

손상잠재력을 이용한 에너지-과잉간극수압 발현 모델 개발

Development of energy-based excess pore pressure generation model using damage potential

박근보¹⁾, Keunbo Park; 김수일²⁾, Sooil Kim; 김기풍³⁾, Kipoong Kim; 이재진⁴⁾, Chaejin Lee

¹⁾ 연세대학교 토목공학과 박사후과정, Post Doc., Dept. of Civil Engineering, Yonsei University

²⁾ 연세대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Yonsei University

³⁾ 연세대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Yonsei University

⁴⁾ 연세대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Yonsei University

SYNOPSIS : The main objective of this paper is to develop an improved model for the analysis of liquefaction potential and to predict excess pore pressure (EPP) using the proposed model that can simulate behavior of saturated sand under earthquake loading conditions. The damage concept is adopted for the development of the proposed model. For the development of the model, a general formulation based on experimental results and damage potential using cumulative absolute velocity (CAV) is proposed for a more realistic description of dynamic responses of saturated sand. Undrained dynamic triaxial tests are conducted using earthquake loading conditions. Based on test results, the NCER-NCW function in terms of w_d and CAV is developed. Procedure for the evaluation of EPP and determination of model parameters for the proposed model is presented as well. For the determination of initial liquefaction, the minimum curvature method using the NCS-NCW curve is proposed. It is observed that predicted initial liquefaction using the proposed method agrees well with measured initial liquefaction. From results of additional undrained dynamic triaxial tests, it is seen that predicted EPP generation using the proposed model agrees well with measured results for earthquake loading cases.

Key words : Liquefaction, dissipated energy, excess pore pressure, cumulative absolute velocity, damage potential.

1. 서 론

1964년 Niigata 지진으로부터 액상화 발생 메카니즘에 대한 상세한 연구가 시작된 이후로, 미국 및 일본 등 지진 연구의 선진국가에서는 자국의 특성상 많은 지진자료 및 지진관련 시험자료를 토대로 경험적 평가방법을 계속 수정보완하고 있다. 그러나 기존의 액상화 평가방법은 지진력과 지반 저항력의 최대값만을 비교하므로 불규칙한 지진력에 의한 실제 지반의 동적 거동을 충분히 반영하지 못하고 있다. 현재 실내시험 수행시 대부분의 경우 실지진력을 이용하기보다 등가전단응력과 등가반복 재하횟수로 표현된 정현파의 진동하중을 사용하여 이를 토대로 지진규모별 액상화 저항응력비를 산정하는 기존의 응력비교법이 일반적이다. 이는 실내진동시험을 통해 얻을 수 있는 시간에 따른 간극수압의 변화, 변형률 및 응력 등의 다양한 실험 결과를 효율적으로 이용하지 못하는 것이며, 불규칙한 지진의 지진규모나 지속시간 등에 따른 지진특성 변화가 지반에 미치는 영향을 제대로 반영하고 있지 못한 것이다.

최근 지진에 의한 액상화 현상에 있어 간극수압의 변화 및 토립자 내부의 소산에너지 변화 관계에 관

한 연구가 계속되고 있다. 소산에너지 개념은 진동전단하중이 재하되는 경우, 포화사질토에서 발생하는 토립자의 미세구조의 재배열과 그에 따른 에너지 소산에 대한 연구에 기초를 두고 있다. 이러한 연구는 Nemat-Nasser와 Shokooch (1979)에 의해 처음 시작된 이래로, Mostagel과 Habibaghi (1979), Davis와 Berrill (1982, 1985, 2001) 등에 의해 여러 경험적 관계 모델들이 제안되었다. 하지만 기존의 모델은 정현하중을 이용한 실험결과를 분석하여 이루어진 것으로 불규칙한 지진과가 갖는 특성을 반영하지 못하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 실제 지진하중을 대신한 정현하중을 통해 구해진 실내실험의 데이터에 기반한 대부분의 기존 간극수압발현 모델들과는 달리 지진 시 포화 사질토의 거동특성을 보다 정확히 규명하기 위하여 실지진 하중과 같은 불규칙한 진단하중을 재현할 수 있는 정밀한 진동삼축시험과 손상 영역을 이용하여 불규칙한 실지진하중과 정현하중을 모두 고려한 합리적인 간극수압발현 모델로 김(2007)에 의해 제안된 모델의 발전된 형태이다. 특히 지진하중의 경우 하중형태에 따라서 과잉간극수압의 변화가 수식화 되기 어려운 점을 고려하여 정규화 누적절대속도, 누적된 응력, 과잉간극수압비와 소산에너지를 도입하여 액상화 저항특성을 나타내도록 하였다. 또한 개발된 모델을 이용한 과잉간극수압 예측기법과 모델변수 및 초기액상화 예측식을 제안하였다. 개발된 모델의 타당성은 추가 실내진동삼축시험을 수행하여 실내진동삼축시험 결과와 비교검토하고 기존의 과잉간극수압 발현모델과의 비교검토를 통하여 밝혔다.

2. 손상잠재력

손상잠재력 (damage potential)은 지진에 대한 지반 능력의 정도를 평가하는데 중요한 계수로서 사용되고 있다 (Naeim과 Anderson 1993). 지반의 손상잠재력은 입자의 상대적인 강도, 과잉간극수압, 외력 등 여러 가지의 형태로 나타낼 수 있는데 손상을 대표하는 계수로는 Arias intensity (Arias 1970), energy response spectra, 그리고 strong motion duration 값(Trifunac와 Novikova 1994) 등이 있다.

최근 누적 절대 속도 (cumulative absolute velocity, CAV)가 좀 더 기술적으로 완벽하고 분별력 있는 계수 (EPRI 2006; Kramer와 Mitchell 2006)로서 사용되고 있다. 지진에 의한 지반의 강도 및 손상의 정도를 나타내는 계수로서 활용되고 있는 CAV는 EPRI (1988)에서 처음 사용하였고 다음과 같이 절대 지진 가속도의 시간적분으로 정의되며 잠재적으로 저진동수의 운동에 민감한 반면, 손상을 주지않는 고진동수 운동에는 둔감한 특성을 지닌다.

$$CAV = \int_0^t |a(t)| dt \quad (1)$$

여기서 t = 시간, $a(t)$ = 가속도

3. 제안된 과잉간극수압 모델

3.1 손상영역의 응력분포

지진이 발생하는 동안에 흙 요소는 응력과 과잉간극수압 변화의 결과로서 손상의 정도가 변화한다. Tohgo와 Itoh (2005)에 의하면 손상은 손상영역의 확장에 의해 설명되며 완전손상 (completely damaged)과 진행손상(progressively damaged) 영역으로 구성된 손상의 영역과 비손상 (undamaged) 영역으로 구성된다. 하중이 증가하면 비손상영역은 점점 감소하고 완전 파괴인 경우에는 이 영역은 사라진다. 그러나 완전손상과 진행손상 영역의 범위는 점점 증가하고 완전 파괴인 경우에는 완전 손상영역만이 존재한다. 이 때 하중을 받는 공시체에 작용하는 응력 분포는 두 영역으로 나뉜다. 이 두 영역에 작용하는 응력 분포는 첫째로 비손상 영역에의 공시체에 작용하는 응력 분포와 현재의 손상의 정도를

가지고 있는 완전손상과 진행손상 영역에 작용하는 응력 분포 이다.

손상과 비손상영역에 작용하는 응력 분포는 CAV 가 지진에 의한 강도와 손상 정도를 측정할 수 있는 기준으로 나타내어짐으로 CAV 로 산출할 수 있다. 그러나 CAV 를 사용하는 것은 지진파의 형태에 따라 CAV 의 값이 달라지므로 이를 정규화 하기 위해 CAV 를 지진의 전체 발생구간에서의 CAV 값인 CAV_{max} 로 나눈 가중함수 d_{CAV} 를 다음과 같이 정의하여 손상 정도를 측정할 수 있는 기준으로 정의한다.

$$d_{CAV} = \frac{CAV}{CAV_{max}} = \frac{\frac{A}{m} \cdot \int_0^t |\sigma(t)| dt}{\frac{A}{m} \cdot \int_0^{t_{max}} |\sigma(t)| dt} \quad (2)$$

여기서 CAV_{max} = 전체 하중의 가진 시간에서의 CAV 값

A = 면적

m = 질량

$\int_0^t |\sigma(t)| dt$ = 현재 상태까지의 누적 하중

t = 시간

t_{max} = 전체 하중의 가진 시간.

가중함수 d_{CAV} 가 0인 경우 공시체의 손상이 없는 상태이거나 이전에 어떠한 하중도 받지 않은 상태이다. d_{CAV} 가 1인 경우는 완전 파괴 상태를 나타낸다. d_{CAV} 가 0과 1 사이의 경우는 손상과 비손상 영역이 공존하는 경우로 계속해서 하중이 가해지고 있는 경우를 나타낸다. 따라서 현재의 손상 영역에 작용하는 응력 분포의 합이 공시체 전체에 작용하는 응력과 같으며 다음과 같이 정의 된다.

$$\sigma = \sigma_{pd} + \sigma_{ud} = d_{CAV} \cdot \sigma + (1 - d_{CAV}) \cdot \sigma \quad (3)$$

여기서 σ = 가해진 하중

σ_{pd} = 손상 영역에서의 응력

σ_{ud} = 비손상 영역에서의 응력

d_{CAV} = CAV 가중함수

식 (2)와 (3)은 전체 하중영역에 대한 지반의 손상상태 및 현재의 응력상태를 나타낸다.

액상화는 응력 반전이 발생함으로서 과잉간극수압이 증가하는 것으로 손상 정도의 과정으로 표현된다 (Kramer 등 2002). 따라서 공시체에 작용하는 현재의 과잉간극수압 분포는 d_{CAV} 로 나눌 수 있다.

하중을 받을 때 공시체는 과잉간극수압에 따라서 변형하며 마침내 파괴에 이른다. 이때 과잉간극수압 분포가 d_{CAV} 로 표현되기 때문에 손상 영역에 작용하는 과잉간극수압과 비손상 영역에 작용하는 과잉간극수압으로 구성된다. 과잉간극수압이 증가하는 동안, 손상영역은 증가하며 비손상 영역은 감소한다. 그

러므로 과잉간극수압의 분포는 다음과 같이 정의 한다.

$$u = u_{pd} + u_{ud} = d_{CAV} \cdot u + (1 - d_{CAV}) \cdot u \quad (4)$$

여기서 u = 과잉간극수압

u_{pd} = 손상 영역에서의 과잉간극수압

u_{ud} = 비손상 영역에서의 과잉간극수압

d_{CAV} = CAV 가중함수

3.2 누적응력, 과잉간극수압과 소산에너지

공시체 내부의 손상은 부분손상이 점점 증가하여 파괴에 도달한다. 이러한 손상을 해석하는데 있어서 일반적으로 손상과 비손상영역의 거동에 관한 연구가 다양하게 진행되고 있다. 본 연구에서는 공시체의 강도 감소로 인한 공시체의 파괴형태를 확인 할 수 있고 또한 공시체의 강도 거동이 비손상영역에서 좌우되기 때문에 비손상 영역에서의 응력분포를 이용한다.

전체 하중 상태, 하중 크기 및 시간을 고려하기 위하여 식 (3)과 (4)의 비손상영역 부분을 적분하면 다음과 같다.

$$CS = \int_0^t [(1 - d_{CAV}) \cdot \sigma] dt \quad (5)$$

$$CEP = \int_0^t [(1 - d_{CAV}) \cdot u] dt \quad (6)$$

여기서, CS 와 CEP = 비손상 영역에서의 누적 응력과 과잉간극수압

t = 시간

d_{CAV} = 가중함수

σ = 가해진 하중

u = 과잉간극수압

식 (6)을 과잉간극수압 비로 다시 쓰면 다음과 같다.

$$CER = \int_0^t [(1 - d_{CAV}) \cdot r] dt \quad (7)$$

여기서 CER = 누적 과잉간극수압비

r = 과잉간극수압비

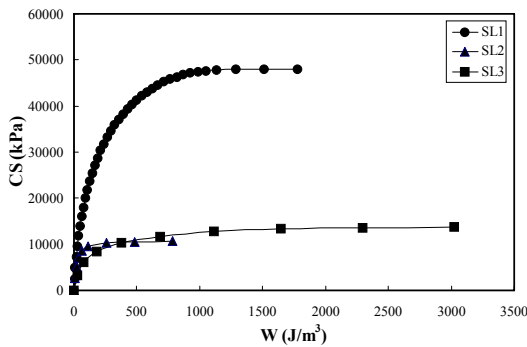
식 (5)와 (7)과 같은 형태로 나타내기 위하여 소산에너지를 적분하여 다음과 같이 정의한다.

$$W = \int_0^t w_d(t) dt \quad (8)$$

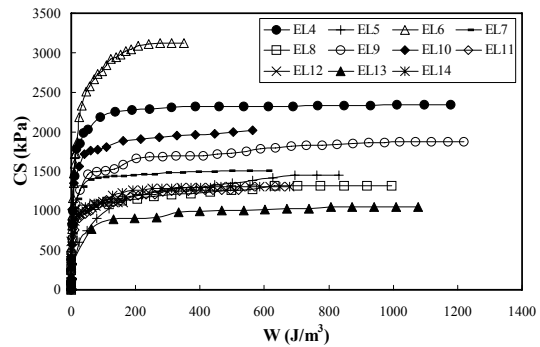
여기서 W = 누적 소산에너지

$w_d(t)$ = 소산에너지

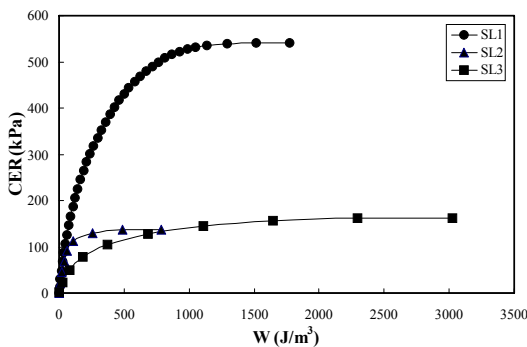
그림 1은 비손상 영역에서의 누적 소산에너지에 따른 누적응력 (CS)과 누적 과잉간극수압비 (CER)를 나타낸 것이다. 그림 1의 (a)와 (c)는 각각 정현파 시험 결과를 나타낸 것이고 그림 1의 (b)와 (d)는 지진파 시험 결과를 나타낸 것이다.



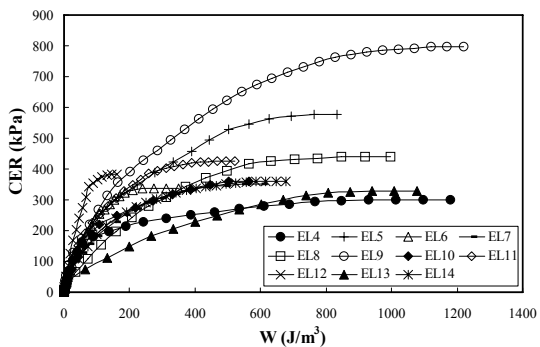
(a) 정현파에 대한 CS 곡선



(b) 지진파에 대한 CS 곡선



(c) 정현파에 대한 CER 곡선



(d) 지진파에 대한 CER 곡선

그림 1 CS 곡선과 CER 곡선

그림 1에서 모든 시험 결과가 초기에는 비선형으로 증가하다가 어떤 값이 후에서 일정하게 유지되는 것으로 나타났다. 따라서 그림 1의 상관관계가 하나의 수식으로 잘 나타나도록 하기 위하여 각각의 최대값으로 정규화 하면 다음과 같다.

$$CS_{Nor} = \frac{CS}{CS_{max}} \quad (9)$$

$$CER_{Nor} = \frac{CER}{CER_{max}} \quad (10)$$

$$W_{Nor} = \frac{W}{W_{max}} \quad (11)$$

여기서 CS_{Nor} , CER_{Nor} 과 W_{Nor} = 정규화 응력, 과잉간극수압과 소산에너지비

CS_{max} , CER_{max} 와 W_{max} = 최대누적응력, 누적과잉간극수압비과 누적소산에너지

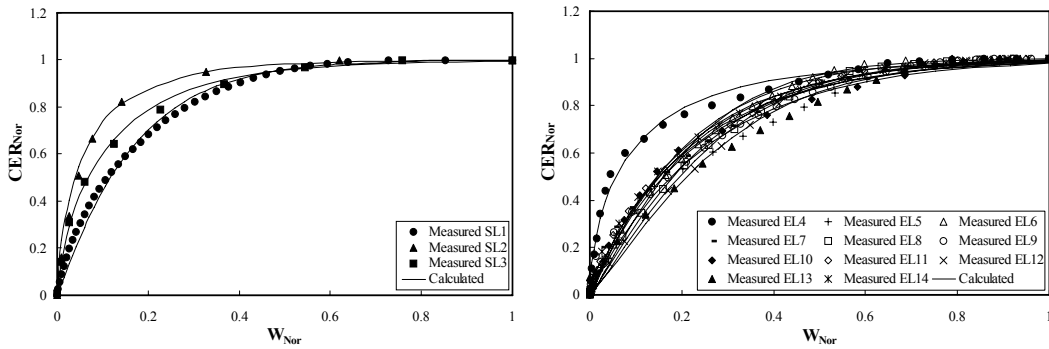
3.3 손상잠재력과 소산에너지에 기초한 과잉간극수압 모델

식 (10)과 (11)의 관계를 그림 2의 (a)와 (b)에 나타내면 모든 경향은 다음의 식으로 표현된다.

$$CER_{Nor} = 1 - \exp(-A_r W_{Nor}^{Z_r}) \quad (12)$$

여기서 A_r 과 Z_r = 상관계수

그림 2는 계산된 $CER_{Nor} - W_{Nor}$ 값과 실험결과에서 얻은 측정값을 같이 나타낸 것이다. 그림 2에 나타낸 바와 같이 측정값과 식 (12)에 의한 계산값이 잘 일치하였다.



(a) 정현파에 대한 CER_{Nor} 곡선

(b) 지진파에 대한 CER_{Nor} 곡선

그림 2 CER_{Nor} 곡선의 실험결과와 수식화결과

과잉간극수압비와 소산에너지의 관계로 표현하기위하여 식 (12)를 W_{Nor} 로 미분하면 다음과 같다.

$$\frac{dCER_{Nor}}{dW_{Nor}} = (A_r \cdot Z_r) \cdot W_{Nor}^{Z_r-1} \cdot \exp(-A_r \cdot W_{Nor}^{Z_r}) = K \quad (13)$$

미분된 식 (13)에 CER_{max} 와 W_{max} 를 곱해주면 간극수압비를 구할 수 있다.

$$r = K \cdot \left(\frac{w_d}{1 - d_{CAV}} \right) \cdot \left(\frac{CER_{max}}{W_{max}} \right) \quad (14)$$

식 (14)에서 CER_{max} 는 전체 과잉간극수압비 곡선을 알아야 구할 수 있다. 그러나 과잉간극수압비의 초기 액상화 발생시는 1이므로 식 (14)는 다음과 같다.

$$r = K \cdot \left(\frac{w_d}{1 - d_{CAV}} \right) \cdot \left[K \cdot \left(\frac{w_d}{1 - d_{CAV}} \right) \right]_{liq} \quad (15)$$

여기서 $\left[K \cdot \left(\frac{w_d}{1 - d_{CAV}} \right) \right]_{liq} = \left(\frac{CER_{max}}{W_{max}} \right)$

3.4 상관계수 A_r 과 Z_r 의 결정

대부분의 간극수압 모델에 있어서 상관계수가 충분히 체계적으로 연구되거나 적용되지 못하고 있다. 이것은 실내실험을 통해서 쉽게 정의되기 어렵고 입력 하중만을 고려해서 쉽게 결정되지 못하기 때문이다. 식 (12)에서 사용된 상관계수 A_r 과 Z_r 역시 시행 착오를 통해서만 찾을 수 있다. 따라서 입력하중과 실내실험 결과를 이용할 수 있는 체계적인 조사를 위하여 새로운 응력-시간이력 계수를 정의하고 이 계수와 A_r 과 Z_r 의 영향을 분석하여 쉽게 상관계수를 결정할 수 있도록 하였다. 새로운 응력-시간이력 계수는 다음과 같다.

$$d_{Nor,f} = \frac{\int_0^{t_{ini}} |\sigma(t)| dt}{t_{max} \cdot \sigma_{d,th}} \quad (16)$$

여기서 $d_{Nor,f}$ = 응력-시간 계수

$\sigma_{d,th}$ = 최대 축차응력

$\sigma(t)$ = 가해진 축차응력

t_{ini} = 초기 액상화 까지의 시간

t_{max} = 전체 하중 가진 시간

식 (16)은 초기 액상화 때까지의 응력-시간의 면적을 나타내며 또한 초기 액상화때 까지의 가진 하중의 총합을 의미한다. 초기 액상화는 다음장에서 설명하는 식 (21)에 의해 구해지므로 $d_{Nor,f}$ 을 구하면 쉽게 A_r 과 Z_r 을 결정 할 수 있다.

A_r 과 Z_r 을 결정하기 위하여 첫째로 후술하는 식 (21)와 (22)를 사용하여 초기 액상화 시점을 결정하고 $d_{Nor,f}$ 를 결정한다. 그림 3은 여러 가지 $d_{Nor,f}$ 에 따른 정현파와 실지진파로부터 유도된 A_r 과 Z_r 의 값에 대한 결과를 나타내었다. $d_{Nor,f}$ 계수가 증가함에 따라서 상관 계수 A_r 과 Z_r 이 증가하며 $d_{Nor,f}$ 와 직선관계가 성립한다. 이 함수 관계를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$A_r = 15.200 \cdot d_{Nor,f} - 0.9509 \quad (\text{정현하중}) \quad (17)$$

$$Z_r = 0.3364 \cdot d_{Nor,f} + 0.5396 \quad (\text{정현하중}) \quad (18)$$

$$A_r = 32.556 \cdot d_{Nor,f} + 2.4510 \quad (\text{지진하중}) \quad (19)$$

$$Z_r = 4.7065 \cdot d_{Nor,f} + 0.6811 \quad (\text{지진하중}) \quad (20)$$

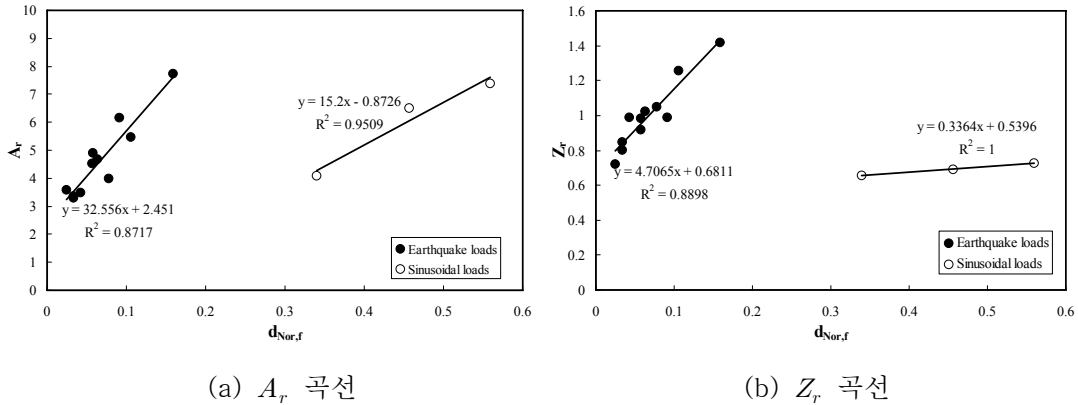


그림 3 상관계수 결정 곡선

3.5 초기 액상화의 결정

그림 4에서, $CS_{Nor} - W_{nor}$ 곡선은 식 (16)과 비슷하게 다음과 같이 간단한 지수 함수식으로 표현된다.

$$CS_{Nor} = 1 - \exp(-A_W \cdot W_{Nor}^{Z_W}) \quad (21)$$

여기서 A_W 와 $Z_W =$ 상관계수

$W_{Nor} =$ 정규화된 누적 소산에너지

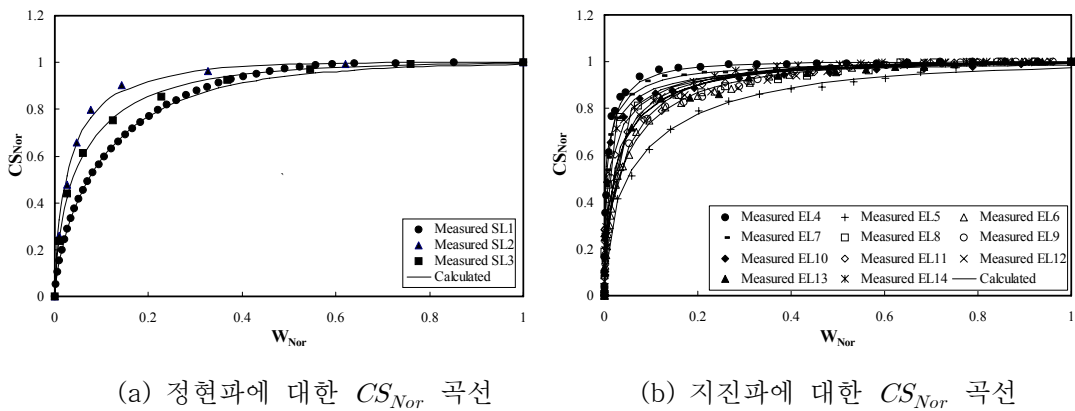


그림 4 $CS_{Nor} - W_{nor}$ 곡선의 실험결과와 수식화 결과

그림 4에 나타낸 실선은 식 (21)을 사용하여 얻은 곡선이며 실험에서 얻은 곡선과 비교한 결과가 잘 일치함을 나타내고 있다.

그림 4에서 CS_{Nor} 곡선의 변화는 공시체의 초기 상태부터 파괴 상태까지를 나타낸다. 이것은 동하중이 작용하는 동안 공시체의 불안정성 변화를 나타내는 것을 의미한다. 그림 4에서 CS_{Nor} 곡선은 CS_{Nor} 곡선이 불안정화($CS_{Nor} = 1$)되기 전 최소 곡률점이 나타나는데 이 곡률점을 $(CS_{Nor})_c$ 로서 정의 하며 초기액상화와 관련된 불안정성의 초기치 상태로 정의 한다. $(CS_{Nor})_c$ 를 찾기 위한 최소 곡률점 식은 다음과 같다.

$$R = \frac{(CS_{Nor})''}{(1 + (CS_{Nor})')^2)^{3/2}} \quad (22)$$

여기서 $R = CS_{Nor}$ 함수의 곡률점

$(CS_{Nor})'$ 과 $(CS_{Nor})'' =$ 첫 번째와 두 번째의 미분 도함수

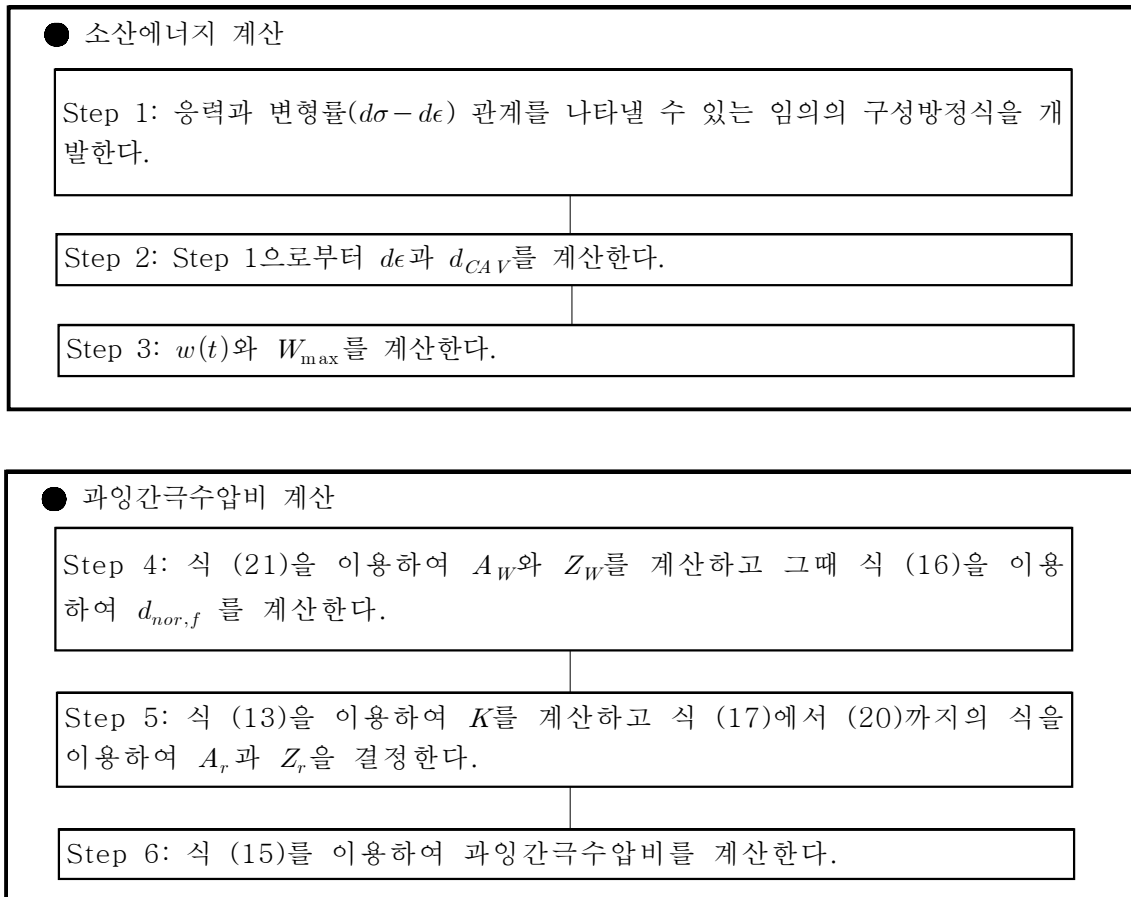


그림 5 과잉간극수압 예측과정

4. 제안된 과잉간극수압 모델의 예측과정

제안된 모델은 액상화 가능성이 있는 정현파나 특히 지진파와 같은 하중을 받는 경우 지반의 실제 거동을 나타내는 과잉간극수압을 예측한다. 제안된 모델에서의 예측 과정은 크게 소산에너지를 계산하는

부분과 과잉간극수압을 계산하는 부분으로 나타낼 수 있으며 이 과정은 그림 5에 나타내었다. 먼저 소산에너지를 계산하는 과정은 입력하중의 응력 증분으로 나눈 후 변형률 증분을 계산한다. 변형률 증분을 계산하면 소산에너지를 계산할 수 있다. 본 연구에서는 Kim (2003)이 제안한 방법을 사용하였으나 변형률 증분을 계산할 수 있는 어떠한 구성방정식을 써도 무방하다.

입력하중에 의해 d_{CAV} 를 계산할 수 있으며 식 (9)과 (11)에 의해 CS_{Nor} 과 W_{nor} 을 얻을 수 있다. 이때 A_w 와 Z_w , W_{max} 를 결정하고 초기 액상화를 결정한다. 결정된 초기액상화에 의해 $d_{Nor,f}$ 를 계산하면 A_r 과 Z_r 을 계산할 수 있으며 식 (15)에 의해 과잉간극수압비를 예측할 수 있다.

5. 제안된 모델의 증명

본 연구에서 제안한 모델을 증명하기 위하여 정현파하중과 지진파하중을 이용하여 추가로 실험을 수행하였다. 추가 실험에 사용된 상대밀도와 구속압은 각각 60%와 100 kPa이다. 이 증명과정에서는 실험에 의해 상관계수를 구하지 않고 입력하중만을 이용하여 제안된 모델 예측과정을 통하여 상관계수를 결정하고 실험에서 얻은 과잉간극수압비와 제안된 모델의 과잉간극수압비를 비교하였다. 또한 이때 기존의 간극수압모델 (Davis과 Berrill 2001; Liang 등 1995; Green 등 2000; Law 등 1990)을 같이 비교하였다.

그림 6에 제안된 모델과 기존의 모델 그리고 실험에서 나타난 과잉간극수압비의 분포를 나타내었다. 정현파와 지진파 하중 모두에 있어 기존의 모델보다는 본 연구에서 제안된 모델이 실험치와 잘 일치함을 알 수 있었다. 따라서 제안된 모델은 정현파와 지진파 형태의 하중에 의한 과잉간극수압 분포 모두를 잘 예측할 수 있을 것으로 판단된다. 특히 지진파와 같이 불규칙한 과잉간극수압비의 발현을 본 연구에서 제안한 모델이 잘 예측함에 따라 기존의 등가전단응력개념을 이용하기 위해 지진파를 정현파로 전환할 필요가 없을 것으로 판단된다.

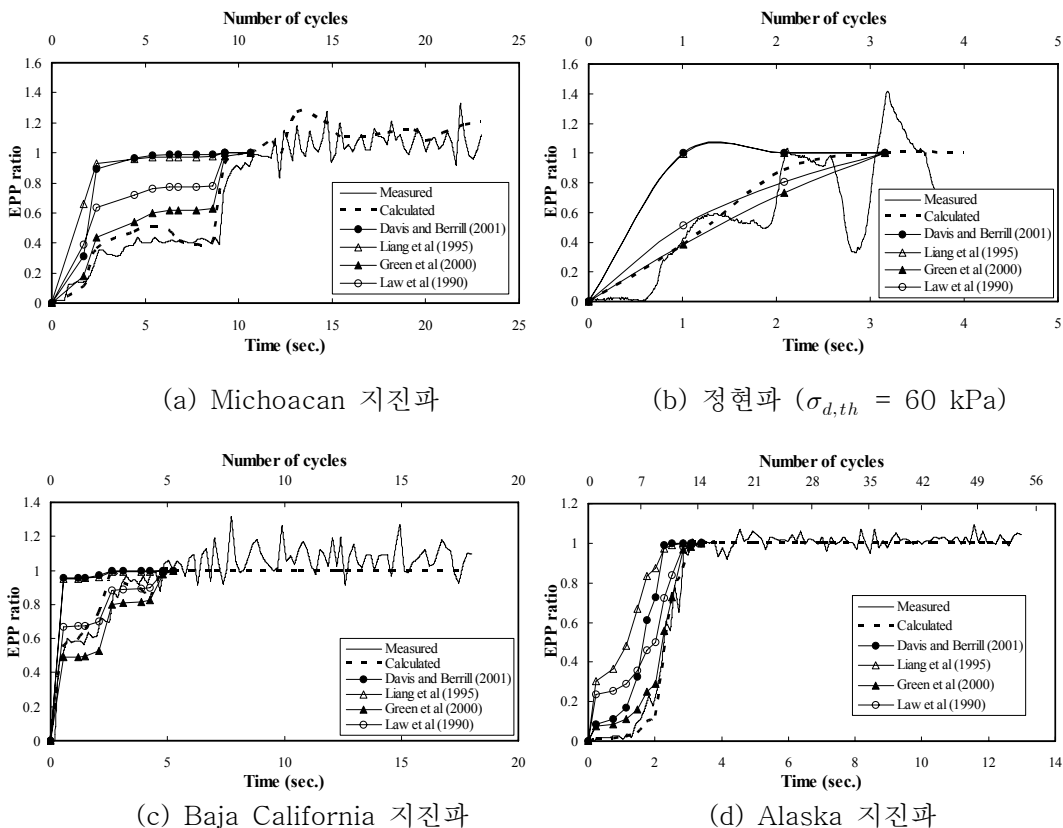


그림 6 과잉간극수압의 실험결과와 예측결과

6. 결론

액상화에 대한 예측 및 과잉간극수압 발현에 따른 강도의 감소를 예측하기 위하여 본 연구에서는 과잉간극수압과 소산에너지의 관계를 손상개념을 이용하여 수식화 하였고 과잉간극수압 발현 모델을 제안하였다. 제안된 모델을 이용하여 초기액상화를 예측할 수 있었으며 추가 실험과의 비교를 통하여 제안된 모델에 대한 타당성을 입증하였다. 특히 제안된 모델은 지진과와 같은 불규칙한 응력 상태에서도 과잉간극수압을 예측할 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2006년도 교육인적자원부 BK21사업의 일환인 연세대학교 사회환경시스템공학부 미래사회 기반시설 산학연공동사업단의 지원을 받아 연구되었음

참고문헌

1. 김수일 (2007), “지진하중을 이용한 액상화 평가” **한국지반공학회 2007년도 봄 학술발표회 논문집**.
2. Arias, A. (1970), *Measure of Earthquake Intensity*, R. J. Hansen, ed. Seismic Design for Nuclear Power Plants, The M.I.T. Press, Cambridge, Mass, USA.
3. Berrill J. B. and Davis R. O. (1985), "Energy Dissipation and Seismic Liquefaction of Sands : Revised Model", *Soils and Foundations*, Vol.25, No.2, pp.106-118.
4. Davis, R. O. and Berrill, J. B. (1982), "Energy Dissipation and Seismic Liquefaction of Sands", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 10, pp.59-68.
5. Davis, R. O. and Berrill, J. B. (2001), "Pore Pressure and Dissipated Energy in Earthquakes-Field Verification", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127(3), pp.269-274.
6. EPRI (1988), *A Criterion for Determining Exceedance of the Operating Basis Earthquake*, EPRI Report NP-5930, July.
7. EPRI (2006), *Program on Technology Innovation: Use of Cumulative Absolute Velocity (CAV) in Determining Effects of Small Magnitude Earthquake on Seismic Hazard Analyses*, EPRI Report TR-1014099, August.
8. Green, R. A., Mitchell, J. K. and Polito, C. P. (2000), "An Energy Based Excess Pore Pressure Generation Model for Cohesionless Soils," *Proc. of Developments in Theoretical Geomechanics - The John Booker Memorial Symposium*(D. W. Smith and J. P. Carter, eds), Sydney, New South Wales, Australia, Nov. 16-17, A. A. Balkema Publishers, Rotterdam, Netherlands, pp.383-390.
9. Kim, S. I. (2003), "Liquefaction Potential in Moderate Earthquake Regions," *Proc. of the 12th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Leung, C. F., Phoon, K. K., Chow, Y. K., Teh, C. I., and Yong, K. Y. eds., Vol. II, World Scientific, Singapore, pp.1109-1138.
10. Kramer, S. L. and Mitchell, R. A. (2006), "Ground Motion Intensity Measures for Liquefaction Hazard Evaluation," *Earthquake Spectra*, Vol. 22, No. 2, pp.413-438.

11. Kramer, S. L., Jones, A. A., Everhard, M. O. and Arduino, P. (2002), *Seismic Instrumentation for the Alaskan Way Viaduct, WA-RD 520.1*. Washington State Department of Transportation.
12. Law, K. T., Cao, Y. L. and He, G. N. (1990), "An Energy Approach for Assessing Seismic Liquefaction Potential," *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.27, pp.320-329.
13. Liang, L. Figueroa, J. L. and Saada, A. S. (1995), "Liquefaction under Random Loading: Unit Energy Approach," *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 121, No. 11, pp.776-781.
14. Mostagel, M. and Habibaghi, K. (1979), "Cyclic Liquefaction Strength of Sands", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.7, pp.213-233.
15. Naeim, F. and Anderson, J. C. (1993), *Classification and Evaluation of Earthquake Records for Design*, EERI/FEMA NEHRP Fellowship report, EERI PF-2/93.
16. Nemat-Nasser, S. and Shokooh, A. (1979), "A Unified Approach to Densification and Liquefaction of Cohesionless Sand in Cyclic Shearing", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.16, pp.659-678.
17. Tohgo, K. and Itoh, T. (2005), "Elastic and Elastic Plastic Singular Fields around a Crack Tip in Particulate Reinforced Composites with Progressive Debonding Damage," *International Journal of Solids and Structures*, Vol 42, pp.6566-6585.
18. Trifunac, M. D. and Novikova, E. I. (1994), "State of the Art Review on Strong Motion Duration," *Proc. of the 10th European Conference on Earthquake Engineering*, ed. G. Duma, I. Balkema, Rotterdam, 131-140.