

점토 함량에 따른 미고결 이암의 크립 변형 비교

명우호, 장찬동(충남대학교 지질학과)

1. 서론

과쇄대나 연약지반 등의 지질공학적으로 취약한 암반의 상당 부분은 미고결암 또는 과쇄암으로 구성되어 있으며 이들 암반의 역학적 성질을 규명하는 것은 보다 정확한 변형, 강도 등의 거동 예측을 위해 필요하다. 일정한 응력 하에서 시간에 따라 지속적으로 발생하는 크립 변형(creep deformation)은 특히 미고결 암석의 rheology에서 중요한 부분을 차지하며 이에 대한 적절한 성격파악을 통해서 이들 암석의 변형 성질의 완벽한 기술이 가능하다(정태중, 1996; 김광식 외, 2001; 김광식과 김교원, 2003; Maranini and Brignoli, 1999; Hagin and Zoback, 2004; Fabre and Pellet, 2006). 미고결 암석에서의 크립을 유발시키는 주요 원인으로는 하중시 공극압의 소산에 따른 유효응력의 증가(Murakami, 1979; Yoshimi, 1987; Koutsoftas et al., 1994; Robinson, 1999)와 암석 매질 자체가 가지고 있는 시간 의존적 변형성(정태중, 1996; 김광식 외, 2001; 김광식과 김교원, 2003; Maekawa et al, 1991; Maranini and Brignoli, 1999; Azam, 2003; Gasc-Barbier et al, 2004; Hagin and Zoback, 2004; Onargan et al., 2004; Fabre and Pellet, 2006; Tomanovic, 2006) 등으로 제시되어 왔다. 특히 후자의 경우에 김광식과 김교원(2003)과 Hagin and Zoback(2004)은 점토나 기타 연성광물의 함유 여부가 크립 발생의 주된 원인이라 제안한 바 있다.

그러나 이러한 제안을 뒷받침할 만한 체계적인 암석역학적 실험 결과가 매우 한정되어 있다. 예를 들어 김광식과 김교원(2003)은 단일 시료에 대한 실험결과를 통하여 크립 변형에 대한 점토광물의 효과를 제안하였고, Dugan et al.(2003)은 ODP 코어에서 획득한 네 개의 점토함량이 다른 시료에 대한 선행압밀압력을 산출하는 데에만 초점을 맞추어 실험결과를 발표하였다. 다만 Hagin and Zoback(2004)이 미고결 모래에 대한 정수압 압축 시험을 통해 점토함량이 클수록 크립변형이 증가됨을 개괄적으로 보인바 있다.

본 연구에서는 이러한 미고결 암석의 크립변형에 관한 점토함량의 효과를 알아보기 위한 일환으로 압밀시험을 실시하였다. 점토함량과 더불어 크립변형에 영향을 줄 수 있는 초기 공극률에 의한 효과도 같이 조사하여 보았다.

2. 시료 및 시험 방법

시료는 한국지질자원연구원의 심부 지열 에너지 개발 사업의 일환으로서 포항시의 제4기 퇴적층에 굴착한 시추공(총 심도 1,100m)의 코어(SX size)로부터 얻었다. 시추코어는 심도 359m 상부 전 구간을 걸쳐 미고결 이암으로 구성되어있고 이 중 점토함량이 다른 시료를 81, 104, 268, 334m의 심도에서 획득하였다. 모든 시료는 상온에서 건조상태이다.

채취한 시료의 점토 광물 조성 분석을 위해 XRD(X-Ray Diffraction) 정량 분석을 실시하였으며 그 결과 심도별 각 시료의 점토함량은 각각 29.6%(81m), 19.1%(104m), 39.5%(268m), 23.5%(334m)로 나타났다.

점토함량과 더불어 미고결 암석의 주요 물성인 초기 공극률을 측정하기 위하여 비중시험을 실시하였다. 비중 시험은 KS에서 제안된 방법을 따라 수행하였고 이 과정을 통하여 측정된 비중 값을 이용하여 공극률 ϕ 를 다음의 식을 통해 산정하였다.

$$\phi = 1 - \frac{V_{dr}}{G_s V_w} \quad (1)$$

각각의 시료에 대한 비중과 초기 공극률 산출치는 Table 1에 제시하였다.

표 1. 각 시료의 비중과 산출된 초기 공극률.

Core depth (m)	Clay content (%)	Specific gravity	Initial porosity (%)
81	19.1	2.111	41.30
104	23.5	2.591	33.33
268	29.6	2.600	21.87
334	39.5	2.640	47.68

미고결 이암의 크립 변형을 측정하기 위해 압밀시험을 수행하였다. 한국표준(KS)에서 제안하는 압밀시험용 원주형 시편의 크기는 직경 60mm, 높이 20mm이나, 시편이 얻어진 코어의 크기는 SX size이지만 보관과정에서 코어가 절반으로 나뉘어져 보관되었고 또한 건조과정에서 수축 변형이 발생하여 적절한 크기의 시편을 얻을 수가 없었다. 본 실험에서는 직경 25.4mm, 높이 15mm의 원주형 시편을 성형하여 이용하였다. 일반적으로 퇴적암은 그 물성에 있어 이방성을 지니고 있고 이에 의해 결과가 영향을 받을 수 있기 때문에 일관성을 위해 모든 원주형 시편을 그 축방향이 연직방향과 일치하도록 제작하였다.

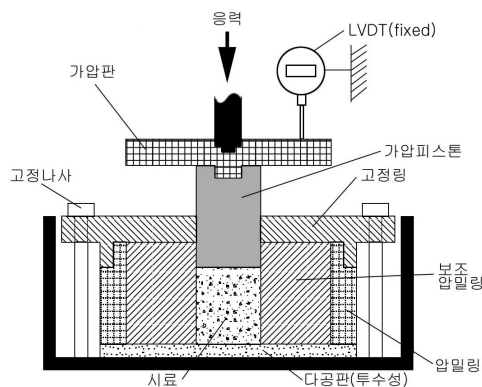


그림 1. 압밀상자 모식도.

그림 1은 실험에 이용된 압밀시험장비의 모식도이다. 성형된 암석시편의 크기에 맞도록 표준압밀시험기 내에 보조압밀링을 장착하여 그 안에 암석시편을 위치시키고 가압피스톤의

로 하중을 가하였다. 하중 경로는 총 6단계로 구성되어있다. 매 단계마다 즉각적으로 1.9 MPa씩 증가시키고 24시간 동안 일정한 응력을 유지시키며 시간에 따른 일축압밀변형을 가압판에 고정된 LVDT를 이용하여 측정하였다. 모든 실험은 실내 상온 상압 하에서 실시하였다.

3. 결과

일축압밀(측방 변위 구속) 상태에서의 시편의 체적변형율은 시료의 초기길이에 대한 측방 변위의 비로 구해진다. 일반적으로 시료의 변형은 하중의 증가에 의해 나타나는 즉각적인 변형과 일정한 하중 하에서의 시간에 따른 크립 변형으로 나눌 수 있다. 그림 2에는 압밀시험 결과에서 하중 증가에 따른 즉각적인 변형을 뺀 크립체적변형율을 시간의 함수로 나타내었다. 모든 시편에서 현저한 양의 크립 변형을 관찰하였다, 크립은 매 하중 증가(1.9MPa step)와 함께 초기에는 급격하게 발생하며 그 이후로 지속적인 압밀의 형태로 나타났다. 점토함량에 따른 크립변형율의 차이는 뚜렷하게 나타났다. 각 시료 당 총 6회의 단계적인 하중증가 동안 발생한 총 누적 크립변형율은 점토함량 19.1% 시료가 2.19×10^{-2} , 23.5% 시료가 4.15×10^{-2} , 29.6% 시료가 4.51×10^{-2} , 39.5% 시료가 11.24×10^{-2} 로 나타났다.

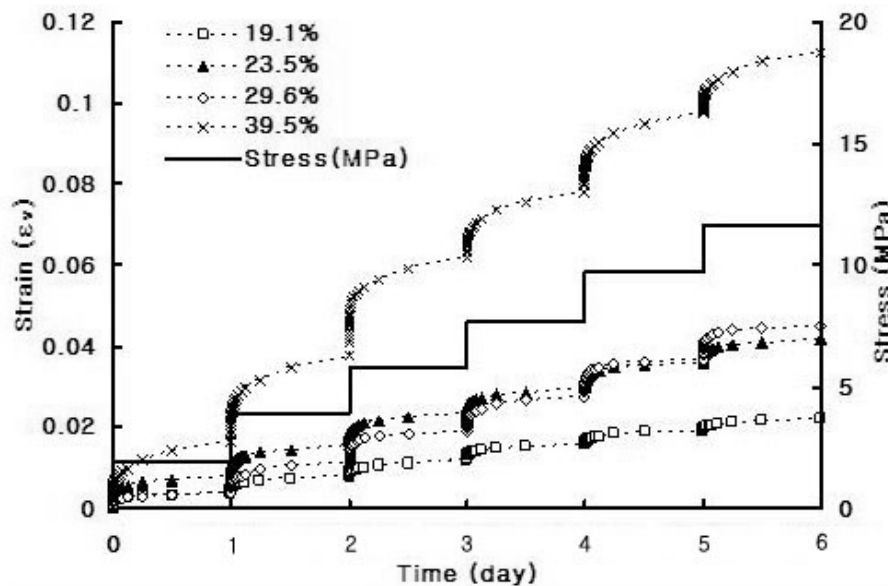


그림 2. 각 시료별 시간-누적 크립 변형율 그래프.

각 상수 응력하에서 발생한 24시간 동안의 크립변형율-시간 곡선은 동일한 시편의 경우 유사한 형태를 보였다. 이에 따라 각 응력 유지단계에서 발생한 총 크립변형율 또한 상수 응력의 크기에 관계없이 거의 일정하게 나타났다(그림 3). 동일한 응력 증가분에 대해 발생한 총 크립변형율이 거의 일정하게 나타나는 것은 선형점성변형(linear viscous

deformation)의 특성을 지시한다. 각 응력 유지 단계에서 발생한 24시간동안의 크립변형율은 점토함량 19.1% 시료가 평균 3.656×10^{-3} , 23.5% 시료가 평균 6.911×10^{-3} , 29.6% 시료가 평균 7.511×10^{-3} , 39.5% 시료가 평균 18.733×10^{-3} 으로 나타났다. 이 결과는 그림 4에서 보이듯이 크립변형율의 크기가 점토함량과 거의 선형적으로 비례함을 나타낸다. 반면 각 시료의 초기 공극률은 총 크립 변형율과 이렇다할 상관관계를 갖지 않는 것으로 나타났다(그림 5).

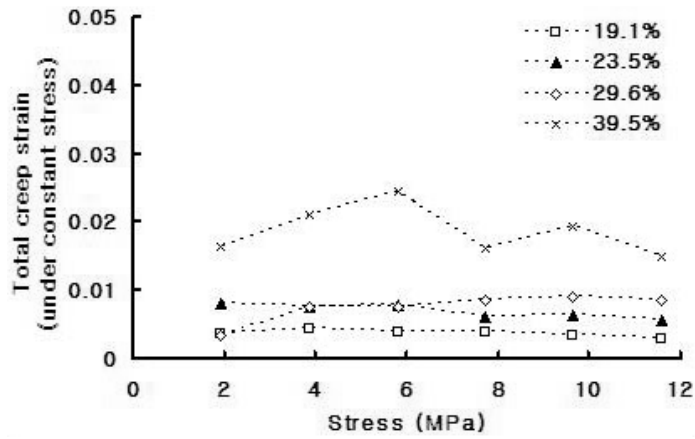


그림 3. 상수 응력 하에서의 총 크립 변형율.

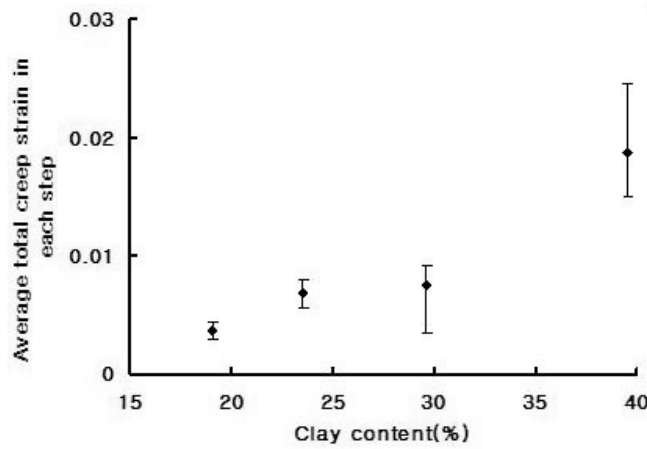


그림 4. 점토함량에 따른 상수 응력 하에서의 총 크립 변형율.

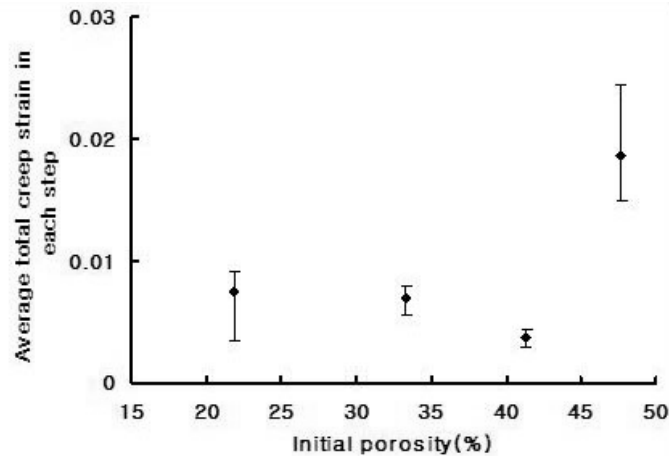


그림 5. 초기 공극률에 따른 상수 응력 하에서의 총 크립 변형률.

4. 크립 변형에 대한 power law 모델링

그림 2에 나타낸 각 응력 단계에 대한 크립변형-시간 곡선은 다양한 형태의 변형 모델 (rheological model)로 표현될 수 있다. 그 중 가장 흔히 이용되는 형태는 시간에 대한 지수 함수 형태로 주어지는 크립변형 곡선의 형태이다(Singh and Mitchell, 1968; Singh, 1973; Hyde and Brown, 1976; Jaurez-Badillo, 1985; Dudley et al., 1994). 즉, 시간의 함수인 크립 변형률 $\varepsilon(t)$ 는

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_f / (1 + [\tau/t]^d) \quad (2)$$

로 주어진다(Jaurez-Badillo, 1985). 여기서 τ 는 characteristic time으로서 최종 크립변형률 ε_f 의 절반에 도달하는데 걸리는 시간으로 정의된다. 식 (5)은 응력 유지기간이 characteristic time보다 매우 작다($t \ll \tau$)는 가정 하에 다음과 같이 단순화시킬 수 있다(Dudley et al., 1994).

$$\varepsilon(t) = \varepsilon(1)t^d \quad (3)$$

여기서 $\varepsilon(1)$ 은 단위시간($t=1$)에서의 크립변형률, 즉 strain parameter라 부르며, d 는 크립지수(creep exponent)이다.

그림 6은 지수함수를 이용하여 실험결과를 fitting한 경우의 한 예이다. 지수함수를 이용한 자료의 fitting은 모든 실험결과에 대해 만족스럽게 수행되었으며 이 과정을 통해 얻어진 두 크립 상수, 즉 strain parameter($\varepsilon(1)$)와 creep exponent(d)를 응력의 함수로서 그림 7에 각각의 시료에 대해 도시하였다. 일정 응력(1.9MPa) 증가 단계 후 24시간 동안 기록된 크립 변형-시간 곡선에서 각각의 시료에 대한 $\varepsilon(1)$ 과 d 는 작용된 응력의 크기에 상관없이 거의 일정하게 나타났다. $\varepsilon(1)$ 은 시료의 점토함량이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보였으며 이는 그림 3과 4에 나타난 경향과 잘 일치한다. 반면 초기 공극률은 $\varepsilon(1)$ 의 값과 이렇다할 상관관계를 갖지 않는다. $\varepsilon(1)$ 과는 달리 d 는 모든 시료에 대해 일정한 경향을 보였다(그림 8).

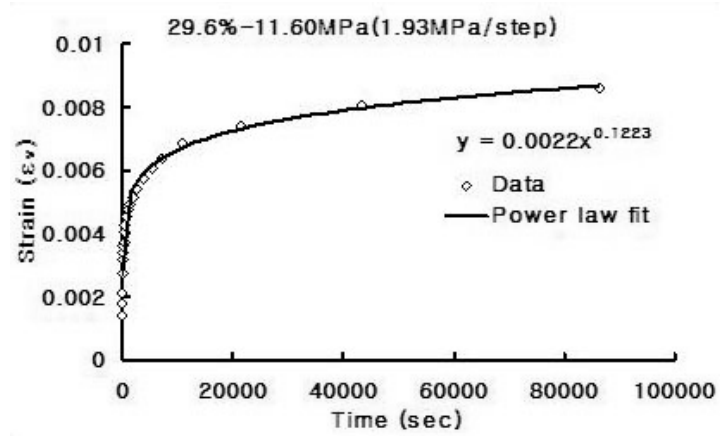


그림 6. 1.93MPa의 상수 응력이 적용된 29.6% 시료의 크립 곡선에 대한 power law fitting.

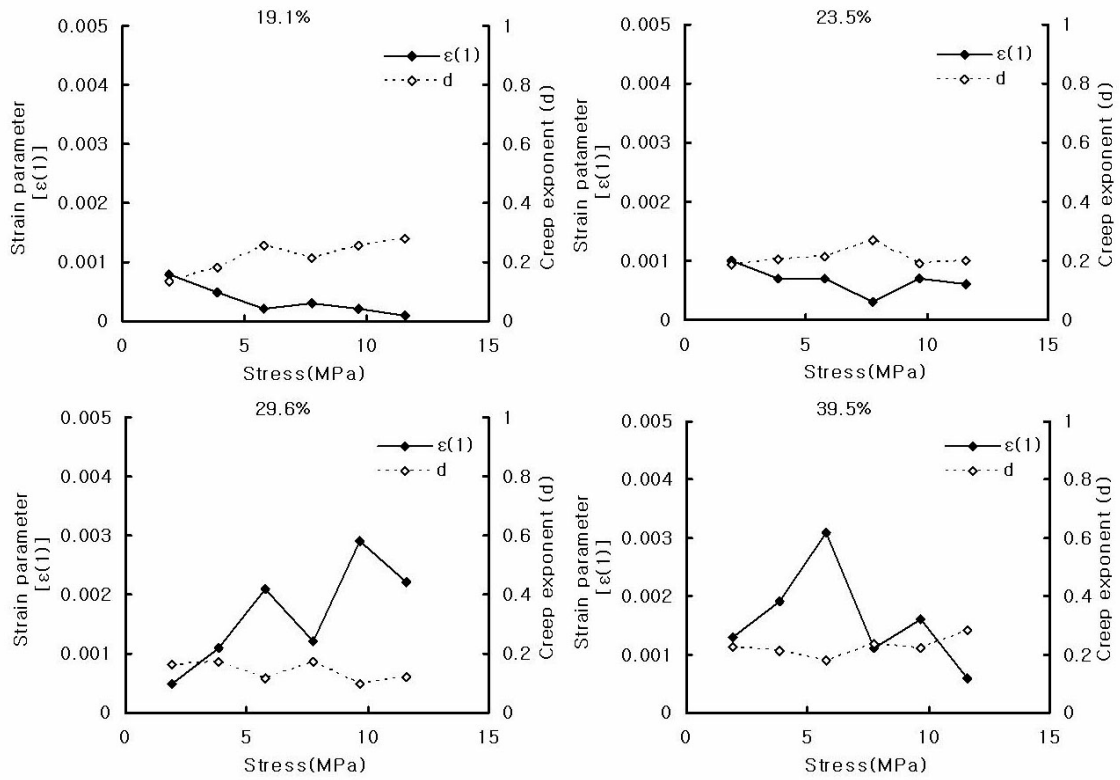


그림 7. Stress의 함수로 나타난 Strain parameter($\epsilon(1)$)와 creep exponent(d).

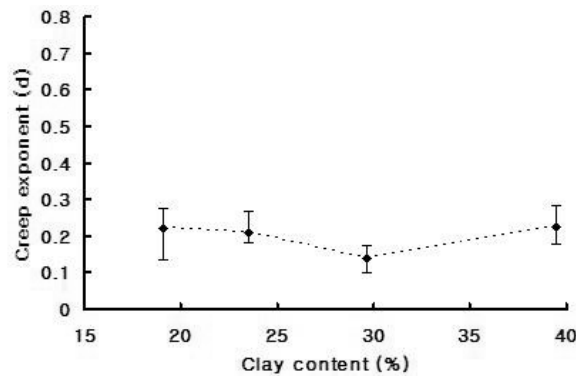


그림 8 점토 함량에 따른 평균 creep exponent(d).

5. 결론

본 연구는 점토함량에 따른 미고결 이암의 크립 변형을 비교하여 점토함량과 크립 변형 간의 관계를 규명하고자 했으며, power law 모델을 통해 크립 변형과 관련된 물성 값을 산출하였다. 실험 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 실험에 이용된 모든 미고결 이암 시료는 일정한 응력 하에서 시간 의존적인 변형, 즉 크립 변형을 보였다.
- 점토 함량에 따라 총 크립 변형율은 거의 선형 비례적으로 증가하는 경향을 보이며 초기 공극률은 크립변형에 큰 영향을 미치지 못하였다.
- 모든 시료에서, 동일한 시료에 대한 각 응력 유지 단계 하에서 나타난 크립 곡선은 거의 일정하게 나타났고 각 단계에 대한 총 크립 변형율도 거의 일정하게 나타나는 것으로 보아 모든 시료에서 선형 점성 변형이 나타났다.
- Power law 모델을 이용하여 산출한 strain parameter($\epsilon(1)$)와 creep exponent(d)는 동일한 시료에 대해 가해진 응력의 크기와는 관계없이 거의 일정한 값을 나타냈다. Strain parameter($\epsilon(1)$)는 시료의 각 응력 유지 단계 총 크립 변형율과 관련있는 상수로 점토함량이 증가함에 따라 그 평균값도 비례적으로 증가하는 경향을 보인다. 따라서, 대상 시료에 각각 대한 크립 특성을 나타내는 상수로 사료된다. Creep exponent(d)는 시험 대상 시료 모두에 대해 점토함량과 관계없이 일정하기 때문에 시험 대상 시료 모두에 대한 크립 특성을 나타내는 상수로 사료된다.

참고문헌

1. 김광식, 김교원, 정자혜, 2001, 포항분지 제3기 이암의 크리프 특성, 대한지질공학회 창립 11주년 정기총회 및 학술발표회, 3-14.
2. 김광식, 김교원, 2003, 포항분지 제3기 두호층 이암의 크리프 거동, 지질공학, Vol. 13, No. 2, 227-238.
3. 정태중, 1996, 의성 소분지에 분포하는 백악기 사암의 크리프 시험, 대한지구과학회지,

Vol. 17, No. 2, 109–118.

4. Azam, S., 2003, Influence of mineralogy on swelling and consolidation of soils in eastern Saudi Arabia, Canadian geotechnical journal: Revue canadienne de géotechnique, Vol. 40 No. 5, 964–975.

5. Dudley, J. W., Myers, M. T., Shew, R. D., Arasteh, M. M, 1994, Measuring compaction and compressibilities in unconsolidated reservoir materials via time-scaling creep, Rock mechanics in petroleum engineering, 45–54.

6. Dugan, B., Flemings, P. B., Olgaard, D. L., Gooch M. J., Consolidation, effective stress, and fluid pressure of sediments from ODP Site 1073, US mid-Atlantic continental slope. Earth and planetary science letters, Vol. 215, No. 1/2, 13–26.

7. Fabre, G., Pellet, F., 2006, Creep and time-dependent damage in argillaceous rocks, International journal of rock mechanics and mining sciences, Vol. 43, No. 6, 950–960.

8. Gasc-Barbier, M., Chanchole, S., Břrest, P., 2004, Creep behaviour of Bure clayey rock, Applied clay science, Vol. 26, No. 1/4, 449–458.

9. Hagin, P. N., Zoback, M. D., 2004, Viscous deformation of unconsolidated sands–Part 1: Time-dependent deformation, frequency dispersion, and attenuation, Geophysics, Vol. 69, No. 3, 731–741

10. Hyde, A. F. L., Brown, S. F., 1976, The plastic deformation of a silty clay under creep and repeated loading, Geotechnique, Vol. 26, No. 1, 173–184.

11. Jaurez-Badillo, E., 1985, General time volume change equation for soils, Proceedings XI International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 2, 519–530.

12. Koutsoftas, D. C., ASCE, M., Cheung, R. K. H., 1994, Consolidation settlement and pore pressure dissipation, Vertical and horizontal deformations of foundations and embankments, 1100–1110.

13. Maekawa, H., Miyakita, K., Sekiguchi, H., 1991, Elasto-viscoplastic consolidation of a diatomaceous mudstone, Japan society of soil mechanics and foundation engineering, Vol. 31, No. 2, 93–107.

14. Maranini, E., Brignoli, M., Creep behaviour of a weak rock: experimental characterization, International journal of rock mechanics and mining sciences, Vol. 36, No. 1, 127–138.

15. Murakami, Y., 1979, Excess pore-water pressure and preconsolidation effect developed in normally consolidated clays of some age, Soils and foundations, Vol. 19, No. 4, 17–29.

16. Onargan, T., Koca, M. Y., Kucuk, K., Deliormanli, A., Saydam, S., 2004, Impact of the mechanical characteristics of weak rocks and trona ore beds on the main drift deformation at beypazari mine, Turkey, International journal of rock mechanics and mining sciences, Vol. 41, No. 4, 641–654.

17. Robinson, R. G., 1999, Consolidation analysis with pore water pressure measurements, Géotechnique, Vol. 49, No. 1, 127–132.

18. Singh, A., Mitchell, J. K., 1968, General stress-strain-time function for soils, *Journal of soil mechanics and foundation division, ASCE*, Vol. 95, No. 1, 21-46.
19. Singh, D. P., 1975, A study of creep of rocks, *International journal of rock mechanics, mining science and geomechanics abstracts*, Vol. 12, 271-276.
20. Tomanovic, Z., 2006, Rheological model of soft rock creep based on the tests on marl, *Mechanics of time-dependent materials*, Vol. 10 No. 2, 135-154.
21. Yoshimi, Y., 1987, Pore pressure dissipation ratio for a nonlinear consolidation problem, *Soils and foundations*, Vol. 27, No. 3, 88-90.