

1971년 San Fernando지진시 Upper San Fernando Dam의 액상화 변형 해석
Seismic deformation analysis of the liquefied Upper San Fernando Dam
under the 1971 San Fernando earthquake

○남하용¹⁾, 조성원²⁾, 김명모³⁾

1. 서 론

준설매립(Hydraulic Fill)공법으로 시공된 필댐(Fill Dam)에 지진하중이 작용하면, 포화된 느슨한 준설매립(Hydraulic Fill)영역에서 액상화가 발생하여 댐에 과도한 변형을 유발하게 된다. 본 논문에서는 1971년 발생한 San Fernando지진시 액상화로 인해 Upper San Fernando 댐에 발생한 변형 양상을 수치해석을 통해 재현하였다. 해석 방법으로는 상용 유한차분 해석프로그램인 FLAC3.3을 사용하여 준설매립 영역을 제외한 부분에 대해서는 Mohr-Coulomb모델을 적용하고 액상화가 발생한 준설매립 영역에 대해서는 Finn모델을 적용하여 유효용력해석을 실시하였으며 이 결과를 전 지반을 Mohr-Coulomb모델로 구성하여 해석한 경우와 비교하였다.

2. 해석 대상

Upper San Fernando 댐은 Los Angeles 북서쪽에 위치한 높이 약 24m(80ft)의 필댐(Fill Dam)으로 중심부는 점토로 형성되어 있고, 점토층 좌우는 준설매립(Hydraulic Fill)을 통해 시공되었다. 1971년 San Fernando 지진시 준설매립 영역에서 액상화가 발생하여 댐의 정상부(crest)가 수직방향으로 0.9m(3ft)가량 침하하였고 횡방향으로는 하류쪽으로 1.5m(5ft)가량 이동하였다. 또한, 댐 하류측 선단에서는 0.6m가량의 융기가 발생하였다. 해석시 사용한 댐의 단면과 지진 발생후 관측된 변형량은 그림1과 같다.

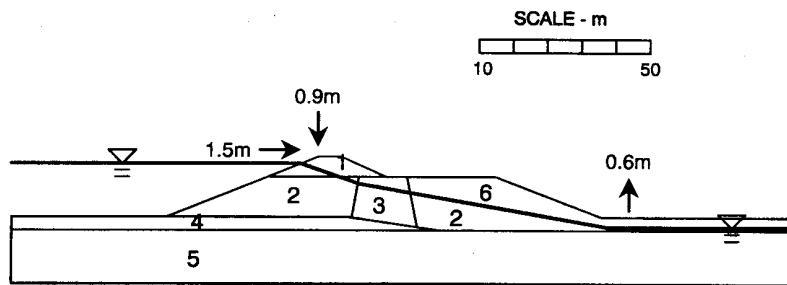


그림 1 Upper San Fernando 댐의 단면과 1971년 지진시 발생한 변위 (Seed et al., 1973)

유한차분해석 요소망은 그림2와 같다.

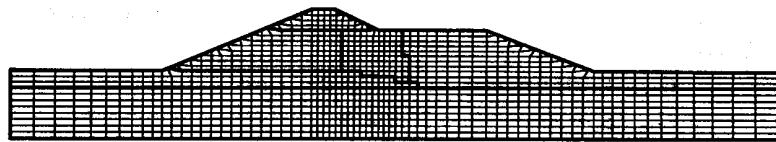


그림 2 해석 요소망

- 1) 서울대학교 토목공학과 석사과정
- 2) 서울대학교 토목공학과 박사과정
- 3) 서울대학교 토목공학과 교수

3. 예상화 모델(Finn모델)

Martin등은 사질토를 대상으로 배수 반복순수전단시험과 비배수 반복순수전단시험을 실시하여 흙 요소에 전단변형이 발생할때의 부피변화와 이로 인해 발생하는 과잉간극수압의 관계를 식(1)과 식(2)로 제안하였다(Martin et.al.,1975). Finn모델은 FLAC에서 제공하는 macro-language인 FISH를 이용하여 기존의 Mohr-Coulomb모델에 Martin의 이론을 적용하여 만든 모델이다.

$$\Delta \varepsilon_{vd} = C_1(\gamma - C_2 \varepsilon_{vd}) + \frac{C_3 \varepsilon_{vd}^2}{\gamma + C_4 \varepsilon_{vd}} \quad \text{-----(1)}$$

$$\Delta u = \overline{E}_r \cdot \Delta \varepsilon_{vd} \quad \text{-----(2)}$$

ε_{vd} : N 사이클까지의 누적 부피변형률

γ : N+1 사이클에 작용하는 전단변형률

$\Delta \varepsilon_{vd}$: N+1 사이클에 발생하는 부피변형률의 증분

\overline{E}_r : 1차원 제하곡선의 접선계수(tangent mouduls of the one-dimensional unloading curve)

$C_1 = 0.80$

$C_2 = 0.79$

$C_3 = 0.45$

$C_4 = 0.73$

여기서 C_1 , C_2 , C_3 , C_4 는 실험을 통해 구한 계수로 상대밀도 45%인 Crystal Silica Sand에 해당하는 값이다.

4. 입력 토질 정수

해석시 사용한 토질 정수값은 1973년 Seed등이 제출한 보고서(EERC 73-2)를 바탕으로 하였고 이를 표1에 나타내었다. 표1에서 토층번호는 그림1에 나타낸 각 영역별 번호에 해당되고, 점착력과 마찰각은 Mohr-Coulomb모델과 Finn모델에 적용되는 강도정수이고, K_{2max} 는 미소 변형율에서의 초기전단탄성계수를 계산하기 위해 사용되었다.

표 1 입력토질정수

토층번호.	토층분류	전체단위중량(t/m^3)	점착력(kPa)	마찰각(Deg.)	K_{2max}
1	Rolled Fill	2.24	124.54	25	52
2	Hydraulic Fill(saturated)	1.95	0	37	30
3	Clay Core	1.95	0	37	**
4	Upper Alluvium	2.06	0	37	40
5	Lower Alluvium	2.06	0	37	110
6	Hydraulic Fill(unsaturated)	1.95	0	37	30

초기전단탄성계수는 Clay Core를 제외한 토층에 대해서는 식(3)을 이용하여 구하였고, Clay Core에 대해서는 식(4)를 이용하여 구하였다.

$$G_{max} = 1000 \cdot K_{2max} \cdot \sqrt{\sigma'_v} \quad \text{단위 : psf} \quad \text{-----(3)}$$

$$G_{max}/S_u = 2300, S_u = 57.5 \text{ kPa} \quad \text{-----(4)}$$

5. 입력 지진 데이터

지진가속도의 입력은 Seed등이 1973년도에 처음 해석할 때 사용한 방법에 따라 Pacoima 댐에서 관측되었던 지진가속도 기록을 최대 가속도가 0.6g가 되도록 조정하여 해석단면의 바닥에 가하였다. 해석에 사용한 지진가속도의 시간이력, 파워 스펙트럼, 가속도 응답스펙트럼은 각각 그림3, 그림4, 그림5와 같다.

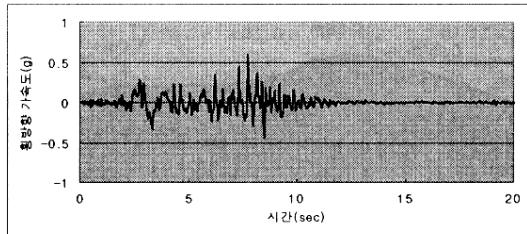


그림 3 횡방향 지진가속도 시간이력

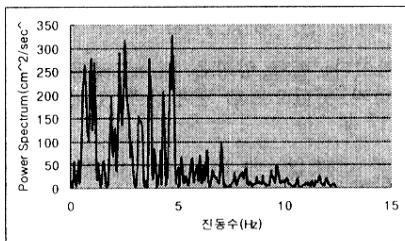


그림 4 지진파의 파워 스펙트럼

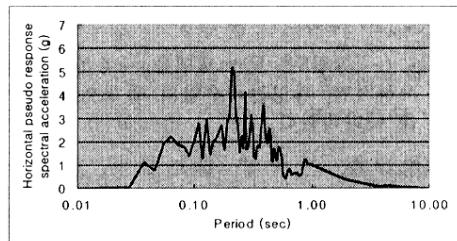


그림 5 지진파의 가속도 응답스펙트럼 (5% damping)

6. 해석 결과

6.1 과잉간극수압의 발생

그림6은 Finn모델을 적용한 준설매립 영역 내부의 한 요소에서의 과잉간극수압 발생 양상을 시간이력으로 나타낸 그림이다. 지진발생후 약 3초 후 즉, 가속도의 진폭이 커지는 순간부터 과잉간극수압이 급격하게 증가하는 양상을 보여준다. 다만, 과잉간극수압의 소산을 고려하지 않았으므로 주요한 진동이 끝난 후에도 발생한 과잉간극수압이 그대로 유지되는 경향을 나타내었다.

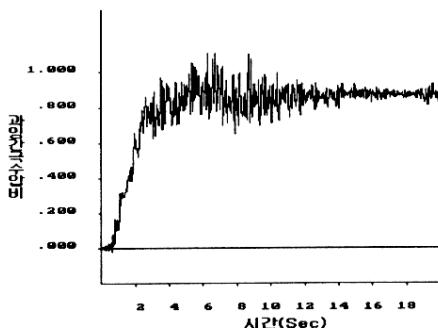


그림 6 과잉간극수압비 시간이력

6.2 댐의 변형

Finn모델을 사용하여 해석한 결과는 그림7과 같다. 댐의 정상부는 수직방향으로 0.88m 침하하였고 횡방향으로는 상류쪽으로 0.27m 이동하였다. 하류측 선단부는 약 0.45m 융기하였고 하류쪽으로 약 2.6m의 과도한 횡변형을 나타내었다. 또한 하류쪽 berm에서는 약 1.0m의 침하가 나타났고, 하류쪽으로 4.0m의 과도한 횡변형을 나타내었다. 댐의 정상부가 상류쪽으로 이동한 것과 하류쪽 berm에서의 과도한 변형을 제외하고는 비교적 실제 관측치와 유사한 결과를 나타내었다.

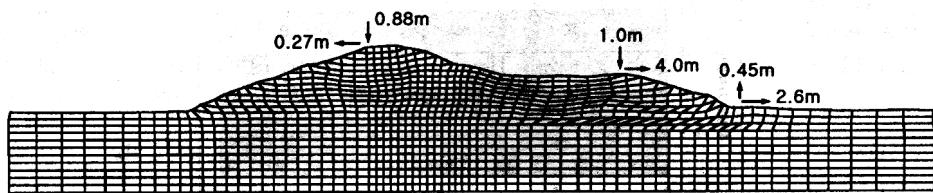


그림 7 변형 형상 (Finn모델 적용, magnification=2.0)

그림8은 Finn모델을 사용하지 않은 경우의 해석 결과이다. 변형 양상은 Finn모델을 적용한 경우와 유사하지만, 파임간극수압의 발생으로 인한 강도감소를 고려하지 못했으므로 변형량에 있어서는 훨씬 작은 값을 나타내었다.

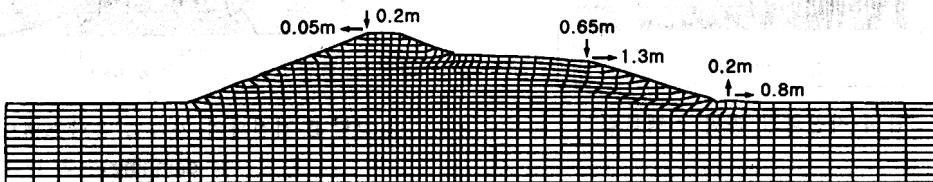


그림 8 변형 형상 (Mohr-Coulomb모델, magnification=2.0)

7. 결론
유한차분 상용프로그램(FLAC)을 이용하여 Upper San Fernando댐의 액상화 변형해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 준설매립 영역을 Mohr-Coulomb모델로 적용하여 해석한 결과 변형량이 Finn모델을 적용한 경우 및 실제 관측치에 비해 매우 작게 나타났다.
- Finn모델을 적용한 경우 댐의 횡방향 변형량은 실제 관측치와 상반되는 결과를 보이거나 과도하게 큰 값을 나타내었지만, 댐 상부의 침하량과 선단부의 용기량은 관측치와 비교적 비슷한 결과를 보였다. 따라서, 액상화로 인한 댐 상부의 침하량을 해석하는데 Finn모델이 적합한 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Seed, H. B., Lee, K. L., Idriss, I. M., Makdisi, F. (1973). "Analysis of the Slides in the San Fernando Dams During the Earthquake of February 9, 1971", University of California, Berkeley, Report No. EERC 73-2.
2. Yoshiharu Moriwaki, Phalkun Tan, and Feng Ji, M.ASCE "Seismic deformation analysis of the Upper San Fernando Dam under the 1971 San Fernando earthquake", Proceedings, Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics III, University of Washington Seattle, Washington, Vol. 2, pp. 854-865, August 1998.
3. Geoffrey R. Martin, W. D. Liam Finn, and H. Bolton Seed (1975), "Fundamentals of Liquefaction under Cyclic Loading", Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 101, No. GT5, May, 1975, pp. 423-438.
4. Itasca Consulting Group, Inc. (1995). FLAC Version 3.30.