

# 양산단층대 암반비탈면에 분포하는 불연속면의 전단강도 특성분석

## Characteristic Analysis of Shear Strength of Rock Slope Discontinuity in Yangsan Fault System

이학주<sup>1</sup>, 김창호<sup>2</sup>, 황웅기<sup>3</sup>, 김태형<sup>4\*</sup>

Hak-Ju Lee<sup>1</sup>, Chang-Ho Kim<sup>2</sup>, Woong-Ki Hwang<sup>3</sup>, Tae-Hyung Kim<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup>Nonmember, Graduate Student, Dept. of Civil and Environ. Eng., Korea Maritime and Ocean Univ., 727 Taejeoung-ro, Yeongdo-gu, Busan 49112, Republic of Korea

<sup>2</sup>Nonmember, Deputy General Manager, Korea Expressway Corp., 77 Hyeoksin 8-ro, Gimchon-si, Gyeongsanbuk-do 39660, Republic of Korea

<sup>3</sup>Member, Manager, Geotechnical Research & Development Co., Ltd., 60 Centum jungang-ro, Haeundae-gu, Busan 48059, Republic of Korea

<sup>4</sup>Member, Professor, Dept. of Civil Eng., Korea Maritime and Ocean Univ., 727 Taejeoung-ro, Yeongdo-gu, Busan 49112, Republic of Korea

### ABSTRACT

This study was conducted to identify the causes of the unusually high number of rock slope failures during an expressway construction in Yangsan fault system. The shear strength (cohesion and internal friction angle) of 128 slopes of discontinuities including bedding, joint, and fault planes were re-evaluated through the examination of face mapping and back analysis. The re-evaluated values were analyzed and then compared with the existing data and values used in the design. As a result, the re-evaluated cohesion and friction angles were very low compared to the existing data and the values applied in the design. This incongruity was pointed as the primary reason for the rock slopes failures during the construction. This may be related to the inherent features of clastic sedimentary rocks in the study area, and the discontinuities in the sedimentary rocks in this region played a significant role. Especially, bedding discontinuity showed a big difference compared to the existing data. The shear strength depended on the type of discontinuity in case of clay filled in discontinuity. However, shear strength was independent on the type of discontinuity in case of shattered materials filled in discontinuity.

### 요 지

본 연구는 양산단층대를 통과하는 고속도로 건설공사 중 암반비탈면의 파괴가 유난히 많이 발생된 원인을 규명하기 위하여 수행하였다. 이를 위해 128개소의 양산단층대 파괴 암반비탈면 대하여 불연속면 유형(절리, 층리, 단층)에 따라 face mapping 과 역해석을 통해 전단강도(점착력, 내부마찰각)를 재 산정하였다. 재 산정된 점착력과 내부마찰각에 대해 분석을 하였으며 기존 문헌 및 설계 값과도 비교를 하였다. 전체적으로 본 연구에서 재 산정된 점착력과 내부마찰각이 기존 문헌 및 설계에 적용된 값보다 작은 것으로 나타났다. 이와 같은 이유로 시공 중 많은 암반비탈면에서 파괴가 발생된 것으로 보인다. 이것은 연구 대상 지역의 쇄설성퇴적암이 가지고 있는 특성과 발달된 불연속면이 큰 역할을 한 것으로 판단된다. 특히 층리 불연속면 인 경우 기존 값과 비교 시 가장 큰 차이를 보이는 것으로 나타났다. 불연속면에 점토충진물이 존재하는 경우 불연속면의 유형에 따라 전단강도가 서로 다른 경향을 보이는 반면, 파쇄물이 존재하는 경우에는 전단강도 값은 불연속면의 유형에 상관없는 것으로 나타났다.

**Keywords** : Shear strength, Clastic sedimentary rock, Yangsan fault, Bedding, Joint

## 1. 서 론

불연속면이 잘 발달된 양산단층대에 위치한 고속도로 건설현장에서 시공 시에 예상을 뛰어넘는 많은 파괴가 발

Received 15 May. 2019, Revised 10 Jul. 2019, Accepted 15 Aug. 2019

\*Corresponding author

Tel: +82-51-410-4465; Fax: +82-51-410-4460

E-mail address: kth67399@kmou.ac.kr (T.-H. Kim)

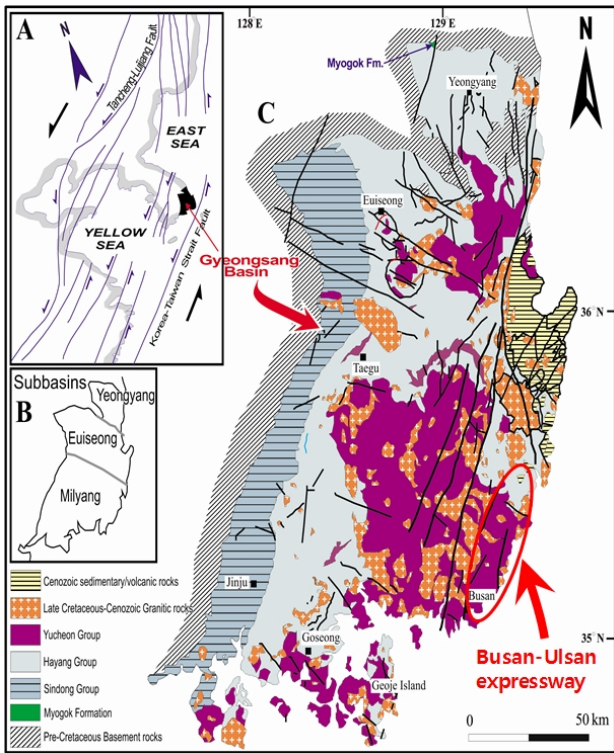


Fig. 1. Geological map of the Gyeongsang Basin with location of Busan-Ulsan expressway: A. Cretaceous sinistral strike-slip fault systems in the East Asian continental margin, B. The Gyeongsang Basin divided into three subbasins by WNW-trending growth faults, C. Regional geological map

생하였다. 부산~울산간 고속도로는 우리나라에서 암질이 가장 불량하고 활성단층이 존재하는 경상분지 퇴적암 지역에 건설된 도로로 본 노선이 통과하는 부산(1~5공구) 지역 절취비탈면의 기반암은 경상계 신라통에 속하는 백악기 화산암류인 유문암질 응회암류로서 비탈면 전구간에 걸쳐서 절리가 매우 발달되어 있으며, 그리고 암반의 차별 풍화로 판단되는 원인에 의하여 비탈면 전구간에 걸쳐 풍화산류토 혹은 풍화암층이 수평적인 변화를 보이는 것으로 조사되었고, 울산(6~9공구) 절도비탈면의 기반암은 경상계 백악기 퇴적암류에 해당하는 울산층으로서 암석의 종류는 담회색~암회색 사암 및 담회색 이암, 그리고 적색 셰일이 호층을 이루고 있는 것으로 조사되었다(Fig. 1).

공사 중 약 151개소에서 암반 비탈면에서 파괴가 발생하였다. 파괴된 비탈면의 파괴유발 원인은 주로 층리, 절리, 단층 등의 불연속면에 의해 발생된 것으로 조사되었다. 67개소의 파괴 암반비탈면이 절리와 밀접하게 관계있는 것으로 조사되었고, 36개소가 층리, 48개소가 단층과 각각 관계있는 것으로 조사되었다. 본 연구에서는 비교적

자료가 충실한 128개소에 대한 자료만을 이용하였다. 물론 많은 경우에 불연속면 간의 상호 작용에 의해 비탈면에 파괴가 발생되었지만 주 파괴 유형이 무엇이나에 따라 파괴 암반비탈면을 구분하였다(Korea Expressway Corporation, 2001, 2008; Kim et al., 2018). 이것은 암반 비탈면의 안정성 평가에 있어서 가장 중요한 요소가 비탈면의 기하학적 형상이기 때문이다(Aydan et al., 1989; Lee and Kim, 2004).

암반 비탈면의 안정성 평가에서 또 다른 중요 원인은 불연속면의 상태를 반영한 전단강도이다. 양산단층대에 위치한 부산~울산간 고속도로 건설현장에서는 시공 전 암반 비탈면의 안정해석을 위해 불연속면에 대한 전단강도(점착력, 내부마찰각)를 산정하여 설계에 적용하였다(Korea Expressway Corporation, 2001). 설계단계에서 고려한 전단강도 산정법은 기존 문헌자료, 시추코아에 대한 절리면 전단시험 및 암석시험, 지표지질조사(암반의 불연속면 특성), 역해석 등의 결과를 비교 검토하여 산정하였다(Hoek and Bray, 1974; Barton, 1973, 1974; You, 2002; Hoek, 1990; Hoek and Brown, 1997). 이와 같은 방법으로 산정된 전단강도를 설계에 적용하였지만 시공과정에서 특이하게도 많은 암반비탈면에서 파괴가 발생하였고 이로 인해 경제적인 손실이 크게 발생하였다(Korea Expressway Corporation, 2008).

불연속면이 양산단층대에 위치한 고속도로 건설현장에서 시공 시에 예상을 뛰어넘는 많은 파괴가 발생한 이유는 설계 시 현장 지질조건을 명확하게 판정할 수 없었기 때문으로 추측되었다. 이것은 설계 시 이루어지는 지반조사의 기술적인 한계와 관련된다(Prist, 1992). 일반적으로 틸새가 미세한 불연속면은 시추조사를 이용한 지반조사 시 그 존재 여부를 확인하는 것이 여건상 매우 힘들다. 또한 설계 시 참조한 불연속면 전단강도가 연구대상 현장이 위치한 퇴적암의 특성을 제대로 반영하지 못하였을 것으로 보인다. 양산단층대 퇴적암은 백악기에 구성된 쇄설성퇴적암으로 특이한 특성을 보이는 것으로 알려져 있다(Kim et al., 2002; Choi et al., 2012; Kim et al., 2017, 2018).

부산-울산간 고속도로 건설공사 중 암반비탈면의 파괴가 많이 발생된 원인을 규명하기 위해 본 연구에서는 양산단층대 암반 불연속면의 상태를 고려한 전단강도 재산정이 이루어졌다. 전단강도 산정은 불연속면 유형별 그리고 불연속면에 대한 면밀히 조사된 자료(불연속면의 각도, 상태, 지하수 유출 유무, 충전물의 유무 및 종류 등) 등을 반

영하여 face mapping과 한계평형해석을 실시하여 이루어졌다. 재 산정된 전단강도는 불연속면의 충전물 상태에 따라 분리하였으며 기존 설계 및 문헌 값과 비교 분석되었다. 본 연구는 양산단층대 쇄설성 퇴적암으로 구성된 128개 암반비탈면을 대상으로 한 점, 그리고 층리, 절리, 단층 등 불연속면 유형을 구체적으로 구분하고 불연속면의 상태(충진물 포함)를 반영한 연구라는 특징을 가지고 있다.

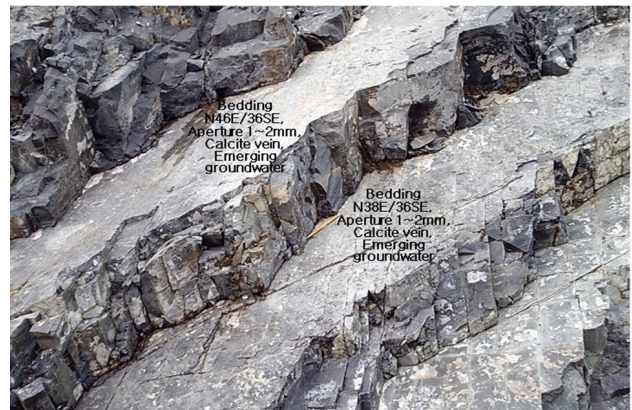
## 2. 전단강도 재산정 방법 및 결과

### 2.1 재산정방법

일반적으로 암반비탈면 불연속면의 전단강도는 지표지 절조사 및 실내시험을 통하여 통해 산출한다. 하지만 이런 방법으로 대상구간의 절리 및 물성치를 정확하게 파악하기는 실제로 매우 어렵다. 그래서 경험치, 관련 경험식, 참고문헌 등을 활용하여 전단강도를 추정하지만 이 또한 절차가 복잡하고 많은 시간이 걸리고 지역적 특성이 결여되는 경우도 발생한다. 특히 암반내 불연속면의 존재는 암반비탈면 파괴가 주로 불연속면을 따라 발생하기 때문에 비탈면 안정에 지대한 영향을 미치게 되는데 이러한 불연속면의 전단강도는 불연속면 분포상태 및 물성치의 파악이 중요하나 설계단계에서는 이 부분이 세밀하게 이루지지 못하고 있다.

Fig. 2는 연구 대상 현장의 층리가 발달된 암반비탈면 상태를 보여주는 대표적인 예이다. 담회색~회백색 세일(또는 이암)이 호층을 이루는 비교적 단조로운 오래된 퇴적암 지층으로 이천리층 및 울산층으로 이루어졌다. 특히 이 지역 퇴적암은 주로 흑색·암회색·적 비탈면 하부에서 상부로 갈수록 풍화가 심하고 암질이 불량해지는 상태를 보인다. 이 지역 세일 및 이암은 암질의 특성상 풍화진행 속도가 빠르므로 비탈면 절취 시 타 지역에 비하여 비탈면 붕락의 빈도가 높으며, 암반의 절리의 빈도도 높은 특성을 보이는 것으로 알려져 있다(You, 2002; Park, 2002). 특이한 점은 비탈면에 점토가 협재된 층리가 많이 발달된 것을 볼 수 있다(Son et al., 2000). 일부에서는 협재된 점토층리를 따라 지하수가 누출되는 것을 볼 수 있다.

Fig. 2와 같은 암반비탈면 불연속면의 전단강도 산정을 위해 Fig. 3과 같은 절차를 따랐다. 먼저 전단강도는 시공 중 노출된 비탈면에 대하여 face mapping과 field test 후 결정하였다. 이 과정에서 암 종류, 지반상태, 풍화도, 불연



(a) Calcite vein and groundwater



(b) Clay filled



(c) Clay filled and groundwater

Fig. 2. Representative bedding planes in rock slopes at the study site

속면 종류, 주향, 경사, 간격, 연장성, 두께, 블록형상, 불연속면의 충전물 유무, 종류, 두께, 거칠기, 상태, 지하수 유무, 파괴 형태, 암괴 크기, 인장균열 등을 조사하였다. 이들 요인들 중에서 전단강도 결정에 미치는 가장 중요한 요소는 불연속면의 경사, 충전물 및 지하수 유무였다. 내부마찰각은 불연속면의 경사를 고려하여 반드시 작게 산정하였다. 산정된 전단강도는 기존 문헌과의 비교 후 한계평형 해석에 의한 정량적인 안정성 분석을 통하여 확정하였다.

한계평형해석에는 TALREN 프로그램을 이용하였다. 해석에서 인장균열 위치는 비탈면 붕락이 발생한 현장에서 조사된 인장균열의 위치를 적용하였고 불연속면에서의 강도와 풍화정도는 비탈면에 대한 face mapping시 현장에서 조사된 강도와 풍화정도를 근거로 하였으며, 지하수위 조건은 설계 시 조건과 같게 적용하였다.

## 2.2 재산정 결과

Tables 1, 2, 3은 Fig. 3에 제시된 절차에 따라 양산단층 대 암반비탈면의 층리, 단층, 절리 불연속면에 대한 전단강도 재산정 결과이다. 본 연구에서는 총 128개소에 대한 자료만을 이용하였다. Table 1은 이중 층리가 발달된 암반 31개 비탈면에 대한 재산정 결과이다. Fig. 2에 언급된 것처럼 층리내 충전물이 전단강도에 미치는 영향을 알아보기 위해 충전물 상태에 따라 결과를 각각 정리하였다. Table 2는 절리가 주로 발달된 암반 58개 비탈면에 대한 전단강도 재산정 결과이다. Table 3은 단층이 발달된

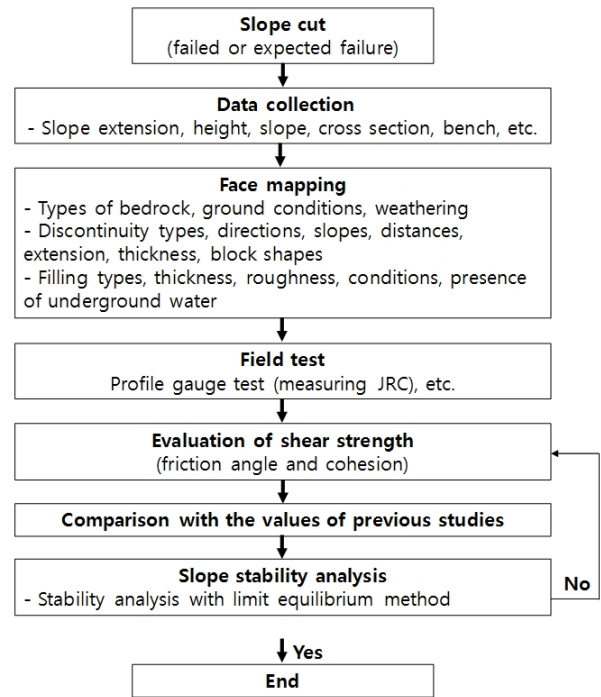


Fig. 3. Evaluation procedure of shear strength adopted in this study

Table 1. Result of re-evaluated shear strengths on bedding planes

| Bedding state                 | No. | Unit weight (kN/m <sup>3</sup> ) | Cohesion (kPa) | Friction angle (°) | Bedding plane angle (°) |
|-------------------------------|-----|----------------------------------|----------------|--------------------|-------------------------|
| Filled by clay                | 1   | 23.5                             | 11.7           | 5                  | 10                      |
|                               | 2   | —                                | 11.7           | 5                  | 7                       |
|                               | 3   | 23.5                             | 11.7           | 5                  | 7                       |
|                               | 4   | 18.6                             | 9.8            | 10                 | —                       |
|                               | 5   | —                                | 17.6           | 25                 | 27                      |
|                               | 6   | —                                | 17.6           | 25                 | 27                      |
|                               | 7   | —                                | 9.8            | 20                 | 33                      |
|                               | 8   | —                                | 17.6           | 25                 | 30                      |
|                               | 9   | —                                | 9.8            | 20                 | 24                      |
|                               | 10  | —                                | 9.8            | 20                 | 32                      |
|                               | 11  | —                                | 4.9            | 15                 | 25                      |
|                               | 12  | —                                | 19.6           | 30                 | 35                      |
|                               | 13  | —                                | 9.8            | 25                 | 35                      |
|                               | 14  | —                                | 9.8            | 15                 | 28                      |
|                               | 15  | —                                | 19.6           | 15                 | 28                      |
|                               | 16  | —                                | 9.8            | 15                 | 28                      |
|                               | 17  | —                                | 19.6           | 25                 | 30                      |
|                               | 18  | —                                | 9.8            | 20                 | 30                      |
|                               | 19  | 18.6                             | 9.8            | 10                 | 13                      |
|                               | 20  | 18.6                             | 9.8            | 10                 | 13                      |
|                               | 21  | 23.5                             | 19.6           | 17                 | 23                      |
|                               | 22  | 19.6                             | 14.7           | 17                 | 24                      |
|                               | 23  | —                                | 9.8            | 17                 | 23                      |
|                               | 24  | —                                | 19.6           | 10                 | 10                      |
|                               | 25  | —                                | 19.6           | 26                 | 28                      |
| Filled by shattered materials | 26  | —                                | 29.4           | 28                 | 30                      |
|                               | 27  | —                                | 29.4           | 28                 | 34                      |
|                               | 28  | —                                | 9.8            | 20                 | 33                      |
|                               | 29  | 19.6                             | 17.6           | 25                 | 30                      |
|                               | 30  | 23.5                             | 9.8            | 17                 | 25                      |
|                               | 31  | —                                | 4.9            | 20                 | 21                      |

Table 2. Result of re-evaluated shear strengths on joint planes

| Joint state                   | No. | Unit weight (kN/m <sup>3</sup> ) | Cohesion (kPa) | Friction angle (°) | Joint plane angle (°) |
|-------------------------------|-----|----------------------------------|----------------|--------------------|-----------------------|
| Filled by clay                | 1   | 24,5                             | 14,7           | 25                 | 34                    |
|                               | 2   | 25,5                             | 9,8            | 20                 | 34                    |
|                               | 3   | –                                | 9,8            | 20                 | 34                    |
|                               | 4   | –                                | 9,8            | 20                 | 30                    |
|                               | 5   | 24,5                             | 19,6           | 15                 | 20                    |
|                               | 6   | 18,6                             | 19,6           | 15                 | 20                    |
|                               | 7   | 22,5                             | 14,7           | 10                 | –                     |
|                               | 8   | 23,5                             | 19,6           | 25                 | –                     |
|                               | 9   | 23,5                             | 29,4           | 30                 | –                     |
|                               | 10  | 22,5                             | 19,6           | 25                 | 30                    |
|                               | 11  | 22,5                             | 9,8            | 25                 | 32                    |
|                               | 12  | 16,7                             | 9,8            | 20                 | 32                    |
|                               | 13  | 22,5                             | 19,6           | 25                 | 30                    |
|                               | 14  | –                                | 19,6           | 25                 | 39                    |
|                               | 15  | 21,6                             | 19,6           | 20                 | 25                    |
|                               | 16  | 23,5                             | 19,6           | 25                 | 30                    |
|                               | 17  | –                                | 24,5           | 30                 | 35                    |
|                               | 18  | 19,6                             | 9,8            | 18                 | 26                    |
|                               | 19  | 19,6                             | 11,7           | 22                 | 26                    |
|                               | 20  | 19,6                             | 14,7           | 25                 | –                     |
|                               | 21  | –                                | 24,5           | 30                 | 34                    |
|                               | 22  | 18,6                             | 29,4           | 25                 | –                     |
|                               | 23  | 18,6                             | 24,5           | 25                 | –                     |
|                               | 24  | 18,6                             | 29,4           | 30                 | –                     |
|                               | 25  | 18,6                             | 29,4           | 25                 | 32                    |
|                               | 26  | –                                | 9,81           | 25                 | 32                    |
|                               | 27  | –                                | 16,6           | 30                 | 36                    |
|                               | 28  | –                                | 19,6           | 30                 | 35                    |
|                               | 29  | –                                | 4,9            | 20                 | 27                    |
|                               | 30  | –                                | 6,8            | 20                 | 33                    |
|                               | 31  | –                                | 4,9            | 15                 | 25                    |
|                               | 32  | –                                | 9,8            | 15                 | 34                    |
|                               | 33  | 19,6                             | 29,4           | 30                 | –                     |
|                               | 34  | –                                | 9,8            | 15                 | –                     |
|                               | 35  | –                                | 19,6           | 30                 | 36                    |
|                               | 36  | –                                | 19,6           | 15                 | 36                    |
|                               | 37  | –                                | 19,6           | 15                 | 35                    |
|                               | 38  | 23,5                             | 19,6           | 15                 | 32                    |
|                               | 39  | –                                | 14,7           | 20                 | 33                    |
|                               | 40  | –                                | 14,7           | 20                 | 33                    |
|                               | 41  | –                                | 19,6           | 30                 | 40                    |
|                               | 42  | –                                | 9,8            | 30                 | 40                    |
|                               | 43  | –                                | 9,8            | 30                 | 39                    |
|                               | 44  | –                                | 9,8            | 20                 | 30                    |
|                               | 45  | –                                | 24,5           | 17                 | 33                    |
|                               | 46  | –                                | 9,8            | 30                 | 50                    |
|                               | 47  | –                                | 14,7           | 30                 | 46                    |
| Filled by shattered materials | 48  | 24,5                             | 14,7           | 25                 | 34                    |
|                               | 49  | 25,5                             | 9,8            | 20                 | 34                    |
|                               | 50  | –                                | 9,8            | 20                 | 34                    |
|                               | 51  | 16,7                             | 9,8            | 20                 | 32                    |
|                               | 52  | 22,5                             | 19,6           | 25                 | 30                    |
|                               | 53  | 21,6                             | 19,6           | 20                 | 25                    |
|                               | 54  | 19,6                             | 29,4           | 30                 | –                     |
|                               | 55  | –                                | 4,9            | 20                 | 27                    |
|                               | 56  | –                                | 9,8            | 20                 | 35                    |
|                               | 57  | 24,5                             | 14,7           | 30                 | 58                    |
|                               | 58  | –                                | 14,7           | 17                 | 40                    |

Table 3. Result of re-evaluated shear strengths on fault planes

| Fault state                   | No. | Unit weight (kN/m <sup>3</sup> ) | Cohesion (kPa) | Friction angle (°) | Fault plane angle (°) |
|-------------------------------|-----|----------------------------------|----------------|--------------------|-----------------------|
| Filled by clay                | 1   | 19.6                             | 24.5           | 40                 | -                     |
|                               | 2   | 22.5                             | 24.5           | 20                 | 80                    |
|                               | 3   | 18.6                             | 18.6           | 25                 | -                     |
|                               | 4   | 22.5                             | 19.6           | 25                 | 30                    |
|                               | 5   | 23.5                             | 19.6           | 25                 | -                     |
|                               | 6   | 22.5                             | 19.6           | 25                 | 30                    |
|                               | 7   | -                                | 9.8            | 25                 | 32                    |
|                               | 8   | 22.5                             | 19.6           | 25                 | 30                    |
|                               | 9   | -                                | 19.6           | 25                 | 39                    |
|                               | 10  | 21.6                             | 19.6           | 20                 | 25                    |
|                               | 11  | 21.6                             | 39.2           | 20                 | -                     |
|                               | 12  | -                                | 6.8            | 10                 | 31                    |
|                               | 13  | -                                | 17.6           | 25                 | 40                    |
|                               | 14  | -                                | 9.8            | 20                 | 42                    |
|                               | 15  | -                                | 9.8            | 20                 | 26                    |
|                               | 16  | 19.6                             | 39.2           | 30                 | -                     |
|                               | 17  | -                                | 9.8            | 25                 | 29                    |
|                               | 18  | 18.6                             | 23.5           | 27.5               | -                     |
|                               | 19  | -                                | 9.8            | 20                 | 33                    |
|                               | 20  | -                                | 9.8            | 20                 | 25                    |
|                               | 21  | 18.6                             | 23.5           | 27.5               | -                     |
|                               | 22  | 23.5                             | 19.6           | 15                 | 32                    |
|                               | 23  | -                                | 18.1           | 15                 | -                     |
| Filled by shattered materials | 24  | 22.5                             | 19.6           | 25                 | 30                    |
|                               | 25  | 21.6                             | 19.6           | 20                 | 25                    |
|                               | 26  | 21.6                             | 39.2           | 20                 | -                     |
|                               | 27  | 19.6                             | 29.4           | 30                 | -                     |
|                               | 28  | 23.5                             | 42.1           | 34.5               | -                     |
|                               | 29  | 18.6                             | 17.6           | 25                 | 82                    |
|                               | 30  | -                                | 17.6           | 25                 | 40                    |
|                               | 31  | -                                | 19.6           | 30                 | -                     |
|                               | 32  | 19.6                             | 39.2           | 30                 | -                     |
|                               | 33  | -                                | 4.9            | 20                 | 27                    |
|                               | 34  | -                                | 9.8            | 20                 | 35                    |
|                               | 35  | 20.6                             | 34.3           | 30                 | -                     |
|                               | 36  | -                                | 9.8            | 25                 | 29                    |
|                               | 37  | -                                | 29.4           | 30                 | 51                    |
|                               | 38  | 20.6                             | 39.2           | 30                 | -                     |
|                               | 39  | 17.6                             | 9.8            | 30                 | 66                    |

암반 39개 비탈면에 대한 전단강도 재산결과이다. 충전물이 전단강도에 미치는 영향을 알아보기 위해 충전물 유무에 따라 각각의 결과를 정리하였다.

### 3. 결과 및 분석

#### 3.1 설계단계에서 산정된 전단강도

설계단계에서 전단강도 산정은 시추코아에 대한 절리면 전단시험 및 암석시험, 지표지질조사(암반의 불연속면

특성) 및 기존 문헌자료 등을 비교 검토하여 암반 절리면에 대한 전단강도를 산정하였다. Table 4는 현장 시료에 대한 대표적인 일축압축강도이고, Table 5는 설계에 참고한 대표적인 문헌자료이다. 또한 Table 6는 Hoek and Bray(1974)가 암반 비탈면 파괴에 대한 역해석으로부터 산정한 비탈면 파괴시 마찰각과 점착력 값을 표로 정리한 것이다. Table 7은 모든 결과를 종합하여 설계에 적용된 점착력과 내부마찰각 값이다. 본 현장의 절토부에 분포하는 암반은 주로 사암 또는 세일로서 풍화된 연암 또는 경암내의 불연속면으로 가정하여 점착력은 약 50kPa으로 산

Table 4. Unconfined compressive and joint compressive strengths of rocks (Korea Expressway Corporation, 2001)

| Boring hole | Unconfined compressive strength (MPa) | Joint compressive strength JCS (MPa) | Average and adopted values in design  |
|-------------|---------------------------------------|--------------------------------------|---|
| CB-3        | 89.2 (910 kg/cm <sup>2</sup> )        | 22.4 (228 kg/cm <sup>2</sup> )       | Average = 21.0 MPa (214 kg/cm <sup>2</sup> )<br>Adopted value = 19.61 MPa (200 kg/cm <sup>2</sup> ) |
| CB-4        | 188.2 (1920 kg/cm <sup>2</sup> )      | 47.1 (480 kg/cm <sup>2</sup> )       |   |
| CB-5        | 63.7 (650 kg/cm <sup>2</sup> )        | 16.0 (163 kg/cm <sup>2</sup> )       |   |
| CB-6        | 100.0 (1020 kg/cm <sup>2</sup> )      | 25.0 (255 kg/cm <sup>2</sup> )       |   |
| CB-7        | 64.7 (660 kg/cm <sup>2</sup> )        | 16.2 (165 kg/cm <sup>2</sup> )       |   |
| CB-8        | 79.4 (810 kg/cm <sup>2</sup> )        | 19.9 (203 kg/cm <sup>2</sup> )       |   |
| CB-9        | 60.8 (620 kg/cm <sup>2</sup> )        | 15.2 (155 kg/cm <sup>2</sup> )       |   |
| CB-10       | 58.8 (600 kg/cm <sup>2</sup> )        | 14.7 (150 kg/cm <sup>2</sup> )       |   |
| CB-13       | 101.0 (1030 kg/cm <sup>2</sup> )      | 25.3 (258 kg/cm <sup>2</sup> )       |   |
| CB-14       | 23.5 (240 kg/cm <sup>2</sup> )        | 23.5 (240 kg/cm <sup>2</sup> )       |   |
| CB-15       | 72.5 (740 kg/cm <sup>2</sup> )        | 18.1 (185 kg/cm <sup>2</sup> )       |   |
| CB-16       | 55.9 (570 kg/cm <sup>2</sup> )        | 14.0 (143 kg/cm <sup>2</sup> )       |   |

Table 5. Basic friction angle of shale and sandstone (Korea Expressway Corporation, 2001)

| Rock type | Value (°) | Reference                 |
|-----------|-----------|---------------------------|
| Sandstone | 25 ~ 35   | Barton and Croubey (1977) |
|           | 27 ~ 33   | Barton and Croubey (1977) |
|           | 35 ~ 45   | Hoek and Bray (1974)      |
| Shale     | 25 ~ 35   | Hoek and Bray (1974)      |
|           | 19 ~ 32   | Barton and Croubey (1977) |
|           | 27        | Hoek and Bray (1974)      |

Table 6. The relationship between friction angle and cohesion (Hoek and Bray, 1974)

| No. of sample | Friction angle (°) | Cohesion (kPa) |
|---------------|--------------------|----------------|
| 1             | 7.15               | 10.90          |
| 2             | 10.22              | 19.21          |
| 3             | 12.23              | 9.87           |
| 4             | 20.30              | 68.02          |
| 5             | 20.31              | 88.79          |
| 6             | 21.35              | 9.87           |
| 7             | 22.41              | 51.40          |
| 8             | 26.35              | 61.79          |
| 9             | 30.12              | 298.55         |
| 10            | 30.28              | 49.33          |
| 11            | 32.20              | 11.94          |
| 12            | 34.22              | 28.56          |
| 13            | 35.17              | 9.87           |
| 14            | 35.19              | 138.63         |
| 15            | 37.09              | 28.56          |
| 16            | 38.06              | 49.33          |
| 17            | 42.03              | 474.04         |
| 18            | 42.09              | 29.60          |

정하였고, 마찰각은 절리면내에 점토분이 존재 유무에 따라 30°와 25°로 산정하였다.

### 3.2 재 산정된 점착력과 내부마찰각

Fig. 4는 재 산정된 불연속면의 점착력과 내부마찰각 자료 전체를 도시한 것이다(검은색 원은 층리틀, 검은색 삼각형은 절리틀, 엑스는 단층을 각각 나타냄). 비교를 위해 점착력 범위 100kPa 이하에 해당되는 Hoek and Bray(1974)의 자료도 같이 도시하였다(흰 원). 기존 Hoek and Bray자료(Table 6)는 전체 암반에 대한 역해석 결과인데 본 연구처럼 불연속면 관련 자료 대부분은 점착력이 100kPa 보다 작을 것으로 예상되어 이에 해당되는 자료만을 원래 자료에서 추출하여 재 작성한 것이다. 전체적으로 본 연구에서 재 산정된 평균점착력(17kPa)과 평균내부마찰각(22°)이 Hoek and Bray가 제시한 값(평균점착력 35 kPa, 평균내부마찰각 26°)보다 작은 것을 알 수 있다. 이것은 연구 대상 지역의 쇄설성 퇴적암이 가지고 있는 특성으로 특히 이 지역 퇴적암에 발달된 불연속면의 특성에 기인된 것으로 판

Table 7. Estimated and adopted shear strength for joint and clay gouge zone in Busan-Ulsan expressway

| Case            | Cohesion (kPa) | Friction angle (°) |
|-----------------|----------------|--------------------|
| Joint           | 50             | 30                 |
| Clay gouge zone | 50             | 25                 |

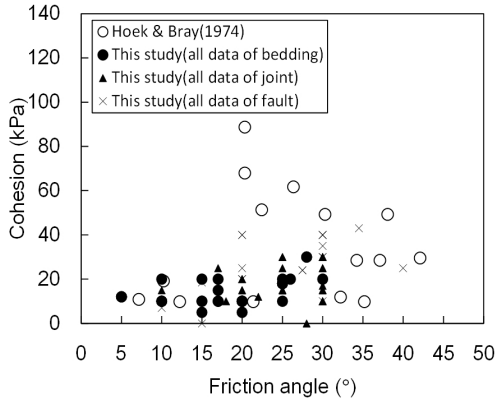
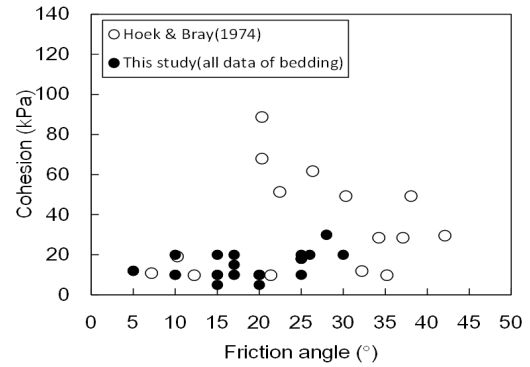


Fig. 4. Relationship between the friction angle and cohesion obtained from the failed rock slope discontinuities in Yangsan fault system with the data proposed from Hoek and Bray (1974)

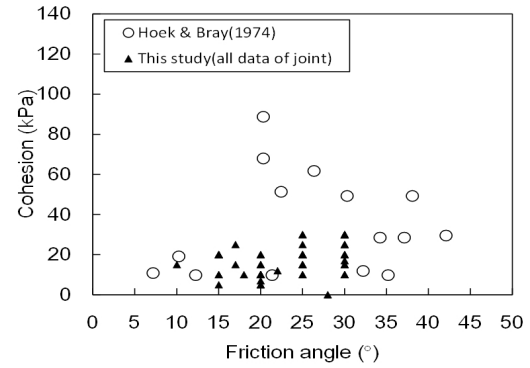
단된다. 또한 Hoek and Bray의 값과 차이는 평가 방법과 시기에 의해서도 발생할 수 있는데 본 연구에서 재산정된 점착력과 내부마찰각은 노출된 비탈면에 대한 face mapping을 실시하여 즉 불연속면의 현장 상태를 반영한 결과이기 때문이다.

Fig. 5는 재 산정된 불연속면의 점착력과 내부마찰각을 불연속면 종류에 따라 각각 도시한 것이다. Hoek and Bray(1974)가 제시한 결과에 비교해 보면 전체적으로 점착력은 매우 작게 나타나고 마찰각도 상대적으로 작은 것을 알 수 있다. 특히 층리의 경우 절리나 단층에 비해 상대적으로 작은 값을 보이는 데 이것은 불연속면에 토사가 협재되어 있고 층리면에 풍화잔존물인 점토가 존재하기 때문이다. 또한 Fig. 2에서 본 바와 같이 점토 잔존물이 존재하는 층리면을 따라 지하수가 누출되는 영역도 있어 점착력과 마찰각이 상대적으로 작게 나타나는 것으로 보인다.

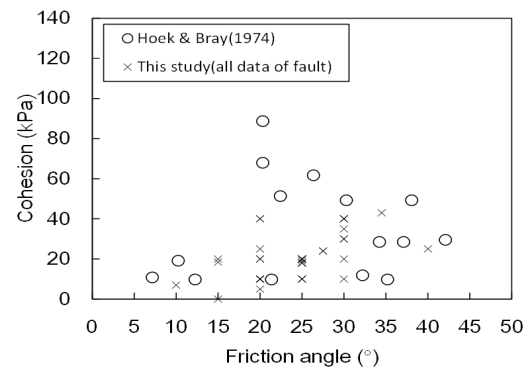
Fig. 6은 전단강도 중 점착력만을 비교한 것으로 (a) 전체 불연속면 자료, (b) 불연속면에 점토 충전물이 존재하는 경우, (c) 불연속면에 파쇄물이 존재하는 경우에 해당된다. 값은 불연속면에 대한 값과 이들의 평균값, 설계값 그리고 Hoek and Bray가 제시한 값을 같이 도시하였다. 표준오차도 같이 도시하였는데 전체 불연속면의 자료에 대한 층리, 절리, 단층에서 표준오차는 각각 1.12, 0.95,



(a) Bedding



(b) Joint



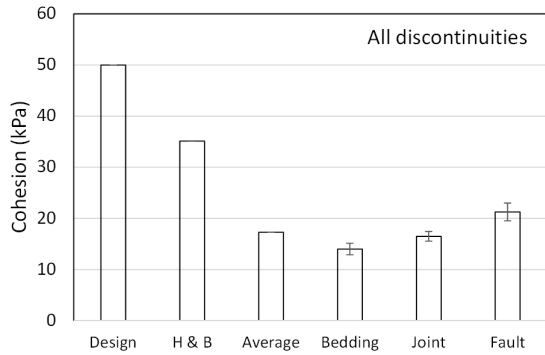
(c) Fault

Fig. 5. Relationship between the friction angle and cohesion to type of discontinuity with the data proposed from Hoek and Bray (1974)

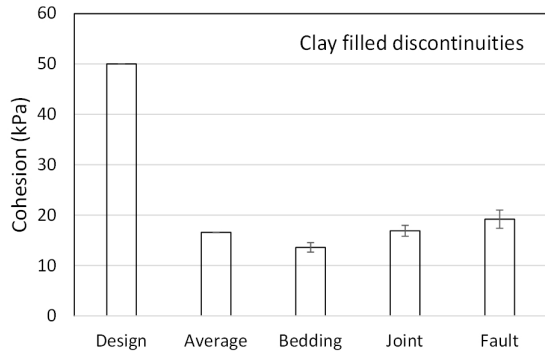
1.74이다. 불연속면에 점토 충전물이 존재하는 경우 층리, 절리, 단층의 표준오차는 각각 0.94, 1.07, 1.8이다. 불연속면에 파쇄물이 존재하는 경우 층리, 절리, 단층의 표준오차는 각각 4.40, 2.07, 3.29이다. 파쇄물이 존재하는 경우가 점토 충전물이 존재하는 경우보다 전체적으로 오차 범위가 크데 이것은 분석에 사용된 자료가 상대적으로 적어서 발생한 것이므로 판단된다.

Fig. 6(a)을 보면 불연속면 평균값이 설계값 보다 1/2 이상 작은 것을 알 수 있다. Hoek and Bray가 제시한 값과 비교하면 불연속면 평균값과 거의 1/2 수준임을 알 수 있

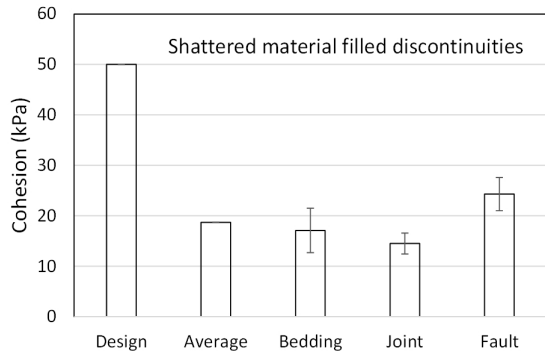




(a) All data of discontinuities



(b) Data of discontinuities filled by clay

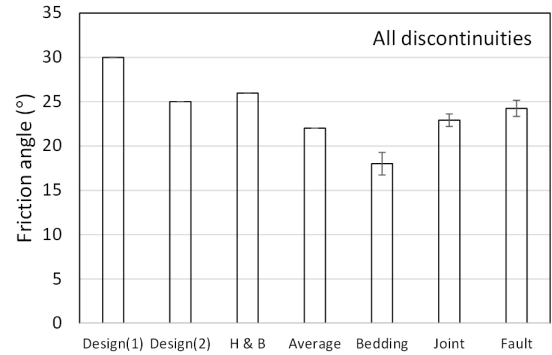


(c) Data of discontinuities filled by shattered material

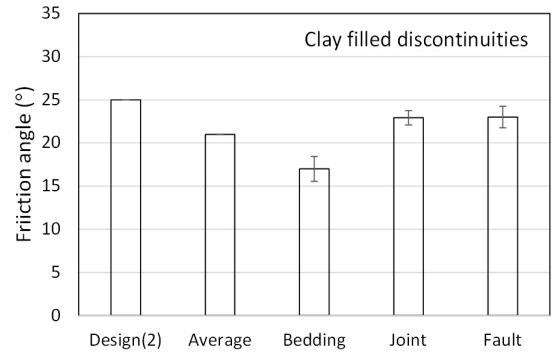
Fig. 6. Comparison of cohesion values to discontinuity types and states

다. 이것은 설계 시 고려한 불연속면의 점착력이 실제와 많은 차이가 있음을 보여주는 것이다. 각 불연속면에 대해 살펴보면 층리의 경우 점착력이 가장 작게 산정되었으며 그 다음으로 절리, 단층 순으로 나타났다. 층리의 점착력은 평균값보다도 작고 절리나 단층보다도 작아 층리가 불연속면 중에서 점착력에서 가장 취약한 특징을 보임을 알 수 있다. 층리의 경우 불연속면에 토사가 협재되어 있고 층리면에 풍화잔존물인 점토가 존재하기 때문이다. 특히 층리 중 지하수의 유출이 발생하는 층리 불연속면은 가장 취약할 것으로 판단된다.

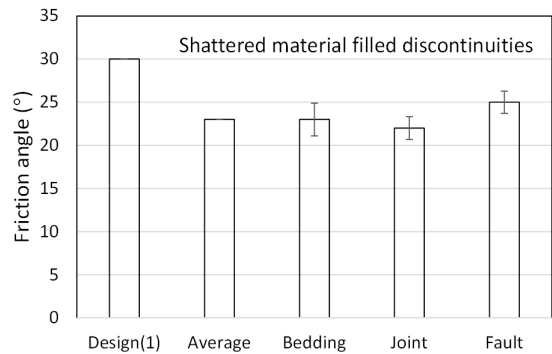
Fig. 6(b)는 불연속면에 점토충진물이 존재하는 경우 점착력 값으로 전체 자료를 도시한 Fig. 6(a)와 유사한 경향



(a) All data of discontinuities



(b) Data of discontinuities filled by clay



(c) Data of discontinuities filled by shattered material

Fig. 7. Comparison of friction angle values to discontinuity types and states

을 보임을 알 수 있다. 즉 층리에서 점착력 값이 가장 작게 산정되었다. Fig. 6(c)는 불연속면에 점토 대신 파쇄물이 존재하는 경우로 불연속면의 종류 상관없이 거의 유사한 값을 보임을 알 수 있다. 이것은 점착력 값이 불연속면의 유형보다는 면에 존재하는 파쇄물에 지배된다는 것을 의미한다.

Fig. 7은 전단강도 중 내부마찰각만을 비교한 것이다. 값은 불연속면에 대한 값과 이들의 평균값, 설계값 그리고 Hoek and Bray가 제시한 값을 같이 도시하였다. 설계 값은 설계 시 절리면인 경우(Design(1)=30°)와 점토 충진물이 있는 경우(Design(2)=25°) 두 가지를 고려하였기 때문에 같이 도시하였다. 표준오차도 같이 도시하였는데 전체

불연속면의 자료에 대한 층리, 절리, 단층에서 표준오차는 각각 1.28, 0.71, 0.91이다. 불연속면에 점토 충전물이 존재하는 경우 층리, 절리, 단층의 표준오차는 각각 1.44, 0.83, 1.24이다. 불연속면에 파쇄물이 존재하는 경우 층리, 절리, 단층의 표준오차는 각각 1.90, 1.32, 1.29이다. 점착력에서와 마찬가지로 파쇄물이 존재하는 경우가 점토 충전물이 존재하는 경우보다 전체적으로 오차 범위가 큰데 이것은 분석에 사용된 자료가 적은데서 기인된 문제로 판단된다.

Fig. 7(a)를 보면 불연속면 평균값이 설계값 보다 작은 것을 알 수 있다. Hoek and Bray가 제시한 값과 비교해도 작게 나타는 것을 알 수 있다. 이것은 설계 시 고려된 불연속면의 상태가 실제와 차이가 있음을 보여주는 것이다. 각 불연속면에 대해 살펴보면 층리의 경우가 점착력에서처럼 내부마찰각이 가장 작게 산정되었다. 그 다음으로 절리, 단층 순으로 나타났다. 층리의 내부마찰각은 평균값보다도 작고 절리나 단층보다도 작아 층리가 불연속면 중에서 내부마찰각에서 가장 취약한 특징을 보임을 알 수 있다. 이유는 앞에서 설명한 바와 같이 층리의 경우 불연속면에 토사가 협재되어 있고 층리면에 풍화잔존물인 점토가 존재하기 때문이다.

Fig. 7(b)는 불연속면에 점토충진물이 존재하는 경우로 내부마찰각이 전체자료에 대한 경향(Fig. 7(a))와 유사한 것으로 나타났다. 하지만 불연속면에 파쇄물이 존재하는 Fig. 7(c)를 보면 점착력에서 보여준 것과 같이 불연속면의 종류 상관없이 거의 유사한 내부마찰각 값을 보임을 알 수 있다. 이것은 내부마찰각 값이 불연속면의 유형보다는 면에 존재하는 파쇄물에 지배된다는 것을 의미한다.

### 3.3 Mohr-Coulomb 파괴기준

일반적으로 Mohr-Coulomb(MC) 파괴기준은 암석(intact rock)에 대하여 인장시험, 일축압축시험, 삼축압축시험 등을 실시하여 그 결과를 이용하여 나타내는데 일반적으로 표현하면 식 (1)과 같다.

$$\tau = c + \sigma_n \tan \phi \quad (1)$$

여기서  $\tau$ 는 불연속면의 전단강도,  $c$ 는 불연속면의 점착력,  $\phi$ 는 불연속면의 내부마찰각이다.

MC모델은 암석뿐만 아니라 불연속면을 가진 암석에

대해서 여러 연구자들에 의한 적용되었다. Patton(1966)은 거칠기 경사를 고려한 이중선(bilinear) 전단강도 MC모델을 제시하였으며, Jaeger(1971)는 Patton이 제시한 전단강도 모델에서 두 선간의 연결을 완만하게 전환(smooth transition) 시키는 식을 제시하였다. 그 외 MC모델에 톱니 이론을 적용한 많은 연구가 진행되었다(Haque and Kodikara, 2012). 하지만 이들 MC모델을 적용한 전단강도 식은 자연상태의 불연속면의 특징을 매우 간략화시켜 적용시켰다는 약점을 가지고 있다. 좀 더 자연상태 불연속면의 특징(불규칙 표면)을 고려한 전단강도 식은 거칠기계수(Joint Roughness Coefficient, JRC)를 이용하여 Barton과 그 동료들에 의해 제안되었다(Barton 1976; Barton and Choubey 1977).

본 연구에서는 Barton이 제시한 것과 같은 거칠기계수 측정을 포함하여 포괄적으로 불연속면(층리, 절리, 단층)의 각도와 상태 등을 고려해서 점착력과 내부마찰각을 산정하였으며 식 (1)을 직접 사용하여 양산단층대 암반비탈면 불연속면에 대한 MC파괴기준 식을 제안하였다. 사용된 점착력과 내부마찰각 값은 3.2절에 제시된 것을 사용하였다. 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\tau = 14.00 + \sigma_n \tan 18.0^\circ \quad \text{for bedding} \quad (2)$$

$$\tau = 16.48 + \sigma_n \tan 22.9^\circ \quad \text{for joint} \quad (3)$$

$$\tau = 21.27 + \sigma_n \tan 24.2^\circ \quad \text{for fault} \quad (4)$$

$$\tau = 17.30 + \sigma_n \tan 22.0^\circ \quad \text{average for all discontinuities} \quad (5)$$

Fig. 8은 앞에 제시된 식을 전단강도와 수직응력의 향으로 MC파괴기준을 도시화 한 것으로 층리, 절리, 단층뿐만

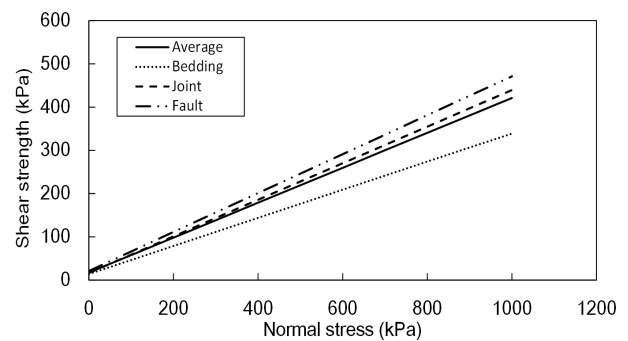


Fig. 8. Shear strength versus normal stress curves applied Mohr-Coulomb failure criterion for bedding, joint, fault and averaged value

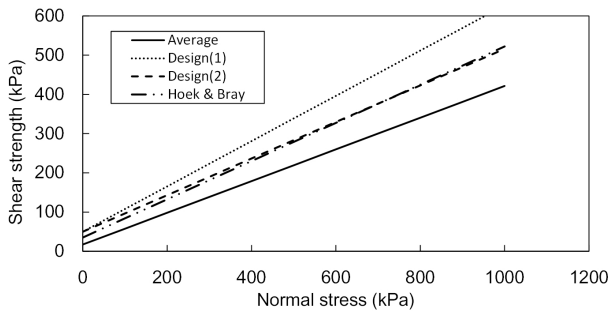


Fig. 9. Shear strength versus normal stress curves applied Mohr-Coulomb failure criterion for design, Hoek & Bray, and averaged value

아니라 이를 자료에 대한 평균값도 같이 나타냈다. 층리의 경우 절리나 단층에 비해 상대적으로 작은 전단강도를 보이는 데 이것은 층리면에 풍화잔존물인 점토가 존재하고, 점토 잔존물이 존재하는 층리면을 따라 지하수가 누출되는 영역도 있기 때문이다. 평균값은 절리와 매우 유사한 것을 보이는 것으로 나타났다.

Fig. 9는 비교를 위해 Fig. 8의 평균값과 Hoek and Bray(1974)(점착력 100kPa 이하에 해당되는 자료) 값과 설계에서 사용된 값(점착력 50kPa, 내부마찰각 25°, 30°)을 같이 MC파괴기준을 도시하였다. 3.2절의 결과와 같이 전체적으로 본 연구에서 제시된 MC파괴기준이 Hoek and Bray의 MC파괴기준보다 작은 것을 알 수 있다. 설계값과 비교하면 내부마찰각 30°를 적용한 경우(Design(1)) MC파괴기준 사이에 상당한 차이가 있음을 알 수 있다. 이것은 앞서 여러 번 언급한 바와 같이 연구 대상 지역의 쇄설성 퇴적암이 가지고 있는 특성에 기인된 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

연구 대상 현장은 우리나라에서 암질이 가장 나쁘다고 분류되는 쇄설성퇴적암이 존재하는 양산단층대를 통과하는 부산~울산간 고속도로 현장으로 도로건설공사 중 암반비탈면의 파괴가 많이 발생된 원인을 규명하기 위해 약 128여개 비탈면 분석을 통해 불연속면에 대하여 전단강도를 재 산정하였다. 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 전단강도(점착력과 내부마찰각)는 비탈면에 대한 face mapping과 역해석을 통해 재 산정하였다. 기존에 많이 활용되고 있는 Hoek and Bray(1974)가 제시한 결과와 비교 시 이 지역 불연속면의 점착력과 내부마찰

각이 Hoek and Bray의 경우 보다 매우 작은 것으로 나타났다.

- (2) 설계 시에 사용된 전단강도와 비교에서도 본 연구에서 산정된 불연속면의 전단강도와 많은 차이가 있는 것으로 나타났다. 이것은 설계 시 지표지질조사 및 실내시험에서 대상구간의 불연속면 특성을 정확하게 파악하지 못했기 때문이다.
- (3) 전단강도(점착력 및 내부마찰각) 값이 기존 문헌자료 및 설계 값과 비교에서 특히 층리에서 가장 큰 차이를 보이는 것으로 나타났다. 층리의 경우 절리 및 단층에 비해 점착력 및 내부마찰각 모두 설계 및 문헌 값보다 작은 것으로 나타났다.
- (4) 불연속면에 점토 충전물이 존재하는 경우 전단강도 값은 동일한 결과를 보인 반면, 불연속면에 파쇄물이 존재하는 경우 전단강도 값은 불연속면의 유형에 상관없이 거의 유사한 값을 보이는 것으로 나타나 전단강도 값이 불연속면의 유형보다는 면에 존재하는 파쇄물에 지배되는 것으로 나타났다.

#### Acknowledgement

This research was supported by a grant (18CTAPC 117263-03) from Technology Advancement Research Program (TARP) funded by Ministry of Land, Infrastructure and Transportation of Korean government.

#### References

1. Aydan, Ö., Shimizu, Y. and Ichikawa, Y. (1989), "The Effective Failure Modes and Stability of Slopes in Rock Mass with Two Discontinuity Sets", *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol.22, No.3, pp.163-188.
2. Barton, N. R. (1976), The Shear Strength of Rock and Rock joints. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, 13: pp.255-279.
3. Barton, N. R. (1973), Review of a New Shear Strength Criterion for Rock Joints, *Eng. Geol.*, Vol.7, pp.287-332.
4. Barton, N. R. (1974), A Review of the Shear Strength of Filled Discontinuities in Rock, *Norwegian Geotech. Inst. Publ. No.105*.
5. Barton, N. R. and Choubey, V. (1977), The Shear Strength of Rock Joints in Theory and Practice, *Rock Mech.* Vol.10, No.1-2, pp.1-54.
6. Choi, E. K., Kim, S. W., Kim, I. S. and Lee, K. H. (2012),

- A Study on the Chemical Index of Alteration of Igneous Rocks, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, 28(3), pp.41-54 (in Korean with English abstract).
7. Haque, A. and Kodikara, J. (2012), A Simplified Analytical Model for Predicting the Shear Behavior of Regular Triangular Rock/Concrete Joints under Constant Normal Stiffness, *Geotechnique*, 62(2), pp.171-176.
  8. Hoek, E. (1990), Estimating Mohr-Coulomb Friction and Cohesion Values from the Hoek-Brown Failure Criterion, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, Vol.27, No.3, pp.227-229.
  9. Hoek, E. and Bray, J. D. (1974), *Rock Slope Engineering*, CRC Press, p.368.
  10. Hoek, E. and Brown, E. T. (1997), Practical Estimates of Rock Mass Strength, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol.34, No.8, pp.1165-1186.
  11. Jaeger, J. C. (1971), Friction of Rocks and the Stability of Rock Slopes, Rankine Lecture. *Geotechnique*, 21, pp.97-134.
  12. Kim, C.-H., Kim, B.-Y., Park, T.-W. and Kim, T.-H. (2018), Estimation of Shear Strength of Discontinuous(bedding) Cut Sedimentary Rock Slope by Using Back Analysis, *J. Korean Geosynthetic Society*, Vol.17, No.1, pp.139-152.
  13. Kim, K. S., You, B. O. and Lee, S. D. (2002), Failure Characteristics of Cut Slopes of Shale in Kyoungsang Basin, Proceedings of the seminar and field workshop for mudstone and shale, organized by the Korean Geotechnical Society for Rock Mechanics Commission, pp.103-114.
  14. Kim, S.-W., Choi, E.-K., Kim, J.-W., Kim, T.-H. and Lee, K.-H. (2017), Chemical Weathering Index of Clastic Sedimentary Rocks in Korea, *The Journal of Engineering Geology*, Vol. 27, No.1, pp.67-79.
  15. Korea Expressway Corporation (2001), Design Reports the Busan-Ulsan Expressway.
  16. Korea Expressway Corporation (2008), Reports of Slope Stability Analysis on the Busan-Ulsan Expressway Construction Site.
  17. Lee, S. H. and Kim, S. J. (2004), "Weathering Characteristics of Sedimentary Rocks Affected by Periodical Submerging", *Journal of Mineralogical Society of Korea*, Vol.17, No.1, pp.23-35.
  18. Park, H. D. (2002), "Engineering Geological Properties of Mudstone and Shale", Proc. of the seminar and field workshop for mudstone and shale, organized by the Korean Geotechnical Society for Rock Mechanics Commission, pp.18-30.
  19. Patton, F. D. (1966), Multiple Modes of Shear Failure in Rock, Proc. of the 1st International Cong. on Rock Mech., Lisbon, 1, pp.509-515.
  20. Priest S. D. (1992), *Discontinuity Analysis Rock Engineering*, Chapman & Hall, London, Vol.228, No.13, pp.39-49.
  21. Son, M., Kim, I.-S., Lee, D. H., Lee J.-D., Kim, J. S. and Paik, I. S. (2000), "Geological Characteristics in the Eastern Part of the Ulsan Fault Area, Korea : Structural Geology and Anisotropy of Magnetic Susceptibility(AMS) in the Tertiary Miocene Waup Basin", *Journal of the Geological Society of Korea*, Vol.36, No.3, pp.195-216.
  22. You, B. O. (2002), Assumption of Shear Strength on Failed Discontinuities Due to Back Analysis, Proc. of fall conference of the Korean Geotechnical Society, pp.213-227.