

1-g 진동대시험을 이용한 진동하중을 받는 포화된 모래지반의 투수계수 변화 추정

Estimation of the Permeability Variation in Saturated Sand Deposits Subjected to Shaking Load Using 1-g Shaking Table Test

하 익 수*¹ Ha, Ik-Soo

김 명 모*² Kim, Myoung-Mo

Abstract

The purpose of this study is to understand the dissipation pattern of excess pore pressure after liquefaction and to estimate the variation in permeability during shaking load, which should be known for settlement predictions of the ground undergoing liquefaction. In this study, 1-g shaking table tests were carried out for 5 different kinds of sands, all of which had high liquefaction potentials. During the tests excess pore pressure at various depths, and surface settlements were measured. The measured dissipation curve of the excess pore pressure after liquefaction was linearly simulated using the solidification theory, and from the analysis of the slopes of linearly simulated curves, the correlation between dissipation velocity and the gradation characteristics was obtained. By substituting this correlation and the measured settlement to the dissipation velocity equation recommended in solidification theory, the permeability during dissipation was calculated, which was used for estimating the permeability variation during shaking load. The dissipation velocity of excess pore pressure after liquefaction had a linear correlation with the effective grain size divided by the coefficient of uniformity. The permeability during dissipation and liquefaction increased by 1.1~2.8 times and 1.4~5 times compared to the initial permeability of the original ground, respectively. And the amount of increase became greater as the effective grain size of the test sand increased and the coefficient of uniformity decreased.

요 지

액상화후 과잉간극수압 소산양상을 파악하고 액상화를 겪는 지반의 침하량을 예측하는데 필요한 진동하중이 작용하는 동안의 포화된 모래지반의 투수계수 변화를 추정하기 위하여, 액상화 가능성이 큰 5종류의 모래에 대해 1-g 진동대시험을 수행하였다. 시험과정중에 깊이별 과잉간극수압과 지표면 침하량을 계측하였다. 액상화후 계측된 과잉간극수압 소산곡선을 침강이론으로 선형모사하였고 선형모사된 소산곡선의 기울기를 분석함으로써 소산속도와 입도특성치와의 상관관계를 얻었다. 이러한 상관관계와 계측된 침하량을 침강이론에서 제안한 소산속도식에 대입하여 소산과정중 투수계수를 역산하였고 산정된 소산과정중 투수계수를 이용하여 진동하중이 작용하는 동안의 투수계수 변화를 추정하였다. 액상화후 과잉간극수압의 소산속도는 유효입경을 균등계수로 나눈 값에 선형적 상관관계를 갖는 것으로 나타났으며, 이러한 상관관계를 이용하여 구한 소산과정과 액상화동안의 투수계수는 원지반의 초기투수계수에 비해 각각 1.1~2.8배, 1.4~5배 증가하였다. 그리고 이러한 증가 정도는 시험모래의 유효입경이 클수록 균등계수가 작을수록 더 커짐을 알 수 있었다.

Keywords : Dissipation pattern, Excess pore pressure, Liquefaction, Permeability, Shaking table test

*1 정희원, 서울대학교 공과대학 지구환경시스템 공학부 박사과정 (Member, Ph.D Candidate, Dept. of Civil Engrg., Seoul National Univ., molafrog@snu.ac.kr)

*2 정희원, 서울대학교 공과대학 지구환경시스템 공학부 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Seoul National Univ.)

1. 서론

동적하중을 받는 포화된 모래지반의 침하는 진동초기부터 발생하나 초기액상화에 이르는 시점까지의 침하량은 전체침하량의 20~30%로 상대적으로 작으며, 침하량의 대부분은 진동중이나 진동이후 과잉간극수압 소산과정 중에 발생하게 된다.

지반이 초기액상화 상태에 이르면 흙입자간의 접촉상태를 상실한다. 이것은 지반내 더 손쉬운 흐름의 경로를 만들어 지반의 투수계수를 증가시킨다. 이러한 투수계수의 증가는 액상화 전면을 더 빠르게 전파시켜 과잉간극수압의 발생과 소산과정에서 더 깊은 지반 영역에 영향을 줌으로써 더 큰 침하를 유발시킨다. 그러므로, 1992년 Arulanandan 등은 정수두시험 결과로 얻은 원지반의 초기투수계수는 동적하중이 작용하는 동안의 전체 침하거동을 반영할 수 없고 동적실험 결과와 잘 일치

하는 정확한 수치해석적 예측을 위해서는 발생 과잉간극수압이 큰 부분에서 투수계수를 보다 큰 값으로 증가시키는 것이 타당하다고 하였다. 따라서, 이러한 동적하중이 작용하는 동안의 투수계수 변화 정도를 파악하는 연구가 필요할 것으로 판단된다.

Oda(1972)는 개별요소법을 이용한 수치모형시험을 통해 전단시 모래시료의 입자구조변화에 대한 연구를 수행하였다. 전단파괴시 개별요소의 입자간 접촉면에 수직인 벡터의 방향이 주응력방향으로 집중되고 그 크기가 커지는 것으로부터, 전단파괴시 입자구조는 최소주응력방향의 기존 접촉상태를 상실하여 주응력방향에 평행한 기둥구조(columnlike structure)를 이루고 이러한 인접한 기둥구조 사이의 간극들은 서로 연결되어 연결간극(connected voids)구조를 이룬다고 하였다(그림 1). 이러한 결과로부터 전단시 지반의 주응력방향 투수계수 증가 가능성을 시사 하였다.

Arulanandan과 Sybico(1992)는 원심모형시험을 수행하였고 동적하중이 작용하는 동안, 지반내부의 전기저항치를 측정하였다. 그들은 전기저항 측정치로부터 투수계수 변화 정도를 추정하였는데, 액상화동안의 투수계수는 원지반의 초기투수계수에 비해 약 3.5배 증가한다고 하였다(그림 2). 또한, 이러한 변화된 투수계수를 사용한 수치해석결과가 원심모형시험결과로 예측된 침하량을 보다 정확히 예측할 수 있다고 하였다(그림 3).

Jafarzadeh와 Yanagisawa(1995)는 1-g 진동대시험을 수행하였고 모형지반 바닥면에서의 과잉간극수압 시간이력에 Darcy의 법칙을 적용하는 방법으로 투수계수변화를 추정하였다. 그리고, 초기액상화시 투수계수는 초기 원지반투수계수에 비해 5~6배 증가한다고 하였다.

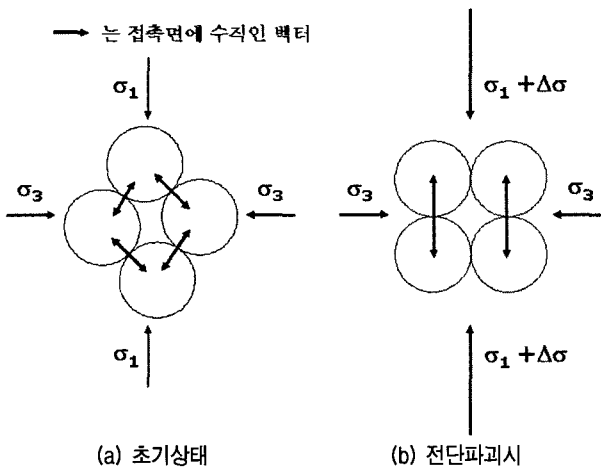


그림 1. 전단시 모래시료의 입자구조 변화(Oda, 1972)

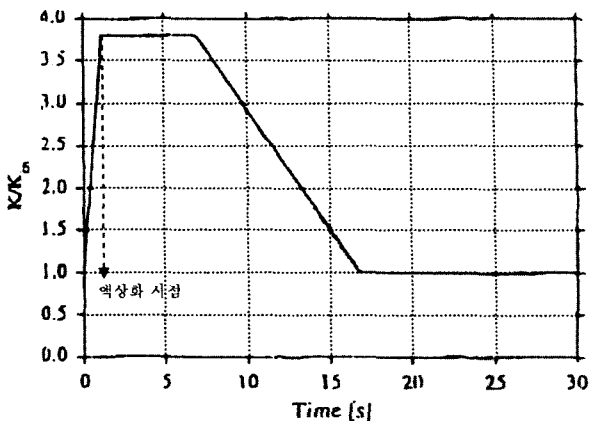


그림 2. 원심모형시험결과 추정된 액상화로 인한 투수계수의 변화 (Arulanandan 등, 1992)

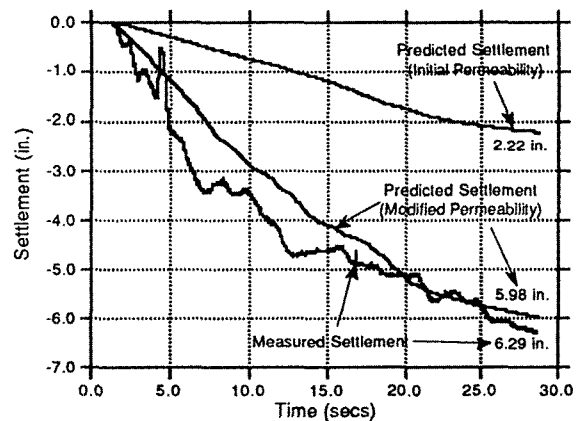


그림 3. 예측침하량과 계측침하량 시간이력 비교(Arulanandan 등, 1992)

이상의 연구들은 투수계수 변화 추정방법이나 특정시료에 대한 투수계수 변화 추정면에서는 좋은 성과를 주었으나 상이한 입도특성을 갖는 모래들의 투수계수 변화에 대한 연구는 여전히 필요하다.

본 연구에서는 액상화 가능성이 크고 상이한 입도특성을 갖는 5종류의 모래에 대해 1-g 진동대시험을 수행하였다. 시험과정 중, 깊이별 과잉간극수압과 지표면 침하량을 계측하였다. 계측된 액상화후 과잉간극수압 소산곡선을 침강이론을 이용하여 선형모사하였고 선형모사된 소산곡선의 기울기를 분석함으로써 소산속도와 입도특성치와의 상관관계를 얻었다. 이러한 상관관계와 계측된 침하량을 침강이론에서 제안한 소산속도식에 대입하여 소산과정 중 투수계수를 역산하였고 산정된 소산과정 중 투수계수를 이용하여 진동하중이 작용하는 동안의 투수계수 변화를 추정하였다.

2. 시험개요

길이 192cm, 폭 44cm, 높이 60cm의 모형토조에 40cm

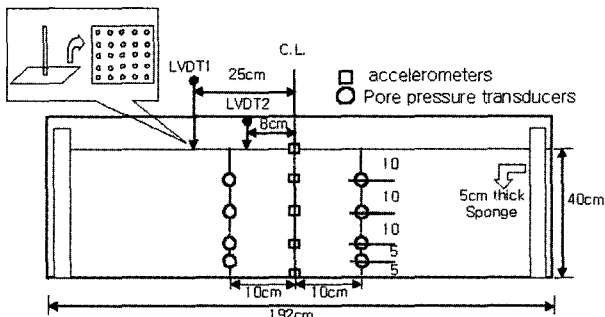


그림 4. 모형지반과 계측기 배치도

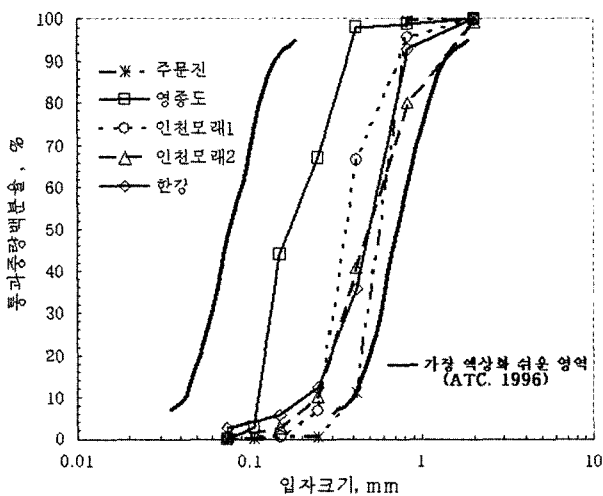


그림 5. 시험모래의 입도분포곡선

두께로 모형지반을 조성하였다(그림 4). 시험에 사용된 모래는 5종류로서 주문진모래, 영종도모래, 인천모래1, 인천모래2, 한강모래이다. 그림 5는 시험에 사용된 모래의 입도분포곡선을 나타낸 그림이다. 그림 5에서 굵은 실선사이에는 ATC(Applied Technology Council, 1996)에서 제안한 가장 액상화하기 쉬운 영역을 나타내며 시험에 사용된 모래들은 모두 이 영역에 포함됨을 확인할 수 있다. 모래지반은 수중침강법으로 조성하였다. 시험모래의 기본물성치는 표 1과 같다. 그림 6은 시험에 사용된 모래의 정수두 시험 결과를 보여준다. 정수두시험 결과는 원지반의 초기투수계수와 소산후 최종단계에서의 투수계수를 정하는데 이용되기 때문에 시험시료의 상대밀도는 지반조성법과 유사하게 물을 채운 몰드에 건조된 모래를 붓고 고무망치로 진동을 주어 원하는 상대밀도를 맞추었다.

계측기는 간극수압계, LVDT, 가속도계를 설치하였고 계측기 설치위치는 그림 4에 나타내었다.

입력지진 하중은 4Hz의 싸인 정현파를 사용하였다. 모든 시험모래에 대한 예비시험결과로부터 모형지반 전체가 액상화가 발생하고 발생한 과잉간극수압이 진동 중에는 소산되지 않도록 하기 위해서 입력가속도의 크기와 진동지속시간은 각각 0.15g와 5초로 하였다. 또한, 최초의 진동시험이 끝나고 발생한 과잉간극수압이 완전히 소산될 만큼 충분한 시간을 기다린 후 모형지반에 재차 진동을 가함으로써 초기상대밀도 변화에 따른 과잉간극수압 소산양상을 살펴보았다. 시험동안에 계측된 지표면 침하량은 지반의 평균적인 상대밀도, 간극비와 간극비의 변화량을 산정하는데 이용되었다.

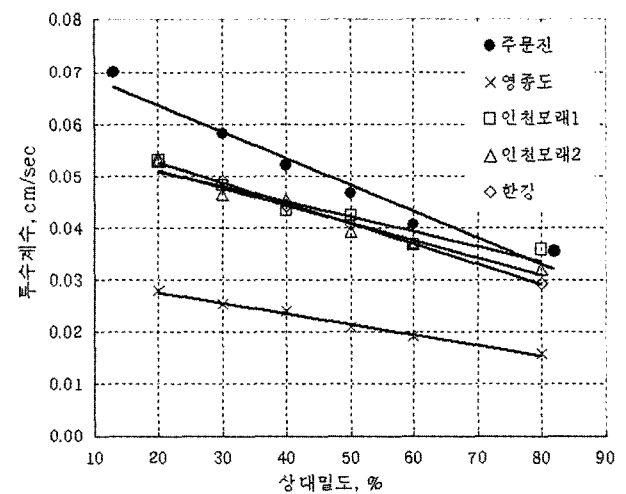


그림 6. 시험모래의 정수두시험 결과

표 1. 시험모래의 기본물성치

시험모래	초기상대밀도(%)		유효입경 (D ₁₀ , mm)	평균입경 (D ₅₀ , mm)	균등계수	비중	최대건조 단위중량 (kN/m ³)	최소건조 단위중량 (kN/m ³)
	1차진동	2차진동						
주운진모래	30	50	0.40	0.57	1.53	2.64	15.68	13.72
영종도모래	20	40	0.11	0.16	1.95	2.64	15.88	13.23
인천모래(1)	21	43	0.24	0.34	1.67	2.57	16.27	14.11
인천모래(2)	23	45	0.23	0.50	2.47	2.67	17.35	14.90
한강모래	20	41	0.21	0.50	2.57	2.61	17.05	14.11

3. 포화된 모래지반의 액상화후 과잉간극수압 소산양상

3.1 소산곡선 모사

침강이론(Florin과 Ivanov, 1961)에 따르면, 액상화된 지반에서 액상화후 과잉간극수압의 소산과정은 모래입자의 침강에 의한 견고화과정으로 설명된다. 이 이론에는 모래입자와 침강이 완료된 견고화된 지반은 비압축성이라는 가정조건을 포함하고 있다. 액상화된 지반에서 특정 깊이에서 발생한 과잉간극수압은 침강이 발생하기 전에는 일정하나 침강이 이루어지기 시작하는 시점부터는 시간에 대해 선형적으로 감소하여 정수압상태의 값에 도달함으로써 견고화과정이 종료된다. 본 연구에서는 시험지반의 두께가 40cm로써 비교적 얇고 추가적인 상재하중이 작용하지 않기 때문에 침강이론에서의 비압축성 지반이라는 가정을 충족하는 것으로 판단되고 또한, 침강이론이 액상화후 과잉간극수압 소산곡선을 선형으로 모사한다는 점에서 그 적용이 용이하므로 침강이론을 이용하여 액상화 후 과잉간극수압 소

산곡선을 모사하였다.

자세한 모사절차는 이전의 연구(하익수 등, 2003)에 제시되어 있으나 그 절차를 간략히 설명하면 다음과 같다.

그림 7은 견고층전면의 이동속도를 구하는 방법을 설명하기 위해, 예로서 나타낸 인천모래1의 계측된 깊이별 과잉간극수압 시간이력 곡선이다. 그림 7에서 P1, P2, P3는 지표면으로부터 각각 30, 20, 10cm 깊이에 위치한 간극수압계의 위치를 표시한 점이며, ○로 표시된 점들은 깊이별 과잉간극수압의 소산시점으로 잡은 점들이다. 견고층전면의 이동속도는 이 점들을 측정할 시간을 x축으로, 측정점의 측정깊이를 y축으로 하여 도시한 점들을 선형회귀한 직선의 기울기(그림 7에서 m으로 표시)로 구한다. 소산 종료시점, t_f는 아래 식 (1)로써 구한다.

$$t_f = \frac{H}{m} \quad (1)$$

여기서, H는 모형지반의 전체높이이고 m은 견고층 이동속도이다.

그리고, 그림 8에서처럼 D점과 대상지반의 전체높이,

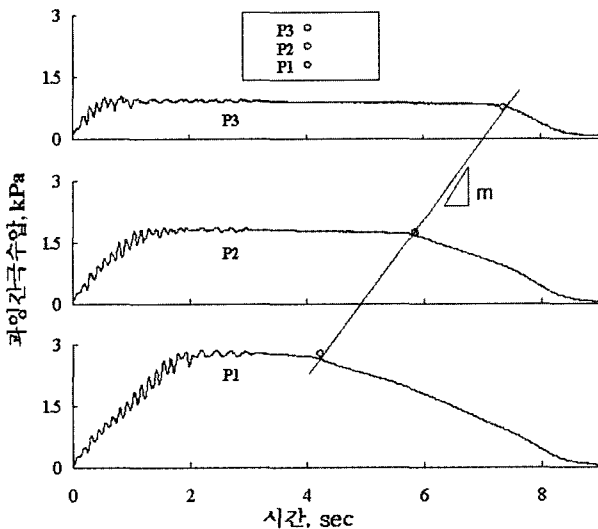


그림 7. 인천모래1의 깊이에 따라 계측된 과잉간극수압 시간이력

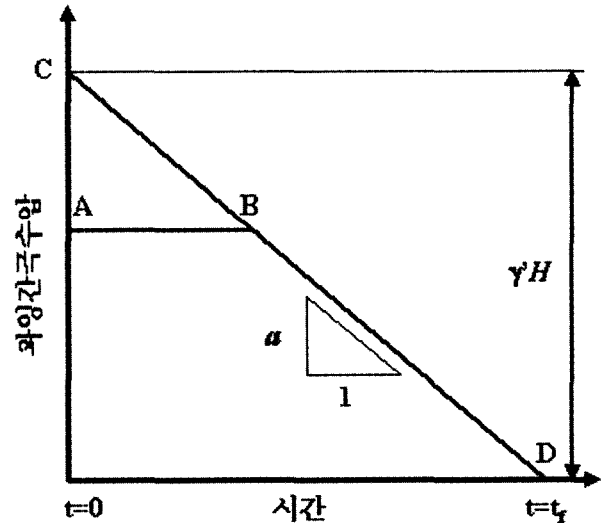


그림 8. 모형지반 바닥/입의 깊이에서의 과잉간극수압 시간이력 모사

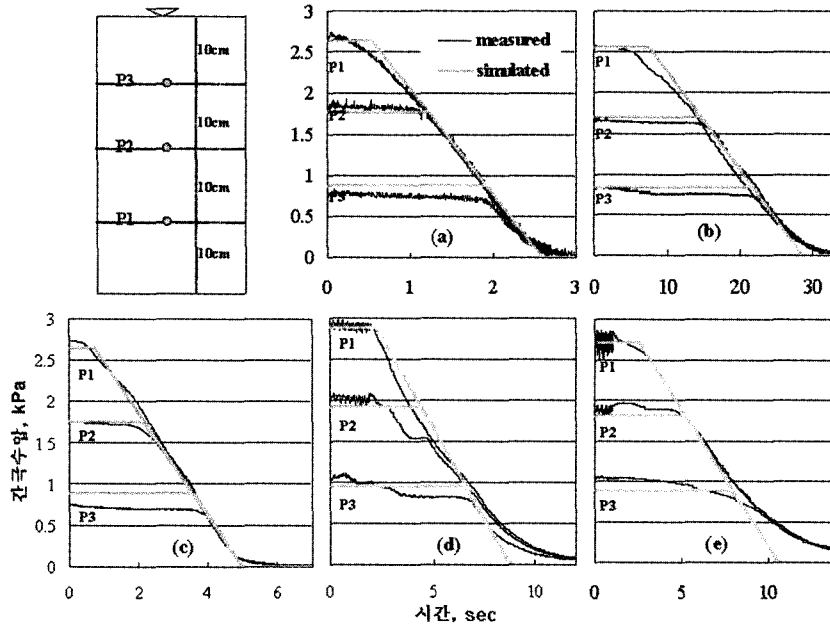


그림 9. 침강이론으로 모사한 액상화후 과잉간극수압 소산곡선과 계측곡선과의 비교
(a)주문진모래, (b)영종도모래, (c)인천모래1, (d)인천모래2, (e)한강모래

H에 수중단위중량을 곱한 값인 C점(액상화시 예상되는 바닥면에서의 과잉간극수압)을 연결하면 바닥면에서의 과잉간극수압소산곡선이 모사된다. 따라서 임의 깊이에서의 과잉간극수압 소산곡선은 그 깊이에서의 액상화시 과잉간극수압(그림 8의 A점)에서 바닥면에서의 과잉간극수압 소산곡선과 만나도록(B점) 수평으로 선을 그어 A-B-D 점을 연결하면 모사된다. 그리고 이러한 소산곡선의 기울기(소산속도), a 는 아래 식 (2)로 구할 수 있다.

$$a = \frac{\gamma' H}{t_f} \quad (2)$$

여기서, γ' 은 액상화된 지반의 수중단위중량이다.

3.2 모사결과 및 소산양상

그림 9는 앞 절에서 설명한 모사방법으로 모사한 액상화후 과잉간극수압 소산곡선과 계측된 소산곡선을 함께 나타낸 그림이다. 그림 9의 (a)~(e)에서 보듯이 이러한 모사방법은 전반적으로 계측치를 잘 모사하는 것으로 나타났다. 따라서, 선형으로 모사한 소산곡선의 기울기, a , 즉 소산속도를 가지고 액상화후 과잉간극수압의 소산양상을 살펴보았다.

과잉간극수압의 소산속도는 유효입경이 클수록 균등

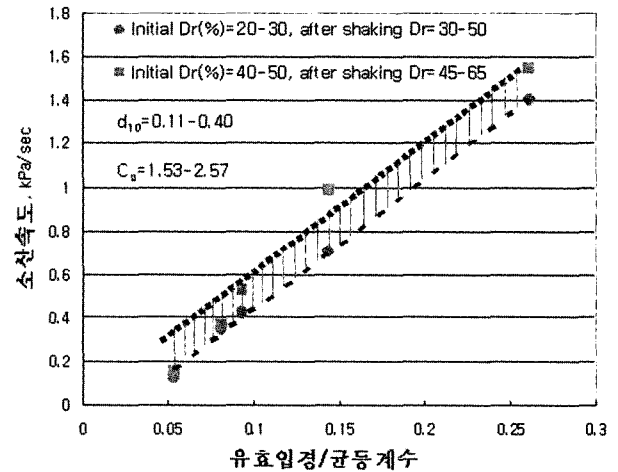


그림 10. 소산속도와 입도특성치 상관관계

계수는 작을수록 증가하는 것으로 나타났다. 그림 10은 이러한 두가지 입도특성치를 함께 고려하여 소산속도와의 상관관계를 나타낸 것인데 소산속도는 유효입경을 균등계수로 나눈 값에 선형적인 관계를 가지는 것으로 나타났다. 또한, 초기상대밀도의 증가는 이러한 상관곡선을 소산속도가 증가하는 방향으로 이동시키는 역할을 하였다. 그림 10에서 두 직선은 각각 초기상대밀도 20~30%, 40~50%일 때의 결과에 대한 회귀곡선이다. 그림 10에서 이러한 소산속도는 시험모래의 유효입경과 균등계수에 따라 최대 14배(회귀곡선기준)까지도 차이가 나는 것을 볼 수 있다.

4. 진동하중을 받는 포화된 모래지반의 투수계수 변화

4.1 소산과정중 투수계수

흡입자간의 접촉상태를 상실함에 따라 액상화동안의 투수계수는 증가하고 이러한 접촉상태는 소산동안에 회복됨으로써 투수계수는 다시 감소하게 된다. 따라서, 액상화동안 뿐만 아니라 소산동안의 투수계수는 원지반의 초기투수계수(k_{ini} 로 정의)와는 다르다. 과잉간극수압 소산곡선의 기울기, a 는 아래 식 (3)으로 표현될 수 있다(Florin 등, 1992; Scott, 1986).

$$a = \frac{(\gamma')^2(1 + e_1)k}{\gamma_w(e_1 - e_2)} \quad (3)$$

여기서, γ' 는 액상화지반의 수중단위중량, γ_w 는 물의 단위중량, e_1 과 e_2 는 각각 액상화된 지반과 견고화된 지반의 간극비이다. 그리고, k 는 투수계수이다.

식 (3)에서 소산곡선의 기울기, a 는 계측곡선을 모사한 곡선의 기울기로부터 구할 수 있고, 간극비와 간극비의 변화량은 시험모래들의 비중과 계측된 지표면 침하량을 이용하여 산정할 수 있기 때문에 이 값들을 식 (3)에 대입함으로써 소산동안의 투수계수, k 를 역산하여 얻을 수 있다. 이러한 투수계수는 진동후 소산과정 동안의 평균적인 투수계수를 나타내는데, 본 연구에서는 소산투수계수(k_{dp})로 정의한다. 또한, 초기투수계수에 대한 소산투수계수의 비를 소산투수계수비(k_{dp}/k_{ini})로 정

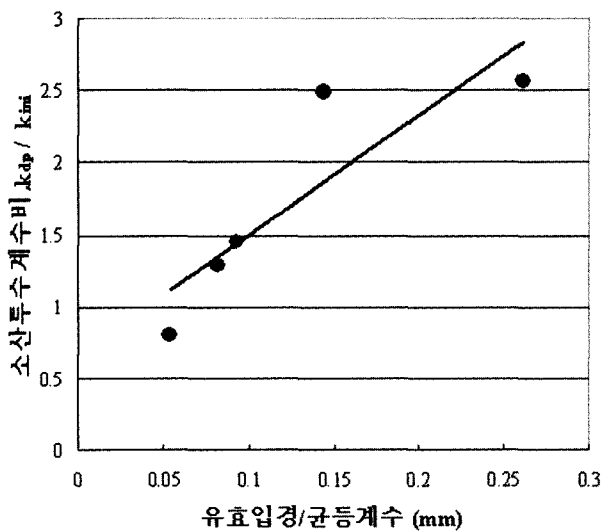


그림 11. 소산투수계수비와 입도특성치와의 상관관계

의한다.

그림 11은 소산투수계수비와 유효입경을 균등계수로 나타낸 값과의 상관관계를 보여준다. 그림 11에서 소산투수계수비가 1이 아닌 사실로부터 소산투수계수와 초기투수계수는 차이가 있음을 알 수 있다. 이러한 차이는 시험모래의 입도특성치에 영향을 받는 것으로 나타났다. 소산투수계수비는 시험모래의 유효입경과 균등계수 값에 따라 1.1~2.8 범위(회귀곡선 기준)의 값을 가진다. 따라서 침강이론을 적용하여 액상화후 과잉간극수압 소산곡선을 모사하고자 할 때, 소산동안의 투수계수는 유효입경과 균등계수를 고려하여 재산정되어야 할 것으로 판단된다.

4.2 진동하중이 작용하는 동안의 투수계수 변화 추정

본 절에서는 앞절에서 언급했던 소산투수계수비와 입도특성치와의 상관관계를 이용하여 액상화동안의 투수계수를 산정하였다. 초기투수계수(k_{ini})는 그림 6의 정수두시험결과를 이용하여 구했다. 소산종료된 지반의 투수계수는 침하량 계측치에 기초하여 산정된 상대밀도값과 그림 6의 정수두시험결과를 이용하여 산정하였다. 모든 시험에서 계측된 지표면 침하율은 초기액상화에서 진동종료시까지 일정하였다(지표면으로 나오는 물의 유출율이 일정). 따라서, 이 기간동안의 투수계수는 이전의 연구(Arulanadan 등, 1992)와 마찬가지로 일정하다고 가정할 수 있다. 또한, 초기상태에서 초기액상화에 이르는 동안의 투수계수는 선형적으로 증가하고 진동 직후부터 소산종료시점까지의 투수계수는 선형적으로 감소한다고 가정할 수 있다(Arulanadan 등, 1992). 이러한 가정조건과 함께, 소산투수계수는 그림 11을 이용하

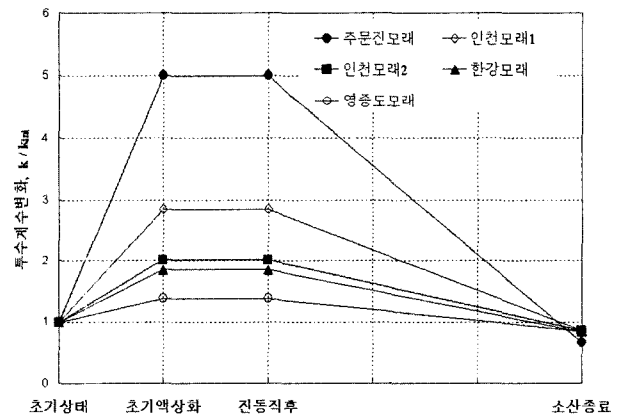


그림 12. 진동하중이 작용하는 동안의 투수계수 변화

여 구하고 이렇게 구한 소산투수계수는 소산기간동안의 평균값을 나타내기 때문에 액상화동안의 투수계수를 산정할 수 있다.

그림 12는 이러한 방법을 이용하여 구한 진동하중이 작용하는 동안의 투수계수변화 추정 결과를 보여준다. 액상화동안의 투수계수는 시험모래의 유효입경과 균등계수값에 따라서 초기 원지반의 투수계수에 비해 1.4~5 배 증가하였다. 즉, 주문진모래의 경우 액상화동안 투수계수는 초기투수계수에 비해 5배 증가한 반면, 영종도모래의 경우에는 진동하중동안 투수계수의 변화는 거의 없는 것으로 나타났다.

5. 결론

본 연구에서는 액상화 가능성이 크고 상이한 입도특성(유효입경=0.11~0.40mm, 균등계수=1.53~2.57)을 갖는 5종류의 모래에 대해 1-g 진동대시험을 수행하였다. 시험과정중, 깊이별 과잉간극수압과 지표면 침하량을 계측하였다. 그리고 그 시험결과를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 액상화후 과잉간극수압 소산속도는 유효입경을 균등계수로 나눈 값에 선형적인 상관관계를 가진다. 또한 지반의 초기상대밀도 증가는 이러한 상관곡선을 소산속도가 증가하는 방향으로 이동시키는 역할을 하였다.
- (2) 액상화후 과잉간극수압 소산동안의 투수계수는 원지

반의 초기투수계수와는 다르며, 그 차이는 시험모래의 D_{10}/C_u 값이 증가함에 따라 증가하였다. 소산과정중 투수계수는 원지반의 초기투수계수에 비해 1.1~2.8 배 증가하였다.

- (3) 포화된 모래지반에서 액상화동안의 투수계수는 원지반의 초기투수계수에 비해 1.4~5배 증가하였고 증가 정도는 시험모래의 유효입경이 클수록 균등계수가 작을수록 더 크게 나타났다.

참 고 문 헌

1. 하익수, 박영호, 김명모(2003), "포화된 모래지반의 액상화후 과잉간극수압 소산양상", 한국지진공학회 학술발표회 논문집, 제7권, 제2호, pp.90-97.
2. Applied Technology Council(1996), *Improved Seismic Design Criteria for California Bridges : Provisional Recommendations*, ATC-32, California Department of Transportation, pp.92.
3. Arulanandan, K. and Sybico, J.(1992), "Post-Liquefaction Settlement of Sand-Mechanism and In situ Evaluation", *Proceedings of the 4th Japan-U.S. Workshop on Earthquake Resistant Design of Life Facilities and Countermeasures for Soil Liquefaction*, Vol.1, pp. 239-254.
4. Florin, V.A. and Ivanov, P.L.(1961), "Liquefaction of Saturated Sandy Soils", *Proceedings of the 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, pp.107-111.
5. Jafarzadeh, F. and Yanagisawa, E.(2001), "Settlement of Sand Models under Unidirectional Shaking", *Proceedings of the 1st Conf. on Earthq. Geotech. Engrg.*, Vol.2, pp.693-698.
6. Oda, M.(1972), "The Mechanism of Fabric Changes During Compressional Deformation of Sand", *Soils and Foundation*, Tokyo, 12(2), pp.1-18.
7. Scott, R. F.(1986), "Solidification and Consolidation of a Liquefied Sand Column", *Soils and Foundation*, 26(4), pp.23-31.

(접수일자 2003. 10. 10, 심사완료일 2003. 12. 10)