

Aging효과를 고려한 필댐의 거동분석

Behavior Analysis of Fill Dam Incorporating Aging Effects

신동훈¹⁾, Dong-Hoon Shin, 박한규²⁾, Han-Gyu Park, 조성은¹⁾, Sung-Eun Cho, 임은상¹⁾, Eun-Sang Im

¹⁾ 한국수자원공사 지반구조연구소 책임연구원, Principal Researcher, Geotechnics & Structures Research Center, Kwater

²⁾ 한국수자원공사 지반구조연구소 소장, Director, Geotechnics & Structures Research Center, Kwater

SYNOPSIS : This study describes the aging behavior of soils and its mechanism, which have been reported in the literatures mainly by Mitchell(1986) and Schmertmann(1991). It could be known that aging of soils has both positive and negative effects on mechanical properties of soils. In order to show aging effects on dam behavior, a parametric study was carried out based considering the presence of a weak area within clay core zone of the fill dam. From the comparison of results obtained from numerical analysis and filed investigation, age-softening phenomena occurred within core zone during about 30 years after its completion.

Key words : Aging, dam behavior, time-dependent behavior, aging effect, soils

1. 서 론

Mitchell(1986) 및 Schmertmann(1991) 등은 “모든 것이 시간에 따라 변화한다. 모든 흙은 나이들고 변화한다”고 한 바 있다. Mitchell(1986)은 1984년 Terzaghi강연에서 지반공학자의 관점에서 흙의 노령화(aging of soils)의 긍정적 측면과 부정적 측면을 모두 언급한 바 있다. Schmertmann(1991)은 25차 Terzaghi강연에서 주로 흙의 노령화의 긍정적 측면을 실내 및 현장실험 결과를 근거로 강조하여 설명한 바 있다.

Schmertmann은 그의 논문에서 Aging Mechanism을 다음의 5가지로 설명하고 있다; (1) Thixotropy (주로 점토, 큰 간극비이고 저응력일 때), (2) Mechanical Aging(주로 모래, 모든 응력조건), (3) Secondary Compression, (4) Particle interference 및 (5) Clay Disperse. 이들 5가지 메커니즘이 모두 액상화저항능력, 최대전단탄성계수, Young계수, 비배수전단강도, 콘저항치, 말뚝지지력, 간극수압 소산 등과 관련하여 시간이 경과할 경우 평균적으로 50~100%의 긍정적 변화에 기여하는 것으로 보고하였다. 그러면서 그는 Aging의 긍정적 개선효과가 나타나지 않았던 사례도 함께 보고하였는데, Stokoe와 Richart(1973)에 따르면 공사후 12년이 경과한 미국 Texas의 한 도로제방에서 Cross-hole 시험을 실시하여 G_0 값을 측정하였는데 Aging에 의해 오히려 G_0 값이 약간 감소된 것을 확인한 바 있다. 그 원인 중의 하나로 그들은 인근 호수의 수위가 상승하였기 때문으로 분석한 바 있다. 또한 Pennsylvania의 한 필댐은 축조후 8개월 반만에 간극수압이 소산되지 않은 채로 붕괴되었고, 캘리포니아 남부의 한 댐에서는 액상화저항능력을 증가시키기 위해 compaction grouting을 실시하였으나 SPT 시험결과 기대한 액상화저항능력은 나타나지 않은 것으로 확인되어, 결국 Aging에 의해 모든 것이 긍정적인 효과만 발생하는 것은 아님을 알게 해준 바 있다.

한편, 우리나라에는 약 18,000개소의 댐이 있다. 이중 약 95%가 1970년 이전에 건설되었고, 56%는 60년 이상 경과되어 노령화가 심화되고 있을 뿐만 아니라 최근의 기상이변과 지진발생 증가 등은 이들

노령화된 댐들의 안전을 더욱 위협하고 있다. 특히, 전술한 바와 같이 시간경과에 따라 댐체를 구성하는 흙재료들의 역학적 성질들이 개선되는 효과(Aging Increase)를 기대할 수도 있으나 Texas의 도로제방의 사례에서와 같이 오히려 역학적 성질이 열화(deterioration)되는 경우도 있을 수 있어 이 분야에 대한 심도있는 조사와 연구가 필요하다. 그러나 우리나라에서는 이 분야에 대한 연구가 매우 미미한 실정이다.

이에 본 논문에서는 Schmertmann 등이 제시한 흙의 노령화의 긍정적 측면을 설명해주는 5가지 Aging메커니즘을 간략히 살펴보고, 노령화로 인하여 댐체 일부의 역학적 성질이 나빠진 경우에 대한 수치해석에 의한 거동분석 사례를 살펴보았다.

2. Aging효과의 검토사례

2.1 변형계수의 증가

발전소를 지지하는 기초지반용으로 9.1m 두께의 점착성토로 성토한 지반에 대해 4년 후에 구속계수(Oedometer Modulus) M 를 측정하여 비교한 결과 그림 1과 같이 M 값이 Aging효과에 의해 100% 증가된 것으로 확인되었다.

또한 Seed 등(1958)은 점성토로 다짐축조한 지반에서 단 4일 후에 저변형을 영역에서의 전단탄성계수가 그림 2와 같이 증가된 것을 확인하였으며, 그후 Mesri 등(1990)은 Aging에 관한 여러 문헌자료를 분석하여 식(1)과 같은 보정식을 제안한 바 있다.

$$G_0^{Aged} = [1 + (N_G \times \log \Delta t)] \times G_0^{Unaged} \quad (1)$$

여기서, G_0^{Aged} : Δt 시간 후의 전단탄성계수

N_G : Aging에 의한 증가율

(모래 : 1~3%, 실트 : 3~6%, 점토 : 6~19%, 자갈 : 2~4%, 다짐성토 : 24%)

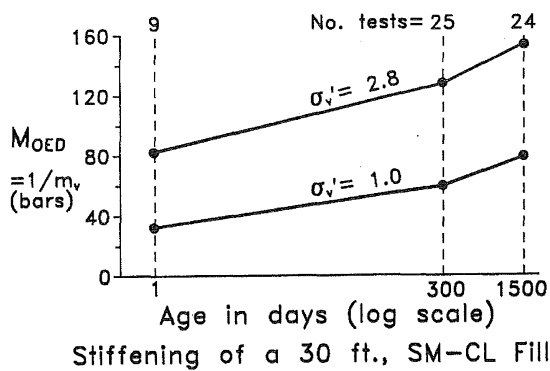


그림 1. Aging에 의한 Oedometer Modulus의 증가

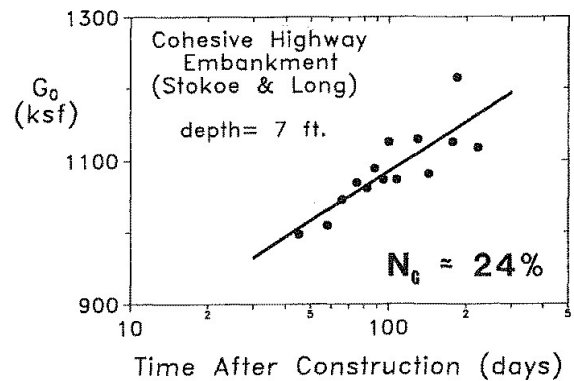


그림 2. Aging에 의한 전단탄성계수의 증가

2.2 전단강도의 증가

Seed(1979)는 액상화 저항강도 평가시 Aging효과를 고려하여 실험실에서 얻어진 액상화저항강도를 50~100% 증가시킬 것을 추천한 바 있으며, Yasuhara와 Ue(1983)은 재성형된 점토의 경우 시간이 30분~30일 경과할 경우 그림 3과 같이 비배수전단강도가 약 50% 증가됨을 확인한 바 있다.

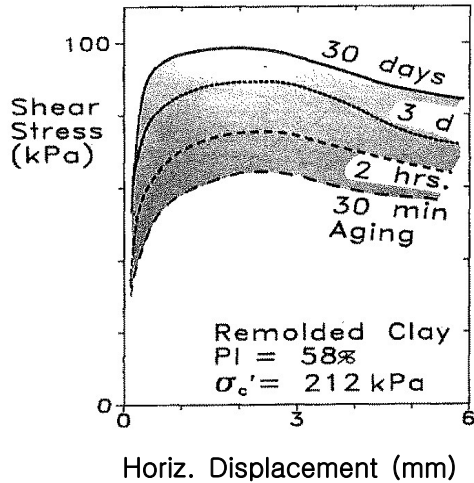


그림 3. Aging에 의한 비배수전단강도 증가 (Yasuhara & Ue, 1983)

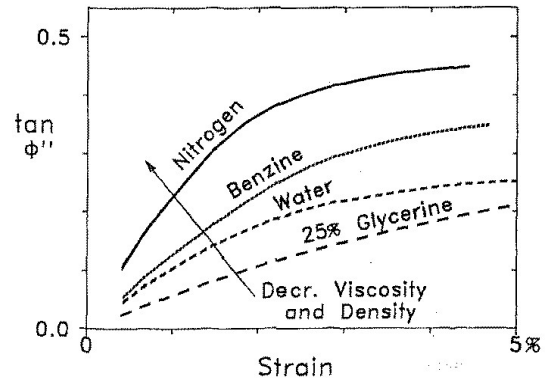


그림 4. 다양한 간극유체 사용에 따른 내부마찰각의 변화

3. Aging 메커니즘

Schmertmann(1991)은 점토와 모래의 Aging메커니즘을 ①분산성 입자의 움직임, ②내부 응력의 아칭 및 ③증가된 입자간 결속의 개별적 또는 복합적 현상으로 설명한 바 있다.

3.1 디소트로피(Thixotropy) 및 Mechanical Aging

점토가 재성형된 후 정지상태에서 상대적으로 짧은 시간동안에 견경(stiffen)해지거나 교반에 의해 매우 연약해지는 현상을 디소트로피라고 할때 짧은 시간동안에 견경해지는 것은 Aging효과라 할 수 있다. 점토의 디소트로피 에너지는 점토입자들 사이의 콜로이드성 인력이라는 내적자원(internal source)에 의한 것이다. 한편, 모래에서도 디소트로피 현상이 발생하며, 이때의 디소트로피 에너지는 점토와 달리 유효응력이라고 하는 외적자원(external source)이다. 유효응력은 2차 압축의 체적감소 또는 creep의 전단변형율을 유발한다. Schmertmann은 모래에서의 디소트로피 현상을 “Mechanical Aging”으로 명명하였다.

3.2 2차 압축

토립자의 2차 압축 또는 creep형태의 대수감쇠형 재배열에 의해 밀도가 변화된다. 이에 대해서는 Mesri 등(1990)에 의해 깊이 있게 연구된 바 있다.

3.3 입자간 간섭(Particles Interference)

모래에 있어서 시간경과에 따라서 입자간 결속(particle interlocking)이 강화되면 유효응력이 증가하여 결과적으로 마찰성분의 전단강도를 증진시킨다. 그림 4는 입자들 사이의 공극을 점성이 다른 유체로 채웠을 때의 입자의 내부마찰각 변화를 나타낸 것으로서 입자간 간섭이 적을 경우 내부마찰각이 작게 발휘됨을 알 수 있다.

3.4 점토의 분산(Clay Disperse)

동일한 압밀압력하에서 배수조건하에서는 카올리나이트 점토입자의 분산에 의해 소성지수가 크게 감소하고 간극비가 크게 감소하는 현상이 일어나며, 그와 동시에 내부마찰각이 증가하게 된다.

4. 노령화된 필댐의 거동분석

4.1 개요

해석대상 댐은 축조 후 30여년 경과된 중심코아형사력댐으로서 높이 21m, 길이 975m이다. 기초지반은 투수성의 사력층으로서 댐축조시 기초지반을 통한 누수를 차단하기 위하여 콘크리트 우물통 기초를 설치하고, 그 하부는 차수그라우팅을 실시하였다. 우물통기초의 내부는 모래자갈로 충전한 후 상부는 갓머리 모양의 콘크리트 덮개를 씌웠다. 점토심벽은 콘크리트우물통기초의 상부꺾을 포함하여 댐마루까지 1:0.2의 구배로 시공되었다. 해석대상댐의 하류측에 신규댐이 설치됨에 따라 이 댐은 필요없게 되었으나 연구목적의 위하여 시추조사, 지구물리탐사, 실내시험 및 각종 수치해석 등이 수행된 바 있다. 시추조사 결과 댐 전체 길이의 중간 정도 위치의 시추공에서 시추조사용 룯드(rod)가 자중에 의하여 낙하하는 현상이 발생하여 그 부위에 대한 상세조사를 실시하였고, 수치해석적인 방법으로도 그 원인을 조사하였다. 특히, 시추룯드의 자중낙하 심도가 우물통기초의 상부꺾의 바로 윗부분이라는 점에 주목하여 그 원인을 검토하였다. 이 부위가 weak zone이 된 이유로는 ① 상부덮개 위쪽에 발생하는 침투류의 집중에 의한 영향, ② 축조시 유기물 함량이 과다하여 담수후 장기간 포화에 따른 국부적 연화현상 발생, ③ 점토심벽의 다짐시공 불량 및 ④ 콘크리트 우물통기초의 강성과 점토심벽의 강성 차이에 의한 부등침하 등을 들 수 있으며, 이는 시간경과에 따른 점토심벽의 부정적 Aging (Negative Aging)으로 볼 수 있다.

4.2 해석방법

해석프로그램은 Geo-Slope사의 SIGMA/W를 사용하였으며 2차원 평면변형을 조건하에 댐의 단계별 축조과정을 모사하여 단계축조에 의한 변형해석을 실시하였다. 해석단면은 그림 5와 같다. 입력파라메타는 현장조사 와 실내시험결과 및 문헌 등을 참고하여 결정하였다. 점토심벽과 상하류 Shell Zone은 쌍곡선모델(Hyperbolic Model)을 사용하였고, 모래자갈로 이루어져 있는 기초지반은 Mohr-Coulomb모델을 적용하였으며, 우물통기초는 충분한 강도와 강성을 갖는 것으로 보고 요소의 property를 부여하지 않았다. 또한 본 연구의 목적상 담수시의 물하중에 의한 영향은 검토에서 제외하였다.

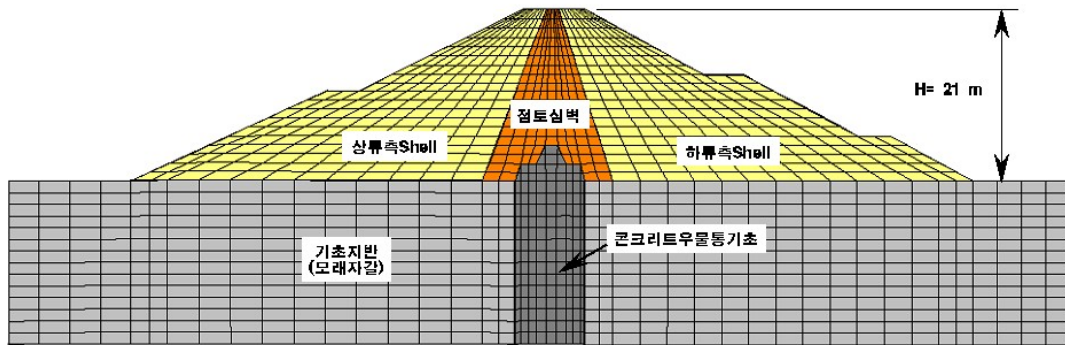


그림 5. 해석대상 댐의 유한요소 해석단면

4.3 해석결과

그림-6은 축조 후 침하량, 연직응력, 최대전단변형을 및 축차응력 분포를 나타낸 것으로 점토심벽 zone에 아칭현상이 발생하여 주변부 보다 상대적으로 적은 연직응력이 작용하고, 콘크리트 우물통 기초의 직상부에는 전단변형율이 집중발생하는 것으로 나타났다.

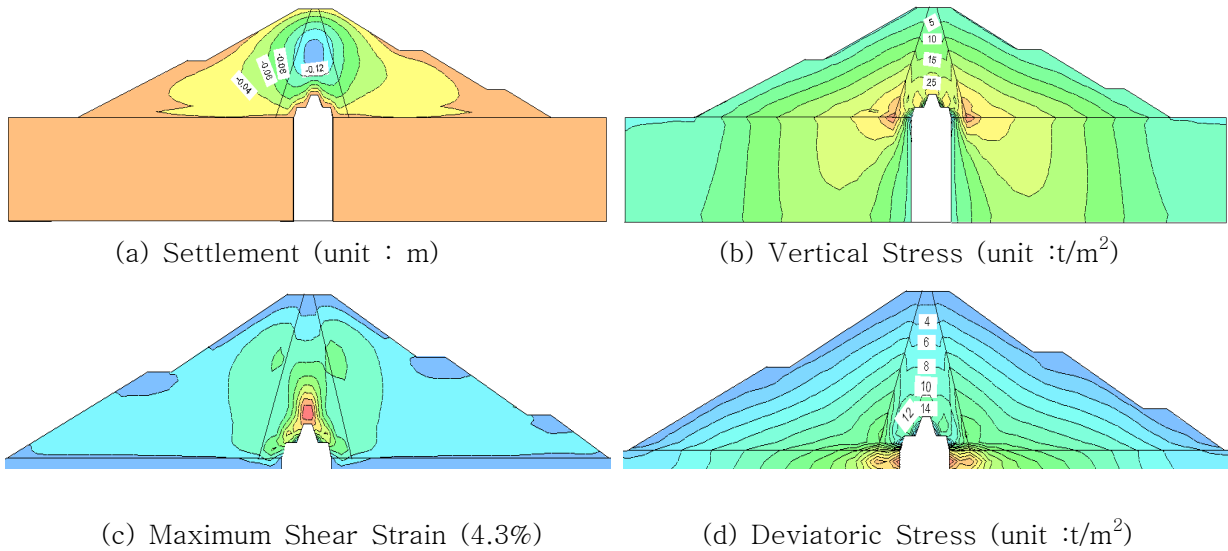


그림 6. 축조완료 직후의 응력 및 변형률 분포

그림 7은 4.1에 전술한 콘크리트 우물통기초의 직상부에서 발견된 weak zone을 고려하여 해석한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 weak zone에 의하여 응력분포와 변형률 분포 양상이 많이 흐트러지는 것을 알 수 있다. 그림 8은 weak zone 발생 전후의 최대전단변형률 분포를 비교한 것으로 우물통기초 직상부의 약 5m 구간은 최대전단변형률이 약 3~5% 정도이고, weak zone 발생 전보다 약 22% 정도 증가하는 것으로 나타났다. 일반적으로 점토심벽재료의 경우 전단변형률이 3~5%정도에서 파괴가 발생하는 것을 고려할 때 이 부위에는 이미 소성상태에 도달된 것으로 볼 수도 있다.

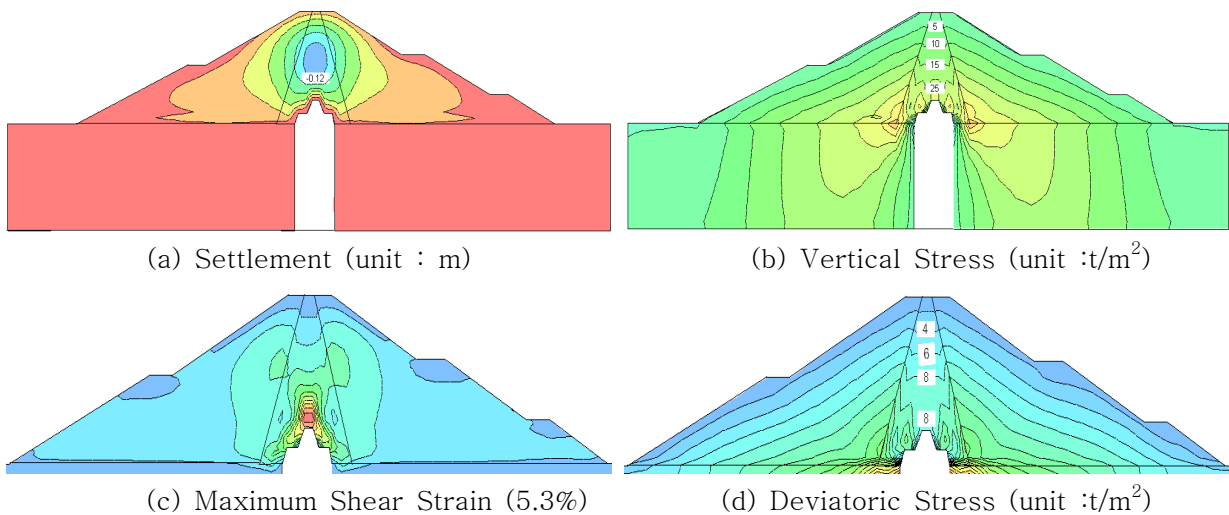


그림 7. Aging에 의한 점토심벽의 부분 손상을 고려한 경우의 응력 및 변형률 분포

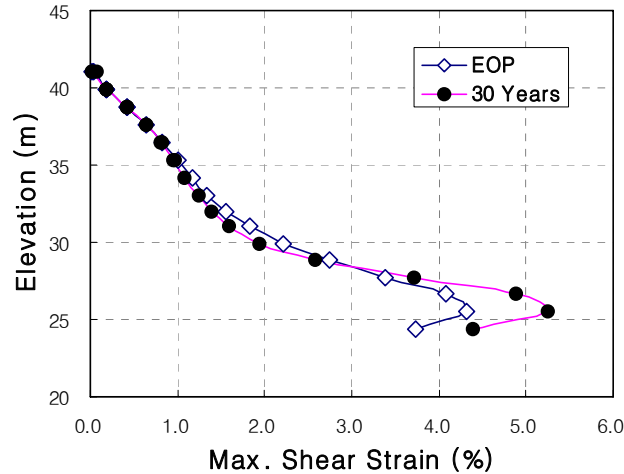


그림 8. 축조직후 및 30년 경과 후의 점토심벽의 전단변형을 분포 비교

5. 결론

본 논문에서는 Schmertmann 등이 제시한 흙의 노령화의 긍정적 측면을 설명해주는 5가지 Aging 메커니즘을 간략히 살펴보고, 노령화로 인하여 댐체 일부의 역학적 성질이 나빠진 경우에 대한 수치해석에 의한 거동분석 사례를 살펴보았으며 그 결론을 요약하면 다음과 같다.

(1) 흙의 Aging 메커니즘은 ① Thixotropy (주로 점토, 큰 간극비이고 저응력일 때), ② Mechanical Aging(주로 모래, 모든 응력조건), ③ Secondary Compression, ④ Particle interference 및 ⑤ Clay Disperse 등으로 설명할 수 있으며, 대부분 액상화저항능력, 최대전단탄성계수, Young계수, 비배수전단강도, 콘저항치, 말뚝지지력, 간극수압 소산 등과 관련하여 시간경과에 따라서 평균 50~100%의 긍정적 변화가 일어나는 것으로 볼 수 있다. 그러나 일부 사례에서는 Aging의 긍정적 개선효과가 나타나지 않거나 오히려 악화된 경우도 있어 이 부분에 대한 심도 있는 연구가 필요하다.

(2) 약 30년 경과된 중앙차수벽형석괴댐에 대하여 Aging효과를 고려한 거동분석을 수치해석적 방법으로 검토한 결과 현장조사시 발견된 국부적 weak zone의 존재가능성을 확인할 수 있었다.

참고문헌

1. Mesri, G., Feng, T.W. and Benak, J.M.(1990), "Postdensification Penetration Resistance of Clean Sands", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 116, No.7, pp.1095~1115.
2. Mitchell, J.K.(1986), "Practical Problems from Surprising Soil Behavior", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 112, No.3, pp.259~289.
3. Schmertmann, J.H.(1991), "Mechanical Aging of Soils", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 117, No.9, pp.1288~1330.
4. Seed, H.B., McNeill, R.L. and de Guenin, J.(1958), "Clay Strength Increase Caused by Repeating Loading", Journal of Soil Mechanics and Foundations Div., ASCE, May, 618.
5. Stokoe, K.H., II and Richart, F.E.Jr. (1973), "Insitu and Laboratory Shear Wave Velocities", Proc. of the Eighth Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Moscow, USSR, Vol.1(2), pp.403~409.
6. Yasuhara, K. and Ue, S.(1983), "Increase in Undrained Shear Strength due to Secondary Compression", Soils and Foundations, Japan, Vo.23(3), pp.50~64.