으로 나타나고 있다. 영종도-2시료의 경우는 밀도가 커짐에 따라 정규화 전단탄성계수가 작아지는 현상을 보이나, 그 차이는 건조단위중량이  $1.549t/m^3$ 인 경우를 제외하면 그다지 차이가 없는 경향을 보이고 있다. 따라서 제안되는 정규화 전단탄성계수 감소곡선은 밀도에 영향을 받지 않을 것으로 판단된다.

대산, 영종도-1, 영종도-2, LNG-1, LNG-2시료의 정규화전단탄성계수 감소곡선을 함께 표현하면 그림 9와 같다. 본 연구에서 적용된 준설패립토의 결과는 Seed와 Idriss의 모래시료에 대한 결과의 위쪽에 분포하고 있다. 따라서 국내 준설패립토지반의 정규화 전단탄성계수 적용시, Seed-Idriss곡선을 사용하는 것은 오류를 보일 수 있으며, 본 연구에서 결정된 정규화 전단탄성계수 감소곡선을 적용할 것을 제안한다.

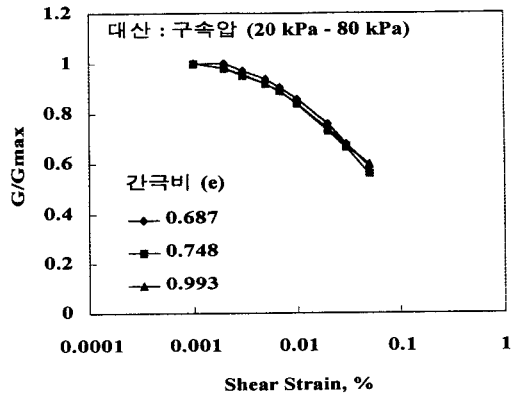
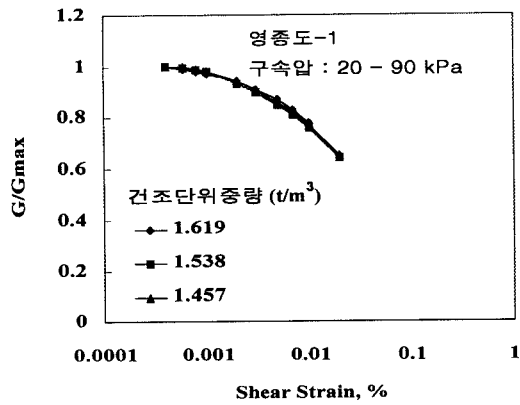


그림 6. 대산시료의 정규화전단탄성계수 감소곡선



1

그림 7. 영종도-1 시료의 정규화전단탄성계수 감소곡선

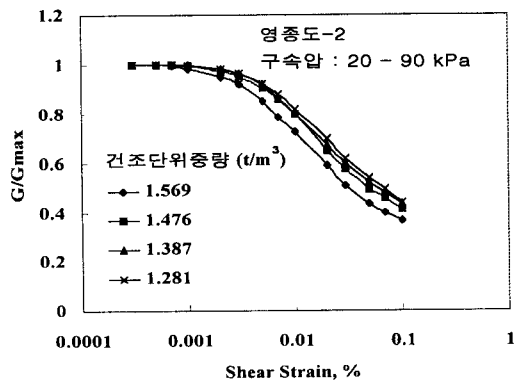


그림 8. 영종도-2 시료의 정규화전단탄성계수 감소곡선

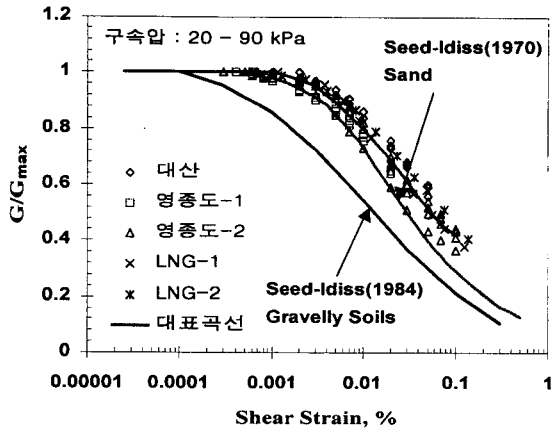


그림 9. 준설패립토의 정규화전단탄성계수 감소곡선(구속압 20-90kPa)

### 3.4 변형율크기에 따른 감쇠비

변형율크기에 따른 감쇠비의 밀도에 대한 영향을 살펴보기 위하여 영종도-2시료에 대해 건조 단위중량을 1.569, 1.476, 1.387, 1.281 t/m<sup>3</sup>으로 바꾸어 시험을 실시하여 구속압 160 kPa인 결과를 그림 10에 나타내었다. 밀도의 차이에 따라 많은 차이는 나지 않지만 밀도가 증가함에 따라 감쇠비가 증가하는 결과를 보였다.

그림 11은 구속압에 대한 감쇠비의 변화를 나타내었다. 90 kPa이하에서는 구속압의 영향이 뚜렷하지 않으나, 160kPa, 320kPa로 구속압이 증가함에 따라 구속압의 영향이 확연하게 나타나서 감쇠비가 작아지는 경향을 보였다. 따라서 깊은 층에서의 해석에서는 감쇠비에 대한 구속압의 영향을 고려하는 일이 필요하다고 판단된다.

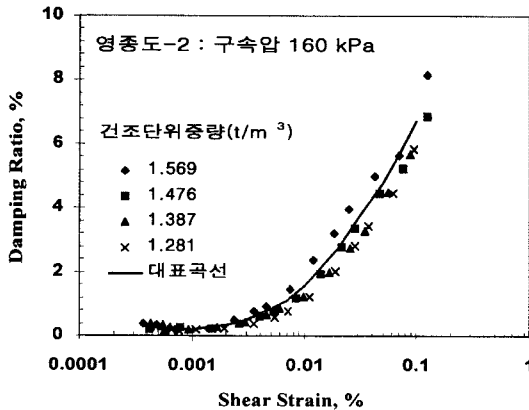


그림 10. 영종도-2 시료의 변형율크기에 따른 감쇠비(160 kPa)

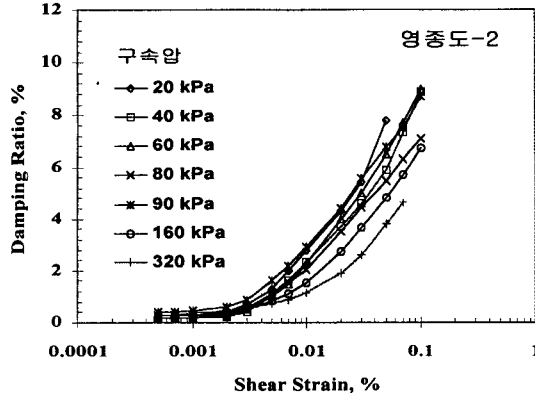


그림 11. 구속압에 따른 감쇠비의 변화

#### 4. 결론

본 논문에서는 서해안지역의 준설패립토에 대하여 공진주시험을 수행하여, 최대전단탄성계수와 최소감쇠비 및 변형율크기에 따른 전단탄성계수와 감쇠비의 변화를 연구하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 준설패립토의 최대전단탄성계수는 밀도와 구속압의 증가에 따라 증가함을 확인하였고, Hardin의 모델의 무차원계수(A)와 구속압영향계수(n)를 688, 0.65로 각각 제안하였다.
2. 준설패립토의 최소감쇠비는 구속압에 따라 감소하는 경향성을 보인다.
3. 준설패립토의 정규화 전단탄성계수 감소곡선은 구속압 20kPa-90kPa 범위에서는 구속압에 대한 영향을 보이지 않아, 준설패립토에 대한 대표곡선으로 제안할 수 있었다. 제안된 대표곡선도 Seed-Idriss가 제안한 사질토에 대한 곡선의 위쪽에 분포하였다.
4. 준설패립토의 고변형율 감쇠비는 밀도에 대한 영향은 미소하였고, 구속압 90 kPa이하에서는 구속압에 영향을 받지 않았다.

#### 5. 감사의 글

본 연구는 건설교통부 프로젝트(RND-96-0007)와 서울대학교 지진공학연구센터 과제(97KS-1031-02-03-3)의 연구비지원에 의한 것으로 이에 깊은 감사를 드립니다.

#### 6. 참고문헌

1. 김동수 (1995), "공진주/비틀전단(RC/TS) 시험기를 이용한 건조 사질토의 변형특성," 한국지반공학회지, 제11권, 제1호, pp. 101-112..
2. Hardin, B. O. (1978), "The Nature of Stress-Strain Behavior of Soil," Proceedings, Geotech. Eng. Div. Specialty Conference on Earthquake Eng. and Soil Dynamics, Vol. 1 ASCE, Pasadena, June, pp. 3-90.
3. Seed, H. B., Wang, R. T., Idriss, I. M. and Tokimatsu, (1984), Moduli and Damping Factors for Dynamic Analysis of Cohesionless Soils, Earthquake Engineering Research Center, Report