

필댐의 내진설계



김종민 >>

세종대학교 토목환경공학과 교수
jongmin@sejong.ac.kr

1. 필댐의 내진해석

최근 국내에서의 지진발생 빈도가 증가함에 따라 내진에 대한 관심이 높아지고 있으며, 이와 더불어 주변 국가의 심각한 지진 피해사례를 계기로 시공 중이거나 시공 예정인 시설물에 대해서는 내진 설계가 이루어지고 있다. 특히, 댐의 경우에는 지진에 의한 파괴가 발생할 경우 단순히 구조물의 파괴에 그치는 것이 아니라 하류지역에서의 인명 및 재산상의 심각한 피해를 유발하게 된다.

본 기사에서는 필댐의 내진설계 시 검토사항과 일반적으로 널리 쓰이는 검토기법에 대해 기술하고자 한다. 필댐의 내진설계 항목 중 지반공학과 관련된 사항으로는 기초지반 및 댐 제체의 액상화 검토, 댐 제체의 안정성과 변위 검토가 가장 중요하며 이들의 해석기법에 대해 정리하였다.

2. 기초지반의 액상화 검토

지진하중에 의해 기초지반에 액상화가 발생할 경우 제체 및 부속구조물의 부등침하 혹은 활동이 우려되며 이로 인해 댐의 안정성 및 기능성의 저하가 발생할 수 있다. 따라서 설계지진하중에 대한 기초지반

의 액상화 발생 가능성을 검토해야 하는데 이를 위해서는 지진하중에 의한 지반 내 반복전단응력비와 이에 저항하는 전단저항응력비를 산정·비교해야 한다. 액상화에 대한 안전율은 전단저항응력비/반복전단응력비로 산정되며 일반적으로 1.0~1.5 이상의 안전율일 때 액상화에 대해 안전한 것으로 본다.

2.1 반복전단응력비(CSR; Cyclic Stress Ratio)의 산정

지진하중에 의해 지반 내에 발생하는 반복전단응력비는 Seed와 Idriss(1971)가 제안한 다음의 식 (1)을 이용하여 산정한다.

$$CSR = \frac{\tau_d}{\sigma'_v} = 0.65 \frac{\alpha_{mas}}{g} \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} r_d \quad (1)$$

여기서, α_{mas} =최대 지표면가속도, g =중력가속도, σ_v 와 σ'_v =액상화 검토 지점의 연직전응력 및 연직유효응력, r_d =응력감소계수

식 (1)에서 최대 지표면가속도, α_{mas} 는 설계 대상 댐의 규모와 중요도에 따른 내진등급, 건설예정지역의 위치와 지반조건을 고려하여 내진설계 상위지침인 내진설계기준연구II(건설교통부, 1997)에 따라 산정한다. 또한 응력감소계수, r_d 는 지반의 변형성(deformability)에 대한 보정계수로서 액상화 검토 지점의 깊이에 따라 그림 1과 그림 2를 이용하여 산정한다. 그림 1은 지진규모 7.5를 기준으로 제안된 반면 그림 2는 지진규모에 따라 제안된 도표로 지진규모 7.5에 대해 그림 1의 결과와 일치함을 알 수 있다.

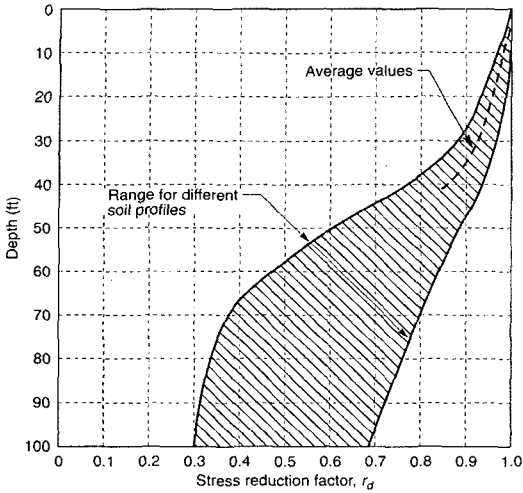


그림 1. 지진규모 7.5에 대한 응력감소계수 산정도표

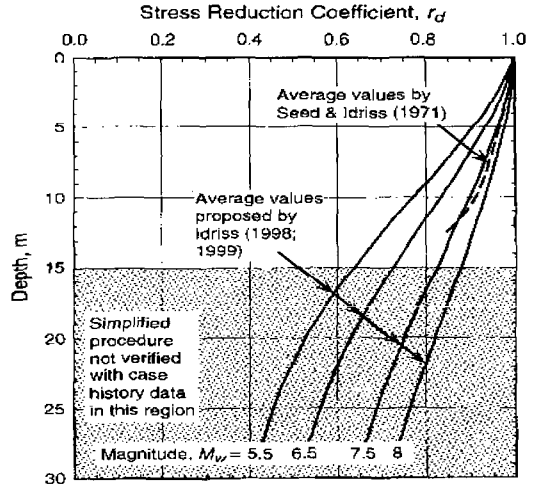


그림 2. 다양한 지진규모에 대한 응력감소계수 산정도

표 1. 전단저항응력비 산정방법

	현장시험법	실내시험법
시험방법	SPT, CPT, 전단파속도 측정시험	반복삼축압축시험
장점	<ul style="list-style-type: none"> 간편하고 경제적임 비교란시료의 채취가 불필요함 	<ul style="list-style-type: none"> 반복하중을 가하여 지진하중을 모사함으로써 지진조건 제어가 용이함
단점	<ul style="list-style-type: none"> 지진하중을 모사하지 못함 기제안된 도표를 이용하여 간접적으로 CRR 산정 	<ul style="list-style-type: none"> 비교란시료의 채취가 필수적임 시료 대표성에 불확실성이 많음

2.2 전단저항응력비(CRR; Cyclic Resistance Ratio)의 산정

전단저항응력비는 액상화가 발생할 때의 반복전단 응력비로서 $CRR > CSR$ 이면 액상화 발생가능성이 있는 것으로 판단한다. 전단저항응력비를 산정하는 방법으로는 현장시험결과를 이용하는 방법과 액상화 검토 지점 지반의 비교란시료에 대한 실내시험결과를 이용하는 방법이 있으며, 이를 표 1에 비교·정리하였다.

(1) 표준관입시험(SPT) 결과를 이용한 전단저항응력비 산정

전단저항응력비는 해머효율과 액상화 검토 지점의 유효상재압의 영향을 고려한 환산 표준관입저항값

(N), 즉 (N_{i60})값을 그림 3과 그림 4의 도표에 적용하여 산정하며, 환산 N 값은 아래의 식 (2)를 이용하여 산정한다.

$$(N_i)_{60} = C_N \frac{ER_m}{60} N = \sqrt{\frac{10}{\sigma'_v}} \frac{ER_m}{60} N; \sigma'_v \text{ in t/m}^2 \quad (2)$$

그림 3과 그림 4는 지진규모 7.5를 기준으로 작성된 것이므로 우리나라와 같이 지진규모 6.5를 기준으로 설계할 경우 전단저항응력비에 대한 보정이 필요하다. 지진규모에 따른 보정계수는 표 2와 같다.

(2) 콘관입시험(CPT) 결과를 이용한 전단저항응력비 산정

액상화 검토 지점의 유효상재압의 영향을 고려한 환산 콘관입저항값(q_{ci}), 즉 q_{ci} 값을 그림 5의 도표에

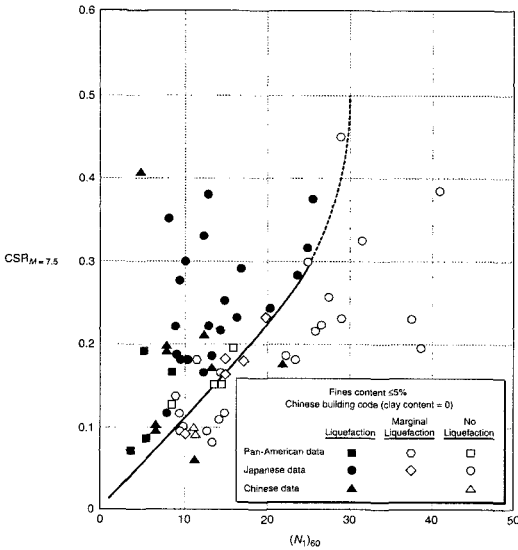


그림 3. 조립토의 $(N_1)_{60}$ 과 CRR 관계

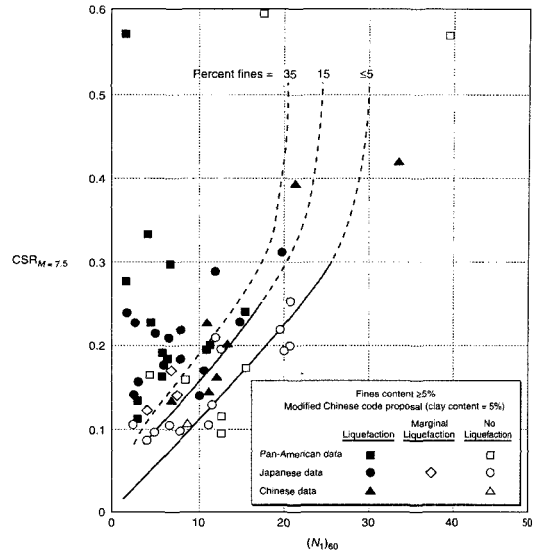


그림 4. 세립토의 $(N_1)_{60}$ 과 CRR 관계

표 2. 지진규모에 대한 보정계수

지진규모		5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5
보정 계수	Seed 등	1.43	1.32	1.19	1.08	1.00	0.94	0.89
	Youd 등	2.20~2.80	1.76~2.10	1.44~1.60	1.19~1.25	1.00	0.84	0.72

※ Seed and Idriss (1982), Youd and Idriss (1997)

적용하여 산정하며, q_{cl} 은 아래의 식 (3)을 이용하여 산정한다.

$$q_{cl} = q_c \sqrt{\frac{P_a}{\sigma'_v}} \text{ 혹은 } \frac{1.8}{0.8 + \sigma'_v} q_c; \sigma'_v \text{ in t/ft}^2 \quad (3)$$

그림 5는 지진규모 7.5를 기준으로 작성된 것이므로 설계 지진규모에 따라 표 2의 보정계수를 적용한다.

(3) 전단파속도 측정시험 결과를 이용한 전단저항 응력비 산정

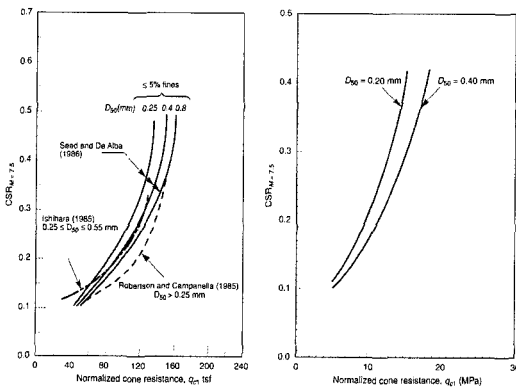


그림 5. q_{cl} -CRR 관계

액상화 검토 지점의 유효상재압의 영향을 고려한 환산 전단파속도(VS), 즉 VS1값을 그림 6의 도표에 적용하여 산정하며, VS1은 아래의 식 (4)를 이용하여 산정한다.

$$V_{sl} = V_s \left(\frac{P_a}{\sigma'_v} \right)^{1/n} \quad (4)$$

식 (4)에서 n은 일반적으로 3이며, 그림 6은 지진 규모 7.5를 기준으로 작성된 것이므로 설계 지진규모에 따라 표 2의 보정계수를 적용한다.

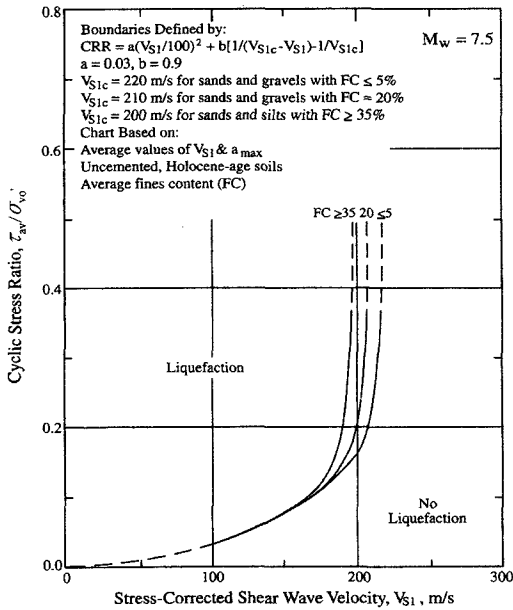


그림 6. 전단파속도와 CRR 관계

(4) 반복삼축압축시험 결과를 이용한 전단저항응력비 산정

반복삼축응력시험을 이용할 경우, 임의의 구속응력 조건에 대해 시료 내에 액상화가 발생할 때까지 축차응력을 반복재하 하여 액상화발생시의 반복전단

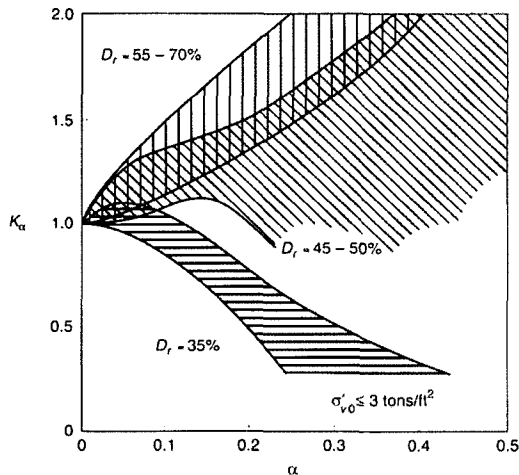


그림 7. 보정계수 K α 산정도표

응력비, 즉 전단저항응력비를 산정하게 된다. 최소 3개의 구속응력 조건에 대한 반복삼축압축시험을 수행하여 '전단저항응력비-액상화발생 반복재하횟수'로 표현되는 특성곡선을 작성하고, 이로부터 설계 지진 규모에 해당하는 전단저항응력비를 산정하면 된다. 우리나라의 경우, 설계 지진규모 6.5에 해당하는 반복재하횟수 10회에 대한 전단저항응력비를 특성곡선으로부터 도출하면 된다.

3. 댐 제체의 액상화 검토

앞 절의 액상화 검토 방법은 지표면이 경사지지 않은 경우, 즉 지반 내 응력이 주응력상태인 경우로 제한된다. 땀댐의 경우 제체 내에 침윤선이 형성되므로 제체 액상화 발생 가능성을 검토해야 하는데, 이 경우 지표면의 경사로 인해 제체 내 응력이 더 이상 주응력 상태가 아니며 이러한 초기 전단응력은 전단저항응력에 영향을 미치게 된다. 또한 유효연직응력이 100 kPa 보다 커지는 경우 구속응력의 영향을 고려해야 한다. 다음의 식 (5)는 초기 전단응력과 구속응력의 영향을 고려한 보정 전단저항응력비 산정공식이며, 식의 보정계수 K_α 와 K_σ 는 각각 그림 7과 그림 8

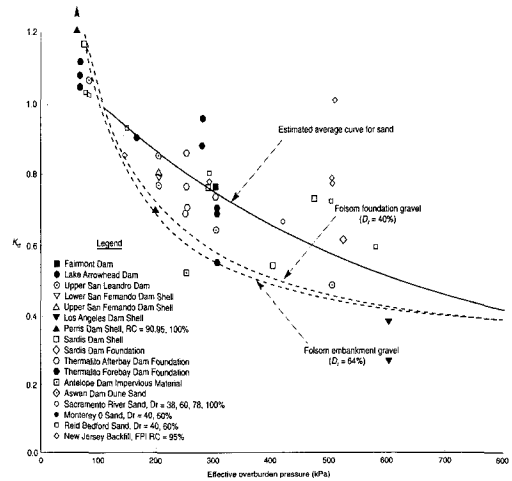


그림 8. 보정계수 K σ 산정도표

의 계수 산정도표를 이용하여 산정·적용한다.

$$\text{보정 } CRR = (CRR) K_a K_o \quad (5)$$

그림 7에서 α =초기전단응력/유효연직응력으로서 초기전단응력은 정적유한요소해석 등을 통해 산정하며 연직유효응력 σ'_v 이 300 kPa 보다 작은 범위에 적용 가능하다.

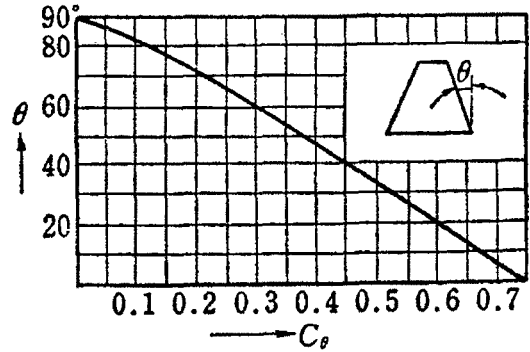


그림 9. 계수 C_θ

4. 댐 제체의 안정성 해석

지진에 의한 동적 지반운동은 가속도 성분에 의하여 댐 제체에 큰 관성력을 발생시킨다. 이러한 동하중의 작용시 댐 제체 내 응력변화 및 변형을 해석하기 위해서는 지반운동에 대하여 전체시간이력에 대한 정보가 필요하지만 이러한 관성력은 짧은 시간동안만 작용하고 또한 작용방향의 변화가 크므로 댐 제체의 동적안정에 대한 안전율이 1보다 작은 경우가 유발할 지라도 매우 작은 변형만 발생될 수 있다.

지진하중 작용시 댐 제체의 안정성 평가방법은 크게 유사정적해석법과 동적해석법으로 구분된다. 유사정적해석법과 동적해석법은 각각 특성을 가지고 있어 해석목적, 댐 제체의 재료조건과 대상 댐의 특성에 맞게 적용해야 하는데 유사정적해석법은 지진에 의해 유발되는 관성력을 추가적인 정적하중으로 환산하여 거동해석에 적용하는 방법으로서 지진의 주파수 파장이 구조물의 크기보다 8배 이상인 경우 동적효과가 매우 작게 나타나므로 이러한 경우는 유사정적해석법이 유용하다. 유사정적해석법은 지진하중 산정이 간편하고 해석이 간단한 장점은 있으나 구조물의 동적특성과 지반과 구조물의 상호작용을 규명할 수 없는 한계성을 갖고 있다.

유사 정적 해석법으로 사면안정을 평가하기 위해서는 정적하중, 관성력, 동수압을 결정해야 하며, 관성력을 고려하기 위해 사용되는 지진계수 K_h 는 식 (6)과 같이 지표면 최대가속도의 50%를 사용하도

록 한다.

$$K_h = \frac{\alpha_{max}}{2g} \quad (6)$$

또한 저수지의 물에 의해 작용하는 동수압은 식 (7)의 Zanger 공식과 그림 9를 적용하여 고려한다.

$$p = C_\theta K_h \gamma_w H \left[\frac{1}{2} \left\{ \frac{h}{H} \left(2 - \frac{h}{H} \left(2 - \frac{h}{H} \right) + \sqrt{\frac{h}{H} \left(2 - \frac{h}{H} \right)} \right) \right\} \right] \quad (7)$$

여기서, H =수심, h =수면에서의 깊이, C_θ =상류면 경사각의 함수(그림 9 참조)

댐 제체재료의 강도는 지진하중에 의하여 제체 내에 과잉간극수압이 발생되지 않는 경우에는 배수상태에서 얻어지는 잔류강도 값을 바탕으로 기존의 해석방법의 적용이 가능하다. 반면, 제체재료의 투수계수가 작아 지반 내에 과잉간극수압이 발생하는 경우에는 이에 대한 적절한 고려가 필요하다. 일반적으로 비배수상태($\phi_u=0$)로 적용되므로 전응력 해석방법을 적용하여 지진하중에 의한 비배수 전단강도 감소효과만을 고려하여 해석하는 것이 가능하다.

유사정적해석법은 지진하중의 크기만을 고려하여 유사정적하중으로 대치함으로써 지진하중의 시간이력을 무시하는 단점을 내포하고 있다. 하지만 계산과정이 간단하며, 적용사례 및 일반적인 실험을 통한 제체재료의 물성치를 쉽게 얻을 수 있는 장점이 있다.

5. 댐 제체의 변위해석

댐 제체의 변위해석은 안전율이 1이 될 때의 가속도, 즉 항복가속도를 산정하고 이를 2번 적분하여 변위를 산정하는 Newmark 활동블록이론을 기본개념으로 한다. 대표적인 변위해석법으로는 Makdisi-Seed 방법과 Newmark 방법이 일반적으로 이용되고 있다. 그러나 상기 해석방법을 기술기사로 간단히 기술하는 것은 불가능하므로 본 기사에서는 필댐의 변위산정에 적용할 수 있는 간단한 도표를 소개하고자 한다.

흙 댐의 경우에는 그림 10의 도표를 이용하여 표준 최대변위(u_s)를 구한다. 표준최대변위의 산정은 Newmark의 활동블록이론을 근간으로 한 것이며, 유사정적해석을 통하여 안전율이 1이 될 때의 가속도, 즉 항복가속도를 산정해야 한다. 도표의 표준최대변위는 가속도 0.5g, 속도 30in/s를 기준으로 한 것이므로 다른 지표면 운동에 대해서는 다음의 식 (8)을 이용하여 최대변위, u_m 을 산정한다.

$$u_m = \frac{u_s V^2}{1800A} \quad (8)$$

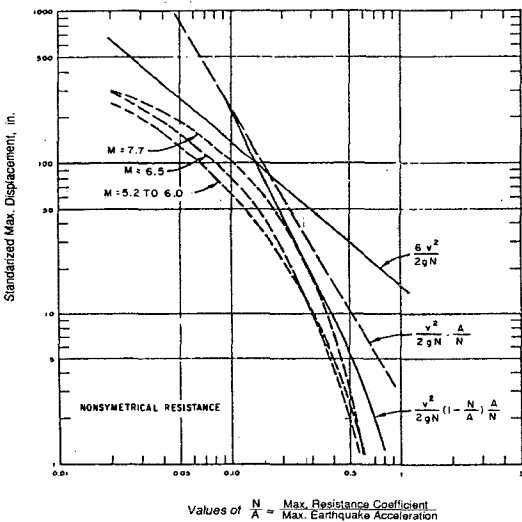


그림 10. 흙댐의 변위산정도표

여기서, V =지표면 최대속도(in/s), A =지표면 최대 가속도

식 (8)을 적용하기 위해서는 지표면 최대 속도를 알아야 하나, 그 산정이 어렵다. 따라서 적용의 편의를 위해 NEHRP 규정의 유효최대가속도와 유효최대 속도 개념을 식 (8)에 적용하면, $V=a_v \times 30$ (in/s)이고 $a_a \approx a_v$ (a_v =effective peak velocity-related acceleration, a_s =유효 최대가속도계수)를 적용하면, 식 (9)와 같이 쓸 수 있다.

$$u_m = 0.0033a_a u_s \quad (9)$$

사력댐의 변위산정은 Bureau 등이 제안한 그림 11을 이용한다. 지진규모에 따른 지진강도지수(ESI, Earthquake Severity Index)의 값을 식 (10)을 이용하여 구한 후 그림 11의 도표에 적용하여 지진강도지수에 따른 댐 마루의 상대연직변위를 산정할 수 있다.

$$ESI = A(M-4.5)^3 \quad (10)$$

여기서, A =댐 마루에서의 가속도, M = 지진규모

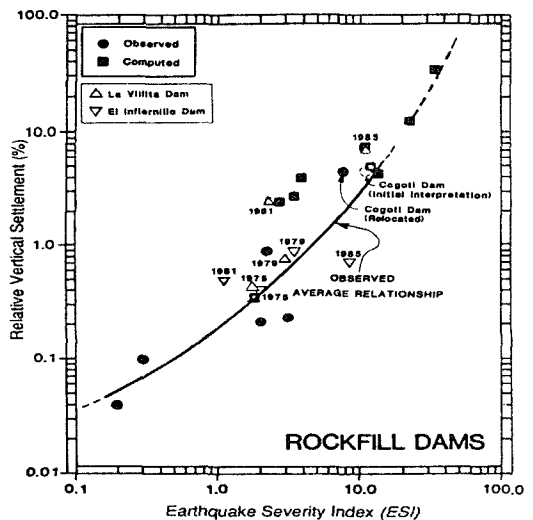


그림 11. 사력댐의 변위산정도표

참고문헌

- 건설교통부 (1997), 내진설계기준연구 II
- 건설교통부 (2001), 댐 설계기준
- Australian National Committee on Large Dams (1998), Guidelines for Design of Dams for Earthquake
- Bureau, G., Volpe, R., Roth, W., and Udaka, T. (1987), "Seismic Analysis of Concrete Face Rockfill Dams", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 113, No. 10
- Franklin, A. and Chang, F. (1977), Earthquake Resistance of Earth and Rock-Fill Dams, Report 5 Permanent Displacements of Earth Embankments by Newmark Sliding Block Analysis, US Army Corps of Engineers, WES
- Kramer, S.L. (1996), Geotechnical Earthquake Engineering, Prentice-Hall
- Seed, H.B. and Idriss, I.M. (1971), "Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential", Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 107, No. SM9, pp. 1249-1274
- Seed, H.B. and Idriss, I.M. (1982), Ground Motions and Soil Liquefaction During Earthquake, Monograph Series, Earthquake Engineering Research Institute, Berkeley, CA
- Youd, T.L. and Idriss, I.M. (1997), NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils, Technical Report NCEER-97-0022, National Center for Earthquake Engineering Research, pp. 1-40