

사면의 지반 열화로 인한 안정성 평가에 관한 연구

A Study on the Evaluation of Stability due to Ground Deterioration of Slope

한 영 철¹ Han, Young-Chul

Abstract

The lapse of time may cause in the slope structure various deterioration phenomenon progresses in the ground of slope, and collapse due to deterioration of strength, resulting in a decrease in the service life. The approach to slope stability due to the ground deterioration is a different concept from the existing limit equilibrium analysis, which is limited to the physical characteristics and geometrical structure of ground. In this study, we conducted a comparative analysis of various literature studies related to the slope failure characteristics and behaviors to presented the optimal formulas for shear strength reduction, such as the exponential function, the logarithmic function and the inverse hyperbolic function. And then a case study was performed on cut slope of Gyeongbu High Speed Rail construction site along the Yangsan fault zone, where the slope failure of shale layer vulnerable to deterioration occurred. As a result, it was confirmed that landslide occurred due to reduction of shear strength by deterioration, as safety factor is approx. 1.0 at the time when the slope failure occurred. Based on the comprehensive case study, as a quantitative approach to the evaluation of slope stability due to deterioration of ground, finally we propose a method for evaluating slope stability with optimal strength reduction curves.

요 지

사면 구조물은 시간이 경과함에 따라 대상지반에서 각종 열화 현상이 진행되어 내구성의 저하로 인한 붕괴가 발생할 수 있으며, 사용 연한을 감소시키는 결과를 초래하게 된다. 이러한 지반 열화에 따른 사면안정에 대한 접근방안은 지반의 물리적 특성 및 기하학적인 구조에 국한하여 분석하는 기존의 한계 평형 해석과는 또 다른 개념이라 할 수 있다. 본 연구에서는 사면의 열화 특성과 관련하여 각종 문헌 조사를 통하여 비교분석을 수행하고, 전단강도 저감에 대한 최적의 제안식들로서 지수함수, 로그함수 및 역쌍곡선 함수를 제시하고, 열화에 취약한 양산 단층대의 세일층에서 붕괴가 발생한 경부고속철도 절토사면을 대상으로 사례분석을 실시하였다. 본 연구에서는 사례분석을 통하여 향후 열화로 인한 사면 안전성과 관련하여 정량적인 평가를 위한 최적의 강도 저하 곡선을 도출하고 한계평형해석에 의한 안정해석을 할 수 있는 접근 방법을 제시하였다.

Keywords : Ground deterioration, Limit equilibrium analysis, Slope stability, Shale, Strength reduction characteristics, Slip surface, Inverse hyperbolic function

¹ 정회원, 연세대학교 겸임교수 (Member, Adjunct Prof., Dept. of Civil Engrg., Yonsei Univ., Tel: +82-2-2123-6642, Fax: +82-2-2123-8378, ychan009@yonsei.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2019년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

국내 국토 70% 이상이 산지로 형성되어 있으며 도로 및 철도 등의 사회 기반시설의 개량 및 신설 확충으로 인하여 인공 사면의 수는 매년 증가하고 있다. 반면 최근 지구 온난화로 인한 국지성 집중 호우 등 기후 변화가 심화되어 사면의 붕괴 및 산사태가 빈번히 발생하고 대규모화하고 있어, 인적 및 물적 피해가 급증하고 있다. 이러한 토사 재해 피해를 저감하기 위한 방안으로 수많은 연구가 진행되고 있으나, 주로 강우와 지반의 물리적 특성에 국한하여 분석하고 연구가 이루어지고 있는 실정이다.

토목 구조물 중 사면의 경우에 준공 후 시간이 경과함에 따라 지반의 열화 혹은 사면 보호공/대책공의 노후화에 따라 점차 안정성에 위해를 초래할 수 있다. 사면 지반의 열화는 주로 대기 노출에 따른 물리적 혹은 화학적 요인으로 대별할 수 있으며, 물리적 요인으로는 주로 얇은 심도의 사면에서 진행되어 침식이나 평면과외가 진행하게 된다. 반면 깊은 심도의 사면의 경우에는 지하수와의 화학적 상호 작용(chemical interaction) 혹은 용출(Leaching) 등에 따라 열화가 진행되어 강도 저하로 인한 사면 붕괴가 발생하게 된다. 이러한 화학적 특성 변화는 주로 셰일(shale), 이암(mudstone), 석회암(limestone), 석고질 이회암(gypsiferous marl) 등의 퇴적암이나 단층대(fault zone)의 단층 점토(gouge)와 같이 물과 대기 중에 매우 취약한 지반에 발생한다. 특히 사면의 기하학적 변형이나 터널 등 지하 구조물 등이 설치되는 지역에서는 지하수의 유로 변화와 병행하여 유속이 증가하여 열화를 촉진하여 사면의 안정성을 저하시키는 원인 중에 하나라 할 수 있다.

이와 같이 사면 구조물은 시간이 경과함에 따라 대상 지반에서 각종 열화 현상이 진행되어 내구성의 저하로 인한 붕괴가 발생할 수 있으며, 사용연한을 감소시키는 결과를 초래하게 된다. 따라서 이러한 내용연수를 고려한 적절한 설계는 물론 공사 완료 후에 유지관리 차원에서 열화로 인한 장기적인 사면의 거동 분석은 매우 중요하다 할 수 있다. 이러한 지반 열화에 따른 사면안정에 대한 접근방안은 지하수와 지반의 물리적 특성 및 기하학적인 구조에 국한하여 분석하는 기존의 한계 평형 해석과는 또 다른 개념이라 할 수 있다.

2. 사면 지반의 열화 원인

지반의 열화는 시간이 경과함에 따라 지반의 공학적 특성이 저감되는 현상으로 풍화(weathering), 변질(alteration), 슬래킹(slaking), 용해(solution) 및 염분 용탈(salt leaching) 등을 포함한다고 정의할 수 있으며, 전단 강도의 연화(softening) 현상도 일종의 열화의 과정으로 간주된다(Yoshida et al., 1997). 장기적으로 사면 열화 현상에 대한 원인은 물리적 요인(physical processes)과 화학적(chemical processes)으로 대별된다(Geological Society, 1995).

물리적 요인은 ageing 혹은 creep 효과와 같이 시간이 경과함에 따라 온도 변화, 습윤/건조 반복, 응력해방 등 물리적인 환경 변화에 따라 특성의 변화가 발생하는 현상이며 강성도의 저하 혹은 변형률 증가를 일으키며 박리, 마모 및 동결 용해 등을 포함한다.

화학적 요인은 풍화(weathering)나 주변 환경(지하수, 대기오염 등)에 따른 화학적 변화로서 진행되며, 사면 지반과 지하수의 화학적 상호작용(chemical interaction)에 의해 지반의 강도 특성을 감소시키며(Hagros, 2007), 화학적 상호작용은 용해, 산화 및 환원, 수화 및 가수분해 등의 과정으로 분류할 수 있다(Hack, 2008). 특히, 화학적 풍화는 모암의 광물 조직 및 불연속면의 형태에 따라 크게 영향을 받으며, 현지 기후, 지표면 및 지하수 위 상태, 지하수에 용해되어있는 화학적 성분에 따라 직접적인 영향을 받는다(Fookes et al., 1988; Tating et al., 2013a; Park et al., 2016). 특히 그라우팅으로 보강된 지반이나 이암, 셰일, 이회암(marl) 혹은 석고질암(gypsiferous materials) 등과 같은 퇴적암(sedimentary rocks)은 물에 취약하므로 용탈이나 화학적 작용에 민감하다 할 수 있다(Tating et al., 2013a).

3. 사면 열화의 공학적 특성

자연 사면은 열화가 진행되어 붕괴에 이르기까지 수십 년에서 수천 년의 걸쳐 발생하고 있으나, 인공 사면의 경우는 상대적으로 화학적 열화로 인하여 수개월 또는 수십 년 이내에도 발생하는 것으로 알려져 있다(Selby, 1993; Fookes et al., 1988; Utili, 2004). 사면 열화의 진행은 근본적으로 암석의 종류, 기후 변화 및 지형학적인 요인의 함수로서 투수성과 관련하여 암반 절리가 주된 요인이 된다(Geological Society, 1995).

한편, 아이찌현(愛知県) 유역의 화강암 풍화토를 인

장 강도로부터 판정한 결과, 신선한 화강암이 토사화하기 위해서는 5백만 년의 시간이 필요로 한다고 하였다(Kang, 2009). 반면에 Pye and Miller(1990) 등에 의하면 정석고(anhydrite)나 세일로 구성된 사면 지반에서 수화에 의한 팽창압으로 인하여 불과 며칠 혹은 몇 주에 걸쳐 급격히 강도 저하가 발생하였다는 연구결과를 발표하였다. 따라서 사면 열화와 관련하여 암석학적으로 퇴적암 계열과 화성암 혹은 변성암 계열로 대별 할 수 있으며, 사면 열화와 관련하여 지반 공학적인 관점의 대상은 퇴적암 계열의 지반이라 할 수 있다.

4. 퇴적암 계열 지반의 열화 특성

Terzaghi(1936)는 견고한 점토 지반의 경우 물의 침투로 열화로 인한 강도 저하가 발생하여 점진적인 파괴가 발생한다고 제안한 이후에 Walkinshaw et al.(1996) 등이 사례분석을 제시한 적이 있으며, Bjerrum(1967)은 사면에 있어 전단강도 저하에 대한 예측 모델을 제안한 바 있다. 이와 관련하여 일본에서도 Shinjo and Ito(1989), Yoshida et al.(1994), Mochizuki et al.(2011) 등이 견고한 점토를 대상으로 열화 특성분석을 수행한 바 있다.

Fig. 1은 shimajiri 이암에 대하여 풍화에 따른 역학적 거동을 나타내고 있다(Shinjo and Ito, 1989). 그림에서 강도정수인 점착력(c)의 값이 원지반 상태 350kPa에서 5년간 침수 후에 230kPa로 저하되며, 건조 수축 후에는 120kPa 및 완전 풍화된 후에는 55~72kPa로 크게 저하되는 시험결과를 나타내고 있다. 반면에 내부마찰각(ϕ)은 원지반 상태 37°에서 각각 30°, 36°, 27°~30°로 상대적으로 미소하게 감소하는 경향을 나타내고 있다. 따라

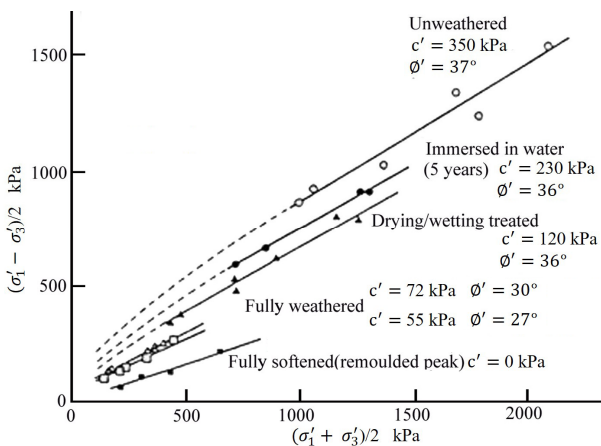


Fig. 1. Shear strength reduction of Shimajiri mudstone due to deterioration (Shinjo and Ito, 1989)

서 열화에 따른 전단강도의 저하는 점착력의 감소가 주 대상이 된다고 할 수 있으며, 이는 열화에 따라 토립자의 골조 구조의 변화보다는 상대적으로 입자 간 본딩(bonding)의 파괴 효과가 크다는 것으로 간접적으로 판단할 수 있다. 또한 국내 단층 점토(Gouge)의 열화 현상에 대한 실내 시험 결과로서 시료를 지하수에 침수시킨 결과 5.5일 만에 중량이 약 50%로 감소하였으며, 2개월 후에는 완전히 분해되는 것으로 조사되었다(Kim, 2013).

한편, 열화로 인한 시간적 강도 저하는 작용 매커니즘에 따라 다양한 속도로 진행되므로 실내시험 결과로부터 결정하기는 쉽지 않으며, 강도 열화 속도를 평가하는데 어려움이 있다. 따라서 현장 계측이나 사례분석을 통한 해석으로부터 정량적으로 풍화 속도(weathering rate)를 평가할 수 있는 시간-강도저감 곡선의 관계함수로 진행속도를 유추해내는 것이 적절할 것으로 판단된다(Yoshida et al., 1990, 1994; Huisman et al., 2006).

5. 열화에 따른 강도 저감 특성 평가방안

과거에는 열화가 발생하는 과정을 creep으로 간주하여 이론적인 해석 방안이 주를 이루었으나 엄밀한 의미에서 지하수 등의 주변 환경에 따른 화학적 열화 과정과 다소 차이가 있다. creep의 발생은 공사 기간을 포함하여 초기에 대부분 수렴되므로 장기적으로 발생하는 추가 변위는 열화에 따른 거동이라 추정할 수 있다(Jiang et al., 2007). 심각한 산사태를 일으키는 사면의 열화 과정은 지반의 강도 저하로 정의할 수 있으며, 지반의 역학적 열화 특성에 대한 평가를 통하여 이러한 풍화 과정을 이해하는데 유효한 방법이라 할 수 있다. 각종 문헌에 따르면 열화에 따른 강도 저하는 Mohr-Coulomb의 파괴이론으로부터 강도정수 c , ϕ (점착력 및 내부 마찰각) 중에 풍화가 진행됨에 따라 점착력의 감소가 주 요인이라고 알려져 있으며, 상대적으로 미소한 감소가 있는 내부 마찰각은 변화가 없는 것으로 간주되고 있다(Ollier, 1984; Shinjo and Ito, 1989; Pye and Miller, 1990; Yoshida et al., 1994; Utili, 2005; Mochizuki et al., 2011). 따라서 열화와 관련하여 제안된 모델이나 가정에 따르면, 어떠한 시간-열화도 상관관계는 시간-점착력의 상관관계로 나타낼 수 있다. 따라서 이론적 및 경험적인 상관 식으로 선형(linear), 쌍곡선(hyperbolic), 포물선(parabolic) 지수 함수(exponential laws), 역 쌍곡선(Inverse-hyperbolic function) 및 로그 함수(log function)(Ollier, 1984; Matsunaga,

2008) 및 등으로 나타낼 수 있다. 또한 이와는 별개로 Sato Model(1984)이 있으나 특정 지반에 대하여 다양한 입력변수가 필요하므로 적용성에 한계가 있다. 이러한 상관 식들에 대하여 광범위한 문헌 조사를 통하여 비교 분석한 결과 사면 안정성과 관련하여 열화로 인한 지반 특성의 변화에 대한 대표적인 평가방안으로서 선정된 실험적인 접근 방법은 다음과 같다.

- 역 쌍곡선 함수(Inverse-hyperbolic function): Yoshida et al., 1990, 1997.
- 지수 함수(Exponential weathering intensity rate): Selby, 1993; Oguchi et al., 1994; Sunamura, 1996; Norwick and Dexter, 2002; Tating et al., 2013a, 2013b; Momeni et al., 2017.
- 로그 함수(Logarithmic weathering intensity rate): Ollier, 1984; Huisman, 2006; Tating et al., 2013a, 2013b.
- 쌍곡선 함수(Hyperbolic law-Rate theory of creep): Ladanyi, 1974; Sandrone and Labious, 2010.

5.1 역 쌍곡선 함수(Inverse-hyperbolic function)

Morgenstern N.R. and Eigenbrod K.D.(1974)에 따르면 이암(mudstone)인 London clay 절토 사면의 붕괴와 관련하여 열화 정도를 달리한 다양한 시료에 대한 일축 압축시험 결과로부터 역쌍곡선 함수(inverse-hyperbolic function)가 가장 유효한 방법이라 주장하였다. 즉, 전단 강도는 시간이 경과함에 따라 역 쌍곡선 함수로 감소하며, 약 100년이 경과하면 완전 열화 상태(fully-softened condition)에 도달된다고 발표하였다. 이러한 연구로부터 열화로 인한 강도 열화는 다음과 같이 시간의 역 포물선 함수를 사용하여 원위치에서 완전 열화된 상태에 대한 강도 변수를 다음과 같이 보간법으로 나타낼 수 있다(Yoshida et al., 1990, 1997).

$$X = X_0 \left[1 - \frac{t}{xt + t_{fs} \{X_0 / (X_0 - X_{fs}) - x\}} \right] \quad (1)$$

여기서, X는 강도계수(strength parameter), x는 강도저감 속도계수(strength reduction-rate parameter)로서 상수이며, t는 경과 시간임. 또한, 첨자 0 및 fs는 초기 및 완전 열화 상태를 나타냄. 즉, X₀는 초기 상태의 강도계수를 나타내며, X_{fs}는 완전 열화된 상태의 강도계수를 나타낸다.

5.2 풍화 강도 속도 개념(Weathering intensity rate)

암반 사면의 시간 의존적 풍화에 대한 평가방안은 풍화 강도(weathering intensity)과 풍화 강도율(weathering intensity rate)의 개념이 있다. 풍화 강도는 일정 시간 경과 후에 모암의 변질량(amount of alteration) 혹은 분해도(degree of decomposition)이며, 풍화 강도율은 이러한 풍화강도 변화량의 경시변화를 나타낸다(Huisman, 2006). 이와 관련된 연구는 Fookes et al.(1988), Selby(1993), Hack and Price(1997), Huisman(2006), Tating et al.(2013b) 등이 있다.

1) 지수 함수(Exponential weathering intensity rate)

Selby(1993)에 의하면 안산암이 점토화되는 과정에 대하여 시간-점착력의 상관관계를 지수함수(exponential function)로 나타내었으며, 이후 Oguchi et al.(1994), Sunamura (1996), Norwick and Dexter(2002), Tating et al.(2013a, 2013b) 및 Momeni et al.(2017)이 사면 안정성 검토에 경험식으로 사용되었다.

$$C_t = C_0 e^{-kt} \quad (2)$$

여기서, C_t: 임의 시간(t)에서의 점착력, C₀: 초기 점착력, k: 상수.

2) 로그 함수(Logarithmic weathering intensity rate)

Ollier(1984)에 따르면 현무암에 대한 화학적 풍화 정도를 조사한 결과 시간-점착력의 상관관계가 로그함수(logarithmic function)로 저감되는 것으로 발표되었으며, 이후 Huisman(2006) 및 Tating et al.(2013a, 2013b)이 사면 안정성과 관련하여 경험식으로 사용하였다.

$$\frac{C_t}{C_0} = a + b \log(1+t) \quad (3)$$

여기서, C_t: 임의 시간(t)에서의 점착력, C₀: 초기 점착력, a, b: 상수.

5.3 쌍곡선 함수(Hyperbolic law-rate theory of creep)

Ladanyi(1974)에 의하면 화학적인 풍화로 인하여 주변 지반의 강도 특성이 장기적으로 초기치의 30%까지

감소하며, 쌍곡선법(hyperbolic law)으로 임의 시간의 역학적 특성을 구할 수 있는 식 (4)를 제안하였다(Sandrone and Labious, 2010).

$$V(t) = V_{ST} - \left[(V_{ST} - V_{LT}) \cdot \left(1 - \frac{1}{1 + \frac{t}{T}} \right) \right] \quad (4)$$

여기서, V_{ST} : 입력변수(friction angle ϕ and cohesion c)의 초기치

V_{LT} : 최종 단계의 입력변수로서 초기치(V_{ST})의 30%로 가정

T : 지반의 풍화 진전도와 관련된 시간 상수(일반적으로 1.0 사용)

t : 시공 완료 후 임의 시간

식 (4)는 Maekawa et al.(1991)이 규조질 이암(Neogene diatomaceous soft rock, 珪藻質泥岩)에 대하여 열화로 인한 강도 특성 변화를 평가하기 위하여 시행한 건조/습윤 반복시험(자연 함수비의 25%까지 건조)을 통한 일축 압축시험 결과와 유사한 경향을 나타내고 있다.

그러나 본 제안식은 터널 지반의 열화와 관련하여 제안되었고, creep 개념이며, 초기에 90%이상으로 급격히 저하되는 특수한 팽창성 지반을 대상으로 제안되었기에 본 연구의 사례분석에서는 제외하였다.

6. 열화에 따른 사면 안정성 사례 분석

장기적인 사면의 안정성과 관련하여 열화에 대한 예측기법은 아직도 명확한 해법이 없으나 각종 문헌 및 계측자료로부터 매개변수를 도출하고 전향에서 제시한 각종 경험식을 토대로 하여 열화에 따른 경시변화에 대한 추이를 판단할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 열화에 따른 사면 안정성에 대한 사례 분석을 위하여 세일층에서 사면 붕괴가 발생한 지역을 대상으로 국내에서 실용적으로 사용되고 있는 Slope-W 프로그램(Geo-Slope, 2018)을 이용하여 열화 따른 사면의 거동 해석을 수행하였으며, 지반재료의 거동은 Mohr-Coulomb(MC) 파괴 기준으로 한계평형해석(Morgenstern-Price method)을 실시하였다.

6.1 대상 지역 현황

양산 단층대를 통과하는 대구~부산 간 경부고속철도 2단계 건설 노선의 절토 사면에서 공사 중에 붕괴가 빈번하게 발생하였으며, 이러한 지역 중 대표적인 00-0공구 토공 00구간에 대하여 사례분석을 수행하였다. 본 구간의 지질분포는 하양층군내의 진동층(Jindong Fm.)에 속해 있고, 양산단층으로 인한 단층 각력대(Fault breccia zone)로서 열수 변질된 자색 세일이 두껍게 분포하고 있으며, 부분적으로 얇은 사암이 협재되어 있다. 사면 파괴는 2007년 2월 10일경 굴착을 사면 하단까지 완료한 이후 2007년 10월 31일에 하부에서 rock anchor를 설치하는 중에 발생하였으며(폭 38.0m, 높이 13.0m), 즉시 하부 복토를 시행하여 추가 붕괴를 방지하였다. 사면 파괴 지역의 수직상단에는 배수로가 설치된 상태로서 강우 시 우수가 집중적으로 침투되는 구역이며, 사면 파괴 이전인 10월 26일(일 강우량 14.0mm) 이후 5일간 건조한 상태를 유지하고 있었다. 사면의 계획 단면은 10단으로 3단까지 1:1.0(연암), 4단 1:1.8(풍화암) 및 5단에서 10단까지는 1:2.5(풍화토)의 경사로 굴착되었으며, 사면 파괴는 굴착 후 263일 만에 3단~4단에 걸쳐 주로 연암층(단층 각력대)의 세일층에서 발생하였으며, 사면 선단부 파괴면에서 지하수의 유출은 발생하지 않았다. 사면 파괴 원인은 강우로 인하여 배수로를 따라 우수가 집중 침투로 인하여 세일(자색, 연암)의 단층각력대인 지반에 지하수 침투로 인하여 주로 연암층(단층 각력대)에서 열화 현상이 발생하고, 점진적으로 강도가 저하되어 집중 강우가 없는 상태에서 사면 파괴에 이른 것으로 추정하였다(Fig. 2, 3 참조).



Fig. 2. slope failure in cut slope of rail road

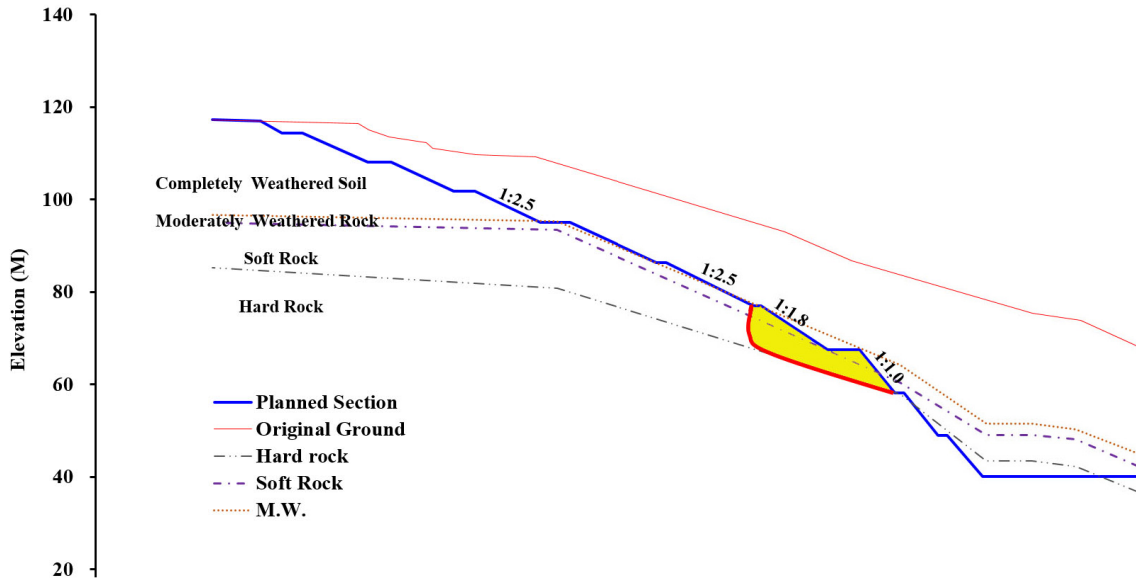


Fig. 3. Subsurface profile and sectional plan

Table 1. Material properties and input data (before slope excavation)

Strata	Unit weight (γ_t), kN/m ³	Strength parameter		비고
		Cohesion (c), kPa	Internal friction angle (ϕ), °	
C.W.S	18	10	30	
M.W.R.	20	50	30	
S.W.R.	22	130	30	Fault breccia (Shale)
H.R.	25	300	35	

당 지역은 양산 단층대와 관련하여 주변에 많은 지질학적 및 지반공학적 특성 조사가 수행되었으며(Sungjee Construction Co., 2008), 이를 참조하여 사면 굴착 전의 각 지층별 암반 분류 및 원지반의 역학적 특성은 Table 1과 같이 결정하였다.

6.2 입력 물성치(점착력) 결정

당 지역의 사면파괴 원인을 지하수 침투로 인한 세일층의 열화로 추정하여 전 항의 각종 열화에 따른 제안식들을 이용하여 종합 분석을 수행하였다. 단, 열화가 진행됨에 따라 점착력은 점진적으로 감소하나, 상대적으로 내부마찰각은 변화가 없는 것으로 간주하였다. 해석 방법은 단층 세일층(slight weathered rock; SWR)의 점착력(c)을 감소시켜 입력치를 결정하였으며, 사면 파괴 후(굴착 후 263일)의 지반의 점착력(c)에 대하여 실제 측정된 자료가 없으므로 한계평형해석으로 안전율이 1.0인 상태의 점착력(c)을 시행착오(trial and error)법으로 역산하여 사면 파괴시의 강도계수(X)와 점착력(c_t)를 5.4kPa

로 추정하여 경과시간(t)에 대한 안전율($S.F.$)을 분석하였다.

Fig. 4에서 보는바와 같이 지수함수(Exponential)와 로그함수(Logarithmic)의 경우에 주어진 시간($t=263$ 일)에 대하여 정수가 각각 $k=3.181$ 및 $a=1.0$, $b=3.184$ 로 결정되는 반면에 역 쌍곡선함수(Inverse-hyperbolic)의 경우

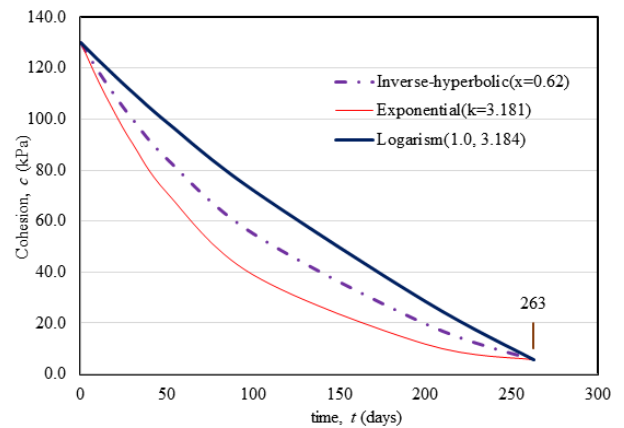


Fig. 4. Computed variation of cohesion (c) envelope with time due to deterioration

에는 완전 풍화($X_{fs}=0$)될 때까지의 소요 시간(t_{fs})을 추정할 수 없으므로 강도저감 속도계수인 상수 x 의 값은 다양한 값을 나타낸다(본 고에서는 지수함수와 로그함수의 상호 비교를 위하여 중간 값으로 $x=0.62$ 로 가정함). 그림에서 보는 바와 같이 지수 함수 곡선은 초기에 열화 진행 속도가 빠른 반면에 로그 함수는 상대적으로 완만한 곡선을 보이고 있는 것을 알 수 있으며, 역 쌍곡선 함수는 이러한 경향과 상관없이 다양한 저감 곡선을 나타낸다고 할 수 있다.

6.3 사면 안정 해석

열화 따른 사면의 거동 해석은 세일(S.W.R., 단층각력대)층을 대상으로 Fig. 4의 열화에 따른 점착력(c)의 저감 곡선으로부터 역 쌍곡선 함수가 평균값을 나타내므로 이들의 값을 입력치로 적용하였다. 사면 해석 시 전단 파괴면은 실제 발생한 형상과 유사하게 복합사면(Composite slip surface)으로 안전율을 산정하였으며, 최

소 안전율을 갖는 얇은 심도(shallow slip)와 층리를 따라 복합 단면의 전단 파괴면을 갖는 깊은 심도(deep slip)에 대하여 해석을 수행하였다. 특히 사면 붕괴 후의 파괴면에서 지하수의 유출이 발생하지 않았기 때문에 지하수위는 고려하지 않았다.

대상 사면에 대한 한계평형해석 결과로부터 사면 파괴 곡선 및 안전율(S.F.)은 Fig. 5와 같다. 그림에서 a), b)는 층리를 따라 전단 파괴면을 형성하는 깊은 심도(deep slip) 파괴의 경우이며, c), d)는 최소 안전율을 나타내는 얇은 심도(shallow slip) 파괴를 나타내고 있다. 또한 a), c)는 굴착 후 및 b), d)는 실제 파괴가 발생한 시점(굴착 후 263일)에서의 사면 파괴 곡선 및 안전율을 나타내고 있다. Fig. 6은 사면 안정해석 결과로부터 열화 진행에 따른 경과 시간에 대한 사면 안전율의 변화 곡선을 나타내고 있으며, 이로부터 점착력과 안전율의 상관관계를 Fig. 7에 나타내었다.

Fig. 5 및 Fig. 6에서 보는 바와 같이 굴착 후 깊은 심도 및 얇은 심도의 안전율은 각각 3.05 및 3.21로서

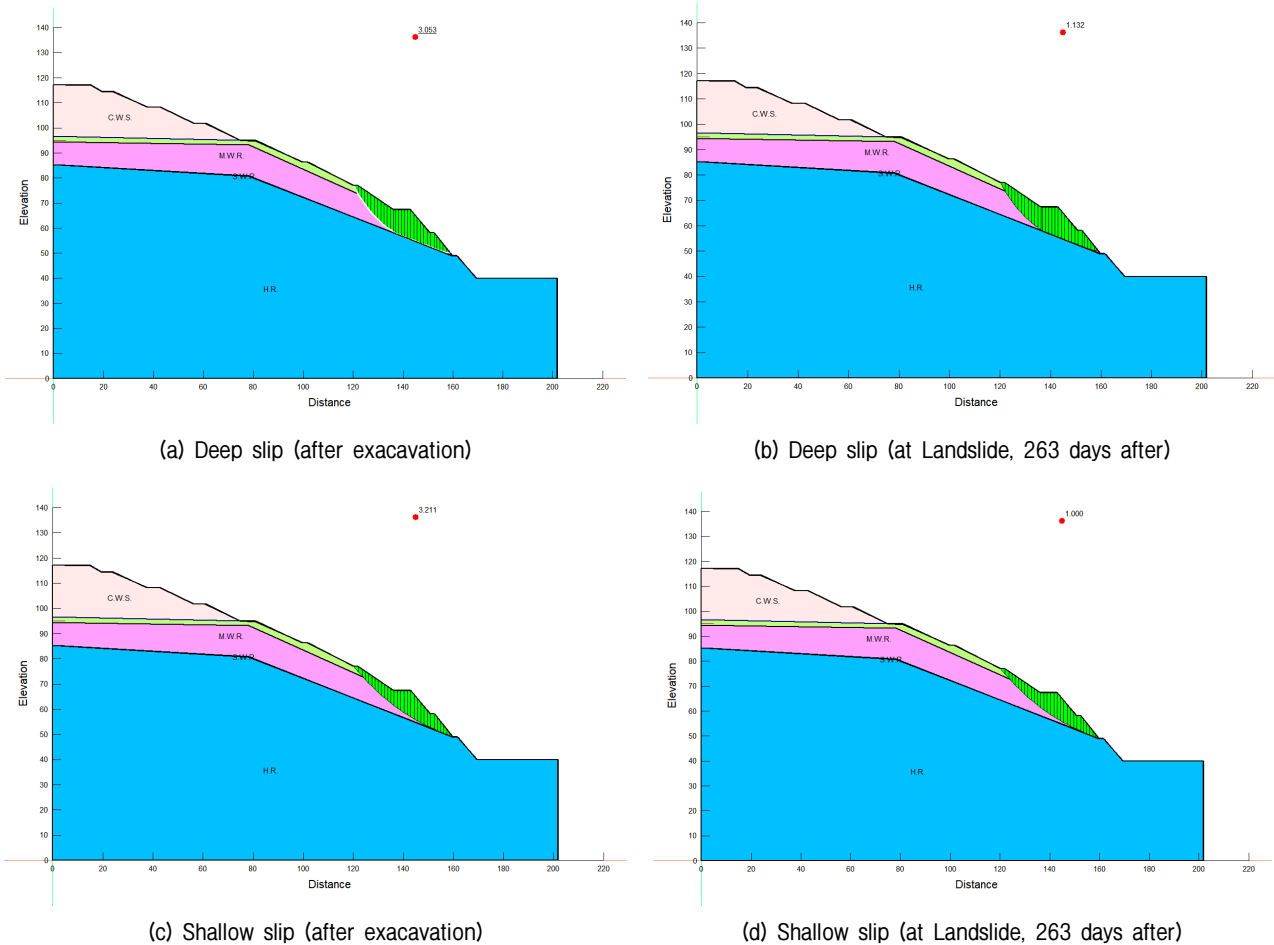


Fig. 5. Computed envelopes of slope failure and safety factors

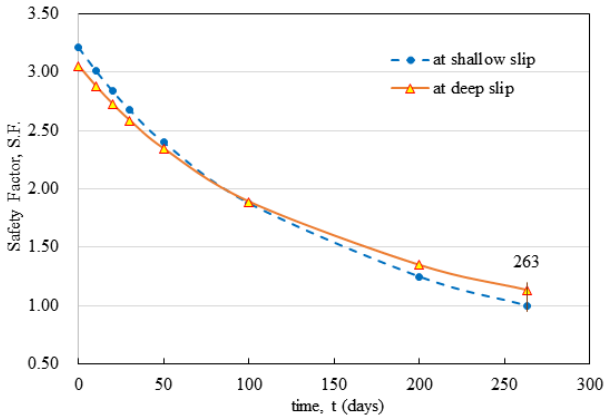


Fig. 6. Computed variation of safety factor envelopes with time due to deterioration

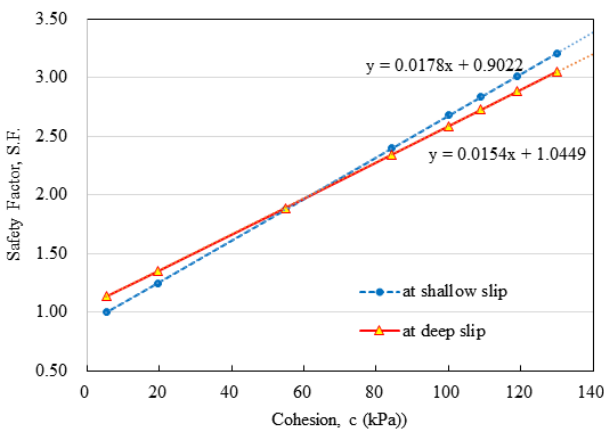


Fig. 7. Relationship between cohesion and safety factor

안정을 유지하였으나, 지속적인 열화가 진행됨에 따라 안전율이 점차 저하되어(본 연구에서는 역 쌍곡선 곡선) 실제 사면 파괴가 발생한 시점인 굴착 후 263일 경과하여 각각 1.13 및 1.0을 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 따라서 본 대상 사면은 열화로 인한 지반의 전단 강도 저하로 사면 붕괴가 발생한 것으로 추정할 수 있다. 특히 열화로 인한 점착력의 저하와 안전율은 Fig. 7에서 보는 바와 같이 선형관계를 나타내고 있는 것을 알 수 있다.

6.4 정량적 예측기법의 제안

본 연구에서 열화에 따른 강도 저감 특성 평가방안으로 제시된 제안식들에 대한 비교 분석 결과 지수 함수 곡선은 초기에 열화 진행 속도가 빠른 반면에 로그 함수는 상대적으로 완만한 곡선을 보이고 있는 것을 알 수 있으며, 역 쌍곡선함수는 이러한 경향과 상관없이 다양

한 저감 곡선을 나타낸다고 할 수 있다. 이에 따라 사례 분석을 통한 열화로 인한 사면 안정해석 결과로부터 향후 열화에 취약한 사면에 대하여 다음과 같은 정량적 예측방안을 제안할 수 있다.

즉, 사면 굴착 시 초기 강도 정수(점착력 및 내부 마찰 각)를 기준하여 사면 굴착 완료 후에 임의 시간 간격을 갖고 최소 2회 이상에 걸쳐 시료를 채취하여 전단강도 시험을 실시하여 강도 정수를 구하고, 이를 통하여 각종 제안식(지수 함수, 로그 함수 및 역쌍곡선 함수)의 입력 매개 변수(상수)를 도출하여 상호 비교·분석을 실시하도록 한다. 또한 이로부터 진행속도를 유추하여 한계 평형해석에 의해 정량적인 사면 안정성 평가를 수행할 수 있을 것으로 판단된다.

7. 결론

본 연구에서 사면의 열화 특성과 관련하여 광범위한 문헌 조사를 통하여 비교분석을 수행하고, 전단강도 저감에 대한 최적의 제안식들을 선정하여 열화에 취약한 세일층을 대상으로 사례분석을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 인공 사면의 경우에 열화와 관련된 공학적인 관점의 대상은 퇴적암 계열의 지반이며, 물에 취약한 셰일(shale), 증발암(evaporites), 석고(gypsum) 및 탄산염 계열의 암반(some carbonate rocks)등의 사면에서 화학적인 열화에 따른 강도 저하를 할 수 있다.
- (2) 문헌 조사를 통한 비교 분석결과 열화와 관련된 시간-열화도는 시간-점착력의 상관관계로 나타낼 수 있으며, 사면 안정성과 관련하여 열화로 인한 지반 특성의 변화에 대한 대표적인 평가방안으로서 이론적, 실험적인 최적의 접근 방법으로 다음과 같은 최적의 제안식이 도출되었다.
 - 역 쌍곡선 함수(Inverse-hyperbolic function)
 - 지수 함수(Exponential weathering intensity rate)
 - 로그 함수(Logarithmic weathering intensity rate)
- (3) 열화에 따른 사면 안정에 대한 사례분석을 위하여 사면 붕괴가 발생한 지역을 대상으로 최적의 제안식에 대한 매개변수를 도출하고, 사면 안정해석을 수행한 결과 사면 굴착 이후에 지속적인 열화가 진행됨에 따라 안전율이 점차 저하되어 실제 사면 파괴가 발생한 시점(굴착 후 263일 경과)에서 안전율

1.0(얕은 심도)로서 열화로 인한 지반의 전단 강도 저하로 인하여 사면 붕괴가 발생한 것으로 확인될 수 있었다.

- (4) 열화로 인한 사면 안정성 평가 방안으로 사례분석을 통한 해석 결과로부터 정량적 접근방안이 제안되었다. 즉, 사면 굴착 시 초기 강도 정수(점착력 및 내부 마찰각)를 기준하여 사면 굴착 완료 후에 임의 시간 간격을 갖고 최소 2회 이상에 걸쳐 시료를 채취하고, 전단강도 시험을 실시하여 강도 정수를 구하고, 이를 통하여 본 고에서 제시된 제안식(지수 함수, 로그 함수 및 역 쌍곡선 함수)에 대하여 입력 매개 변수(상수)를 도출하여 상호 비교·분석을 실시하고, 이로부터 진행속도를 유추하여 한계 평형 해석에 의해 정량적인 사면 안정성 평가를 수행할 수 있을 것으로 판단되었다.

감사의 글

이 논문은 2017년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업이며(2017R1D1A1B03029677), 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌 (References)

1. Fookes, P.G., Gourley, C.S., and Ohikere, O. (1988), "Rock Weathering in Engineering Time", *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* 21(1): pp.33-57·February 1988.
2. Geological Society Engineering Group Working Party Report (1995), "The Description and Classification of Weathered Rocks for Engineering Purposes", *Quarterly Journal of Engineering Geology*, The Geological Society, 28, pp.207-242.
3. GEO-SLOPE (2018), "SLOPE/W Computer Program for Slope Stability Analysis", GEO-SLOPE International, Ltd.
4. Hagros, A., Johansson, E., and Hudson, J.A. (2007), "Time dependency in the mechanical properties of crystalline rocks: a literature survey", Possiva OY, Finland.
5. Huisman, M., Hack, H.R., and Nieuwenhuis, J. (2006), "Predicting Rock Mass Decay in Engineering Lifetimes: The Influence of Slope Aspect and Climate", *Environmental and Engineering Geoscience*; 12, 1; pp.39-52.
6. Huisman, M. (2006), "Assessment of rock mass decay in artificial slopes", *PhD Dissertation*, Technische Universiteit Delft.
7. Jiang, Y., Guan, Z., and Tanabashi, Y. (2007), "Delayed Deformation Analyses for Mountain Tunnels", *The Second Half Century of Rock Mechanics, 11th Congress of the International Society for Rock Mechanics*, Lisbon, July 2007, Vol.2, pp.825-828.
8. Kang, S.M. (2009), "Geochemical Weathering Deterioration of Rock and Environmental Assessment", *Dissertation*, Andong National University.
9. Kim, N.Y. (2013), "Cases on Tunnel and Slope Collapse Caused by the Fault Zone", Q&A, *Journal of KSCE*, 61(1), pp.124-128.
10. Ladanyi, B. (1974), "Use of the Long-term Strength Concept in the Determination of Ground Pressure on Tunnel Linings", *In: 3rd Congr. Int. Soc. Rock Mech.*, Denver, Vol.2B, pp.1150-1156.
11. Maekawa, H. and Miyakita, K. (1991), "Effects of Repetition of Drying and Wetting on Mechanical Characteristics of a Diatomaceous Mudstone", *Soils and Foundation*, Vol.31, No.2, June 1991, pp. 117-133.
12. Matsunaga, T. (2008), "Study on Prediction of Tunnel Deformation and Rationalization of Measures", *PhD These*, Kyoto University.
13. Mochizuki, A., Ma, X. and Sokkheang, S. (2011), "Failure of a Cut Slope and Deterioration of Shear Strength due to Weathering", *Proceeding of TC302 Symposium Osaka 2011 : International Symposium on Backwards Problem in Geotechnical Engineering and Monitoring of Geo-Construction* (2011), pp.154-161.
14. Morgenstern N.R. and Eigenbrod K.D. (1974), "Classification of Argillaceous Soils and Rocks", *dour Soil Mech. and Found. Eng.*, ASCE, Vol.100, No.GT10, pp.1137-1156.
15. Momeni, A., Hashemi, S.S., Khanlari, G.G. and Heidari, M. (2017), "The Effect of Weathering on Durability and Deformability Properties of Granitoid Rocks", *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, August 2017, Volume 76, Issue 3, pp.1037-1049.
16. Norwick, S. A. and Dexter, L. R. (2002), "Rates of Development of Tafoni in the Moenkopi and Kaibab Formations in Meteor Crater and on the Colorado Plateau, northeastern Arizona", *Earth Surf. Process. Landforms*, Vol.27, pp.11-26.
17. Ollier, C. (1984), "Weathering", 2nd ed. Longman, Geomorphology Texts, London and New York. 270p.
18. Oguchi, C. T., Hatta, T., and Matsukura, Y. (1994), "Changes in Rock Properties of Porous Rhyolite through 40,000 Years in Kozushima, Japan", *Geog. Rev. Japan*, Vol.67A, pp.775-793 (in Japanese with English abstract).
19. Park, B. S., Cho, H., Youn, S. P. and Park, D. I. (2016), "Analysis and evaluation of stability for the reactivated landslide along deep seated weakness zones", *International Journal of Geo-Engineering*, Volume 7, Paper no. 3, DOI 10.1186/s40703-016-0016-9
20. Price, I. R. and Velbel, M. A. (2003), "Chemical Weathering Indices Applied to Weathering Profiles Developed on Heterogeneous Felsic Metamorphic Parent Rocks", *Chem. Geol.*, Vol.202, pp.397-416.
21. Pye, K. and Miller, J. A. (1990), "Chemical and Biochemical Weathering of Pyrite Mudrocks in a Shale Embankment", *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 23, pp.365-381.
22. Sandrone, F. and Labiouse, V. (2010), "Analysis of the Evolution of Road Tunnels Equilibrium Conditions with a Convergence-Confinement Approach", *Rock Mechanics and Rock Engineering*, March 2010, Volume 43, Issue 2, pp.201-218.
23. Sato, M., Takeda, N., and Kamemura, K. (1983), "Numerical Analysis of Rock behaviour Considering Time-dependent Strength", *Japanese Geotechnical Society*, pp.817-820 (in Japanese).
24. Selby, M. J. (1993), "Hillslope Materials and Processes", 2nd edn, Oxford University Press, Oxford.
25. Shinjo, T. and Ito, T. (1989), "Slope excavation, In Recent Advances in Soft Rock Research", *Rept. of ISSMFE Tech. Com. Soft Rocks and Ind. Soils and Proc.* Disc. Ses. 5, Rio de Janeiro, Brazil, pp. 31-43.

26. Sunamura, T. (1996), "A Physical Model for the Rate of Coastal Tafoni Development", *The Jour. of Geol.*, Vol.104, pp.741-748.
27. Sungjee Construction Co. (2008), "Report on stability assessment for tunnel under express highway", Section 12-4, Construction of Gyeongbu High Speed Rail: Phase Two (II).
28. Tating, F., Hack, R., and Jetten, V. (2013a), "Engineering Aspects and Time Effects of Rapid Deterioration of Sandstone in the Tropical Environment of Sabah, Malaysia", *Engineering Geology* 159 (2013) pp.20-30.
29. Tating, F., Hack, R., and Jetten, V. (2013b), "Weathering and Deterioration as Quantitative Factors in Slope Design in Humid Tropical Areas; Case Study Northern Kota Kinabalu, Sabah, Malaysia", *Ingeokring Newsletter*. 33. ISSN: 1384-1351, pp.22-28.
30. Utili, S. (2004), "Evolution of Natural Slopes Subject to Weathering an Analytical and Numerical Study", *PhD Dissertation*, Milan University of Technology.
31. Utili, S. (2005), "An Analytical Relationship for Weathering Induced Slope Retrogression: A Benchmark", *Rivista Italiana Di Geotecnica* 2/2005, pp.9-30.
31. Walkinshaw, J.L. and Santi, P.M. (1996), "Landslide: Investigation and Mitigation, Chapter 21- Shales and Other Degradable Materials", *Transportation Research Board Special Report*, Issue Number: 247, pp.555-576.
32. Yoshida, N., Nishi, M., Kitamura, M., and Adachi, T. (1997), "Analysis of Mudstone Deterioration and its Effect on Tunnel Performance", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Volume 34, Issues 3-4, April-June 1997, pp.353-353.
33. Yoshida, N., Morgenstern, N.R., and Chart, D.H. (1990), "A Failure Criterion for Stiff Soils and Rocks Exhibiting Softening", *Can. Geotech. Jour.*, Vol.27, pp.195-229.
34. Yoshida, N. and Adachi, T. (1994), "F.E. Analysis of Strength Deterioration in Stiff Clays and Mudstones Upon Excavation", *jour. Japan Soc. Dam Eng.*, No.13, pp.14-28.

Received : November 5th, 2018

Revised : December 3rd, 2018

Accepted : December 7th, 2018