

과잉 간극 수압 모형 개발 및 적용

Development and application of pore pressure generation 모형

한정우* · 이승찬** · 박두희***

Han, Jung Woo · Lee, Seung Chan · Park, Duhee

Abstract

High excess pore water pressure may develop when loose saturated sand is subjected to earthquake excitation, resulting in reduction in the shear strength and stiffness, and ultimately can result in liquefaction. It is very important to accurately assess the level of the pore pressure generation for seismic design and to perform effective stress analysis. A simple numerical 모형 is developed for estimating the development of pore water pressure due to seismic loading. The method only uses two parameters and the length of the accumulated shear strain. The accuracy of the proposed 모형 is verified through a series of laboratory test data. Comparisons show that the modified 모형 is an improvement over existing 모형s.

Key words : Pore water pressure, earthquake loading, shear strain, number of cycles

1. 서론

느슨한 사질토의 경우 지진하중에 의하여 매우 큰 과잉간극수압이 발생할 수 있으며 이로 인하여 지반의 전단강도와 강성이 현저히 감소한다. 유효응력해석과 이를 통한 내진설계를 수행하기 위하여 정확하게 과잉 간극수압발생을 모사하는 것은 매우 중요하다. 과잉 간극수압을 모사 하는 기존 모형으로는 전단 변형률 크기(γ_c)와 반복 하중 횟수(N)를 이용한 Dobry(1982) 모형과 감소계수를 활용한 Finn 모형(1982), Tomislav(2005) 모형이 있다. 이러한 기존 모형들을 비교, 검토해 보고 보다 합리적이고 적합한 모형을 찾아 활용하고자한다.

2. 간극수압 증가 모델

지진과 같은 반복하중에 의한 포화된 사질토의 간극 수압비(u^*)의 증가에 영향을 주는 인자로는 전단 변형률 크기(γ_c)와 반복 하중 횟수(n_c)에 가장 큰 영향을 받는다(Dobry, 1982). 그림1은 간극수압증가비(u^*)가 전단 변형률 크기(γ_c)와 반복 하중 횟수(n_c)에 의해 어떠한 비례 관계가 있다는 것을 보여준다.

Dobry(1982)는 간극수압 증가비(u^*)가 $f(u^*)=n \cdot g(\gamma_c)$ 과 같은 기본형태의 함수로 된다고 생각하였다. 위 관계로부터 함수는 하이퍼볼릭($D/1+D$)꼴로 표현되며, 간극수압증가비(u^*)는 $g(\gamma)$ 값을 비선형으로 고려하여 식(1)과 같은 Dobry's 모형을 만들 수 있으며, 계수 p, s, $g(\gamma)$ 의 값은 실험을 통해 경험적으로 구할 수 있다.

$$u^* = \frac{n \cdot p \cdot g(\gamma - \gamma_v)^s}{1 + n \cdot g(\gamma - \gamma_v)^s} \quad (1)$$

* 정회원·한양대학교 토목공학과·석사과정·E-mail: tribim@hanyang.ac.kr

** 정회원·한양대학교 토목공학과·석사과정·E-mail: lala777@hanyang.ac.kr

*** 정회원·한양대학교 토목공학과·전임강사·E-mail: dpark@hanyang.ac.kr

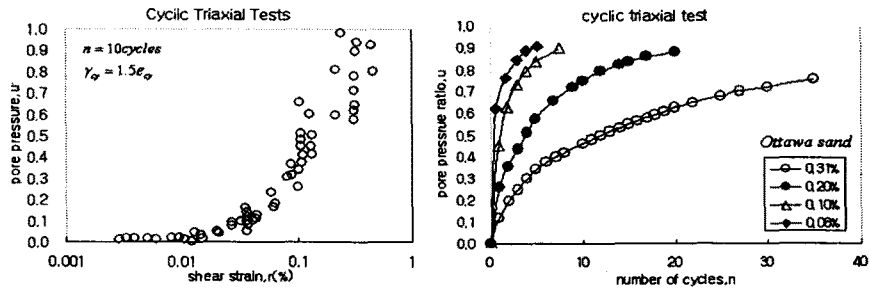


그림 1. 전단변형 크기(γ_c), 반복 하중횟수(n)와 간극수압증가비(u^*) 관계

Finn 과 Bhatia(1982)는 Dobry와 같은 생각을 했지만 변형을 길이라는(ξ ; length of strain path) 새로운 계수를 도입하여 ξ 는 $d\xi = 1/2|d\gamma|$ 로 정의 된다. 반복 하중횟수(n_c)와 간극수압 증가비(u^*)를 ξ 에 대하여 나타낼 수 있지만 ξ 과 u^* 와의 관계를 일반적으로 단일 함수로 표현할 수 없다. 이는 ξ 값이 같더라도 u^* 값은 γ_c 의 크기에 따라 각기 다르기 때문이다. 그래서 κ (damage parameter)라는 변환 함수(T)가 포함된 함수를 곱함 $k = T\xi$)으로써 각 변형률에 다른 ξ 값을 하나의 식으로 일반화 하였다. 변환 함수(T)에 의해 각 변형률에 따라 다른 ξ 값이 하나로 정리되는 결과를 가져왔고 이는 κ (damage parameter) 값과 u^* 값은 아래 두가지 함수에 의해 표현 할 수 있다.

$$u^* = G(\kappa) = (A/B) \ln(1 + B\kappa) \text{ or } u^* = \kappa(D\kappa + C)/(A\kappa + B) \quad (2)$$

Tomislav's(2005)은 Finn and Bhatia(1982)의 논문을 기초로 하였지만 변환함수의 적용방법이 상의하다. 전단 변형률 크기(γ_c)를 $\xi = 4\gamma$ 로 하고, 간극수압증가비(u^*)가 일어나지 않은 최소 변형률 γ_n 를 고려하였다.

$$\xi' = \xi - \xi_n = 4n\gamma - 4n\gamma_n = 4n(\gamma - \gamma_n)$$

한편 "damage parameter"는 전단 변형률 크기(γ_c)에 변수를 계승한 값과 반복하중 횟수(n_c)의 곱을 통해 정의된다. 전단변형률 크기(γ_c)와 전단 변형률의 길이(ξ)의 곱에 최소 전단 변형률 크기(γ_n) 고려하고 각 자료들을 일정한 함수로 만들기 위해 계수 a, b를 사용하여 각 사질토의 실험 결과를 종합하여 κ', κ'' 와 간극수압비와(u^*)의 결과값을 비교하여 일반적인 함수를 작성하였다.

$$\kappa' = \xi'(\gamma - \gamma_n)^a, \kappa'' = (\xi'/\gamma)[(\gamma/\gamma_n) - 1]^b$$

κ', κ'' 는 여러 사질토에 따라 각기 다른 범위에서 간극수압증가비(u^*)값을 나타냄으로 일반화하기 위해 간극수압증가비(u^*)가 0.5 일 때를 기준으로 정리하였다. 정리한 함수를 D로 표현 하였고, D에 대응 되는 간극수압증가비(u^*)의 관계식을 구함으로써 최종 함수를 만들 수 있다.

$$u^* = 0.5D^{0.4} \quad (D \leq 2.5 \text{ or } u^* \leq 0.72)$$

$$u^* = \frac{1.01D - 0.72}{D} \quad (D \geq 2.5 \text{ or } u^* \geq 0.72) \quad \text{or} \quad u^* = \frac{D}{1+D} \quad (u^* \geq 0.2) \quad (3)$$

3. 간극수압 증가 모델 비교 및 문제점

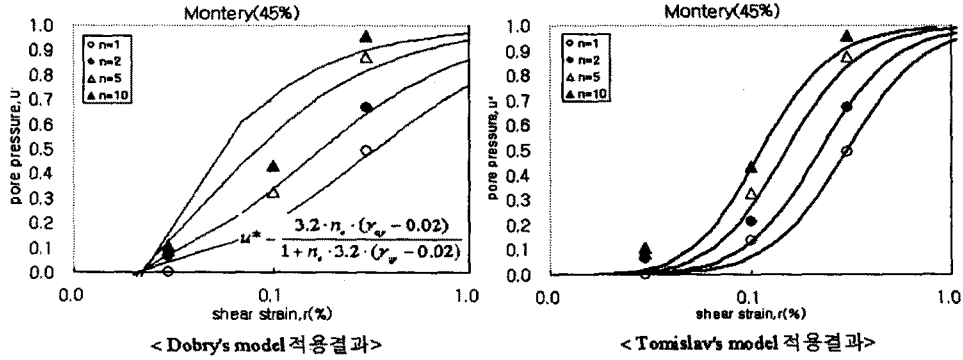


그림 2 Dobry's 모형 과 Tomislav's 모형 비교

Dobry's 모형의 경우 반복하중횟수가(n_c) 증가 할수록 정확성이 저하됨을 알 수 있다. 또한 간극수압증가비(u^*)와 반복 하중횟수(n_c)를 역수로 바꾸었을 때 계수 p값(절편값)은 반복하중횟수(n_c)이 무한히 증가함에 따라 간극수압증가비(u^*)는 1로 가야 하기 때문에 계수 p값이 1로 수렴된다는 가정하에 공식을 유도하였다. banding sand 경우는 p값이 1로 수렴되는 반면, CF sand는 수렴하지 않았고, 결과적으로 정확한 함수를 찾지 못한다. Finn's 모형의 경우에는 λ 값을 결정할 시 두개의 변형률 값에(γ_1, γ_2) 대해 각각의 ξ, ζ 값에 대응되는 u^* 값이 같게 된다고 하여 전개를 하였다. 이것은 무수히 많은 변형률 중 단지 두개의 요소만 비교하여 λ 값을 결정된 것이며 ξ 값을 고려 시에는 최소 변형률(γ_m)를 고려 못했다. Dobry's 모형 과 Tomislav's 모형의 식을 비교해 보면 같은 공식임을 알 수 가있다. 즉 Dobry's 모형 에서 계수 p의 값이 1이 된다면 $n \cdot g(\gamma)$ 와 D의 물리적 의미가 같아지며 동일한 식이 된다. 그림 3를 보면 Tomislav's 모형에서 간극수압비(u^*)와 D와의 관계를 보면 Banding sands의 경우는 $D/1+D$ 의 함수와 일치 함으로, $D/1+D$ 로 유도된 Dobry's 모형에서도 잘 맞지만 CF sand는 $D/1+D$ 의 함수 결과는 맞지 않는다. 즉 Dobry's 모형은 $D/1+D$ 로 표현 가능한 사질토에서 올바른 계수를 산정 했을시 정확한 결과를 얻을 수 있다. 이에 반해 Tomislav's 모형은 다양한 사질토가 적합한 두가지 함수로 분리 적용되어 신뢰성이 높다.

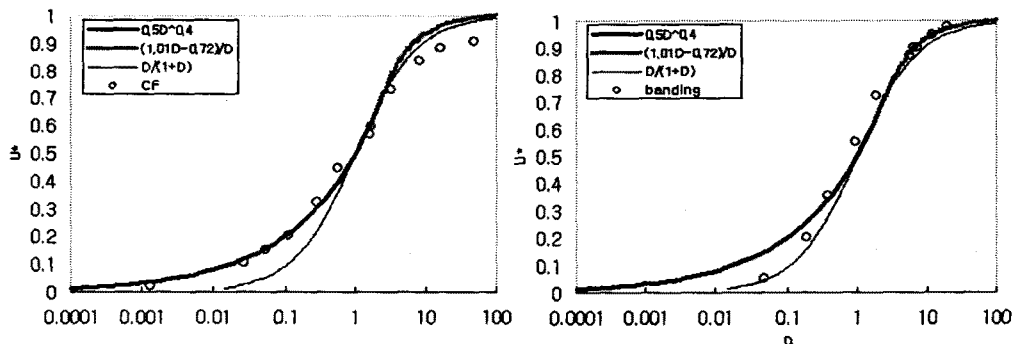


그림 3 Tomislav의 모형의 D 함수

4. Modified 모형 제시

Finn의 모형에서는 ξ 과 u^* 의 관계를 찾기 위해 ξ 에 변환 함수(T)를 곱하였고, Tomislav의 모형에서는 ξ 에 작거나 큰 γ 의 표현인 γ^a 를 곱하여 나타내었다는 것이 다르며 이후 과정은 같다. 하지만 ξ 에는 이미 변수 γ 를 포함하고 있는데 γ^a 를 곱한다는 것은 물리적 의미는 부여하지 않고 단지 수학적 의미만을 내포하고 있다. 각 변형율에 따른 각 ξ 값의 u^* 값을 같게 해주기 위해 γ^a 을 곱한다면 아래와 같이 표현 되어 한다.

$$\kappa = 4 \cdot n \cdot \gamma^a = \xi \cdot \gamma^{a-1}$$

여기에 γ_n 를 고려한다면 다음과 같이 식을 바꿀 수 있다. 또한, Tomislav's 모형에서는 $a \geq 0$ 이라고 하였는데 이는 γ 에 지수로 대입함으로써 ξ 길이가 작게 하여 최종적으로 각 변형율에 대해 동일 u^* 에서는 ξ 값이 최초보다 작게 되어 같아지게 되기 위함이다.

$$\kappa' = 4 \cdot n \cdot (\gamma - \gamma_{iv}) \cdot (\gamma - \gamma_{iv})^{a-1} = 4 \cdot n \cdot (\gamma - \gamma_{iv})^a$$

위 3가지 모형마다의 문제점을 갖고 있으나, 그림2 처럼 가장 간편하면서 실측치에 정확한 개형을 나타내는 모형은 Tomislav's 모형이라고 할 수 있다. 그러므로 Tomislav's 모형의 단점을 보완하고 이를 개선하여 모든 사질토에 적합한 공식을 유도함이 적합 하겠다. 그림4 에는 Tomislav's 모형에서 사용된 사질토 시료의 Tomislav가 고려하지 않은 SMB, Owi, Ws sand 3가지를 추가 하였다.

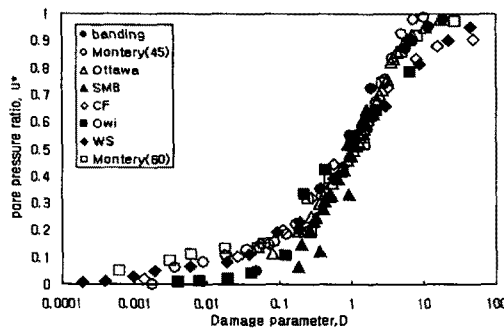


그림 4 Tomislav's 모형 시험 결과

Tomislav's 모형은 실험한 사질토에 적합한 함수를 채택하기 위해 두 가지 함수를 제안 하였지만, 그림4 처럼 Tomislav가 고려하지 못한 추가 시료의 결과값을 정리 해본 결과 맞 기존 사질토의 CF sand의 경우는 간극수압증가비(u^*)가 액상화를 유발하는 1값까지 증가 못한다, 이는 정확성을 높이기 위해 식(3) 이외의 또 다른 함수가 필요함을 알 수 있다. 이를 통해, Tomislav's 모형을 그대로 적용하면 새로운 함수식 표현이 각 사질토 마다 필요해진다. 그러므로 식(3)의 두가지 함수와 추가된 시료의 결과값을 모두 포함한 함수를 만들어 보았다. 이는 변수 4개의 함수로 나타내어진다.

$$u^* = \frac{a \cdot D}{b + D} + \frac{c \cdot D}{d + D} \quad (4)$$

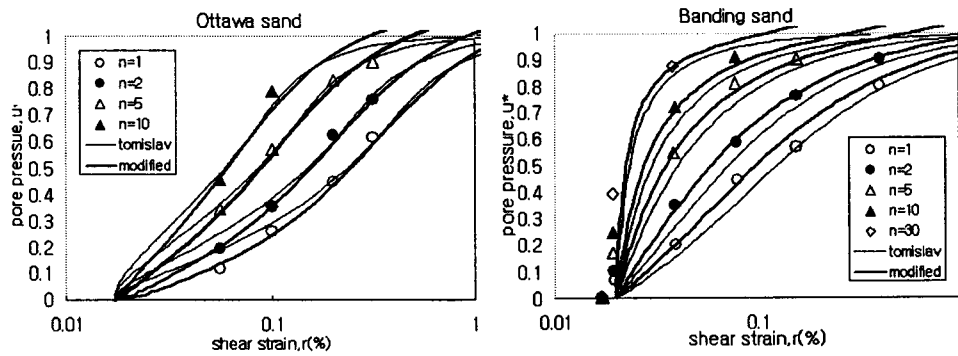


그림 5 실측치와 제안된 수치모형결과의 비교

Tomislav's 모형과 유도 과정에는 큰 차이는 없으나 Modified 모형이 실측치에 정확하다. 이는 D함수에 가장 근접한 함수를 찾아 적용했기 때문이다. 식 (4)를 통해 변수의 값을 늘어 냈지만 모든 사질토에 적용 가능한 공식을 개발 하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 기존 간극수압 증가 모형인 Dobry's 모형, Finn's 모형 Tomislav's 모형을 서로 비교 분석 해 보았다. Dobry's 모형의 경우는 변수인 반복하중횟수(n)에 커짐에 따라 간극수압이 실측치와 상이했으며, 일부 사질토에만 적합함을 알 수 있었다. 감소 계수를 활용한 Finn's 모형은 모든 변형을 값을 고려 못하였다. 지수 모형의 감소계수를 활용한 Tomislav's 모형은 간극수압 증가 모사가 정확하며 다양한 사질토에 가능하다. 하지만 모델이 사질토에 따라 다르게 표현되어야 한다. 이에 Tomislav's 모형을 변수를 4개로 조정 하여 모든 사질토에 적합한 모델로 바꾸었다..

참고문헌

1. Tomislav Ivsic. (2004), "A model for presentation of seismic pore water pressures", Journal of Soil dynamics and earthquake Engineering,
2. Dobry,R., Ladd,R.S., Yokel,F.Y.,Chung,R.M. and Powell,D.,(1982). "Prediction of pore water pressure buildup and liquefaction of sands during earthquakes by the cyclic strain method."Building Science Series 183, National Bureau of Standards, U.S.Department of Commerce, U.S. Government Printing Office, Washington,D.C, 150p
3. Finn, W.D.L., and Bhatia,S.K.(1981). "Prediction of seismic porewater pressures." Proc. 10th International Conference on soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, Vol.3, 201 206.
4. Seed, H.B., Martin, p.p. and Lysmer, J.(1975). "The generation and dissipation of pore water pressures during soil liquefaction." Report No.EERC 75 26, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California.