


이학석사 학위논문

황령산 산사태 원인 분석 및
유지관리 계획 결과의 연구

지도교수 최 정 찬

이 논문을  학위논문으로 제출함.



2004년 8월

부경대학교 대학원

응용지질학과

라 원 진

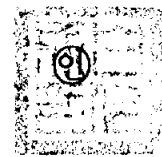
라원진의 이학석사 학위논문을 인준함.

2004년 8월 31일

주 심 이학박사 정 상 용



위 원 이학박사 백 인 성



위 원 이학박사 최 정 찬



목 차

List of Figures	iv
List of Tables	x
Abstract	xi
1. 서론	1
1.1 연구배경 및 목적	1
1.2 연구방법	4
2. 연구지역의 지질 개관 및 지질 특성	5
2.1. 지질 개관	5
2.2. 지질 특성	8
2.2.1. 연구지역의 암상	8
2.2.2. 연구지역의 지질구조	16
3. 연구지역의 물리적 암석특성	23
3.1. 암반의 공학적 분류	23
3.2. 현장조사	26
3.2.1. Schmidt hammer 시험	26
3.2.2. 시추 조사	32
3.3 실내 시험	35
3.3.1. 실내 물성치 시험	35
3.3.2. XRD 분석	38

4. 산사태의 발생원인 분석	23
4.1. 산사태 발생 현황	40
4.2. 항공사진 판독	41
4.3. 현장조사에 의한 육안 분석	41
4.4. 평사투영해석	48
4.5. 한계평형해석	52
4.5.1. 해석 모델링	53
4.5.2. 역해석 및 강도정수 결정	53
5. 유지관리 계측 및 분석	63
5.1. 유지관리 계측의 필요성 및 목적	63
5.2. 유지관리 계측 시스템	63
5.3. 경사계	66
5.3.1. 작동원리	66
5.3.2. 경사계의 설치 및 측정	70
5.4. 하중계	72
5.4.1. 작동원리	72
5.4.2. 측정 지점 및 설치장소의 선정	74
5.4.3. 측정 범위 및 오차의 정도	75
5.4.4. 하중계의 설치 및 측정	76
5.5. 간극수압계	78
5.5.1. 작동원리	78
5.5.2. 측정 범위 및 오차의 정도	79
5.5.3. 간극수압계의 설치 및 측정	79

5.6 계측결과 및 분석	81
5.6.1. 경사계 계측결과	81
5.6.2. 하중계 계측결과	87
5.5.3. 간극수압계의 계측결과	91
6. 결론 및 제언	96
참고문헌	99
요 약	103
부 록	104

List of Figures

- Fig. 1. Satellite image map of Mt. Hwangnyeong(2000, KOMPSAT-1 EOC+Landsat TM Band 3/2/1). 3
- Fig. 2. Map of Mt. Hwangnyeong. landslide showing sliding direction, the size of landslide and drilling sites(from Choi and Paik, 2002). 3
- Fig. 3. The simplified geological map of Busan(1. Alluvium; 2. Granite; 3. Gabbro; 4. Rhyolite ash flow tuff; 5. Andesitic rocks; 6. Andesitic volcanic breccia; 7. Songdo Formation; from Kim and Yoon, 1993). 6
- Fig. 4. Differential weathering of sedimentary rock in Mt. Hwangnyeong. 10
- Fig 5. Minor faults developed in the sedimentary rock. This slope located in Kyung Sung University opposed to the landslide slope. Photographs show weathered zone along fault planes. 10
- Fig. 6. Photomicrographs of lamination in typical alternation of strata(sandstone and mudstone) in Mt. Hwangnyeong. Dark color is argillaceous part(muddy). White color is arenaceous part(sandy). Scale bar is 0.5mm. 11

- Fig. 7. Photomicrographs of typical tufaceous sandstone in Mt. Hwangnyeong. Plagioclase particles replaced by calcites(a, b, c) and cement replaced by calcites(d). Scale bar is 0.5mm. 12
- Fig. 8. Photomicrographs of tufaceous sediments developed in Mt. Hwangnyeong. a) Tufaceous sandy mudstone is studded with volcanic glass. b) Tufaceous sandstone included feldspar (replaced with calcite) and quartz. c) & d) Cherty sedimentary rock in the study area. Particles originated from volcanic glasses(partially replaced with calcite). Scale bar is 0.5mm. 13
- Fig. 9. Photographs of landslide slope. a) Panoramic view of landslide slope. b) Failure plane exposed lower part of landslide slope. Overall distinctive feature is relatively thin beds at landslide slope. Upper Beds(c) are more thick than lower beds(d). Fine grained beds developed in more thin beds. 14
- Fig. 10. Photographs of landslide slope. a) Failure plane exposed middle part of landslide slope. Lower Beds(b, c) are more thick than upper beds(d) at middle part of slope. Fine grained beds developed in more thin beds. 15
- Fig. 11. Geological map of the Gyeongsang Basin(Korea Institute of Geology, 1995). 17

Fig. 12. Lower hemisphere equal area projection and contour plot of discontinuity planes in Mt. Hwangnyeoung.	21
Fig. 13. Rosette diagram showing representative three joint sets in Mt. Hwangnyeoung.	21
Fig. 14. Photograph showing calcite vein in the sedimentary rock. ...	22
Fig. 15. Exposed joint plane of outcrop. Photograph showing plume texture.	22
Fig. 16. Classifications of uniaxial compress strength of rocks.	23
Fig. 17. Cross section of rock test hammer.	28
Fig. 18. Distribution of assumed uniaxial compress strength calculated form schmidt hammer rebound value of the study area.	30
Fig. 19. Geological cross sections showing greenish gray tuffaceous shale layers(line A-A' & line B-B' by Fig. 2).	33
Fig. 20. X-ray diffraction pattern of clay mineral from failure surface.	39
Fig. 21. Aerial photographs of the landslide area taken on(A: the 15th of November, 1993, B: the 19th of November, 1996, C: the 23th of November, 1997, D: the 17th of June, 1998).	42
Fig. 22. Vertical failure plane occurred the first landslide.	43
Fig. 23. Sliding zone(clay & greenish gray mudstone).	44
Fig. 24. Three slide planes of the landslide.	44
Fig. 25. Photograph of the second landslide(tension cracks developed parallel to road).	46

Fig. 26. Two vertical joint sets developed tension cracks in upper drainage.	46
Fig. 27. More extended tension cracks in upper drainage.	47
Fig. 28. Photograph of the third landside.	47
Fig. 29. Exposed slide plane(about 12° dip).	49
Fig. 30. Exposed slide plane(coated with clay).	50
Fig. 31. Analysis of stereographic projection method($\phi=43^\circ$).	51
Fig. 32. Analysis of stereographic projection method($\phi=21^\circ$).	51
Fig. 33. Variation of safety factor with angle of internal friction and piezometric head rate($c=0.0t/m^2$).	57
Fig. 34. Variation of safety factor with angle of internal friction and piezometric head rate($c=1.0t/m^2$).	57
Fig. 35. Variation of safety factor with angle of internal friction and piezometric head rate($c=2.0t/m^2$).	58
Fig. 36. Cohesion and angle of internal friction by feed back analysis (50% piezometric head) and direct shear test.	58
Fig. 37. C-C' Cross section by slope gradients.	61
Fig. 38. Slope stability analysis of 1:1.5 gradient(50% piezometric head).	61
Fig. 39. Slope stability analysis of 1:2.0 gradient(50% piezometric head).	62
Fig. 40. Variation of safety factor with slope gradient and piezometric head rate.	62

Fig. 41. Monitoring Equipments for maintenance monitoring.	65
Fig. 42. Flow chart of real-time monitoring system.	65
Fig. 43. Photograph of the inclinometer sensor(probe).	67
Fig. 44. Photograph of the inclinometer tube and probe.	67
Fig. 45. Circuit diagram of the inclinometer sensor and calculation of horizontal displacement.	68
Fig. 46. Sketch showing the principle of horizontal displacement calculation and in-situ measurement.	69
Fig. 47. Drawing of a general load cell.	73
Fig. 48. Drawing of two vibrating wire principle(A: Static tension measurement method, B: Static-dynamic tension measurement method).	73
Fig. 49. Sketch showing earth anchor load cell.	77
Fig. 50. Photograph of earth anchor load cell and measurement.	77
Fig. 51. Photograph of the piezometer sensor(vibrating wire type).	80
Fig. 52. Sketch showing the piezometer and installation.	80
Fig. 53. Result of horizontal displacement with inclinometer(I-1, manual measurement).	83
Fig. 54. Result of horizontal displacement with inclinometer(I-2, manual measurement).	83
Fig. 55. Result of horizontal displacement with inclinometer(I-3, manual measurement).	84

Fig. 56. Result of horizontal displacement with inclinometer(I-1, automatic measurement).	84
Fig. 57. Result of horizontal displacement with inclinometer(I-2, automatic measurement).	85
Fig. 58. Result of horizontal displacement with inclinometer(I-3, automatic measurement).	85
Fig. 59. Result of horizontal displacement with inclinometer(I-4, manual measurement).	86
Fig. 60. Result of average axial load with load cell(L-1).	89
Fig. 61. Result of average axial load with load cell(L-2).	89
Fig. 62. Result of average axial load with load cell(L-3).	90
Fig. 63. Result of average axial load with load cell(L-4).	90
Fig. 64. Result of piezometric head with pore pressure(P-1).	93
Fig. 65. Result of piezometric head with pore pressure(P-2).	93
Fig. 66. Result of piezometric head with pore pressure(P-3).	94
Fig. 67. Histogram of precipitation in the Busan area(from the 16th of July, 2000 to the 14th of August, 2001).	94
Fig. 68. Histogram of cumulative precipitation(from the 16th of August, 2000 to the 14th of August, 2001).	95

List of Tables

Table 1. Classification of uniaxial strength and seismic velocity (construction standard specification, suggested Ministry of Construction & Transportation, Korea, 1994)	25
Table 2. Rock test hammer rebound value and assumed uniaxial compress strength	29
Table 3. Coordinations and elevations of bore holes(Fig. 2)	32
Table 4. Standard test methods of soil's property(suggested by Korea Quality Institute of Construction Industry)	35
Table 5. Input data of limit equilibrium method modeling	37

Study on Analysis for Factors Inducing the Hwangnyeong Mountain Landslide and Analysis for the Result of Maintenance Monitoring

Won-Jin La

Department of Applied Geology, Graduate School

Pukyong National University

Abstract

Korea Peninsula covers mountainous terrain that over 70 percent of the total area. Annual average precipitation of Korea is 1,200 millimeters and over half annual rainfall concentrate in rainy season, from June to August. Most of the landslides occurred in rainy season resulted from heavy rainfall.

To analyze the cause of Hwangnyeong mountain landslide, various analyses were performed such as geology survey, in-situ investigation, drilling, laboratory test, aerial photograph interpretation, X-ray diffraction analysis, and slope stability analysis using Stereographic Projection and Limit Equilibrium methods

As the result, Hwangnyeong mountain area is consist of sedimentary

rock which has weakness for chemical weathering and variation of engineering properties. Three major joint sets developed at study area and is identified as extension joints.

The result of aerial photograph interpretation show that Hwangnyeong mountain landslide had been progressed before one year. And the result of analyses, Hwangnyeong mountain landslide occurred with a plane failure type which was due to increase of pore pressure triggered by rainfall, and rock mass moved on failure zone which is consist of illite and chlorite. Base on this result and rock properties data, used SLOPE/W software which is application of a limit equilibrium method. The result of the limit equilibrium method show that safety factor is enough when reconstruct slope has 1:2.0 gradient.

As soon as reinforcement work have completed, maintenance monitoring was performed to estimate the slope stability. Four inclinometer, three piezometer, four earth anchor load cell were installed for the maintenance monitoring with automatic measurement. One rain gauge was installed to measure the amount of rainfall. As the result of monitoring, which was performed during after one year, show steady state of slope. Especially, in this case of landslide which was triggered by heavy rainfall, maintenance monitoring with automatic system is useful for recognizing of rapidly change of pore pressure and deformation.

1. 서론

오늘날 급격한 국가 산업의 발달에 따라 사회간접자본에 대한 투자가 국가의 중점사업으로 추진되어 왔으며, 이와 더불어 산업단지, 도로개설 등 인간생활 영역의 확대를 위해 많은 절개지 사면이 발생되어 왔다. 특히 효율적인 물자 수송과 인적 이동을 위해 기존의 고속도로와 국도의 확장 및 신설이 불가피한 실정이다.

도로의 확장과 신설을 위해서는 대부분의 경우 암반사면의 노출이 불가피하며, 이렇게 노출된 암반사면은 인간의 생명과 재산을 보호하기 위해 안정성을 유지시켜야 할 필요가 있다. 사면 설계시 절취사면의 안정성을 확보하기 위해 지표지질 조사, 시추조사, 물리탐사, 실내시험의 결과치를 평사투영, 유한요소, 한계평형식 등을 이용하여 사면설계가 이루어진다. 그럼에도 불구하고 인지하지 못한 연약대(Weakness zone)로 인하여 시공 중이거나 시공 완료 후에 사면파괴가 빈번히 발생되고 있다.

암반내 존재하는 연약대는 화학적, 물리적 특성으로 인하여 인지하기 어려울 때가 많다. 이러한 약대는 최종적인 사면설계 시에 계획되는 안전율을 실제보다 낮게 산정되게 하여 불안정한 사면을 형성시키게 되며, 결국 사면파괴에 이르도록 한다. 특히 도심지역에서 발생하는 산사태와 절취사면의 붕괴는 다른 지역보다 많은 인명피해와 재산피해를 야기하므로 도심지 절취사면의 경우, 설계단계에서 보다 많은 자료의 획득이 필요하며, 시공 후 계측 등을 통한 유지관리가 철저히 시행되어야 할 것이다.

1.1. 연구배경 및 목적

우리나라는 국토의 70% 이상이 산지이고, 연 평균 강수량 1,200mm의 절반 이상이 우기인 7, 9월에 집중되고 있다. 국내에서 발생하는 산사태도 이 우기에 대부분 발생하는 것으로 연구되었고(Choi and Yoon, 1994), 산사태의 발생 원인은 대부분 강우에 기인한다고 보고되었다(Hong et al., 1994).

황령산 사면은 부산항 건설 사무소에서 부산항 3단계 개발사업의 일환으로 배후수송망 체계에 따른 도로 확장 및 개설을 위해 시공된 도심지 도로사면이다. 황령산 산사태는 1999년 9월 10일 오전 11시 50분경 황령산 터널방면 우측의 도시고속도로 진입을 위한 대연램프 진입로 부근 절취사면에서 발생하였으며, 사고당일 약 100mm의 강우가 발생되었다. 활동사면의 규모는 길이 약 130m, 폭 약 50m, 지층두께 약 20~30m 정도이며, 퇴적암층의 풍화된 녹색이암층을 따라 평면파괴 형태로 발생한 것이다. 주 활동지반은 S7°E~S12°E 방향으로 수평거리 최대 17m 이동하여 황령산 터널입구 4차선 도로의 끝까지 흘러내렸다(Fig. 1). 평면도로 200m 구간이 약 14만m³의 토사로 인해 매몰되었고 진입램프 강교 130m가 붕괴되고 사망자 1명 부상자 3명이 발생하였다. 이로 인해 부산시 전체의 교통이 혼잡을 이루어 시민들이 큰 불편을 겪었다.

본 연구는 잠재적인 파괴 가능성을 지닌 연약대가 사면파괴의 활동파괴면으로 작용하는 메카니즘을 황령산 산사태 사례를 통하여 규명하였고 계측을 통하여 지속적인 거동 유무에 대해 분석하였다. 국내 도로사면에서의 설계 및 유지관리 시 지질공학적인 연약대의 존재유무와 파괴 가능성의 고찰이 반드시 필요할 것이며, 지속적인 계측도 필요하리라 사료된다.

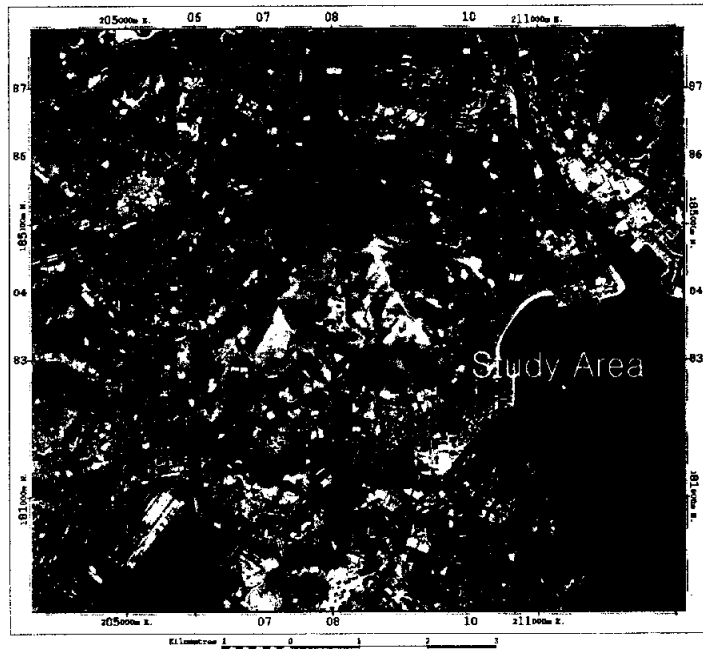


Fig. 1. Satellite image map of Mt. Hwangnyeong(2000, KOMPSAT-1 EOC+Landsat TM Band 3/2/1).

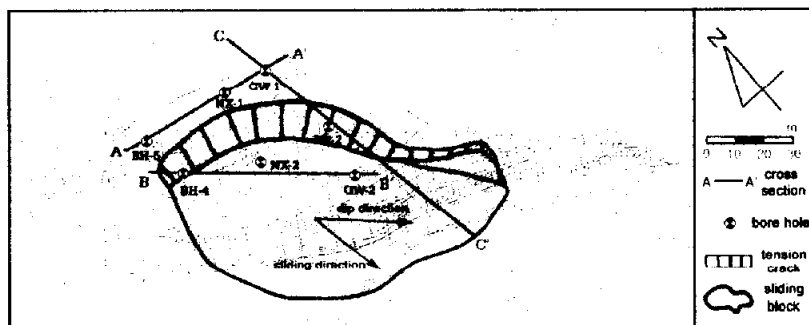


Fig. 2. Map of Mt. Hwangnyeong. landslide showing sliding direction, the size of landslide and drilling sites(from Choi and Paik, 2002).

1.2. 연구방법

일반적으로 산사태의 원인은 자연적 요인과 인위적인 요인이 있으며, 자연적인 요인으로는 지질 및 지형에 대한 내인적 요인과 강우, 강설, 융설, 지진, 화산 등의 외인적 요인으로 나눌 수 있다. 국내에서 발생하는 대부분의 산사태는 외인적 요인인 강우와 관련되어 발생된다. 본 연구지역의 강우와의 상관성을 파악하기 위해 기상자료를 조사하여 비교분석하였으며, 황령산 산사태 지역의 파괴이력을 조사하기 위해서 문헌조사 및 항공사진판독을 실시하였다.

산사태의 파괴 메카니즘은 그 구성물질과 지질특성에 크게 좌우된다. 본 연구지역의 지질특성을 조사하기 위하여 문헌조사 및 현장지질조사, 시추조사를 실시하였다.

토질, 암반, 파괴 활동면의 점토 등의 물성치를 파악하기 위해서 비파괴 강도 시험인 Schmidt Hammer Test를 실시하였으며, 현장에서 채취한 시료 및 시추조사시 획득한 코아시료를 통하여 일축압축시험, 탄성파 속도 시험 등 다양한 실내 물성치 시험을 실시하였고 활동면에서의 점토 시료를 채취하여 XRD분석을 실시하였다. 이러한 기초자료와 평사투영해석 프로그램인 DIPS의 분석결과를 비교분석하여 본 연구지역의 산사태 발생원인을 분석하였다.

산사태가 발생한 본 연구지역 사면은 부산시 교통량의 중추적 역할을 하므로 유지관리를 목적으로하는 자동화 계측이 필요하였다. 계측기기로는 산사태를 야기한 주활동면의 거동유무를 파악하기 위하여 경사계, 우량계, 간극수압계, 하중계를 설치하여 자동계측을 실시하였다.

2. 연구지역의 지질 개관 및 지질 특성

2.1. 지질 개관

부산 일원에는 중생대 백악기말의 화성활동의 결과로 형성된 중성 및 산성화산암류와 이보다 후기에 관입한 볼국사 관입암체들이 곳곳에 분포하고 있다. 그리고 퇴적암체들은 이들 화성암류에 의하여 둘러싸여 고립적으로 산재하여 분포되어 있다(Fig. 3). 따라서 부산 지역은 지질분포에 있어서 암층들의 횡적분포가 전반적으로 불연속적인 양상을 띤다. 총서적으로는 경상누층군의 최상부에 해당하는 유천층군(중생대 백악기)의 여러 암석들이 혼재되어 분포함이 특징으로서, 본 유천층군은 주로 안산암, 유문암, 석영안산암 등의 용암과 응회암 등 화산기원 암석들과 이에 협재된 역암, 사암, 셰일 등의 퇴적암 등으로 구성되어 있으며, 이들 암층들은 백악기 후기에 일어난 화성활동에 의하여 곳곳에서 화강암체에 의하여 관입되어 있는 양상을 보인다.

유천층군은 하부로부터 다대포층, 안산암질화산각력암, 안산암류, 암회색응회질퇴적암, 유문석영안산암질화산각력암, 유문석영안산암, 유문암질암으로 구분되며(장태우 외, 1983), 최하부를 이루는 다대포층은 다시 하부와 상부로 세분된다. 하부 다대포층은 적색층과 비적색층의 교호대를 이루고 있으며 화산암물질의 함유량이 적은 것이 특징이고, 상부 다대포층은 녹색 및 녹회색 응회질사암이 대부분이며, 안산암질암이 부분적으로 관찰된다. 이번 산사태가 발생한 지역의 지층은 1:50,000 부산·가덕도폭에서 “암회색응회질퇴적암”에 해당되는데, 본 암회색응회질퇴적암은 다대포층보다 상부에 위치한 것으로 암회색을 띠는 부분이 가장 우세하고 회

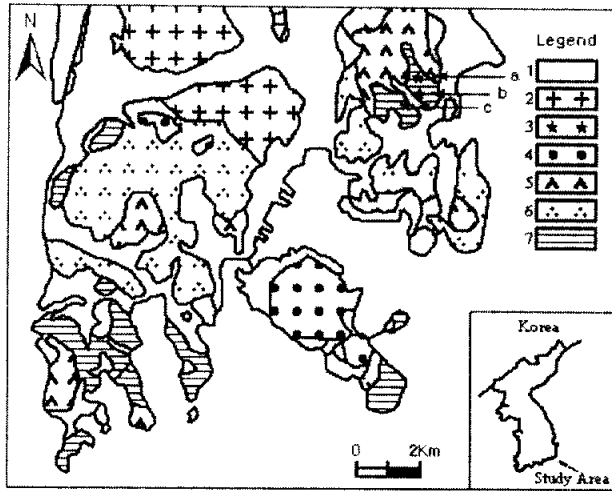


Fig. 3. The simplified geological map of Busan(1. Alluvium; 2. Granite; 3. Gabbro; 4. Rhyolite ash flow tuff; 5. Andesitic rocks; 6. Andesitic volcanic breccia; 7. Songdo Formation; from Kim and Yoon, 1993).

색, 암녹색, 담회색을 띠기도 하는 사암과 이암으로 기재되어 있다. 장태우 외(1983)는 본 퇴적암에서 채취한 세립사암의 현미경 관찰결과 석영, 견운모 및 지지분한 장석, 녹니석 등으로 구성되어 있으며, 특히 녹니석이 기질에 아주 풍부한 것으로 관찰하여 본 퇴적암에 녹니석이 우세한 것과 본 퇴적암이 응회질인 것과는 상당한 연관성이 있을 것으로 사료하였다.

이 퇴적층은 부산시 남구 대연동 일대, 영도구 태종대 일대, 북구 엄궁동 부근 및 가덕도폭 북동부 화산일대, 재산면 생곡리 부근 등지에서 고립되어 불연속적으로 분포하는 것으로 보고되어 있는데(장태우 외, 1983), 최근의 조사결과 본 퇴적암은 광안리 해안의 해저에 까지 연장 분포되어 있는 것으로 확인되었다. 한편 장태우 외(1983)는 본 퇴적층 내에 안산암질암이 협재되어 있는 것으로 기재하고 있으나, 최근 김진섭과 윤성효(1993)는 이들 퇴적암이 안산암질 중성암맥에 의해 관입되어 있음을 관찰하고 다대포층과 암회색응회질퇴적암을 같은 시대에 쌓인 지층으로 생각하여 임시적으로 '송도층'이라 명명한 바 있다(Fig. 3).

최정찬과 백인성(2002)은 황령산 부근에 분포한 본 응회질퇴적암을 1) 번영로변 노두 등에서 안산암에 의한 관입접촉이 나타나고, 2)본 퇴적암과 안산암과의 급격한 경계면 부근에 두꺼운 저탁암층이 발달함에도 불구하고 안산암질역을 포함한 역암이 관찰되지 않으며, 3)이 지층의 경사가 경계면에서 점차 감소하는 점 등으로 미루어 본 퇴적층과 주변 안산암체와의 접촉관계는 관입접촉인 것으로 판단하였고 이와같은 관입작용이 본 지역 퇴적암을 부분적으로 혼펠스화 시킨 것으로 사료하였었다.

2.2. 지질 특성

2.2.1. 연구지역의 암상

본 조사지역의 대표적인 지층노출 지역인 3개 지역, 즉 황령산 개발단지 절개지역(a 지역), 황령산터널 진입로 동측변 절개지역 (b 지역: 사태 발생 지역), 경성대 공과대학 절개지역(c 지역) 등(Fig. 3)에서 관찰된 지층의 총 두께는 100m 이상이며, 전반적으로 횡적인 연장성이 양호한 균일한 층리가 발달하고 대체적으로 응회질 성분을 다량 함유함이 특징이며, 이와 함께 경질암인 규산질퇴적암이나 호온펠스 사이에 연약질인 셰일(혈암)이 빈번하게 협재함(Fig. 4)이 본 지역 퇴적층의 특징이다. 이와 같은 암층의 구성으로 본 지층의 풍화암대에서는 셰일의 성층면을 따른 층리면 및 이에 수직으로 발달한 절리 등이 빈번히 발달하게 되었으며, 아울러 본 지역에 부분적으로 발달되어 있는 소규모 단층들(Fig. 5) 역시 본 지역 암층의 균열작용에 일조가 된 것으로 판단된다.

본 응회질퇴적암층은 대체적으로 북동방향의 주향과 남동방향의 경사를 가지며, 북측에서는 $20^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 의 경사를 보이다가 남측으로 오면서 경사가 10° 미만으로 점차 낮아지는 경향을 보인다. 본 퇴적암층은 박층의 셰일과 실트스톤 및 세립 내지 중립질 사암의 호층, 중립 내지 조립의 응회질 사암, 응회암, 이회암, 처어트, 역암 등 다양한 암질로 이루어져 있으며, 부분적으로 열변성을 받아 호온펠스화 되어 있다. 따라서 야외노두에서 이들 퇴적암층의 풍화양상은 호층의 양상으로 나타난다(Fig. 4). 즉, 호온펠스화되었거나 규산질이 우세한 암층의 경우에는 전반적으로 풍화정도가 미약한 반면, 세립질 퇴적층이나 석회질퇴적층 또는 교결재가 방해석으로 이루어진 응회질 사암층 등은 풍화암 내지 풍화토의 상태로 나타난다.

최정찬과 백인성(2002)은 본 황령산일대 퇴적암상을 1)엽층 내지 얇은 층이 발달한 사암과 이암의 호층암상, 2)얇은 층 내지 두꺼운(수 cm ~ 수 십 cm 두께)층으로 발달한 점이적인 사암상, 3)석회질의 함력 사암 내지 이암상, 4) 얇은 엽층으로 발달한 실트스톤과 이암의 호층암상, 5) 어회암상, 6) 수평 내지 사엽층리가 발달한 사암과 이암의 호층암상, 7) 불규칙한 엽층이 발달한 사암 내지 실트스톤과 이암의 호층암상, 8) 괴상의 쳐어트암상, 9) 우상 내지 렌즈상 층리가 발달한 사암과 이암의 호층암상으로 분류하였으며, 이 외 셰일과 응회암이 산출된다고 하였다.

산사태가 발생한 지역(Fig. 3 b)의 하부는 응회질의 함유가 비교적 적고, 전반적으로 10 cm 내외 두께의 층으로 발달하며(Fig. 9 c), 내부에는 일반적으로 엽층리가 발달한다(Fig. 6). 중부층, 즉 붕락면이 발달한 지역의 하부 지층은 층의 일반적인 두께가 수 십 cm로 비교적 두껍게 발달한 편이며, 응회질 사암과 셰일 등 전반적으로 응회질 성분이 풍부한 암층의 발달이 주를 이룬다(Fig. 10 a,b,c). 붕락면이 발달한 본 지역 상부 지층은 중부층과 마찬가지로 응회질 성분의 함유가 일반적이나, 중부층과는 달리 층의 두께가 수 cm 내지 10 cm 내외의 얇은 층으로 발달함이 특징이다(Fig. 10 d). 이 지역 지층의 주요 암상은 최정찬과 백인성(2002)의 구분에 의하면 화학적 풍화에 매우 약한 석회질의 함력 사암 내지 이암상에 해당한다.

본 지역은 이들 응회질퇴적암과 석회질암들은 부분적으로 열변성을 받아 풍화를 받지 않은 상태에서는 비교적 단단한 편이나, 풍화에 약한 장석과 방해석 물질들이 흔히 함유되어 있다(Fig 7).

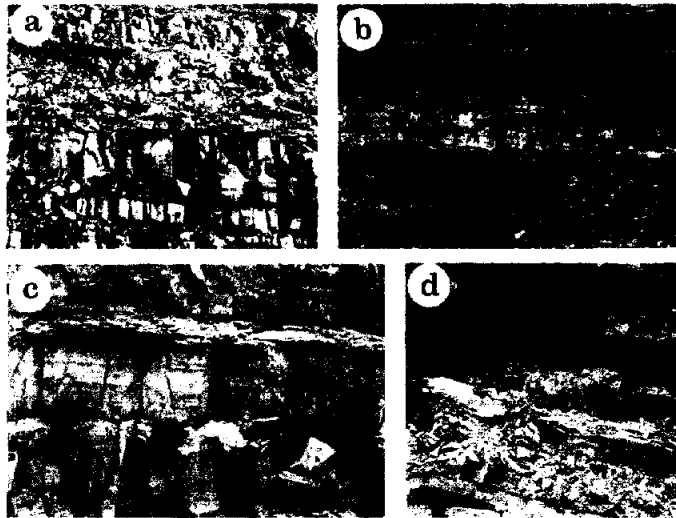


Fig. 4. Differential weathering of sedimentary rock in Mt. Hwangnyeong.

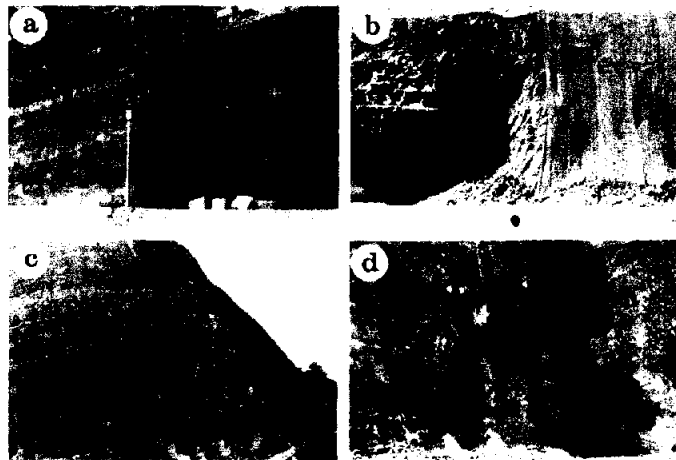


Fig 5. Minor faults developed in the sedimentary rock. This slope located in Kyungsung University opposited to the landslide slope. Photographs show weathered zone along fault planes.

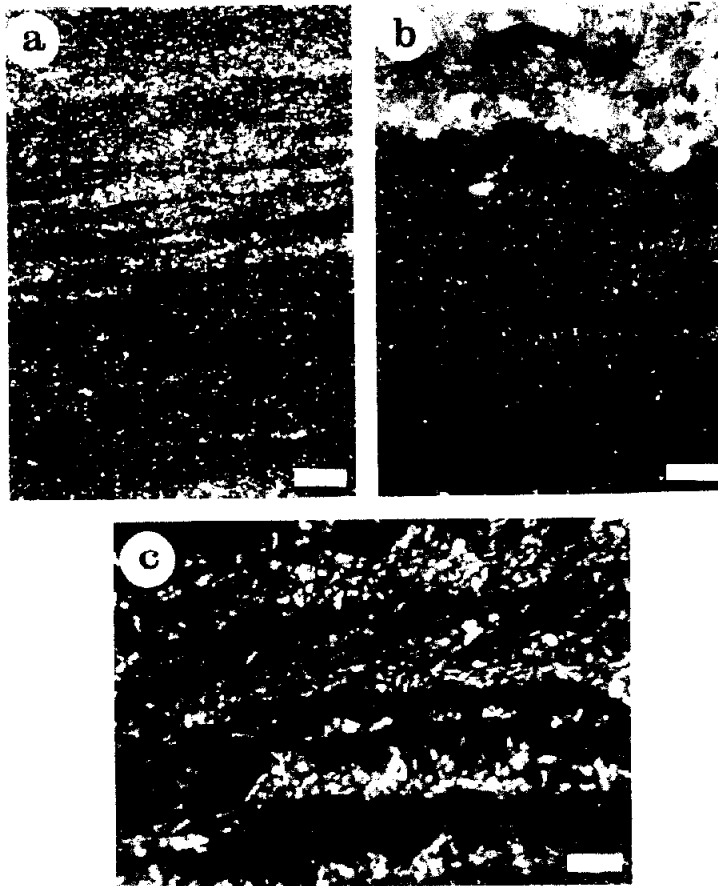


Fig. 6. Photomicrographs of lamination in typical alternation of strata(sandstone and mudstone) in Mt. Hwangnyeong. Dark color is argillaceous part(muddy). white color is arenaceous part(sandy). Scale bar is 0.5mm.

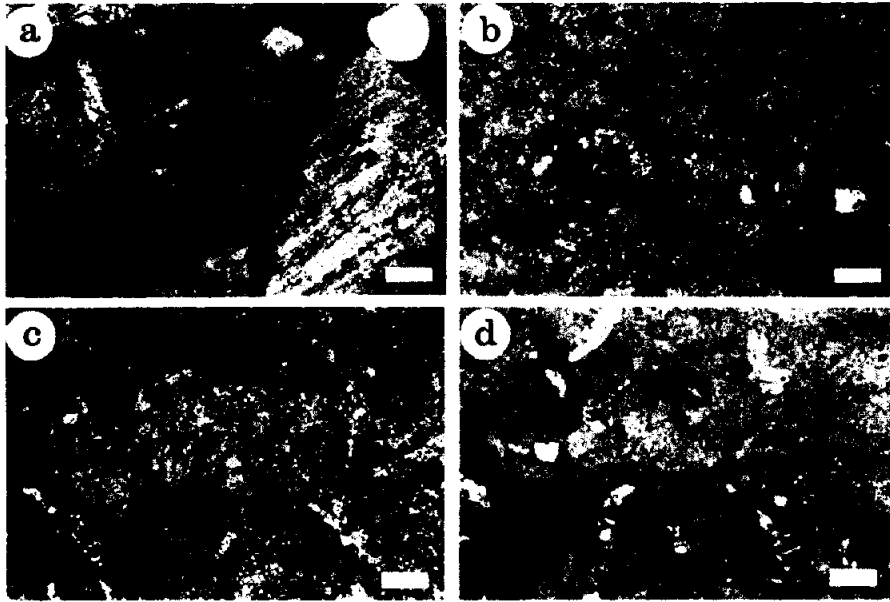


Fig. 7. Photomicrographs of typical tuffaceous sandstone in Mt. Hwangnyeong. Plagioclase particles replaced with calcites(a, b, c) and cement replaced with calcites(d). Scale bar is 0.5mm.

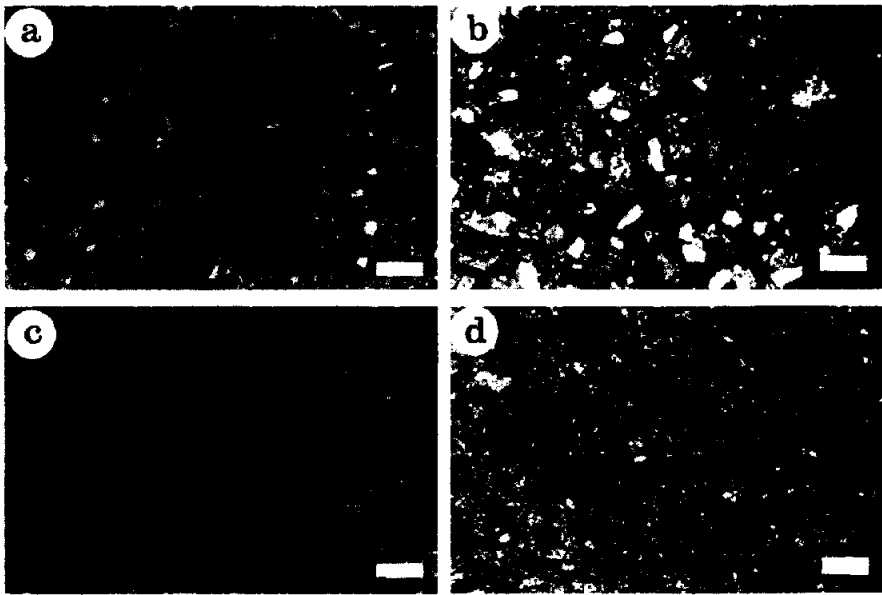


Fig. 8. Photomicrographs of tufaceous sediments developed in Mt. Hwangnyeong. a) Tufaceous sandy mudstone is studded with volcanic glass. b) Tufaceous sandstone included feldspar(replaced with calcite) and quartz. c) & d) Cherty sedimentary rock in the study area. Particles originated from volcanic glasses(partially replaced with calcite). Scale bar is 0.5mm.

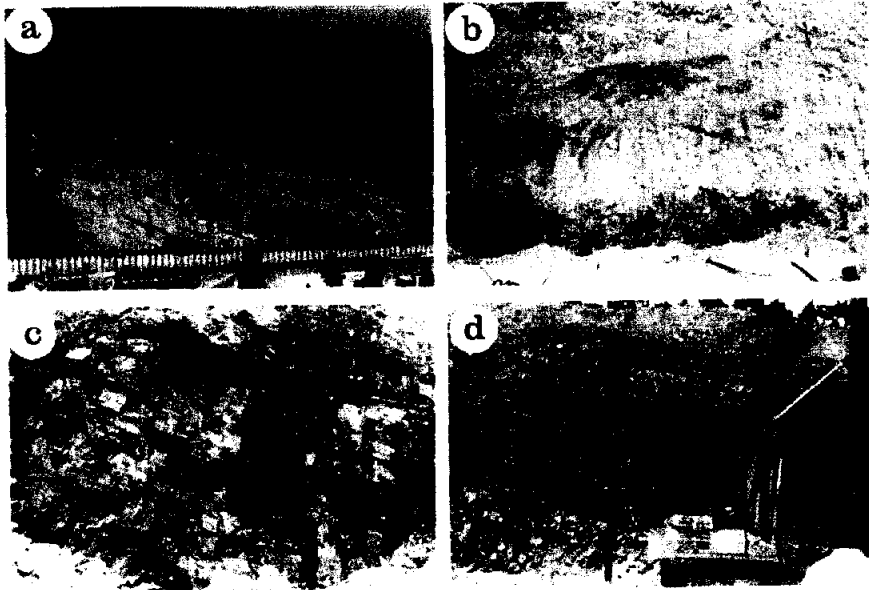


Fig. 9. Photographs of landslide slope. a) Panoramic view of landslide slope. b) Failure plane exposed lower part of landslide slope. Overall distinctive feature is relatively thin beds at landslide. Upper Beds(c) are more thick than lower beds(d). Fine grained beds developed in more thin beds.

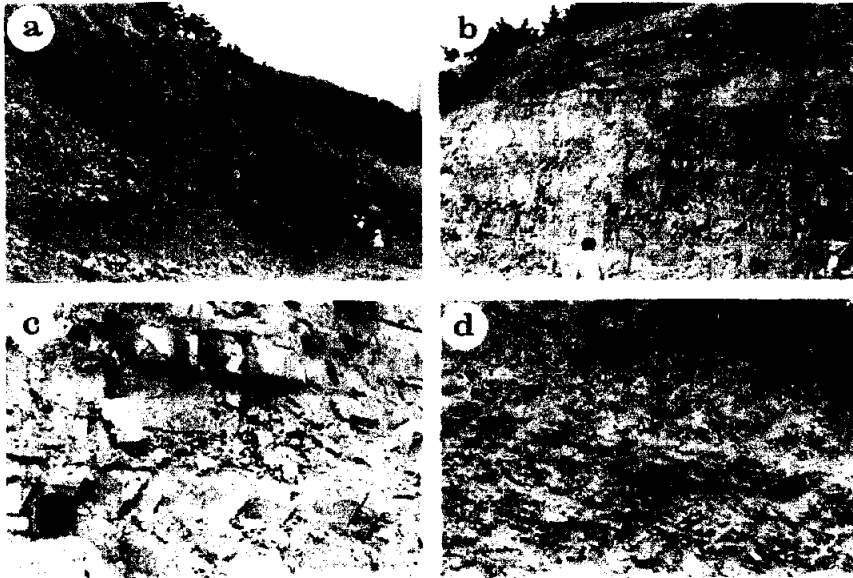


Fig. 10. Photographs of landslide slope. a) Failure plane exposed middle part of landslide slope. Lower Beds(b, c) are more thick than upper beds(d) at middle part of slope. Fine grained beds developed in more thin beds.

2.2.2. 연구지역의 지질구조

부산지역의 지형은 서로 평행하게 발달되는 북북동-남남서 방향의 큰 계곡이 길게 연장되는 것이 가장 뚜렷한 특징인데, 이 계곡부를 따라서 양산단층, 동래단층 및 기장단층 등의 대단층이 발달하고 있다(Fig. 11).

양산단층은 한반도 동남부에 발달하는 북북동방향의 몇 조의 평행한 단층들 중에서 단층의 폭이나 연장성이 가장 큰 것이 양산단층이다. 이 단층은 부산의 낙동강 하구언에서부터 낙동강의 본류 일부를 따라 발달하여 약 N10°E방향의 주향으로 양산, 언양, 경주, 영덕읍 부근을 지나 영해읍과 영덕군 병곡면 병곡리를 지나면서 바다로 연장되다가 다시 후포면소재지에서 거의 북쪽방향으로 연장되어 울진군 기성명 사동리 하사동에서 바다로 연장되는 것으로 알려졌다(이병주와 선우춘, 2003). 이 단층을 따라 지형적으로도 역시 뚜렷한 선구조가 발달되나 하나의 일직선이 아닌 약간씩 방향이 다른 선들로 이어지면서 부산에서 기성면까지 연장된다. 양산단층은 하나의 단층선이 계속 연장되어 분포하는 것이 아니라 몇 개의 평행한 단층들이 간격을 두며 발달하는 대규모 단층대이다. 따라서 양산단층의 폭은 전구간에 걸쳐서 매우 불규칙하다. 대체로 단층의 폭은 경주시 남쪽으로 폭이 넓으며, 그 북쪽으로는 폭이 좁아지는 형태이다. 장천중과 장태우(1998)는 경주 남쪽에서는 양산단층의 폭이 1Km 미만에서 6~7Km의 폭을 가지고, 약 30Km의 주기로 단층폭이 증가하고 감소한다는 규칙성을 제시하였다.

양산단층의 운동사에 대한 여러 학자들의 발표자료를 요약하면 지금까지 양산단층의 운동에 대해서는 주향이동(Sillitoe, 1977)과 경사이동(Choi and Park, 1985, 김종열, 1988), 등 몇 가지 의견이 있어 왔지만 현재는 우수향 주향이동(Simple dextral strike-slip)이라는 견해가 주류를 이루고

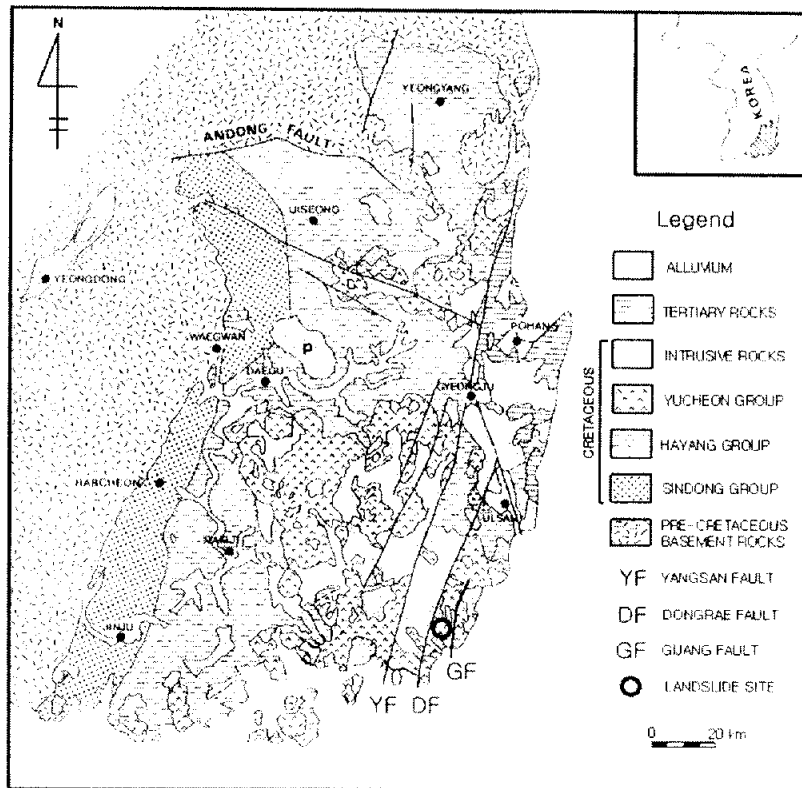


Fig. 11. Geological map of the Gyeongsang Basin(Korea Institute of Geology, 1995).

있다. 그러나 대단층은 전체 단층이 한번의 운동으로 동시에 발달하는 것이 아니라 공간적 및 시기적으로 달리하면서 점차 성장하게 된다. 즉, 양산단층도 한번의 운동에 의해 일시적으로 단층이 형성 되었다기 보다는 적어도 2번 이상의 운동을 한 다중변형(Multiple deformation)의 산물로 해석된다. 이와같은 견해는 청하지역의 연구(채병곤과 장태우, 1994)에서도 보여주고 있으며, 양산단층의 우수향주향이동이라는 의견에 반하여 절리연구에 의한 NNW-SSE 및 NE-SW 압축응력장(김상욱과 이영길, 1981), 자기비등방성구조에 의한 NW-SE 압축과 미세균열에 의한 NW/WNW, NNE/NS 압축응력장(이준동 외, 1993, 이병주와 송교영, 1995)등의 다양한 응력해석의 연구결과가 이를 뒷받침하고 있다. 이와 같이 양산단층은 몇 차례에 걸쳐 작용한 중북변형의 결과임이 여러 학자들에 의해 주장되고 있다.

동래단층은 부산광역시의 동구 좌천동과 남구 문현동 사이 즉 부산만에서 북북동 방향으로 발달하며, 선구조로는 경주시 외동을 냉천리까지 연장되는 단층이다. 이 단층 역시 양산단층과 마찬가지로 우수향의 주향이동단층으로 상기 양산단층과 같은 양상을 가진 것으로 보는 것이 일반적인 견해이다. 동래 단층에 대해서는 활발한 연구가 진행되지 않았으나 조용찬과 장태우(1998)는 NNE-SSW 압축 및 ESE-WNW 신장의 주향이동성 응력장, 이후 NNE-SSW 신장과 ESE-WNW 신장의 정단층성 응력장, 마지막으로 ENE-WSW 압축 및 NNW-SSE 신장의 주향이동성 응력장으로 해석하였다.

부산지역의 경우 양산단층과 울산단층으로 둘러 쌓인 지대는 양측에 대해 상대적으로 상승하여 호르스트(horst)를 형성하고 있다. 기장단층도 전술한 두 단층과 마찬가지로 북북동 방향의 주향을 가지며 지형상으로도 특징적인 단층곡이 단층선을 따라 발달해 있다.

산사태가 발생한 황령산은 동래단층과 기장단층 사이에 위치하며 고립된 암체로 충적층 위에 조성된 시가지에 의해 에워 쌓여 있다. 본 연구지역에 분포하는 응회질퇴적암층의 층리는 전술한 바와 같이 대체적으로 북동방향의 주향과 남동방향의 경사를 가지며, 북측에서는 $20^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 의 경사를 보이다가 남측으로 오면서 10° 미만으로 경사가 점차 낮아진다. 산사태가 발생한 지역의 층리는 주향 $N14^{\circ}\sim 46^{\circ}E$, 경사는 $14^{\circ}\sim 22^{\circ}SE$ 의 변화를 보인다.

일반적으로 절리는 그 성인에 따라 신장절리(extension joint), 전단절리(shear joint), 혼성절리(oblique extension joint)로 구분된다(Bruce et al. 1976). 야외에서 관찰시 수 cm에서 수 백 m의 길이로 연장되어 있으며, 흔히 규칙적인 절리군(set)을 이룬다. 절리면에는 그 절리의 생성단계에 따라 파괴의 시작점과 파괴의 진행양상을 보여주는 깃털무늬(plumose mark)가 있는 것이 일반적이다. 야외관찰시 신장절리와 전단절리는 독립적으로 존재하지 않으며, 통계적 분석과 물리적 특성 등을 조사하여 절리군(joint set)단위로 구별할 수 있다.

신장절리의 경우는 신장응력에 의해 발생하는 절리로서 일반적으로 수 mm의 간극을 보여주거나 깃털무늬가 두드러지게 발달한다. 인장응력이 작용하는 신장절리 틈은 비어 있는 경우와 대부분 2차적으로 석영이나 방해석 같은 광물로 충전되어 맥(vein)을 형성하는 경우가 있다. 신장절리의 길이와 간격은 절리생성시의 암체의 크기, 두께, 강도 등에 좌우된다. 약하고 얇은 암체에서는 매우 조밀한 절리간극을 보이고 단단하고 두꺼운 암체에서는 상대적으로 넓은 절리간극으로 생성되며, 절리의 간격은 그 암층의 두께에 따라 좌우된다(George and Stephen, 1996). 전단절리는 단층과 같은 과정으로 생성되며, 전단응력과 평행한 방향으로 발달한다. 야외관찰시 암석 내 화석, 포획암, 자갈 크기의 입자가 전단절리로 인해

약간의 변위가 인지되는 몇몇 경우를 제외하고는 그 이동한 변위가 거의 인지되지 않기 때문에 신장절리와 구별이 쉽지 않다. 전단절리는 크기와 형태가 신장절리와 비슷하며, 절리간격과 밀도가 전단절리의 생성시 암체의 물성치와 관련하여 다양하고 단층과 습곡같은 대규모 구조 유무에 따라 연관되어 진다. 또한 그 표면형태에 따라서도 신장절리와 구별하는 것이 쉽지 않지만 드물게 활선(Slickenline)이 있는 경우는 예외적으로 야외에서 인지할 수 있다.

본 연구지역 퇴적암에서 관찰되는 절리들은 대부분 방해석으로 피복 내지는 충전되어 있고(Fig 14), 깃털무늬 구조가 흔하게 관찰된다(Fig 15). 그리고 각각 주향과 경사가 N16°E, 87°NW; N43°W, 86°SE; N82°W, 89°NE로 대표되는 3개의 절리군이 관찰되는데(Fig. 12, Fig. 13) 장태우(1998)가 연구한 동래단층의 고응력장 중 신장응력 방향인 ESE-WNW, NNE-SSW, NNW-SSE와 유사한 방향성을 가진다. 그러므로 본 연구지역의 절리들은 대부분 신장절리로 사료된다.

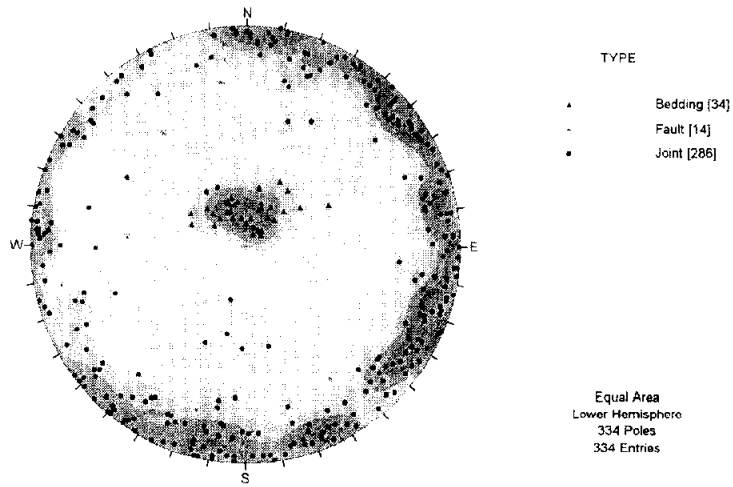


Fig. 12. Lower hemisphere equal area projection and contour plot of discontinuity planes in Mt. Hwangnyeoung.

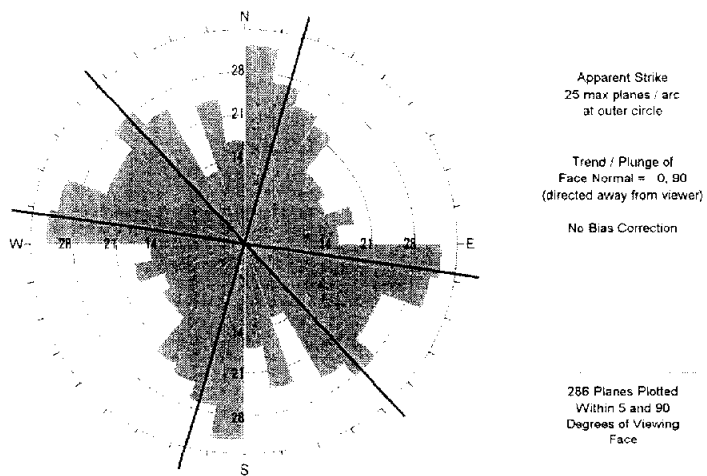


Fig. 13. Rosette diagram showing representative three joint sets in Mt. Hwangnyeoung.

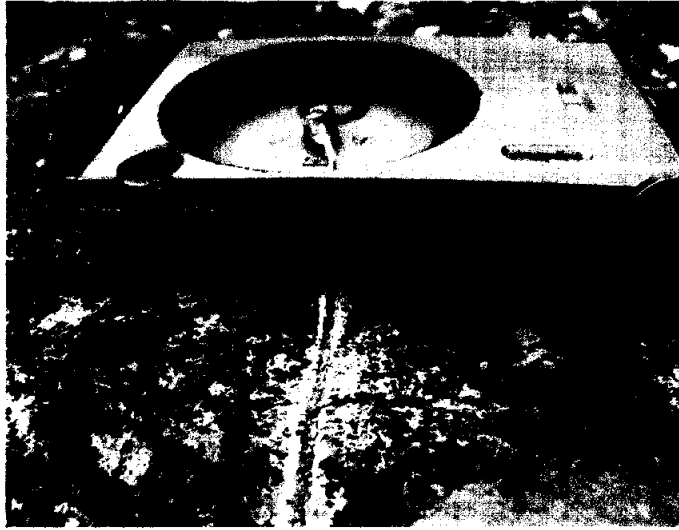


Fig. 14. Photograph showing calcite vein in the sedimentary rock.



Fig. 15. Exposed joint plane of outcrop. Photograph showing plume texture.

3. 연구지역의 물리적 암석특성

3.1. 암반의 공학적 분류

암반의 공학적 분류는 공사대상 암반에 대하여 강도, 변형계수, 절리, 풍화도 등 암반의 성질을 변화시키는 요소들을 현장에서 또는 실험실 내에서 측정하여 종합적인 자료를 얻은 후 그 결과를 객관적으로 표현하기 위하여 맵, 터널, 사면 등 공사대상 목적별로 일정한 기준에 따라서 암반을 구분 혹은 등급화하는 것이다(이부경, 1998).

암석으로 구성된 지반의 안정성 검토의 접근은 강도로부터 시작되었다. 구조물의 종류와 상태, 불연속면의 존재여부와 관계없이 여러 연구자들은 암석 강도가 지반의 특성을 대표할 수 있을 것으로 판단하여 암석의 일축 압축 강도만으로 그 지반의 특성을 분류하였었다(Fig. 16).

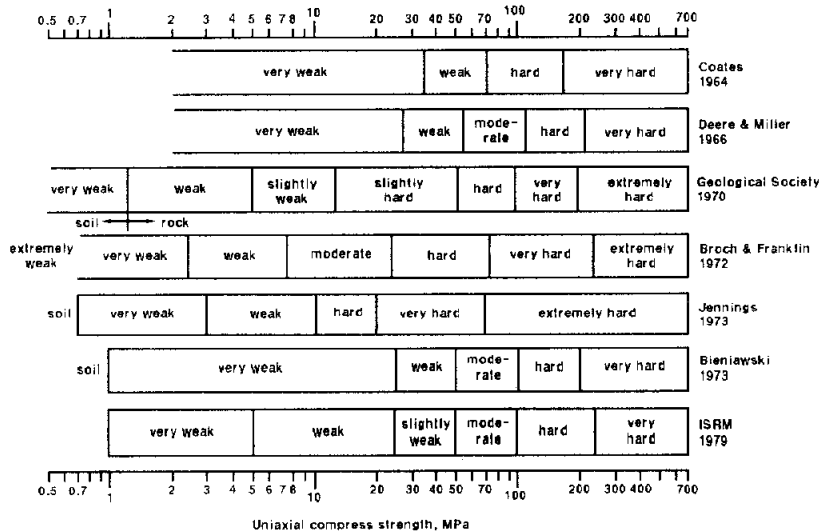


Fig. 16. Classifications of uniaxial compress strength of rocks.

현재 암반에 대한 조사와 연구에서 사용하고 있는 암반분류는 매우 다양하다. 이 분류들은 암석학적 측면, 암반공학적 측면과 엔지니어링 측면에 의하여 제안된 것으로 대별할 수 있다. 국내에서 토목공사의 절토 및 성토, 기초굴착, 터널공사 등의 설계와 시공에 적용하고 있는 암반분류는 국내외의 여러 가지 분류법을 포용하고 있으며, 이들 중 가장 사용빈도가 높은 것이 건설표준품셈의 암반분류이다(Table 1). 이 분류는 주로 굴착공사에서 굴착비 산정을 위한 기준으로 활용하고 있다. 본 연구에서는 데이터획득의 용이성, 신뢰성 있는 분류기준의 확보, 시공시 적용의 편의성, 조속한 복구공사로 인한 시민불편 감소, 공사비 산정의 기준 등을 고려하여 건설표준품셈에 따라 암반을 분류하였다. 이 분류법은 시료를 5X5X5 cm의 입방체로 제작하여 24시간 건조기에서 건조시키고, 2일간 수침시켜 압축강도 시험을 실시하는 것으로 되어 있다. 일반적으로 시료의 길이와 직경비에 따라서 측정되는 암석강도는 상당한 차이를 보이며, 시료의 형상(입방체, 원주체 등)에 따른 강도 차이도 있기 때문에, 국제암석역학회(ISRM)에서 제안하는 강도에 의한 분류와 상당한 차이가 있다. 그러므로 본 연구지역의 암반분류에 대한 보편적인 신뢰성을 확보하기 위하여 ISRM에서 제안된 시험법에 의해서 암석강도를 구하였으며, 연구지역 전반에 걸쳐 실시된 슈미트해머 반발시험치와 대조하였다. 또한 건설표준품셈에서 결여되거나 부족한 암반의 공학적 성질을 알기위해 암석의 단위중량(unit weight), 영률(young's modulus), 포아송 비(poisson's ratio)를 구하였으며, 파괴 활동면인 녹회색이암의 내부마찰각을 획득하기 위하여 직접전단시험을 실시하였다. 또한, 파괴활동면의 점토물질을 채취하여 XRD 시험을 실시하였다.

Table 1. Classification of uniaxial strength and seismic velocity (construction standard specification, suggested Ministry of Construction & Transportation, Korea, 1994)

	Group	In-situ seismic velocity V(km/sec)	Lab seismic velocity Vc(km/sec)	Uniaxial strength (kgf/cm ²)
Weathered rock	A	0.7~1.2	2.0~2.7	300~700
	B	1.0~1.8	2.5~3.0	100~200
Soft rock	A	1.2~1.9	2.7~3.7	700~1,000
	B	1.8~2.8	3.0~4.3	200~500
Moderate rock	A	1.9~2.9	3.7~4.7	1,000~1,300
	B	2.8~4.1	4.3~5.7	500~800
Hard rock	A	2.9~4.2	4.7~5.8	1,300~1,600
	B	over 4.1	over 5.7	over 800
Very hard rock	A	over 4.2	over 5.8	over 1,600

Group	A	B
Classification		
Representative rock	gneiss, crystalline schist, green schist, hornstone, limestone, sandstone, diabase, tuff, granite, diorite, olivinite, serpentinite rhyorite basalt, shale, andesite	dark schist, green schist greenstone, shale, mud, tuff, agglomerate
Determination of eyesight	sand or quartz part is rich. rock mass is hard and crystallization	sand or quartz part is poor.
Determination of classify of 500~1,000gr hammer striking	thin and small fragment, less ash creating at hit point. fragment flying relative long distance	more large fragment creating or not. fragments flying at near hit point.

3.2. 현장 조사

3.2.1. Schmidt hammer 시험

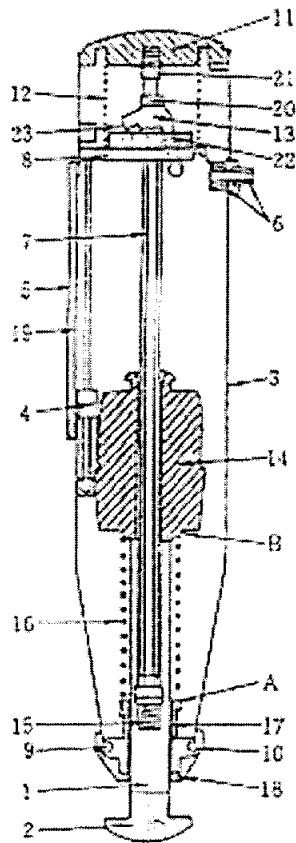
암석의 강도는 인공재료와 달리 시료채취방법 및 시험조건에 따라 역학적 성질이 크게 변화하며, 특히 암석의 강도는 본질적으로 광물조직, 성인, 이력, 풍화정도에 따라 변동범위가 매우 크므로 하나의 공시체의 강도에 대한 측정 강도가 원지반 암반의 강도특성을 대표할 수 없다. 따라서 현장에 분포하고 있는 지반의 강도특성을 보다 신속하고 간편하게 분석하기 위하여 일반적으로 Schmidt Hammer Test를 실시한다.

Schmidt hammer는 해머를 스프링의 힘 즉, 미리 압축한 스프링에 축적된 힘을 방출함으로써 해머가 암반의 표면에 부딪칠 때 그 반발력을 측정함으로써 구하는 일종의 경도인데 신선하고 단단한 암반일수록 해머의 튀어오르는 거리는 크게 된다. 이 튀어 오르는 해머가 충격을 가하기 전에 스프링의 힘에 의하여 움직인 거리에 대한 백분율을 나타내며 이것을 Schmidt hammer의 반발치 또는 반발계수라고 한다. Schmidt hammer는 원래 콘크리트의 압축강도나 탄성계수를 현장에서 간단히 측정하기 위하여 E. O. Schmidt에 의해 고안된 비파괴 시험기이다. 현지 암반의 강도를 가장 손쉽게 추정할 수 있는 방법으로 암반의 절리상태, 암벽의 거칠기, 습윤정도 등에 따라 측정치의 분산이 다소 심하며 양종에 따라 일축 압축강도의 환산에 많은 편차를 나타내는 결점이 있으나, 일반적으로 현장에 분포하고 있는 암반의 강도를 추정하기 위해 국내외에서 널리 사용되고 있는 시험이다.

금번 사용된 Schmidt Hammer(Fig. 17)는 일본 Sanyo Testing Machines Co. Ltd.에서 제작한 Rock Test Hammer (Standard/GS)를 사용하였으

며, 각 지점별로 실시된 Schmidt Hammer의 평균 반발치를 Table 2를 이용하여 일축압축강도를 산정하였다. Schmidt Hammer Test의 과정은 다음과 같다.

- ① 측정전에 test envil에 10번을 가격한 후의 평균값으로 schmidt hammer가 보정되어 있는지를 확인한다.
- ② 최소한 6cm 이상의 두께를 가진 암석 시편에 시험한다.
- ③ 타격 면은 국소파괴의 영향을 줄이기 위해 연마편으로 연마한다.
- ④ 해머의 타격이 타격면에 직각으로 이루어져야하며 $\pm 5^\circ$ 로 타격축을 유지시켜야 한다.
- ⑤ 하나의 타격위치에서 최소한 20번 이상을 타격해야 한다.
- ⑥ 반발치 계산에 있어서 하위 50%는 버리고 상위 50%를 가지고 평균을 낸다. (그 이유는 타격축을 타격면에 직각으로 유지시키지 못하거나, 절리면에서 가깝거나 타격면 내의 6cm 이내로 어떤 불연속면이 존재할 때, 그리고 타격면이 일정하게 평평하지 않아서 국소파괴를 일으키는 경우 반발치가 낮게 나오기 때문이다; ISRM, 1981).



Rock Test Hammer

STANDARD /GS
 标准岩石锤

Rock Test Hammer /GS

- 1 Impact plunger
- 3 Housing camal.
- 4 Rider with guide rod
- 6 Pushbutton camal.
- 7 Hammer guide bar
- 8 Disk
- 9 Cap
- 10 Two-part ring
- 11 Rear cover
- 12 Compression spring
- 13 Pawl
- 14 Hammer mass
- 15 Retaining spring
- 16 Impact plunger
- 17 Guide sleeve
- 18 Felt washer
- 19 Plexiglass window
scale printed on window.
- 20 Trip screw
- 21 Lock nut
- 22 Pin
- 23 Pawl spring

Fig 17. Cross section of rock test hammer.

Table 2. Rock test hammer rebound value and assumed uniaxial compress strength

Rebound value	-90°	-45°	0°	+45°	+90°	Rebound value	-90°	-45°	0°	+45°	+90°
	Assumed uniaxial strength (kg/cm ²)						Assumed uniaxial strength (kg/cm ²)				
10	64	61	51			36	394	373	321	264	242
11	69	65	55			37	420	400	345	285	262
12	74	70	59			38	451	429	370	306	283
13	80	75	63			39	481	457	397	330	306
14	86	80	68			40	516	491	426	355	330
15	92	87	73			41	554	527	457	383	357
16	99	93	78			42	590	561	491	411	383
17	106	100	84			43	633	603	527	445	414
18	114	107	90			44	675	642	565	477	445
19	123	115	97			45	724	589	607	516	481
20	132	124	104	81	71	46	772	740	651	554	516
21	141	133	111	87	76	47	828	788	699	598	558
22	151	142	119	94	82	48	883	846	750	642	598
23	162	152	128	101	89	49	947	902	805	694	647
24	174	163	138	109	96	50	1010	968	864	745	694
25	186	175	148	117	104	51	1084	1039	927	805	750
26	199	188	158	125	111	52	1155	1107	995	864	811
27	213	201	170	136	120	53	1239	1188	1068	934	870
28	229	215	182	146	130	54	1321	1275	1147	1002	941
29	244	230	196	157	139	55	1417	1368	1231	1084	1017
30	262	247	210	169	151	56	1511	1458	1321	1163	1099
31	281	265	226	182	163	57	1621	1565	1417	1257	1188
32	299	283	242	196	176	58	1728	1679	1521	1349	1275
33	321	304	260	212	190	59	1854	1790	1633	1458	1378
34	342	326	279	227	206	60	1976	1921	1752	1565	1489
35	367	350	299	246	224						

* In the case of rebound value over 60,

$$Z = \log y = 0.0307R + 1.4016, \text{ Strength (kg/cm}^2\text{)} = (Z \times R) \times 10$$

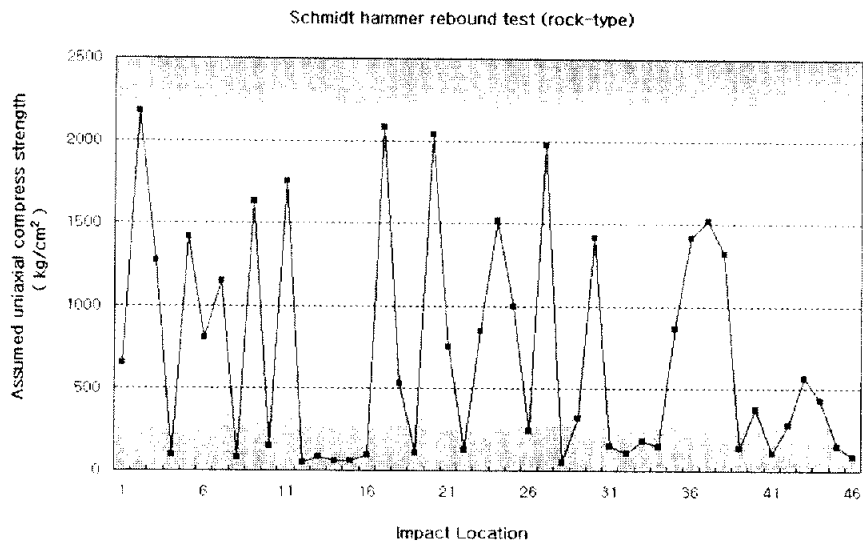


Fig. 18. Distribution of assumed uniaxial compress strength calculated from schmidt hammer rebound value of the study area.

현장에서 측정된 자료는 부록에 수록하였다. 조사시 기본 타격간격을 20m로 하였으며, 수직으로 암종이 바뀌거나 단층대가 나타나면 주변부에 대한 반발치 변화도 측정하였다.

본 파괴사면 부근에서 측정한 Rock Hammer의 보정 반발치 결과에 의하면, 반발치가 10~64(일축압축강도 환산 51~2,176kg/cm²)의 변화를 보인다. 건설표준품셈 암분류기준(Table. 1)에 따르면 이 암석은 그룹 B에 속하며 연암에서 극경암까지 나타나고 있다. 즉, 암석 자체는 매우 단단하나 풍화작용 또는 절리의 발달로 인해 암강도가 현저하게 낮아지는 것으로 사료된다. 파괴활동면에서 발견된 동일한 녹회색 이암의 경우는 반발치가 58~66(일축압축강도 환산:1521~2,125 kg/cm²)으로 측정되었으며, 풍화되지 않은 녹회색 이암의 암석강도는 경암 내지 극경암으로 높게 나타났다.

슈미트해머 테스트 결과, 이 지역에 분포하는 퇴적암의 경우 신선한 암석은 매우 단단하나 강우 및 공기의 침투로 인한 풍화작용 그리고 절리 발달 빈도에 따라 암석강도가 현저하게 낮아져, 같은 암종이라도 강도의 편차가 큰 것으로 조사되었다.

3.2.2. 시추 조사

시추조사는 현장의 지질주상도의 획득, 원위치 시험과 각종 토질시험을 실시하고 지반상태 및 지반공학적 특성을 수집하며, 파괴활동면을 찾기 위해 실시되었다. 본 연구에서는 유압 300형 회전수세식 시추기 1대와 유압 200형 회전수세식 시추기 2대를 사용하였으며, D-3 core barrel 3 개조로 NX-size(76mm) 코어시료를 8개소에서 시추하였다(Fig. 2).

Table 3. Coordinations and elevations of bore holes(Fig. 2)

Bore hole	Coordination(TM)		Elevation(m)
	X	Y	
BH - 1	182738.180	209239.360	39.600
BH - 2	182926.520	208992.800	62.240
BH - 4	182954.300	208914.500	64.700
BH - 5	182983.046	208912.670	76.200
NX - 1	182974.600	208961.000	83.420
NX - 2	182934.686	208955.105	60.370
GW -1	182968.758	208987.279	81.850
GW -2	182897.000	208988.800	49.970

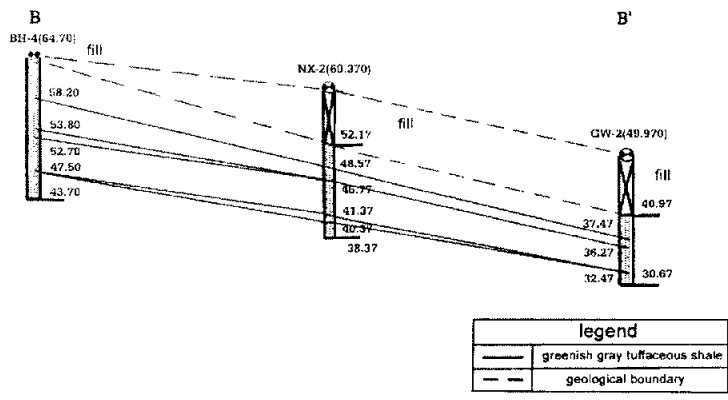
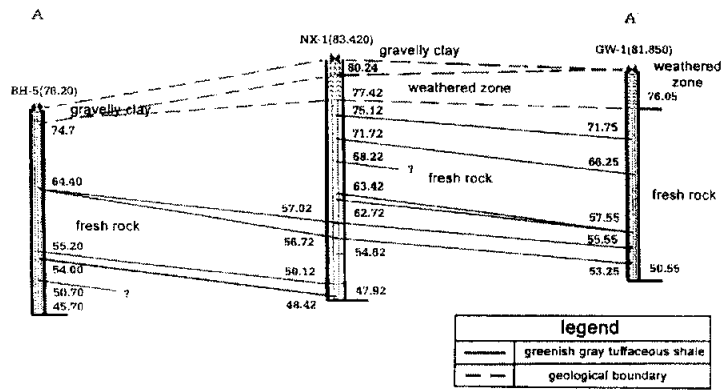


Fig. 19. Geological cross sections showing greenish gray tuffaceous shale layers(line A-A' & line B-B' by Fig. 2).

시추기준은 하부 파괴면 하 기반암층 아래로 2.2~11.5m까지 굴착하였으며, 굴진심도 매 1.5m마다 표준관입시험(SPT)을 실시하였다. 토층의 경우, 스플리트 스폰 샘플러를 이용하여 시료를 채취하였으며, 토층의 전단시험을 실시하기 위하여 GL-0.5m에서 블록 샘플링을 채취하였다. 채취된 시료 및 코아는 현장에서 육안 판별하여, 지질 및 지질공학적 특성(지층 및 특성, 코어회수율, 암질비) 등을 시추 주상도에 기재한 후, 토사층은 함수비가 변하지 않도록 밀봉하여 보관하였으며, 암반층은 코아 원형을 최대한 유지시켜 보관하였다. 시추결과는 부록에 나타내었다.

3.3. 실내 시험

3.3.1. 실내 물성치 시험

본 연구지역에 분포하는 풍화대층의 물리적 및 역학적 특성 등의 제반 물성치를 파악하기 위하여 실내시험을 실시하였다. Casagrande(1942)가 제안한 통일분류법(USCS; Unified Soil Classification System)에 의한 토질 분류 및 토질정수를 파악하기 위하여, 블록 샘플링 과정에서 채취된 시료중 대표적인 지점의 시료에 대하여 한국공업규격(KSF)에 의거하여 시험을 실시하였다. 또한 파괴면으로 추정되는 녹회색의 충전물에 대하여 전단시험을 실시하였다. 각 시험별 성과표는 부록에 있다.

Table 4. Standard test methods of soil's property(suggested by Korea Quality Institute of Construction Industry)

	Soil's property	Standard test method
Laboratory soil experiments	water content	KS F 2306
	specific gravity	KS F 2308
	liquid limit	KS F 2303
	plastic limit	KS F 2304
	grading	KS F 2302
	shear test	KS F 2343

시추조사에서 채취된 10개의 코아시료와 현장에서 채취한 1개의 암석 시료에 대하여 단위중량(unit weight), 일축압축강도(uniaxial compress strength), 탄성계수(young's modulus), 포아송 비(poisson's ratio) 등에 대한 시험을 동아지질(주)에서 실시하였으며, 결과는 Tabel 5에 나타내었다.

단위중량은 2.642~2.869 g/cm³의 변화를 보이는 데, 일반적인 퇴적암의 단위중량 1.91~2.72 g/cm³보다는 높은 경향을 보인다. 일축압축강도의 경우 암회색 사암과 이암의 호층대는 282.5~2352.72 kg/cm²의 변화를 보여주는데, 신선한 암석의 경우 매우 높은 강도치를 보이며 Rock Hammer Test로 구해진 일축압축강도 345~2453 kg/cm²과 거의 유사한 범위 내에서 변하고 있다. 사암의 경우 일축압축강도는 470.84~1034.87 kg/cm²의 변화를 보이며, Rock Hammer Test로 구해진 일축압축강도 279~2182 kg/cm²의 범위보다 좁게 나타나며, 그 이유는 실내압축강도 시험 시 사암의 시료가 2개 밖에 되지 않아서 이런 결과가 나온 것으로 추정된다.

파괴 활동면의 녹회색 이암을 각주상으로 6개의 시료를 형성하여 직접 전단시험을 한 결과, 평균값은 내부마찰각이 43.064°, 점착력이 0.434 kg/cm²로 풍화되어 점토광물로 변하기 전에는 상당히 높은 강도치를 보여주고 있다. 각 시험별 성과표는 부록에 첨부되어 있다.

Table 5. Laboratory experiment results of core samples

Bore hole	Depth(m)	Unit weight (g/cm ³)	Uniaxial strength (kg/cm ²)	young's modulus (kg/cm ²)	poisson' s ratio	rock type
BH-2	18.0-19.5	2.735	2260.02	3.0 x 10 ⁵	0.27	alternated bed (sandstone & mudstone)
BH-4	13.5-15.5	2.734	565.01	1.5 x 10 ⁵	0.10	
GW-1	8.7-8.9	2.642	2357.72	3.7 x 10 ⁵	0.23	
GW-1	11.3-11.5	2.715	1130.01	7.2 x 10 ⁵	0.19	
GW-1	16.2-17.7	2.745	1180.19	3.7 x 10 ⁵	0.38	
GW-2	15.0-16.5	2.774	282.50	1.6 x 10 ⁵	0.18	
outrock block		2.869	1008.00	2.1 x 10 ⁵	0.24	
BH-1	12.3-12.5	2.778	470.84	1.1 x 10 ⁵	0.10	sandstone
BH-1	13.0-13.2	2.671	1034.87	2.2 x 10 ⁵	0.22	

3.3.2. XRD 분석

X선 회절분석(XRD)은 광물의 고유한 분석치 양상(peak pattern)으로 분석시료를 동정하는데 이용되며, 특히 점토광물을 확인하는데 많이 이용되어왔다.

활동면에서 채취한 점토시료의 확인을 위해 X선 회절분석(XRD)을 실시하였다. 채취된 시료는 아게이트 몰타르(Agate mortar)에서 대략 0.005mm의 크기로 분쇄하였다. X선 회절분석에 사용된 기기로는 일본 Rigaku 회사의 D/Max-2000 series이며, 40kv, 20mA의 상태에서 Target으로는 Cu의 $K\alpha$, Filter로는 Ni, Scan Speed $2^\circ/2\theta$ 의 조건으로 분석하였다.

시험결과 대부분의 점토는 녹니석 (chlorite)과 일라이트 (illite)로 구성되며 녹니석 및 일라이트는 다른 점토광물에 비하여 팽창성이 약한 안정된 점토광물이다(Fig. 20). 따라서 녹회색 이암이 지하수의 침투에 의해 풍화되어 생성된 것으로 여겨지는 이 점토는 팽창에 의한 응력보다는 산사태 활동면의 전단강도를 감소시키는 요인으로 작용한 것으로 생각된다.

4. 산사태의 발생원인 분석

4.1. 산사태 발생 현황

파괴사면에 대한 실시설계는 (주)도화종합기술공사가 '87년 12월 30일부터 '91년 7월까지 실시하였는데, 사면경사는 1:0.5로 설계하였다. 책임감리는 한국항만건설감리공단이 '94년 5월 7일부터 '94년 12월 31일까지 수행하였고, 천진ENG이 '95년 1월 21일부터 '95년 7월 21일까지 그리고 (주)정도ENG이 '95년 8월 16일부터 '98년 3월 31일에 걸쳐 수행하였다. 사면절취는 '95년 5월에 (주)창원기술건설에 의해 실시되었는데, 사면경사는 연암의 경우 1:0.5, 풍화암의 경우는 1:0.8을 적용하였다. 그 후, '96년 12월부터 '97년 3월 사이에 (주)상호에 의해 보강공사가 시행되었으며, 시행방법은 1:0.5 사면에 대해 1:0.6으로 사면경사를 완화시켰다.

'99년 9월 11일 오전 11시 50분경 도시고속도로 진입램프 황령산터널 방면 우측 산사면이 붕괴되었다. 평면도로 200m 구간이 약 14만 m^3 의 토사로 인해 매몰되고 진입램프 강교 130m가 붕괴되었고 사망자 1명 부상자 3명이 발생하였다.

'99년 10월 17일 낮 12시 10분경 제2차 산사태가 발생하여 토사가 무너져 내려 황령산 쪽 차로에 설치된 길이 15m 높이 20m의 안전펜스가 흙더미에 밀려 10도 가량 도로 쪽으로 기울고 일부가 파손되었다.

'99년 10월 18일 오후 3시 30분 경 또 다시 직벽 부분의 일부가 소규모로 무너져 내렸다. 그 후, 소단을 설치한 사면구배가 1:2.0이 되도록 사면구배 완화를 위해 토사제거 작업이 실시되었고, 현재 복구 공사가 완료되었다.

4.2. 항공사진 판독

부산시가 보유하고 있는 '92년부터 '99년까지 절개지 일대의 1:6,000 축척의 항공사진을 이용하여 입체경 하에서 분석하였다(Fig. 21). '93년도 사진에서는 아직 황령산터널 진입로가 개설되지 않은 상태이고, '96년 사진에서는 도시고속도로 진입로가 건설 중에 있으며 사면도 완성되지 않은 상태이다. '97년 사진에는 사면이 완성되고 도시고속도로 진입램프도 건설완료되었음을 보여준다. '98년 사진에서는 사면 배후에 사면과 평행한 선구조가 여러조 관찰되나 해상도가 낮아 산길인지 또는 인장균열이 발달한 것인지 확신할 수 없다. 그러나 산사태가 발생한 구역에 이렇게 사면과 평행한 선구조들이 1년 전부터 관찰되며 산사태 발생범위와 대략 일치하는 것으로 보아 산사태가 급작스럽게 발생하지 않고 장기간에 걸쳐 진행되어 왔음을 암시해준다.

4.3. 현장조사에 의한 육안 분석

산사태가 발생한 사면 최상부 3~5m의 토사부는 원호상 파괴면을 그리고 그 하부 암반부에서는 절리에 의한 수직 파괴면을 보여준다(Fig. 22). 파괴 활동면에는 녹회색 이암이 층리방향으로 쪼개진 것이 관찰되고 일부는 정토로 변해 있으며, 이 면을 따라 비교적 많은 지하수의 유출이 관찰된다(Fig. 23). 퇴적암의 층리 경사각과 일치하는 이 면을 따라 움직인 암체는 기존사면에서 도로 쪽으로 튀어 나와 다시 거의 수직으로 파괴되어 도로 위에 쌓인 것으로 사료된다. 연약층은 1개조가 아니라 3m 구간에 3-10 cm 폭으로 4개조가 발달하며 이중 각기 다른 3개 면을 따라 암체

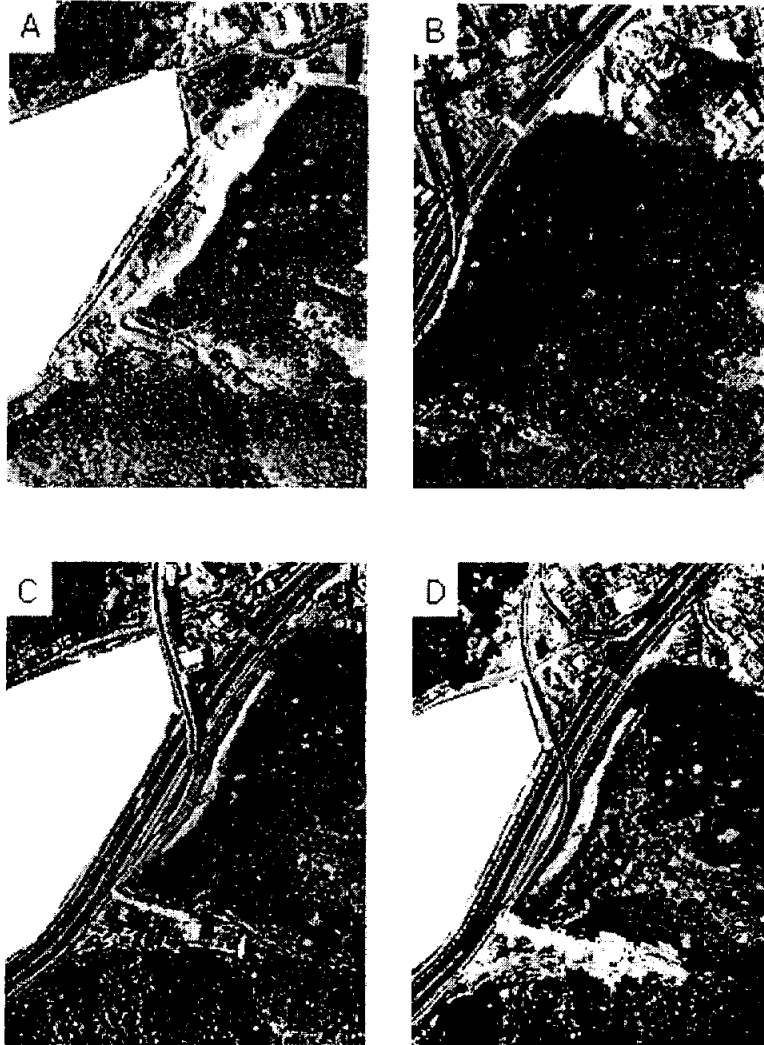


Fig. 21. Aerial photographs of the landslide area taken on (A: the 15th of November, 1993, B: the 19th of November, 1996, C: the 23th of November, 1997, D: the 17th of June, 1998).



Fig. 22. Vertical failure plane occurred the first landslide.



Fig. 23. Sliding zone(clay & greenish gray mudstone).



Fig. 24. Three slide planes of the landslide.

의 활동이 일어났다(Fig. 24). 즉, 4개조의 얇은 연약층 중 각 부분에서 가장 풍화가 잘 진행되어 분리되기 쉬운 곳을 따라 활동이 발생하였다고 사료된다. 연약층 상부의 신선한 암석은 매우 단단하기 때문에 분리되지 않고 큰 암체를 형성해, 파괴면을 따라 약 30~60m 정도 암체가 활동한 평면파괴의 형태를 보여준다.

1차 산사태는 전술한 바와 같이 일시적으로 발생한 것이 아니고 장기간에 걸친 강우의 지하침투에 의해 간극수압이 증가해 수직절리의 틈이 상하부로 연결되어 인장균열이 발생 한 뒤, 단단한 암석층에 협재되어 있는 녹회색 이암이 지하수에 의해 풍화, 점토화 되어 활동 파괴면으로 작용하게 된 것으로 사료된다(Fig. 21 ~ Fig. 24 참조).

산사태 발생지에서 복구 작업이 진행되던 중 2차 산사태가 발생하였다(Fig. 25). 2차 산사태는 파괴가 일어난 암체와 그로 인해 생겨난 수직절개지 사이에 느슨하게 토사를 메워 파괴부분에 대한 토사제거작업을 하던 중 이 부분에 강우가 침투하여 배수가 되지 않아 간극수압이 상승하게 되어 잔류응력이 남아 있는 파괴암체가 한번 더 활동을 하게 되어 발생한 것으로 사료된다.

3차 산사태는 파괴되지 않고 남아 있는 수직 절개지 부분이 앞에서 받쳐주던 암체가 제거됨에 따라 응력이 이완되어 도로와 평행한 방향으로 인장균열이 수개 조 발달하게 되었고 2차 산사태 발생 후 균열의 폭은 시간이 갈수록 넓어지게 되었다(Fig. 26 및 Fig. 27). 결국 2차 산사태 발생 후 하루만에 수직절개지의 일부가 파괴되었다(Fig. 28).

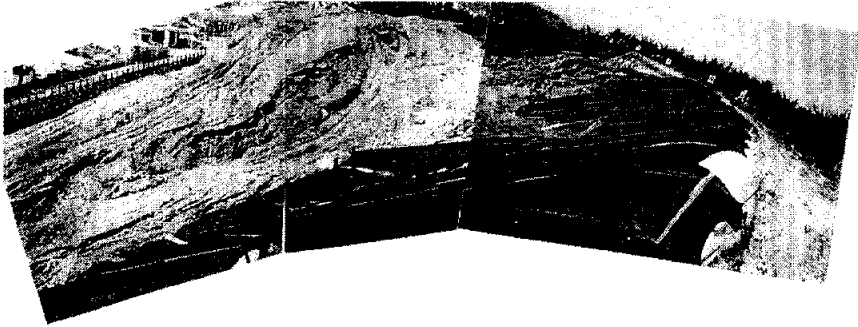


Fig. 25. Photograph of the second landslide(tension cracks developed parallel to road).

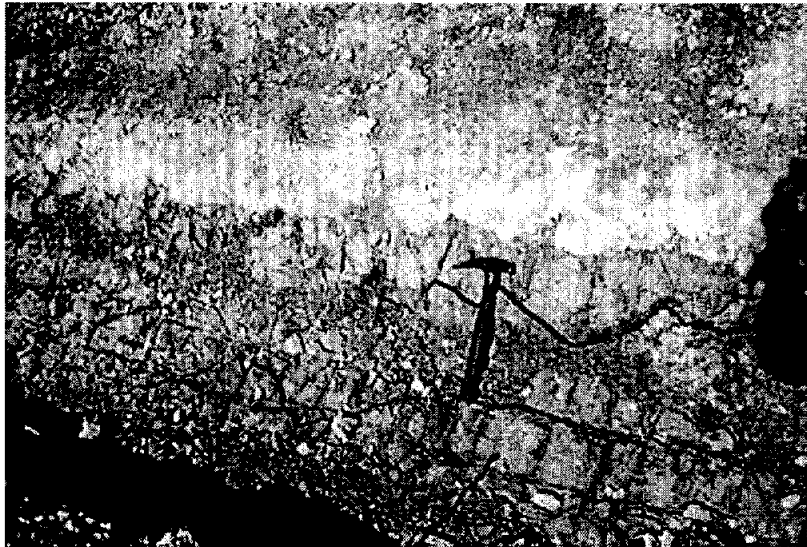


Fig. 26. Two vertical joint sets developed tension cracks in upper drainage.



Fig. 27. More extended tension cracks in upper drainage.

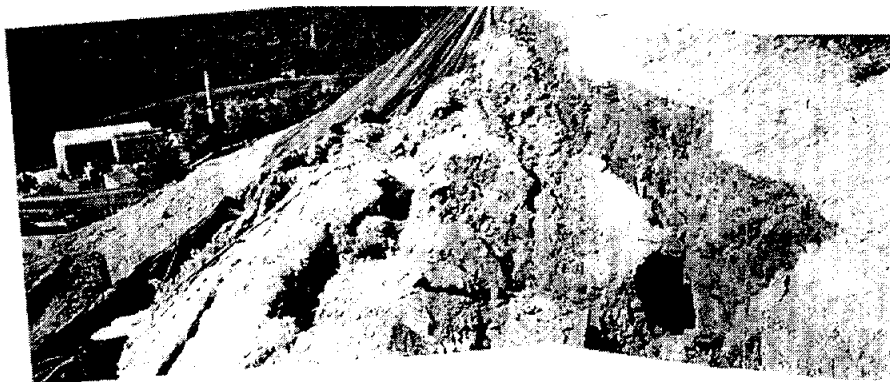


Fig. 28. Photograph of the third landside.

4.4. 평사투영해석

황령산의 절개지들을 조사한 결과 퇴적층의 경사는 부분적으로 최저 5°에서 최고 25°(1:11.4에서 1:2.1) 정도로 변하며 산술평균값은 12°(1:4.7)로 확인되었다. 3차 산사태 후 토사제거 작업 시 확인된 파괴활동면에서 측정된 경사는 18°에서 20°(1:3.1에서 1:2.7)로 관찰되었다(Fig. 29 및 Fig. 30).

산사태가 발생되기전 사면의 예상 파괴 가능성을 분석하기 위하여 캐나다 Rocscience 회사의 DIP(S(version 5.102 for Windows) 프로그램을 이용하여 사면안정성을 분석하였다.

DIPS는 절리면의 방향분석 및 통계처리를 이용하여 사면안정해석에 사용하는 프로그램으로 Toronto대학교의 토목공학과 암반공학팀에 의해서 개발되었다. 이 프로그램은 평사투영법(stereographic projection)을 이용하여 암반의 절리, 단층 및 파쇄대 등과 같은 불연속면에 대한 암석구조의 공학적인 해석에 관련되어 암반사면 등에서 주로 사용되는 프로그램이다.

산사태가 발생하기전 사면의 주향과 경사를 도면으로부터 획득하였고, N34°W, 59°SW로 확인되었다. 측정된 모든 수직절리와 층리의 주향 및 경사들을 입력시킨 결과 신선한 암석의 내부마찰각(ϕ)을 43°(자연상태, 부록 참조)를 적용했을 때는 평면파괴의 위험성이 거의 없었으나 전도파괴의 가능성은 있는 것으로 분석되며(Fig. 31), 활동면에서 채취한 점토시료 직접전단시험 결과인 내부마찰각 21°(자연상태, 부록 참조)를 적용하였을 때는 전도파괴(toppling) 및 평면파괴의 위험성이 있는 것으로 확인되었다(Fig. 32).



Fig. 29. Exposed slide plane(about 12° dip).



Fig. 30. Exposed slide plane(coated with clay).

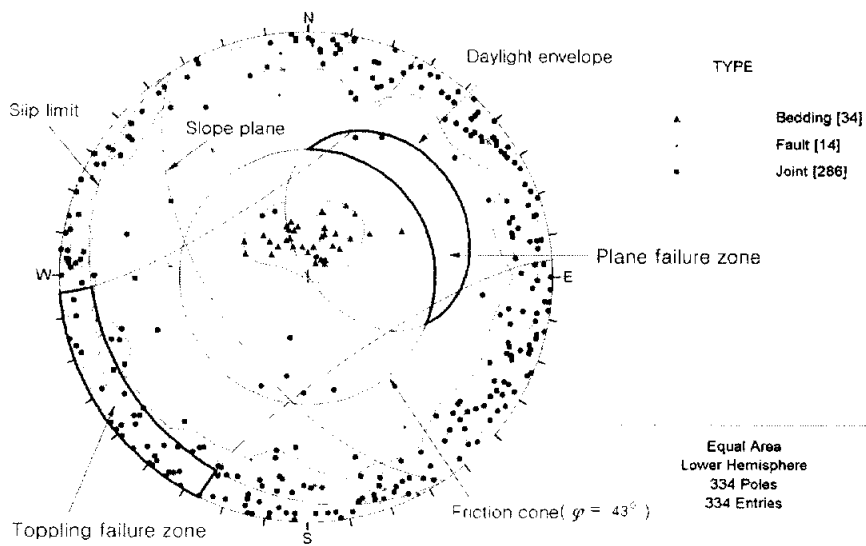


Fig. 31. Analysis of stereographic projection method($\phi=43^\circ$).

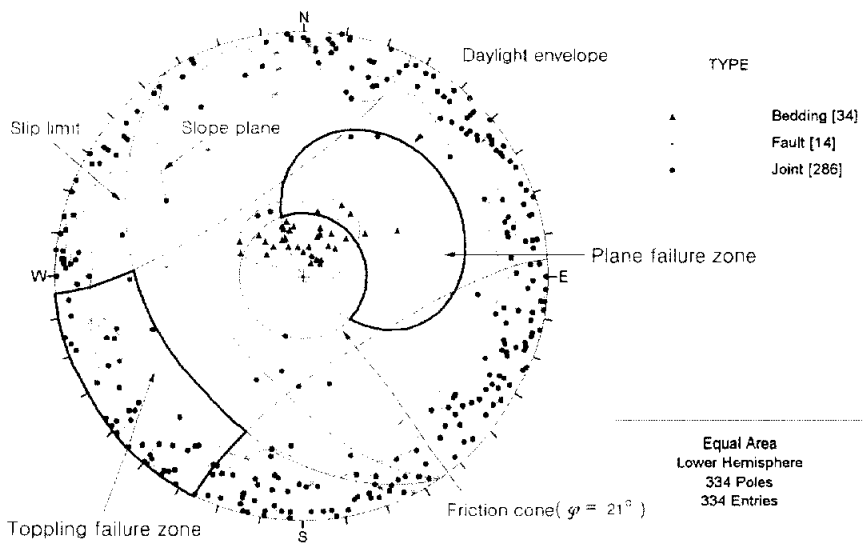


Fig. 32. Analysis of stereographic projection method($\phi=21^\circ$).

4.5. 한계평형해석

황령산 산사태의 원인분석의 일환으로 한계평형해석을 실시하였다. 본 연구에서 사용된 한계평형해석 프로그램은 캐나다 Geo-SLOP사의 SLOPE/W를 이용하였다. 이 프로그램은 Ordinary/Fellenius 법, Bishop 간편법, Janbu 간편법, Spencer 법, GLE(General Limit Equilibrium) 법, Morgenstern-Price 법, Corps-of-Engineers 법 등의 이론으로 절편간 힘의 크기와 방향을 정의할 수 있다. 또한, 절편간 힘을 Morgenstern-Price 법이나 GLE 법으로 정의할 경우에는 Sine 함수, 불완전 Sine 함수, 사다리꼴 또는 유한요소해석 결과의 형태로 절편간 힘을 정의할 수 있다. 일반적으로 토사/암반으로 구성된 자연사면, 굴착노출면, 성토체, 앵커지지 토류벽 등의 안정해석에 많이 이용되고 있다. 본 연구에서는 모든 형상의 파괴면에 적용이 가능한 Spencer의 방법을 이용하였다(Nash, 1987).

본 연구에서 적용한 해석조건들은 다음과 같다.

- 가) 안전율을 구하기 위한 방법 - Spencer method
- 나) 활동면의 형상 - 인장균열을 포함한 Block 파괴
- 다) 강도정수 - 유효응력개념의 점착력과 마찰각
- 라) 경계조건의 종류 - 간극수압, 인장균열, 보강전단력

$$\text{Factor of safety (FS)} = \frac{cA + W \cos \theta \tan \phi}{W \tan \theta}$$

c : Cohesion,

A : Area of slide plane

W : Weight of rock mass,

θ : Angle of slide plane

ϕ : Angle of internal friction

4.5.1. 해석 모델링

본 안정해석의 재료에 대한 구분은 토사 및 풍화암층, 퇴적암층으로 구성되며, 강우시 활동사면 내 간극수압의 영향을 고려하였다. 본 사면은 이미 파괴가 발생한 곳이다. 특히, 1999년 9월 10일 오전 폭우로 인해 사면활동이 발생하였다. 이들 조건을 해석하기 위해 건기시와 우기시로 나누어 분석을 하였다. 건기시에는 수위가 없는 것으로 해석하였으며, 우기시에는 인장균열내의 수압, 활동면 바닥의 수압 등을 고려하였다. 파괴가 일어난 단면에 대한 해석과 파괴가 예상되는 활동면에 대하여 안정해석을 하였으며 우기시에는 보강공법을 적용하여 사면의 안정성을 검토하였다.

먼저, 산사태 발생 전 사면에 대한 역해석을 실시하여 강도정수를 선정하였으며, 선정된 강도정수를 이용하여 본 사면의 보강대책을 위한 안정해석을 실시하였다.

4.5.2. 역해석 및 강도정수 결정

산사태가 발생한 현황, 항공사진 판독으로 본 산사태의 장기적인 진행, 현장조사에서의 육안관찰 및 2차 산사태와 3차 산사태의 추가 붕괴양상 그리고 평사투영해석결과 등을 고려한다면 황령터널 입구의 절취사면 파괴원인은 분명하다. 즉, 강우시 사면 상부의 인장균열을 통해 침투한 우수가 인장균열면을 따라 수압으로 작용하여 활동이 발생한 것이다. 이미 교란된 활동면의 점토층의 강도정수는 실내시험으로 자연상태의 불교란 시기의 강도정수로 구할 수 없기 때문에 파괴사면에 대한 역해석 결과로 점토 층리면의 강도정수를 구하였다. 파괴당시의 현장조건 재현을 위해 주 활동면의 점차력과 내부마찰각을 변화시키면서 안정해석을 실시하였다. 이때, 인장균열에 작용하는 수두

는 0, 50, 100%가 작용하는 것으로 설정하였다.

Fig. 33은 정착력이 $0.0t/m^2$ 인 경우로, 내부마찰각은 15, 20, 25, 30° 인 경우의 안정해석 결과이다. 여기서 X축의 인장균열 수두비는 인장균열의 높이에 대해 인장균열에 물이 찬 높이의 비로 표시하였다. 이와 동일한 경계조건에서 정착력을 각각 $1.0t/m^2$ (Fig. 34)과 $2.0t/m^2$ (Fig. 35)으로 증가시켜서 안전율의 변화를 비교분석하였다.

본 대상사면의 경우 지하수위가 예상 활동면보다 약 4~5m 아래에 존재하는 것으로 나타났다. '4. 3. 현장조사에 의한 육안 분석'에서 설명한 바와 같이 침출수가 흘러나오는 지층(Fig. 23)은 퇴적암층 사이에 호상으로 존재하는 녹색 이암층을 따라 흐르기 때문에 강우가 발생하더라도 지하수위가 형성되어 간극수압으로 작용하지는 않을 것으로 판단된다. 즉 수압이 작용하더라도 상부의 인장균열과 하부의 층리면을 따라 작용하게 된다. 또한 본 사면과 같이 수직절리가 발달해 있고, 수평방향의 층리가 잘 형성되어 있는 경우는 인장균열에 100% 수압이 작용하는 경우는 불가능하다. 이러한 이유에서, 본 역해석에서는 강도정수를 선정하는 기준을 인장균열에 수압이 균열높이의 50% 작용하고, 최소안전율이 1.0인 시점으로 정하였다.

Fig. 36은 이 기준에 의해 선정한 강도정수를 정착력과 내부마찰각의 함수로 나타낸 것이다. 그림에 보인 바와 같이, 최소안전율이 1.0인 내부마찰각은 정착력이 0.0, 1.0, $2.0t/m^2$ 에 대해 각각 22° , 20° , 18° 로 산정되었다. 같은 그림에서 실내직접전단시험에서 구한 정착력은 $1.1t/m^2$ 이고 내부마찰각은 16.8° 이다. 점토시료에 대한 직접전단시험 결과는 배수조건과 비배수조건을 중간정도 결과라고 볼 수 있다. 따라서, 실제 현장 지반의 유효응력으로 표시된 강도정수는 직접전단시험 결과보다 큰 값을 가질

것으로 판단된다. 실내직접전단 시험시 사용된 총리면의 점토는 산사태 현장의 활동면에 협재되어 있는 시료를 채취한 것이다. 현장에서 불교란 시료의 채취는 불가능하여 실내에서 재성형하여 시험을 수행하였다. 시료를 재성형하여 시험하게 되면 일반적으로 점착력은 현장의 불교란 시료에 비해 작게 산정된다. 이는 현장의 경우 aging효과에 의한 cementation으로 인해 점착력이 재성형 시료보다 크기 때문이다. 이에 반해 마찰각은 실내시험시 구속압력이 현장조건에 비해 구속압력이 커지면 전단저항각은 증가하기 때문에 마찰각이 크게 산정된다. 하지만 시험에 사용된 구속압력이 1.0~9.0 t/m²의 범위에서 실내시험을 수행하였기 때문에 현장조건(약 50t/m²)에 비해 작은 구속압력으로 전단시험이 수행되었다. 이러한 사항을 근거로 볼 때 실내직접전단시험에서 산정된 강도정수는 현장조건에 비해 과소평가된 결과이다. 따라서, 현장의 점착력과 내부마찰각은 시험결과보다 더 큰 값을 사용하는 것이 합리적이다. 그러므로 역해석 결과 중 점착력이 실내시험 결과보다 큰 값인 2.0t/m²을, 내부마찰각은 18°를 선정하였다. Table 5는 역해석을 수행하여 구한 강도정수를 나타낸 것이다. 이 표에서 토사 및 풍화암층의 단위중량과 강도정수는 block sampling에서 구한 값이고, 퇴적암층의 단위중량은 시추코아를 측정된 결과이다.

Table 5. Input data of limit equilibrium method modeling.

	γ_t (t/m ³)	ϕ' (°)	c' (t/m ²)
Soil & Weathered rock	1.88	38.0	3.6
Sedimentary rock	2.75*	18.0**	2.0**

*: Unit weight of sedimentary rock,

**: Property of clay(sliding plane)

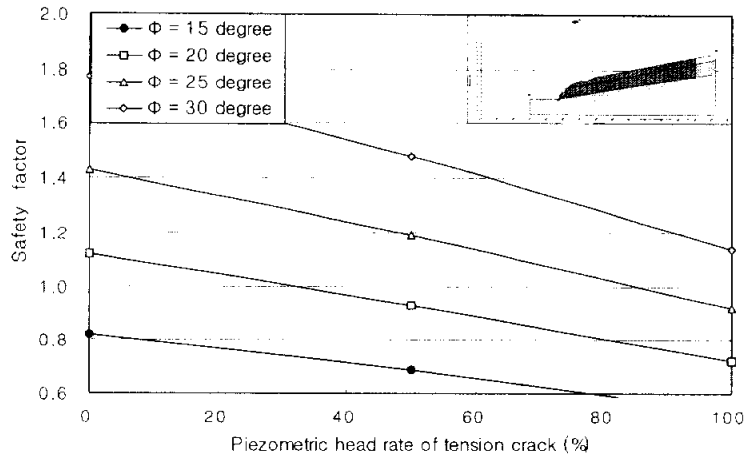


Fig. 33. Variation of safety factor with angle of internal friction and piezometric head rate ($c=0.0t/m^2$).

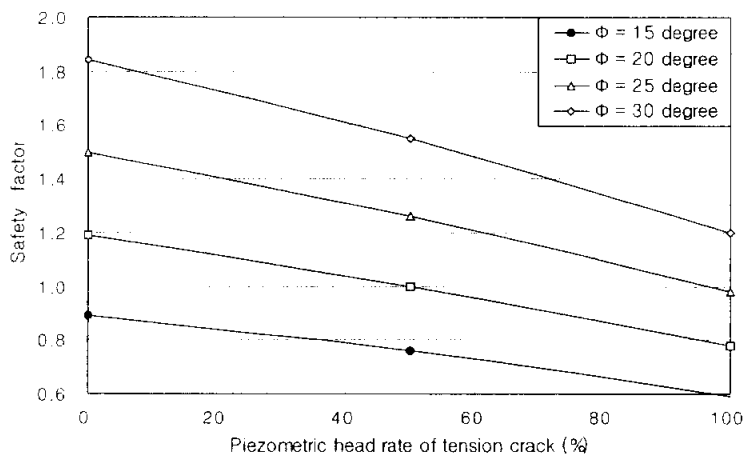


Fig. 34. Variation of safety factor with angle of internal friction and piezometric head rate ($c=1.0t/m^2$).

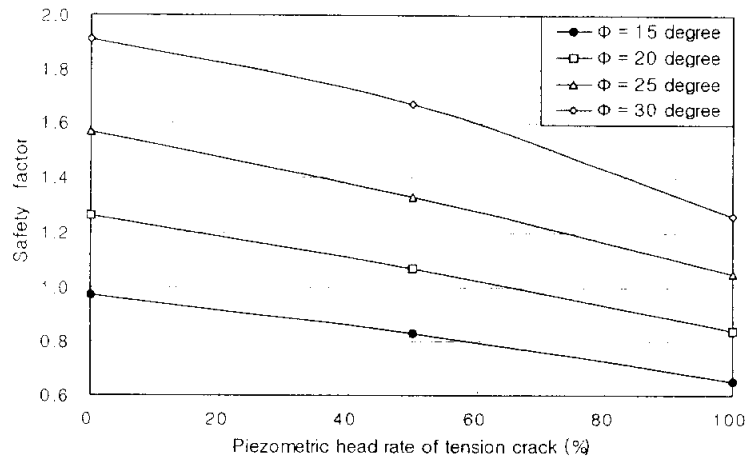


Fig. 35. Variation of safety factor with angle of internal friction and piezometric head rate ($c=2.0t/m^2$).

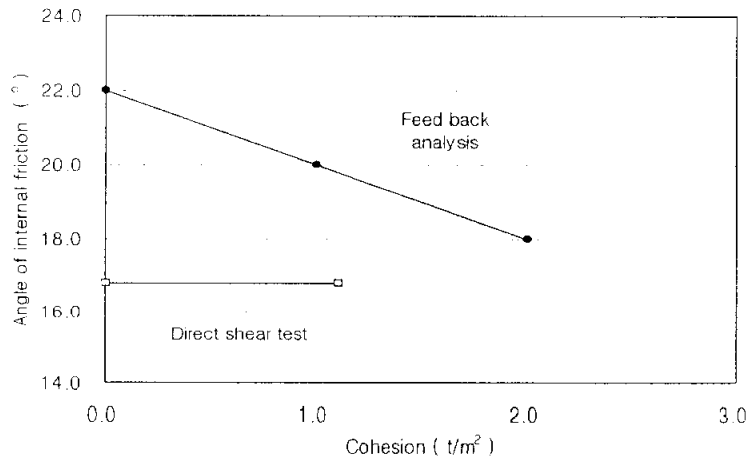


Fig. 36. Cohesion and angle of internal friction by feed back analysis (50% piezometric head) and direct shear test.

4.5.3. 사면 절취경사에 따른 안정해석

붕괴가 발생한 사면의 보수를 위해 정지작업을 수행하여야 한다. 본 사면의 경우 활동면 상부에 20여 m의 수직 인장균열이 존재하기 때문에 붕괴사면 위의 원사면이 불안정한 상태가 된다. 본 절에서는 전체사면의 안정을 유지할 수 있는 사면 절취경사를 제안하였다. 이를 위해 앞 절에서 결정된 강도정수를 이용하여 사면절취경사에 따른 안전율을 계산하였다. Fig. 37은 사면경사를 1:1.5와 1:2.0으로 절취할 경우의 단면을 파괴전 단면에 나타낸 것이다. Fig. 38과 Fig. 39는 각각의 사면경사에 대해 사면안정해석을 수행한 단면을 보인 것이다. 강우시의 조건을 고려해 주기 위해서 층리면 상부의 인장균열과 활동면에 수압이 작용하는 것으로 가정하였으며, 수압의 크기를 변화시켜가며 해석을 하였다.

Fig. 40은 위의 두가지 해석결과를 보인 그림이다. 사면경사를 1:1.5로 절취할 경우 건기시의 안전율은 1.17로 안전측에 들지만 인장균열의 수압 50% 정도 작용하면 최소안전율이 1.03으로 영구사면으로서의 설계를 위한 안전율로는 부족하다. 반면 1:2.0의 경사로 절취할 경우는 건기시 안전율이 1.42로 앞의 결과보다 큰 안전율을 유지할 수 있는 것으로 산정되었으며, 인장균열에 50% 수압이 작용할 경우 1.19정도의 안전율이 계산되었다.

황령터널입구의 사면은 약 1:2.0 정도의 경사로 절취하면 전체적인 안정성은 유지할 수 있을 것으로 판단되었으며, 절취사면의 유지관리 측면에서 일정높이마다 소단을 설치하는 것이 좋을 것으로 사료되어 수직높이 10m마다 2m폭의 소단을 두도록 부산시에 제안하였다. 따라서 사면절취는 1:1.8 경사로 절취하면서 수직높이 10m마다 2m폭의 소단을 두어 전체 사면경사가 1:2.0 정도가 유지되도록 사면 경사를 완화할 필요가 있

다. 이 경우 사면설계를 위한 최소안전율을 어느 정도를 볼 것인가에 따라 다르지만, 본 사면과 같이 현재 4차선도로가 있고, 고속도로 진입램프와 같은 중요 구조물이 있기 때문에 이 보다는 더 큰 안전율이 유지될 수 있도록 보강을 할 필요가 있을 것으로 사료되었다.

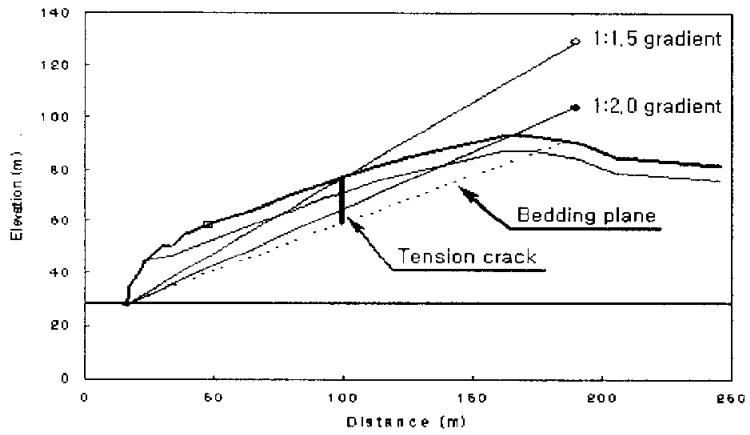


Fig. 37. C-C' Cross section by slope gradients.

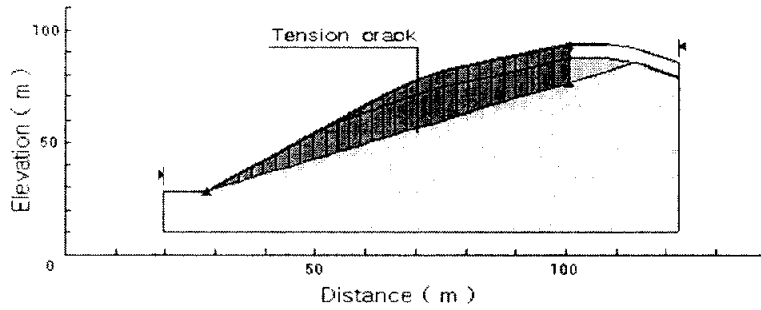


Fig. 38. Slope stability analysis of 1:1.5 gradient (50% piezometric head).

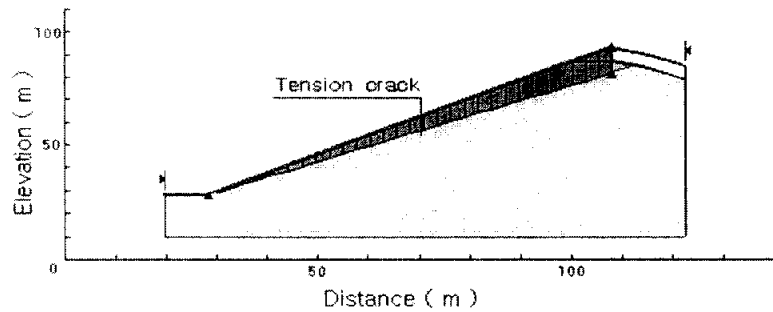


Fig. 39. Slope stability analysis of 1:2.0 gradient(50% piezometric head).

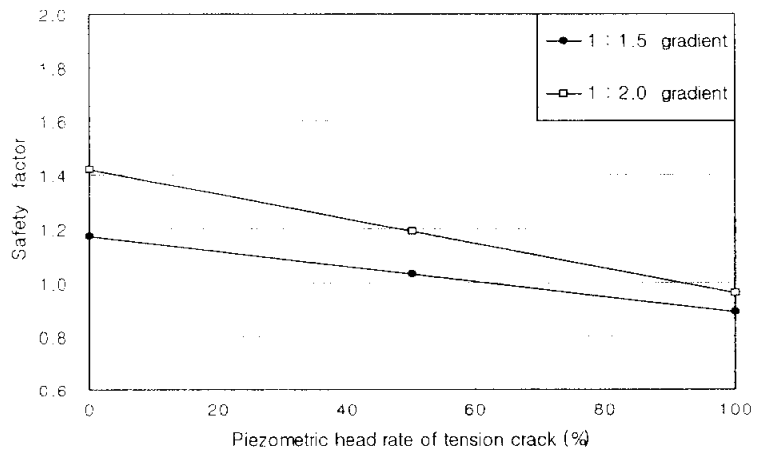


Fig. 40. Variation of safety factor with slope gradient and piezometric head rate.

5. 유지관리 계측 및 분석

5.1. 유지관리 계측의 필요성 및 목적

유지관리 계측은 사면의 거동과 손상을 자동적, 연속적, 객관적으로 모니터링하고 관리하는 시스템을 구축하여 과학적이며, 체계적인 유지관리를 목적으로 한다. 이러한 유지관리 계측을 통하여 사면의 안정성과 도로통행의 안전성을 확보하고 축적된 자료를 이용하여 효율적인 유지보수를 할 수 있다.

Gottadi와 Tonni(2003)는 특히 강우와 관련되어 대규모 산사태가 발생한 사면에 대해 안정성해석과 더불어 유지관리 계측으로 산사태의 재발방지에 효과적임을 밝히고 있다. 본 연구의 대상인 황령산 산사태도 이와 유사한 조건으로 강우와 관련되어 발생되었다. 일반적으로 파괴가 발생한 사면의 전단강도는 급격히 감소되어 추가파괴에 대한 가능성이 있으며, 황령산 진입로는 부산교통순환의 중심지로 그 중요도가 크기 때문에 유지관리 계측이 필요할 것으로 사료하였다.

5.2. 유지관리 계측 시스템

연구지역의 유지계측을 수행하기 위하여 자동측정장치가 현장에 설치되었으며 자동 및 수동계측을 위해 경사계 4개소(3개소에 자동측정공 및 수동측정공 각각 1개소 설치, 1개소는 자동측정공만 설치), 간극수압계 3개소, 하중계 4개소 및 우량계 1개소를 설치하였다(Fig. 41). 경사계는 도로방향과 산정상 방향(A-B 방향)의 변위를 측정하였으며, 상단 계측점, 중단계측점, 하단계측점을 선정하였고 자동계측 센서는 심도 3m, 5m, 7m, 9m 및 11m에 설치되어 있다. 본 계측지점들은 과거 활동면으로 작용한 녹색이암 상부에 남아 있는 층들에 대한 평면파괴의 가능성을 분석하고자

설치하였다.

자동 수평변위 계측은 2001년 1월 5일부터 일 2회 시작되었으며 그후 2001년 3월 14일 보정을 거쳐 이날 측정치를 제로상태로 재설정 (Zero-setting)하여 계측을 실시하였다. 자동수평변위계 센서는 각각 지하 3m, 6m, 9m, 12m에 설치하였다.

우량계의 측정은 수동으로 하여 부산기상청과 비교분석하였으며, 우량계를 제외한 모든 자동 계측자료는 모뎀을 통해 연구실의 컴퓨터와 연결되었고, 자료의 획득, 분석을위한 계측관련 소프트웨어는 (주)진산지오시스템의 Zerozone ver.1.0을 이용하였다. 전체적인 실시간 계측 계통도는 Fig. 42와 같다.

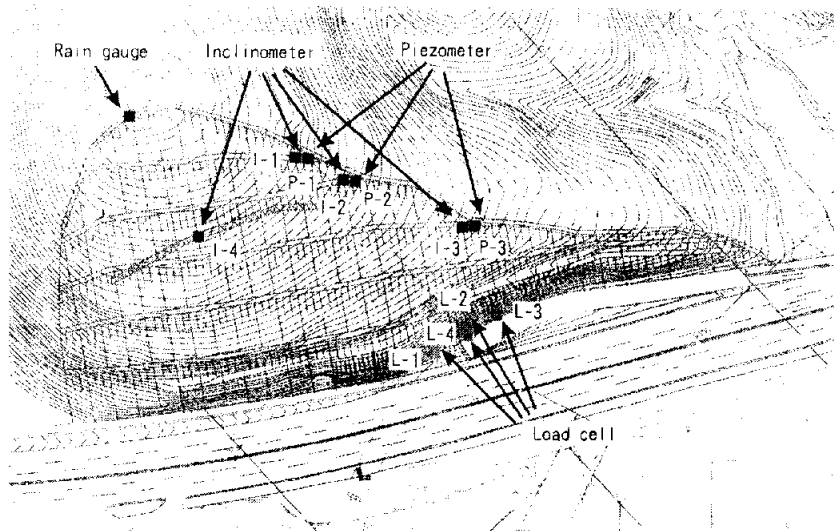


Fig. 41. Monitoring Equipments for maintenance monitoring.

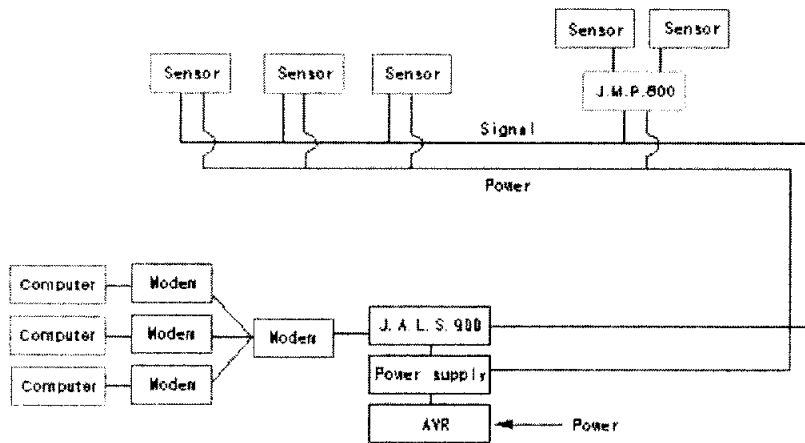


Fig. 42. Flow chart of real-time monitoring system

5.3. 경사계

경사계(Inclinometer)는 지반내의 수평변위의 발생방향, 크기, 속도 등을 측정하는데 이용되며, 측정된 변위를 설계치와 비교하여 구조물의 안정도를 검토하고 지반 변형의 진행 속도를 관측하여 갑작스런 지반의 변형에 미리 대응하는 방안 수립에 활용된다. 경사계의 튜브를 수직방향으로 매설하면 횡방향 변위를 측정할 수 있고 수평방향으로 매설하여 침하량을 측정할 수도 있다.

5.3.1. 작동원리

일반적인 수동 경사계는 지반에 특수 제작된 케이싱을 설치하고 그 속에 탐침기(probe)를 내려 기울기를 알아내는 것이며, 자동측정경사계는 이 탐침기의 역할을 전기비저항센스로 한다. 축의 기울기는 부착저항 스트레인 게이지, 진동현 스트레인 게이지 등을 이용하여 측정할 수 있으나, 현재 널리 이용되는 경사계의 원리는 평행력 가속도계(force balance accelerometer)의 원리가 이용된 것으로 검전기(position detector)의 자장내에 한 질점(mass)이 놓여 있고, 탐침기가 기울어지면 이 질점은 중력의 작용에 의하여 중력의 방향으로 기울고, 이로 인하여 검전기에 전류의 변화가 발생된다. 이러한 변화는 서보진폭기(servoamplifier)를 통해 복원코일(restoring coil)로 피드백된다. 이때 질점은 초기상태의 영점 위치로 복원하고자하는 동일한 전자기력을 반대방향으로 가지게 되므로 평형이 이루어져 움직이지 않는다. 전류가 저항기를 통과할 때의 전압을 측정할 수 있으며 이 전압은 질점을 평형상태로 유지하려는 힘과 정비례한다. 이러한 원리로 비례상수를 곱하여 수평거리가 계산되는 원리이다(Fig. 45).

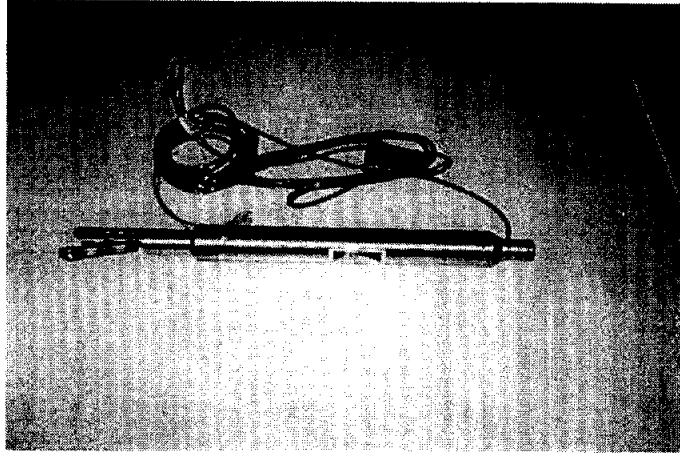


Fig. 43. Photograph of the inclinometer sensor(probe).



Fig. 44. Photograph of the inclinometer tube and measurement

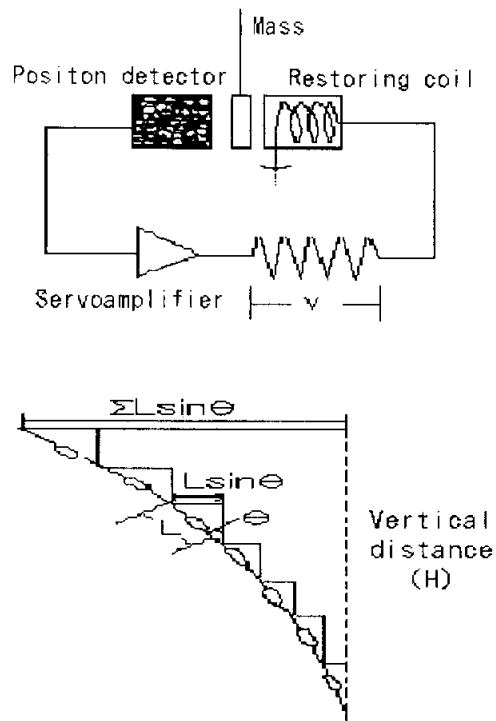


Fig. 45. Circuit diagram of the inclinometer sensor and calculation of horizontal displacement.

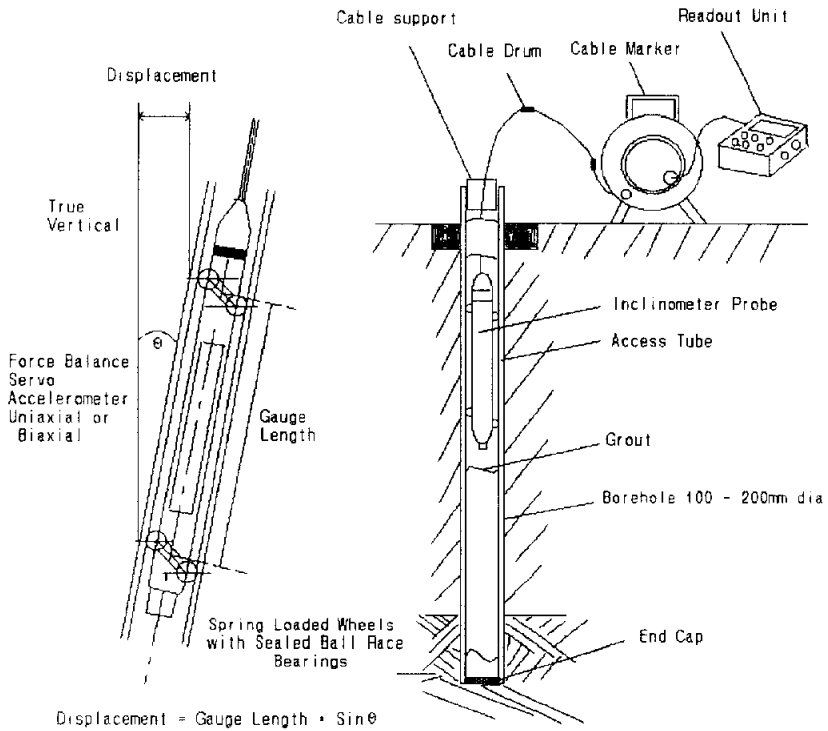


Fig. 46. Sketch showing the principle of horizontal displacement calculation and in-situ measurement.

5.3.2. 경사계의 설치 및 측정

경사계의 감지 탐지자의 능력 및 오차의 정도는 경사계의 종류에 따라 다양하지만 현재 널리 이용되는 평형력 가속도계의 원리를 이용한 경우 측정범위는 30°정도이고, 조건에 따라 90°까지의 측정이 가능하다.

오차의 정도는 측정 깊이 30M당 1~13mm정도이고 경사계관의 경우에는 아래와 같은 방법으로 설치한다.

- ① 양반까지 보오링을 하고 계획심도에 1.0M정도 추가하여 보오링을 한다. 천공의 지름은 100~200mm 정도로 하며 100mm정도로 하는 것이 설치에 편리하다.
- ② 경사계 케이싱의 한쪽 끝에 캡을 씌우고 리벳팅을 한 후 방수를 위하여 잘 봉한다.
- ③ 미리 케이싱과 커플링을 리벳으로 조합시켜 놓고 봉한다.
- ④ 측정방향을 설정하여 시추공에 A와 B의 방향을 표시한다.
- ⑤ 조립된 케이싱을 차례로 시공 공내에 압입하여 측정방향과 키의 방향을 맞추어 설치한다.
- ⑥ 케이싱을 제거하고 그라우팅을 한다.
- ⑦ 그라우팅재로 완전히 채운 후 경사계 케이싱의 끝부분을 보호 덮개로 덮고 보호막을 만들어 잘 보호되도록 한다.
- ⑧ 그라우팅재가 양생된 후 침하된 부위에 다시 양생재를 채운다. 그라우팅을 하는 과정에서는 측정방향에 대한 위치가 변경되지 않도록 주의하여야 한다.

경사계의 측정은 다음과 같이 한다.

- ① 경사계관의 Protective cover를 열고 Cable support를 설치하고, Wheel을 측정방향에 맞추어 경사계관 내부의 Keyway를 따라 케이싱 내부에 밀어 넣고 계획심도까지 감지 탐침자(Plobe)를 내린 후 지시계의 스위치를 켜다.
- ② 50cm씩 표시된 케이블을 Cable support에 맞추어 올리면서 측정을 하고 지시계에 수록된 계측값은 산전기(Readout Unit)로 전송한다 (Fig. 46).

5.4. 하중계

하중계(Load cell)의 측정 목적은 구조물에 작용하는 하중을 정확하게 측정하기 위한 것으로 Strut 및 Earth Anchor에 작용하는 인장력 및 압축력을 측정하여 공사진행 또는 완료후의 지반이나 구조물의 변형을 예측하여 안전관리 자료로 활용하는데 있다. 본 연구에서는 어스앵카 하중계를 설치하였다. 하중계는 지반의 거동으로 인한 구조물이 받는 하중을 측정하는 것으로 구조물의 설계시 적용된 허용응력을 초과하는지의 여부와 구조물의 안정성을 파악하기 위해 널리 이용되고 있다.

5.4.1. 작동원리

하중계는 진동현식(Vibrating wire type), 전기 저항식(electrical resistance type), 수압식(hydraulic pressure type) 등이 있다. 본 연구에는 일반적으로 널리 사용되는 진동현식 하중계를 이용하였다.

진동현식 하중계는 간극 수압계와 마찬가지로 트랜듀서에 있는 강선의 진동 주파수 변화로서 압력을 측정하는 것으로 하중계의 일반적인 형태는 Fig. 47에서와 같이 두꺼운 스틸튜브 형태이고 진동현은 튜브벽에 설치된 홈안에 고정되어 있다. 진동현은 통상 120°각도로 3개가 위치하고 있으나 하중이 1000KN 정도로 아주 크거나 편심 하중이 작용 시는 6개 또는 그 이상의 진동현이 설치된다.

진동현식은 크게 정적인 압력측정과 전적, 동적 압력측정을 모두 측정할 수 있는 것으로 구분된다. 정적인 압력의 측정은 간헐 진동 시스템(intermittent vibration wire system)으로 리시버로부터 발생하는 파동에 의하여 조절될 수 있는 거리에서의 진동이 측정되는 것을 말한다(Fig. 48, A).

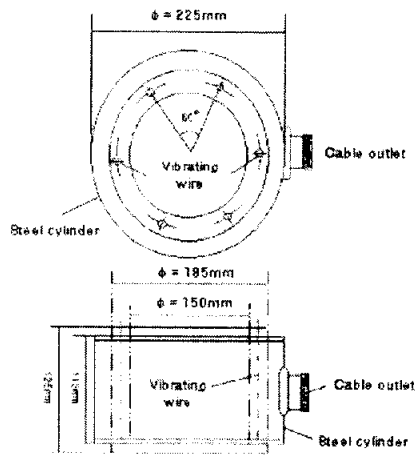


Fig. 47. Drawing of a general load cell.

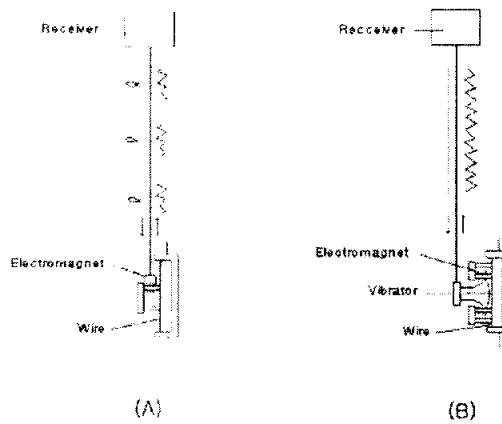


Fig. 48. Drawing of two vibrating wire principle(A: Static tension measurement method, B: Static-dynamic tension measurement method).

정적 및 동적 압력을 모두 측정하는 것은 연속 진동계(continuous vibration wire system)로서 Fig. 48의 B에서와 같이 연속적으로 강선에 진동을 주어 유인된 진동을 잡는 2개의 전자석이 있으며, 이는 진동의 주파수를 연속적으로 수신기에 전달시킨다.

하중과 진동 주파수와의 관계는 다음과 같이 표시된다.

$$P = K(f^2 - f_0^2)$$

P : Axial load, K : Equipment constant

f : Frequency, f₀ : Initial frequency

5.4.2. 측정 지점 및 설치장소의 선정

측정 대상 지점의 설정은 하중의 최대치가 작용하는 흙막이 벽의 중앙부, 경계조건의 고려를 위한 단부, 하중이 작용하는 곳에 인접한 장소, 교통량이 많은 도로측, 침투수의 영향을 받는 하천측 등에 중점적으로 배치한다. 또한 하중계의 설치 장소는 측정대상 부재에 작용하는 하중이 하중계에 안전하게 전달 될 수 있는 장소, 하중계의 설치로 인하여 구조적으로 약점이 안 되는 장소, 하중계의 중량을 지지하는 지지대를 설치하기 좋은 장소를 선정해야 한다.

5.4.3. 측정범위 및 오차의 정도

어스앵커에 하중 및 인장력의 측정은 시간에 따른 변화를 고려하고, 버팀대의 축력 및 굴착시의 하중을 측정하는데 이용된다. 하중계 센서의 오차의 정도는 2% 정도이고 지시계(Read out Equipment)는 오차가 1% 정도로 알려져 있다. 지시계에서 읽어진 값은 다음 식을 이용하여 인장력 및 하중을 구한다.

$$P = G(R_0 - R_1) + K(T_0 - T_1)$$

P : Axial load,

G : Equipment constant

R₀ : Sum of initial measure value,

R₁ : Measure value

T₀ : Initial temperature,

T₁ : Measure temperature

어스앵커 인장용 유압식 잭의 게이지와 하중계로 측정된 하중이 상당한 차이가 발생하는 경우가 있으므로 어스앵커 시공초기에 하중계를 설치하여 유압식 잭과 하중계의 차이 여부를 점검함으로써 어스앵커의 시공 오차를 예방한다. 한편, 하중계의 정확도를 검증할 필요가 있을 때에는 시험실에서 일축 압축 시험기를 이용하여 점검할 수 있다.

5.4.4. 하중계의 설치 및 측정

하중계의 설치 및 계측방법은 다음과 같다.

- ① 케이블을 연결한 후 초기치를 읽고 야장에 기입한다.
- ② 어스앵커 스트랜드를 시추공의 중심부를 따라 내부로 집어넣고 하판(lower plate)을 거치 시킨다.
- ③ 하중계를 설치한다.
- ④ 상판(upper plate)과 지압판을 거치 하고 유압잭을 이용하여 어스앵커를 인장 시킨다.
- ⑤ 어스앵커에 하중계를 설치한 후 케이블을 지시계와 연결하여 측정치를 읽는다. 어스앵커 인장시 2-3단계로 나누어 인장하되, 각 단계별로 유압식 잭의 게이지에 나타난 하중과 하중계로 측정된 하중을 비교하여 최종 인장 하중을 비교한다.
- ⑥ 하중계를 설치한 어스앵커의 강선은 추후 재인장이 가능하도록 적정 길이를 남겨 두고 절단한다.

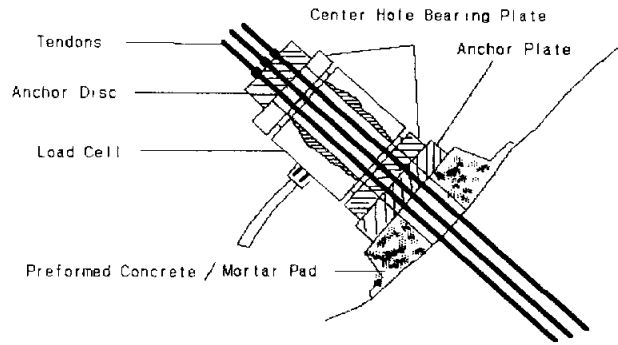


Fig. 49. Sketch showing earth anchor load cell.

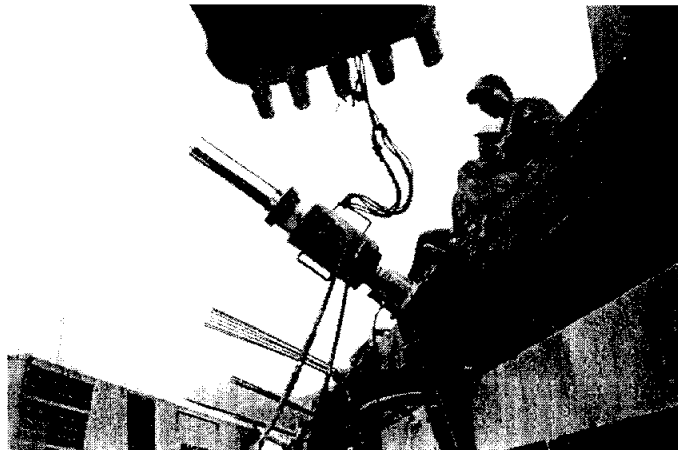


Fig. 50. Photograph of earth anchor load cell and measurement.

5.5. 간극수압계

간극수압계(Piezometer)의 측정 목적은 시공 중 또는 시공완료 후의 지반에 작용하는 간극수압을 측정하기 위한 것으로 장기 안정성이 뛰어나고 비교적 정확한 간극수압측정이 가능하며, 지반응력에 대한 정보를 신속하게 얻을 수 있는 장점이 있다. 경사계가 지반의 실제적인 움직임을 보여주고, 하중계가 구조물의 응력 및 변형을 보여준다면, 간극수압계는 지반 환경에서 작용하는 간극수압으로 인한 응력변화를 보여준다.

5.5.1. 작동원리

간극수압계는 측정원리에 따라 개방식, 유압식, 공기압축식, 진동현식 간극수압계가 있으며, 본 연구지역에서는 장기적인 데이터 획득의 안정성 및 정밀성을 고려하여 진동현식 간극수압계를 사용하였다. 작동원리는 하중계의 진동현식 센스와 같고(Fig. 48), 주파수를 간극수압으로 환산한다. 간극수압계는 하중계에서와는 달리 계기상수에서 단위면적을 고려하지 않는다.

$$P = G(R_0 - R_1) + K(T_0 - T_1)$$

P : Pore pressure,

G : Equipment constant

R₀ : Sum of initial measure value,

R₁ : Measure value

T₀ : Initial temperature,

T₁ : Measure temperature

5.5.2. 측정범위 및 오차의 정도

간극수압계는 70mH₂O(100psi), -40~+150°C의 측정범위를 가지며, 측정범위의 ±0.5%의 정밀도를 가진다.

5.5.3. 간극수압계의 설치 및 측정

간극수압계의 설치는 다음과 같으며, 측정은 하중계의 방식과 같다.

- ① 설치 전에 간극수압계 Tip을 24시간 동안 물에 담가 Tip에 있는 기포를 완전히 제거한다.
- ③ 간극수압계는 필히 연약한 점토나 실트층에 설치하여야 하며 굴진공은 설치 전에 굴진 Slime이 없도록 깨끗하게 세척한다.
- ④ 설치전 설치 위치 하부에 깨끗한 모래를 약 30cm정도 두께로 깔아준다.
- ⑤ 물속에 잠겨있는 간극수압계를 잠긴 채로 현장에 운반한후 Sand Bag을 이용하여 원하는 위치에 설치한다.
- ⑥ 설치된 간극수압계 위에 모래로 투수층(약 15cm 이상)을 형성한 뒤 그 위에 벤토나이트 펠렛으로 차수층(약 50cm 이상)을 형성한다.
- ⑦ 상부까지 시멘트+벤토나이트액으로 그라우팅을 실시한 후 케이싱을 회수한다.
- ⑧ 케이블 보호대를 설치하여 성토시 케이블의 파손을 방지한다.

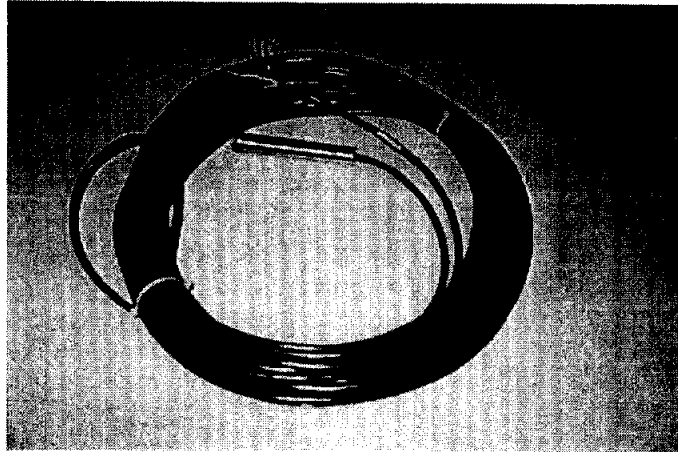


Fig. 51. Photograph of the piezometer sensor(vibrating wire type).

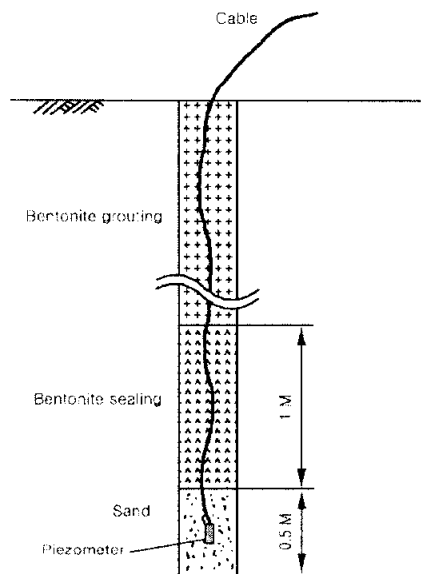


Fig. 52. Sketch showing the piezometer and installation.

5.6. 계측결과 및 분석

5.6.1. 경사계 계측결과

수동 측정공들은 3개소에 설치되어 있는데, 평면파괴의 가능성을 알아보기 위하여 파괴방향의 연장선상에 설치된 상단, 중단 및 하단 자동측정공 옆에 위치하고 있다. 2000년 7월27일에 측정한 자료를 초기치로 하여 2001년 8월 11일까지 약 1년여 동안 계측을 실시하였다. 자동측정공의 자료가 획득되기 시작한 2001년 1월 5일까지는 일 2회, 그 후 자동측정공의 자료가 획득되기 시작한 후로는 월 1회-2회로 계측을 수행하여 왔다.

수동 측정자료에 의하면 세 공 모두 절개면이 준공된 2001년 2월까지 2mm이하의 변위를 보이며 소폭으로 완만하게 증감을 반복하였다. 그 후 6월달까지는 최대 3mm정도로 비교적 급격하게 증가하다 다시 변위가 감소하여 안정되는 추세이다(Fig. 53, Fig. 54, Fig. 55). 공사 준공 후 가파른 수평변위의 증가는 ASNA 공법에 의한 배토조성물로 법면이 피복되어 지하수가 유동경로를 찾을 때까지 일시적으로 배수가 되지 않아 일어난 현상으로 사료된다. 참고로, 2000년 12월부터 2001년 4월까지의 가뭄으로 인하여 지표수가 지하수로 거의 유입되지 않았다. 따라서, 향후 수평변위의 변화를 계속 계측할 필요가 있다.

자동측정공에서 상단(I-1), 중단(I-2) 및 하단(I-3) 측정공은 최종적으로 2001년 3월 14일자를 초기치로하여 측정하였다. 본 공들은 심도가 11m로 자동계측 센서는 심도 3m, 5m, 7m, 9m 및 11m에 설치되어 있다. 추가계측공(I-4)은 억지말뚝이 횡렬로 시공된 전면에 위치하며 자동 수평변위 센서는 3m간격으로 심도 3m, 6m, 12m 및 15m에 설치되어 있으며

2001년 4월 16일자 자료를 최종 초기치로 하여 계측을 실시하였다. 이 공의 경우에는 대비되는 수동계측공이 설치되어 있지 않다.

앞에서도 언급한 바와 같이 이 시기에 수동측정공의 자료에 의하면 변위가 가파르게 증가하였으며 자동측정공들의 경우도 같은 양상을 보인다 (그림 5 참조). 다만, 자동측정공의 변위량은 수동측정공의 약 10배 정도가 되어 센서의 민감도/안정성 및 공내 설치에 따른 기술적인 문제점에 기인하는 것으로 사료된다.

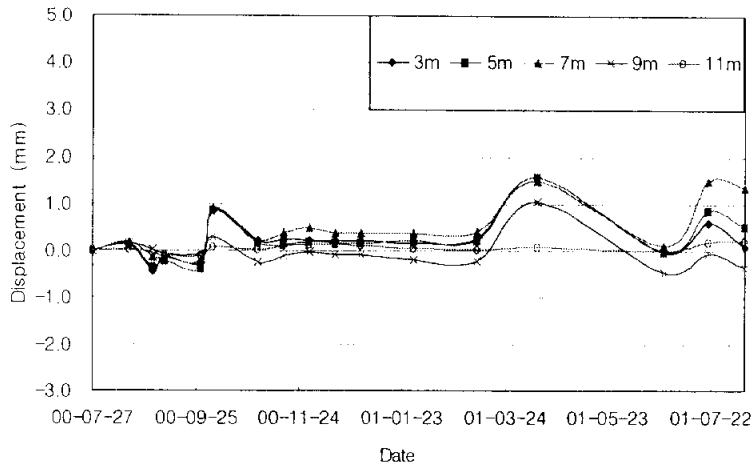


Fig. 53. Result of horizontal displacement with inclinometer(I-1, manual measurement).

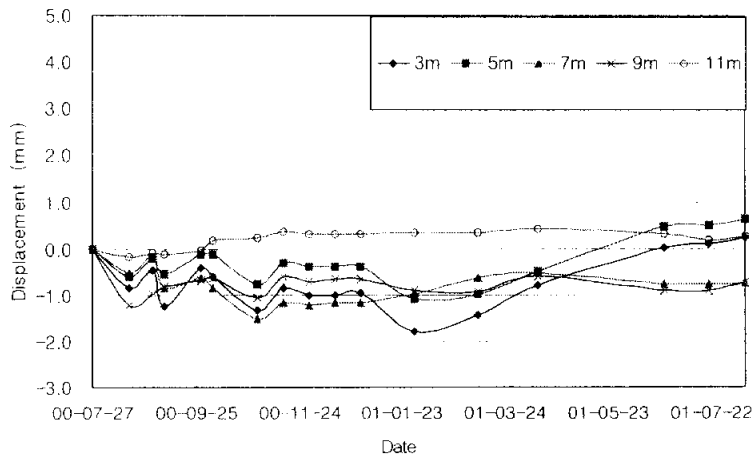


Fig. 54. Result of horizontal displacement with inclinometer(I-2, manual measurement).

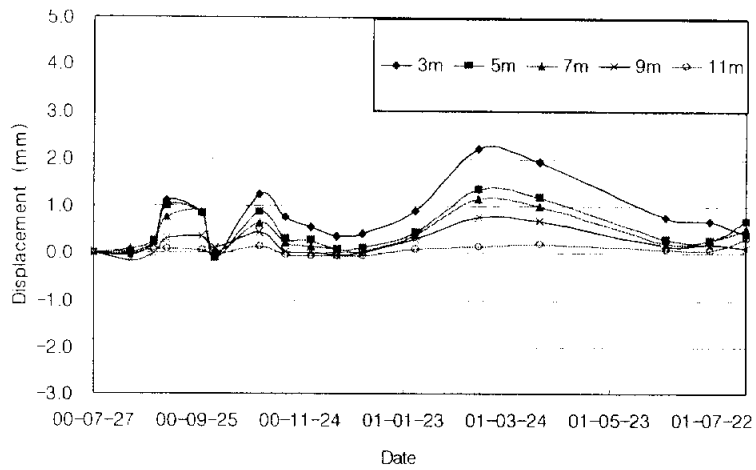


Fig. 55. Result of horizontal displacement with inclinometer(I-3, manual measurement).

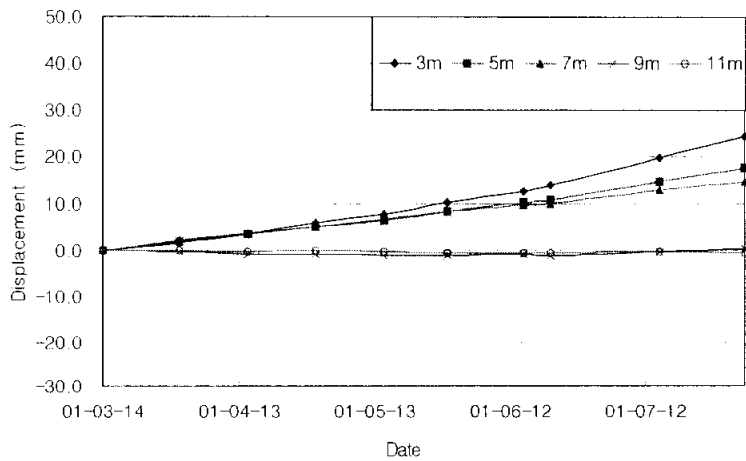


Fig. 56. Result of horizontal displacement with inclinometer(I-1, automatic measurement).

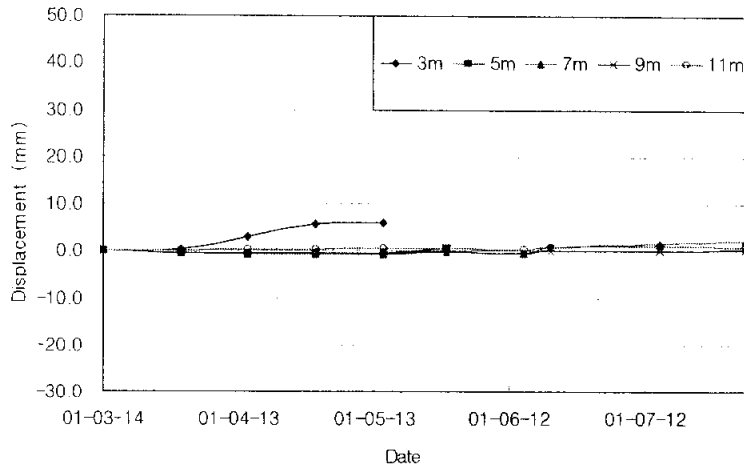


Fig. 57. Result of horizontal displacement with inclinometer(I-2, automatic measurement).

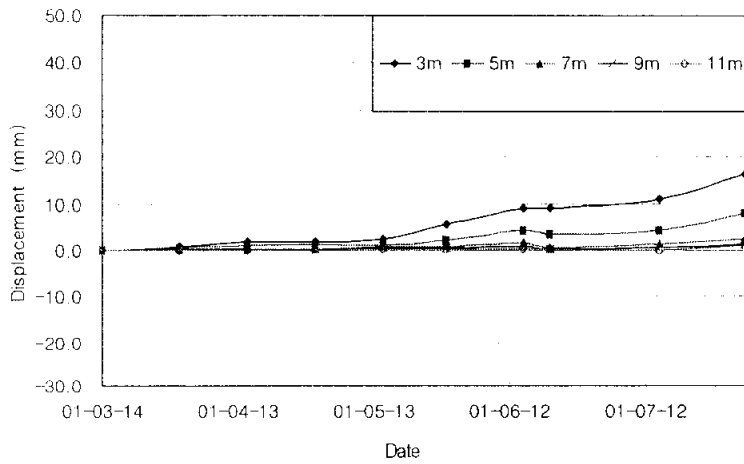


Fig. 58. Result of horizontal displacement with inclinometer(I-3, automatic measurement).

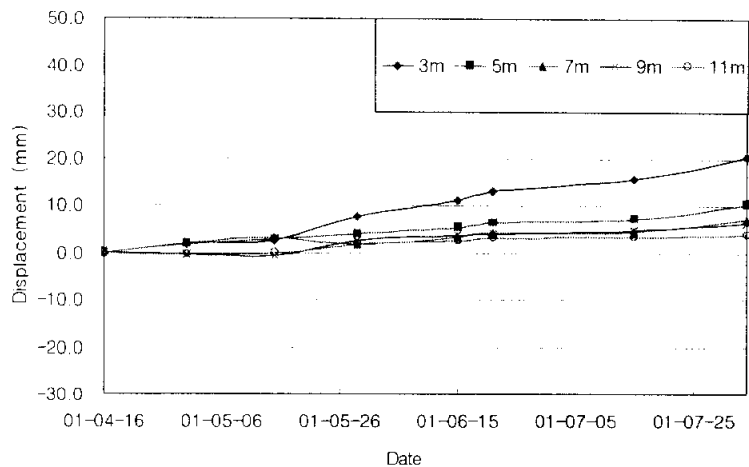


Fig. 59. Result of horizontal displacement with inclinometer(I-4, manual measurement).

5.6.2. 하중계 계측결과

하중계의 경우에는 백양로로 올라가는 램프교대와 옹벽에 설치되어 있다. 하중계 L-1은 옹벽 1단(터널방향), L-2는 교대부 1단, L-3는 옹벽 1단(대남로터리 방향), L-4는 교대부 4단에 설치되었으며, 구조물의 안정성과 직접적인 연관성이 있으므로 가능한 1회/일 간격으로 측정하도록 하였다.

하중계 L-1의 경우, 2000년 11월 6일부터 측정이 되었다. 인장 당시 45.56t이었으나 인장 직후 39.78t, 2000년 11월 7일에는 28.66t으로 대폭 감소하였다. 그 후 완만한 감소세를 보여 2000년 11월 22일에는 26.51t이었으나 2000년 11월 22일 재인장 후 50.99t을 나타내었고 인장 직후에는 42.94t, 2000년 11월 23일에는 40.02t으로 측정되었다. 그 후 완만한 감소세를 유지하여 2001년 1월 22일에는 35.005t을 기록하였고 2001년 8월 5일 마지막 측정 시에는 37.126t의 축력을 보여 거의 변동없이 축력이 유지되는 것으로 측정되었다(Fig. 60).

하중계 L-2는 이전 하중계의 오작동으로 인하여 교대 1단에 새로 설치되었으며 2000년 11월 28일부터 측정이 시작되었다. 11월 28일 인장 시 축력은 52.15t으로 측정되었고 인장 직후 46.39t의 축력을 유지하였다. 그 후 완만한 감소세를 유지하여 2001년 1월 16일에는 40.729t을 기록하였고 2001년 8월 5일 마지막 측정 시 40.109t으로 축력이 거의 변동없이 유지되고 있다(Fig. 61).

하중계 L-3의 경우, 2000년 10월 17일에 설치되었다. 인장 당시 축력이 47.67t이었으나 인장 직후 45.02t으로 약간 감소하였고 2000년 10월 30일 36.88t으로 비교적 크게 감소하였으며, 2001년 6월 15일 35.61t으로 완만하게 증감을 반복하였다. 그 후 불규칙적으로 급격히 축력이 증가

하여 2001년 8월 3일 최고 축력 70.613t을 기록하였다. 하중계 L-3이 설치된 곳은 되메우기를 한 지역으로 배수가 불량하거나 혹은 침하에 의한 편압의 형성 등이 고려될 수도 있다고 사료된다. 또한, 하중계 센서의 오작동도 고려되어야 할 것이다(Fig. 62).

하중계 L-4는 2000년 10월 17일부터 계측이 실시되었으나 센서의 이상으로 인하여 2001년 1월 25일 이후 계측이 불가능 하였다.

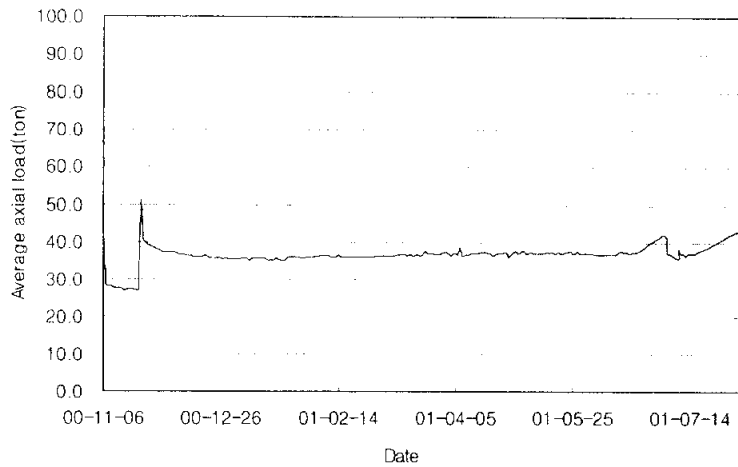


Fig. 60. Result of average axial load with load cell(L-1).

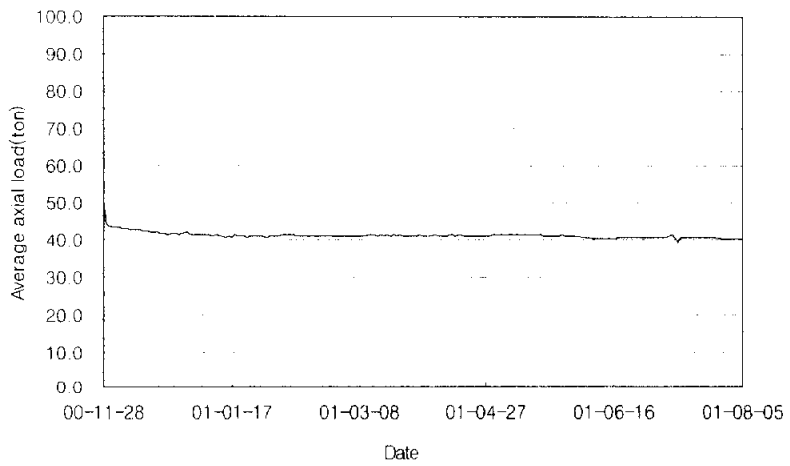


Fig. 61. Result of average axial load with load cell(L-2).

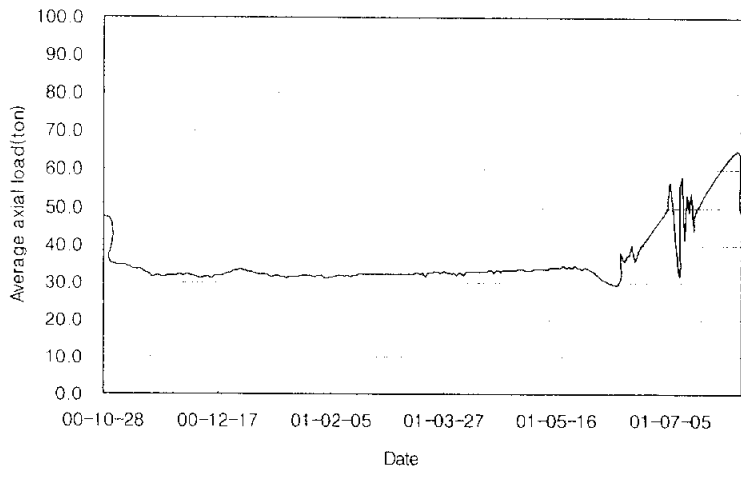


Fig. 62. Result of average axial load with load cell(L-3).

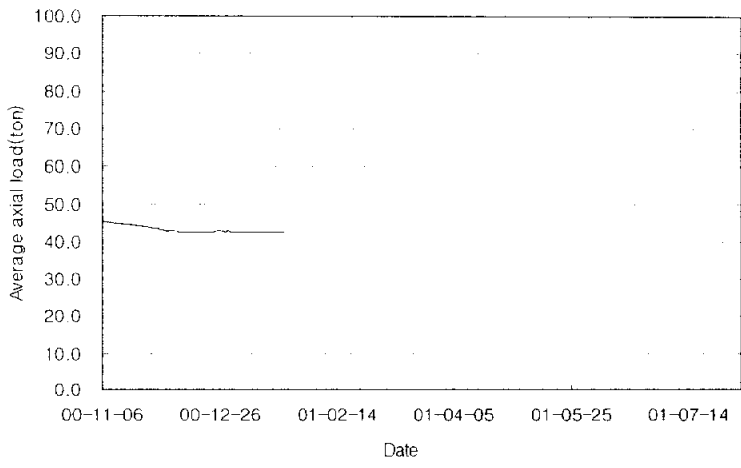


Fig. 63. Result of average axial load with load cell(L-4).

5.6.3. 간극수압계 계측결과

간극수압계는 평면파괴의 가능성을 알아보기 위하여 파괴방향의 연장선 상에 상단(P-1), 중단(P-2) 및 하단(P-3)에 설치하였다. 2000년 7월 27일부터 약 1년 여 동안 간극수압이 측정되었으며 본 연구에 이용된 계측 프로그램에서 압력수두(Piezometric head)로 환산하여 계산된다. 초기수위는 상단, 중단 및 하단이 각각 -6.87m, -6.80m 및 -8.77mm로 지형과 거의 비슷하게 형성되어 있었다.

P-1의 압력수두는 설치시기가 장마기간임에도 불구하고 완만하게 하강하여 2000년 10월 5일 -8.22m 까지 하강하였고, 그 후 완만하게 회복되어 2001년 장마기에는 -6.848.m까지 회복되어 초기치와 거의 비슷하여졌다. 사면의 상부에 위치하고 있어 압력수두의 변화가 다른 간극수압계의 압력수두 변화보다 적응을 보여준다(Fig. 64).

P-2의 압력수두의 경우 2000년 10월 25일 -9.64m까지 하강하였으나 그 후 다시 회복되어 2001년도 7월 15일에는 -6.55m로 초기치와 비슷해졌다(Fig. 65).

P-3의 압력수두는 2000년 10월 12일까지 -10.32m에 이르기까지 완만하게 수위가 하강하였으나, 이후 급격히 상승하여 2000년 10월 30일 -8.44m까지 초기치와 비슷하여졌다. 초기치와 비슷해 진후 완만히 감소하였으며 2001년 장마기에도 수위가 -9.0m이하에서 형성되어 초기치보다 약 50cm정도 수위가 낮게 형성되었다(Fig. 66). P-2 및 P-3의 압력수위도 2001년 장마기에 폭우가 내린 후 수위가 일시적으로 높아지다가 즉시 압력수두의 감소를 보여 이 구간의 배수가 원활한 것으로 사료된다.

3개 지점 모두 2001년 1월 중순부터 압력수위가 완만하게 상승하였는데 ASNA 공법에 의한 배토조성물로 법면이 피복되어 가면서 지하수위가

새로 형성된 것으로 사료되며, 이후 강우에 대한 지반의 압력수두의 변화가 신속한 변화를 보이고 있어, 지표에서 유입된 강우가 사면을 따라 신속히 배출되는 것으로 사료된다.

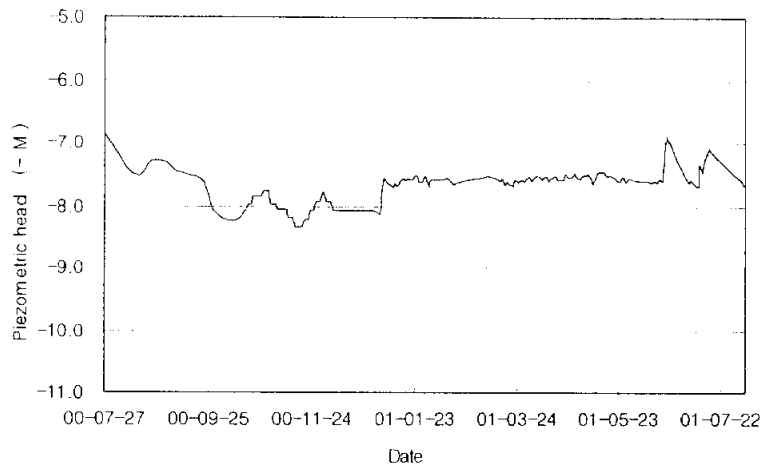


Fig. 64. Result of piezometric head with pore pressure(P-1).

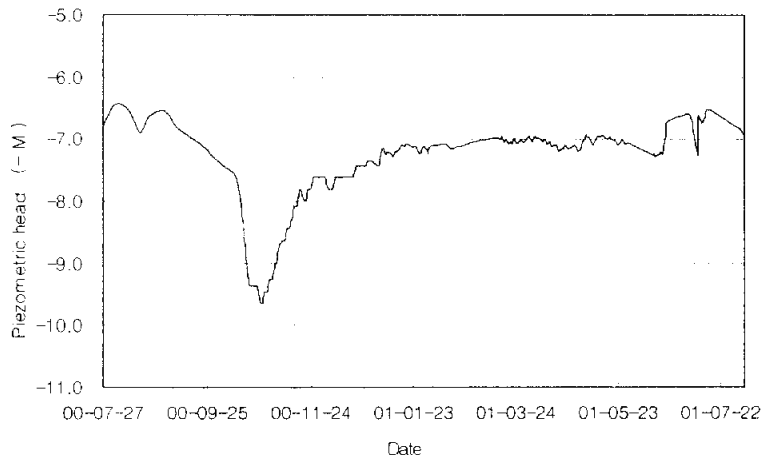


Fig. 65. Result of piezometric head with pore pressure(P-2).

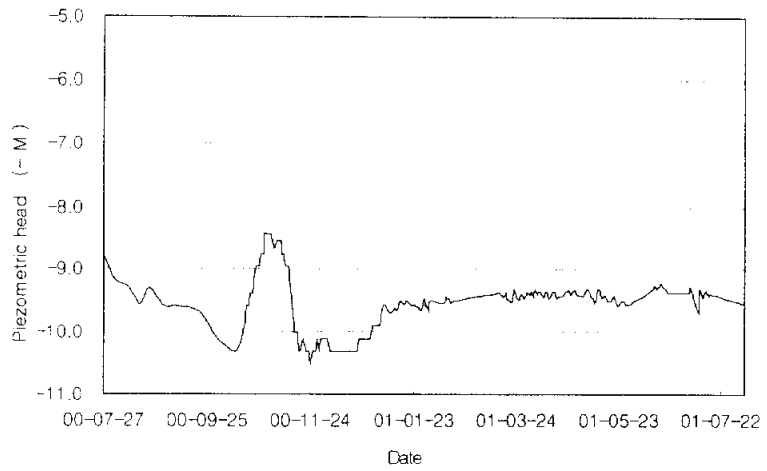


Fig. 66. Result of piezometric head with pore pressure(P-3).

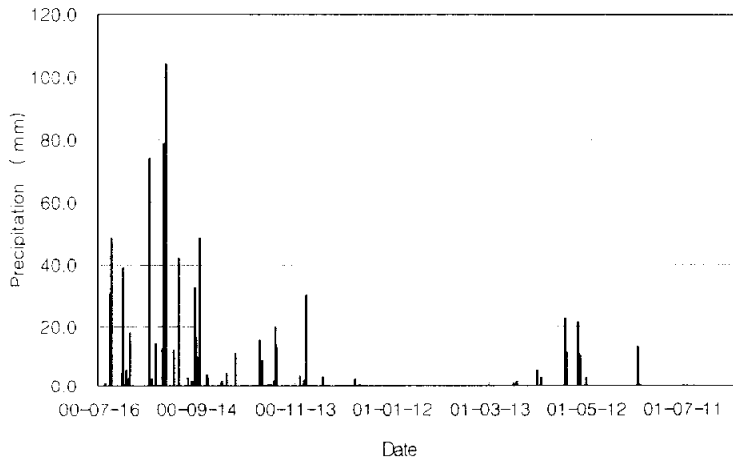


Fig. 67. Histogram of precipitation in the Busan area(from the 16th of July, 2000 to the 14th of August, 2001).

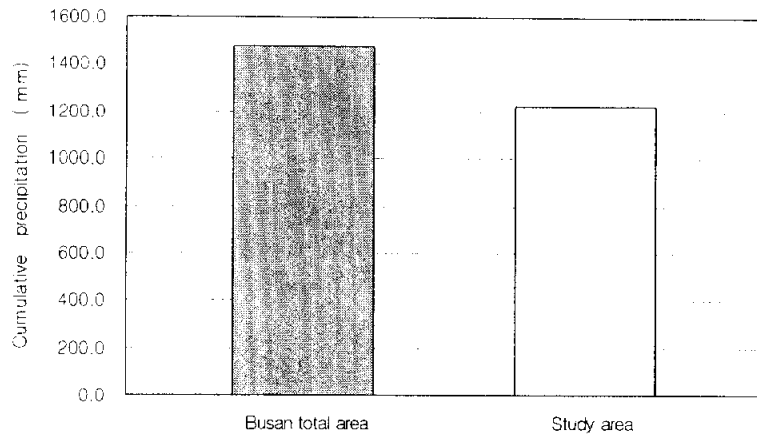


Fig. 68. Histogram of cumulative precipitation(from the 16th of August, 2000 to the 14th of August, 2001).

6. 결론 및 제언

황령산 산사태는 1999년 9월 10일 오전 11시 50분경에 발생하였다. 활동사면은 길이 약 130m, 폭 약 50m, 지층두께 약 20~30m, 파괴토사량이 약 14m³의 대규모의 산사태이며, 국내 대다수의 산사태와 마찬가지로 강우에 기인한 산사태이다. 퇴적암층에 풍화된 녹회색 이암층을 따라 평면파괴 형태로 조사되었고, S7°E~S12°E 방향으로 수평거리 최대 17m로 활동하였다.

산사태가 발생한 지역은 1:50,000 지질도에 “암회색응회질퇴적암”지역에 해당한다. 본 연구의 시추조사와 현미경관찰 결과 산사태가 발생한 지역은 전반적으로 응회질 성분의 함유가 풍부하고 풍화에 약한 장석과 방해석이 많이 함유되어 있는 것으로 확인되었다.

본 연구지역에서 조사된 대표적 절리군(N16°E, 87°NW; N43°W, 86°SE; N82°W, 89°NE)은 장태우(1998)가 연구한 동래단층의 고응력장중 신장응력 방향인 NNE-SSW, NNW-SSE, ESE-WNW와 유사한 방향성을 가지고 있으며, 본 지역의 퇴적암들에서 관찰되는 절리들이 대부분 방해석으로 피복 내지 충전되어 있고, 깃털무늬가 흔히 관찰되므로 신장절리로 사료된다. 그러므로 절리간극이 비교적 넓은 신장절리가 황령산 산사태 지역의 지하수 유동량을 증가시키고, 풍화작용을 촉진하는 등 전반적인 공학적 안정성을 낮추는 역할을 한 것으로 사료된다.

암반의 공학적 성질을 분석하기 위해서 산사태가 발생한 전체 사면에 걸쳐 Schmidt hammer 시험을 실시하였으며, 10개의 코아시료와 1개의 암석블록시료, 활동면에서의 점토를 채취하여 실내시험을 실시하였다.

Schmidt hammer 시험결과 반발치는 10~64(일축압축강도 환산 51~

2.176kg/cm²)로 연암에서 극경암까지의 강도분포를 보였으며, 실내시험 결과 단위중량은 2.642~2.869 g/cm³으로 일반적인 퇴적암의 단위중량 (이부경, 1998)보다 높게 나타났다. 일축압축강도는 282.5~2352.72 kg/cm²로 측정되어 Schmidt hammer 시험결과와 비슷한 강도분포를 보였으며, 퇴적암에서의 횡적 암상변화양상과 다른 양상을 보였다. 이는 풍화에 의한 강도차이로 사료된다. 활동면에서 채취한 점토는 XRD 분석결과 녹니석과 일라이트로 판명되었으며, 실내시험에서 획득된 물성치들은 평사투영해석, 한계평형해석의 입력자료로 이용하였다.

본 연구지역의 항공사진 판독 결과 1998년 사진에서 산사태의 규모와 일치하고 사면의 방향과 평행한 여러 조의 선구조들이 관찰되어 황령산 산사태가 장기적으로 진행되었을 것으로 사료되며, 육안관찰결과 총리면을 따른 평면파괴 형태로 관찰되었으며, 활동면에서 채취한 점토의 내부마찰각($\phi=21^\circ$)으로 분석한 평사투영해석에서 평면파괴 가능성이 높은 것으로 해석되었다. 이들 자료를 바탕으로 SLOPE/W 소프트웨어를 이용한 한계평형해석을 실시하였으며, 해석결과 사면의 구배를 1:2.0으로 낮추어 주는 것이 안전할 것으로 사료되었다.

산사태가 발생한 본 연구지역은 부산의 교통요지에 위치하고 있어 사면 보강 이후에도 자동화 방식에 의한 유지관리계측을 통해 안정성을 분석해야 할 것으로 사료하였다. 본 연구지역의 파괴원인에 대한 선행연구 결과를 통해 추후의 파괴형태는 평면파괴의 형태로 강우와 관련되어 파괴가 일어날 것으로 예상되어 우량계 1개소, 간극수압계(Piezometer) 3개소, 경사계(Inclinometer) 3개소를 계획하고 설치하였으며, 이후 경사계 1개소를 추가로 설치하였다. 또한 사면옹벽부의 구조물 안정성을 판단하기 위하여 어스앵카 하중계(Earth anchor load cell)를 보강옹벽의 띠장 4개소에 설치하였다.

약 1년간의 계측 기간동안 경사계의 경우 최대 24.3mm(l-1, 3m 지점)로 도로방향으로의 변위를 보였다. 하중계의 계측결과 L-1은 2000년 11월 22일부터 급격한 축력증가를 보였으나 3일간의 감소 후 계측종료 시점인 2001년 8월 5일까지 비교적 큰 변화없이 일정한 축력을 나타내었다. L-3은 2001년 7월 3일 이후 큰 폭의 이상축력치를 보이는데 센스의 오작동으로 사료되며, 기타 지점의 하중계에서는 일정한 축력치를 유지하였다. 간극수압계의 경우는 압력수두의 변화양상이 3지점 모두 거의 비슷한 양상을 보이며, 사면의 최상부에 위치한 P-1의 경우 전반적으로 높은 압력수두를 형성하고 있고, 변화의 폭이 작았다. 간극수압계의 계측결과 전반적으로 강우량의 증감과 비례하여 압력수두의 증감을 보이나, 2000년 9월 28일 이후에 급격한 감소가 계측되었다. 이러한 감소현상은 사면 하부에 어스양카 하중계의 설치를 위한 굴착 및 천공의 영향으로 일순간 배수가 급격히 발생된 것으로 사료된다.

계측결과를 종합 고려하면, 강우량에 비례해서 간극수압이 증가되지만 지반의 거동은 거의 없으며, 사면도 안정된 것으로 사료된다. 특히 본 연구지역과 같이 강우와 관련된 산사태 지역의 경우 자동화 계측을 통해서 간극수압의 신속한 증감을 알 수 있었으며, 추후 이러한 주요 시설변 사면에서 자동화 방식에 의한 유지관리계측이 사면의 안정성을 판단하는데 더욱 효과적일 것으로 사료된다.

앞으로 국내사면의 안정성 검토에 있어서 활동면으로 작용하는 연약대의 존재유무에 대해 보다 세심한 조사가 선행되어야 할 것이며, 연약대가 존재할 시에는 연약대의 물성치로 사면을 설계해야 할 것으로 사료되며, 또한 시공이 완료된 이후에도 주요 사면시설인 경우 강우에 대비한 유지관리계측을 제안하는 바이다.

참 고 문 헌

- 김상욱, 이영길, 1981, 유천분지 북부의 암석 및 지질구조, 광산지질, 제 14권 pp. 35-49.
- 김종열, 1988, 양산단층의 산상 및 운동사에 관한 연구, 부산대학교 대학원, 박사학위논문, pp. 97.
- 김진섭, 윤성호, 1993, 부산일원에 분포하는 백악기 화산암류의 암석학적 연구 (1). 대한암석학회지, 제 2 권, 제 2 호, pp.156-166.
- 도화종합기술공사, 1993, 부산컨테이너 부두 배후도로 사면안정 검토.
- 부산항건설사무소, 1991, 부산항 컨테이너부두 배후도로 건설공사 보고서.
- 손치무, 이상만, 김영기, 김상욱과 김형식, 1978, 한국지질도 (1:50,000) 동래·월내도폭 설명서, 자원개발연구소, p. 2-27.
- 이부경, 1998, 굴착공학의 원리, 대운, pp.52-162, p.631.
- 이부경, 1998, 암석역학의 원리, 대운, pp.18-50.
- 이병주, 선우춘, 2003, 양산단층과 동래단층 사이를 통과하는 지방도의 지질공학적 연구, 대한 지질공학회지, 제 13 권, 제 2 호, pp. 193-205.
- 이병주, 송교영, 1995, 포항분지내 지각변형 해석, 자원환경지질, 제 28 권, 제 1 호, pp. 69-77.
- 이준동, 김인수, 윤선, 상기남, 김영화, 1993, 연양지역을 중심으로 한 양산단층에 관한 연구-특히 파쇄작용과 자기 비등방성 고찰을 중심으로 -, 지질학회지, 제 29 권, pp.128-144.
- 일본재료학회, 윤지선 역, 1998, 岩의 力學, 구미서관, p. 655. 조용찬, 장태우, 1998, 동래단층의 고응력장 해석, 대한자원환경지질학회, 대한

- 지하수환경학회 1998년도 공동학술발표회 발표논문집 요약집, pp. 109.
- 장천중, 장태우, 1998, 고응력장 분석을 통한 양산단층의 구조사, 대한 지질공학회지, 제 8 권, pp 35-49.
- 장태우, 강필중, 박석환, 황상구와 이동우, 1983, 한국지질도 (1:50,000) 부산-가덕도폭 설명서. 한국동력자원연구소, pp. 2-11.
- 채병근, 장태우, 1994, 청하-영덕지역 양산단층의 운동사 및 관련 단열 발달상태, 지질학회지, 30권, pp. 379-394.
- 최정찬, 백인성, 2002, 황령산 산사태 원인 분석에 대한 연구, 대한 지질 공학회지, 제 12 권, 제 2 호, pp. 137-150.
- 한국자원연구소, 1995, 한국지질도 (1/ 1,000,000).
- Bruce E. Hobbs, Winthrop D. Means, Paul F. Williams., 1976, An Outline of Structural Geology, Wiley International Edition, pp. 296-300.
- Casagrande, A., 1948, Classification and Identification of Soils, Transactions, ASCE, vol. 113, pp. 901-930.
- Choi, H. I. and Park, K. S., 1985, Cretaceous/Neogene stratigraphic transition and Post-Kyeongsang tectonic evolution along and off the southeast coast, Korea, J. Geol. Soc. Korea, vol. 1. 21, pp 281-296.
- E. T. Brown, 1981, Rock characterization testing & monitoring ISRM suggested Methods, Pergamon Press, pp. 97-105.
- George H. Davis and Stephen J. Reynolds., 1996, Structural Geology of Rocks and Regions(2nd Edit)., John Willey & Sons, Inc., pp. 204-268.

- Gottardi G., Tonni L., 2003. Interpretation of slope movements induced by adjacent large landslide in Northern Italy, *Natural Hazard Review*, Vol. 4, no. 2, pp. 71–77.
- ISRM, 1981, *Rock characterization, testing and monitoring*, Pergamon Press Ltd, pp.101–102.
- Kyung Choi, Ho-Joong Youn, 1994, *The Status and Characteristics of Landslide in Korea*. Proceedings of The North–East Asia Symposium and Field Workshop on Landslides and Debris Flows, Seoul, Korea. pp. 19–26.
- Nash D., 1987, *Comparative Review of Limit Equilibrium Methods of Stability Analysis*, *Geotechnical Engineering and Geomorphology*, John Wiley and Sons, pp. 11–75.
- Oliver, M. Bell, F. G. and Jemy, C. A., 1994, *The effect of rainfall on slope failure, with examples from the Greater Durban area*. Proceedings 7th intern. Cong. IAEG vol. 3, pp.1629–1636.
- R. A. van Zuidam, 1945, *Terrain analysis and classification using aeaial photographs*. International Institute for Aerial Survey and Earth Sciences(ITC), vol. 7. pp. 27–68.
- Rocscience Inc. 1989, *Dips–User's guide*, PP. 1–86.
- Sillitoe, R. H., 1977, *Metallogeny of Andean–type continental margin in South Korea: Implication for opening of the Japan sea*, In Talwani, M. and Pitman, W.C. (eds), *Island arcs, deep sea trench and back–arc basin*, Am. Geophy. Union, Maurice Ewing Ser., Vol. 1, pp 303–310.
- Simoni A., Berti M., Generali M., Elmi C., Ghirotti M., 2004,

Preliminary result from pore pressure monitoring on an unstable clay slope, *Engineering Geology*. Vol. 73, no. 1-2, pp. 117-128.

Sung-Wan Hong, Chun-Whan Cho, Ho-Hon Koo & Je-Yoon Woo, 1994, The Characteristics of Landslides in Korea, *Proceedings of The North-East Asia Symposium and Field Workshop on Landslides and Debris Flows*, Seoul, Korea. pp. 267-276.

요 약

우리나라는 국토의 70% 이상이 산지로 되어 있다. 연평균 강우량은 1,200mm이고 절반이상이 우기인 7월에서 9월에 집중되고 있다. 국내에서 발생하는 대부분의 산사태도 이 우기에 강우로 인하여 발생된다.

황령산 산사태의 원인 분석을 하기 위하여 야외조사 및 시험, 시추, 실내시험, 항공사진판독, X-선 회절분석을 하였다. 그 결과를 바탕으로 평사투영법 및 한계평형해석법을 실시하였다.

황령산지역은 화학적 풍화에 매우 약한 퇴적암상을 가지며, 풍화에 따라 매우 다른 공학적 성질을 나타내었다. 이 지역에는 3개조의 대표적 절리군은 발달하고 있고 이들 절리들은 신장절리인 것으로 확인되었다.

항공사진 분석결과는 황령산 산사태는 1년 전부터 진행되었음을 보여주며, 파괴 원인 분석결과 황령산 산사태는 강우로 인해 간극수압이 증가되어 녹니석과 일라이트로 이루어진 점토층을 따라 평면파괴의 형태로 발생한 것이다. 이러한 원인 분석결과와 암석의 물성치 자료를 바탕으로 SLOPE/W로 한계평형해석을 실시하여 보강사면의 구배가 1:2.0이 되었을 때 충분한 안정성을 가졌다.

복구공사가 완료된 직후, 사면의 안정성 여부를 판단하기 위해 유지관리 계측이 실시되었다. 유지관리계측을 위하여 경사계 4개소, 간극수압계 3개소, 하중계 4개소를 설치하여 자동계측을 실시하였으며, 강우의 양을 측정하기 위해 우량계 1개소를 설치하여 수동으로 계측하였다. 설치 후 1년간 실시된 유지관리계측 결과 안정된 상태를 보였다. 특히, 이와 같이 상당한 강우로 발생하는 산사태 지역에서 자동화 시스템을 이용한 유지관리계측은 간극수압의 급격한 변화와 사면의 변형을 인지하는데 유용하였다.

부 록

Data of schmidt hammer test
The result of the test boring
The result of the laboratory experiment

Date		10/1		Survey Location										황령산 파과사면				Pukyong National University		3 of 8
No	Rock Type	IA	Schmidt Hammer Rebound Values										R	ΔR	R_0	AUCS	Remarks			
3	풍화암	-45	26	18	30	29	54	48	54	54	52	52	52						11m, Shear (10-8) . Massive 하부 1.5m, 상부 30cm 상부 소멸	
			40	56	42	42	40	56	51	53	54	50								
4	Shear zone	0	12	20	35	10	10	10	26	12	12	15							10-7~10-8:3m, Shear zone . 사면 처음부터 여 가까지의 사면 방향 N70W. 다음 Shear zone 바로 옆 사면 쪽에는 부분의 사면 방향 NS	
			15	18	15	12	10	14	10	10	15	17								
5	Gray silt stone	0	54	58	51	54	63	54	54	56	38	48							Shear zone의 우측 2m	
			53	51	58	48	43	48	30	57	59	54								
6	Gray silt stone	0	50	41	32	37	42	43	44	40	53	55							10-9 ~ 10-10: 10m 지하수 유출	
			38	40	44	42	33	37	51	43	42	60								
7	풍화대	0	50	56	48	59	40	42	40	47	47	56							10-10의 상부 1m 풍화대	
			53	41	51	56	54	53	20	19	30	35								
8	풍화대	0	10	13	11	14	14	13	13	10	10	10							10-10 ~ 10-12:11m	
			16	16	20	18	20	12	10	10	10	10								
9		0	34	40	33	12	55	51	29	63	57	60							Gray silt stone	
			55	60	58	64	61	60	30	34	42	54								
10	풍화대	-45	26	20	24	26	18	20	10	10	10	20							10-13 ~ 10-14:14m	
			28	14	26	10	10	10	16	10	24									
11	풍화암	0	33	40	60	58	61	54	43	58	58	63							Gray silt stone	
			64	48	31	63	60	48	52	48	50	42								
																		73m 도로 끝		
IA : Impact angle												R : Averged Rebound Values								
AUCS : Assumed Uniaxial Compressive Strength												ΔR : Corrected Rebound Values								
												R_0 : Reference Rebound Values(R+ ΔR)								

Date		Survey Location										황령산 파괴사면				Pukyong National University		4 of 8	
No	Rock Type	IA	Schmidt Hammer Rebound Values										R	ΔR	R_0	AUCS	Remarks		
12	풍화토	0	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10					펜스 끝 10m 직이는 부분 ~ 2-1:3m N50W, N85W(동북방향, 풍화 심함, 동벽부분 바깥은 부분에서 3m지점
			100이하																
13	풍화토	0	18	14	16	12	16	16	10	10	10	10	10	10					2-1~2-2: 10m
			15	18	16	17	20	19	14	17	15	14							
14	풍화토	0	11	10	10	10	10	14	14	10	10	10	10	10					2-2~: 5m 펜스 방향 변함, N48W(동북 방향)
			10	12	10	10	10	10	17	16	16	11							
15	풍화토	0	12	10	12	10	11	11	10	10	10	10	10	12					2-3~2-4: 11m 펜스방향 변함 N12W (동북 방향)
			12	10	11	17	11	11	10	10	10	14							
16	풍화토	0	22	20	17	16	16	20	20	20	20	14	12	12					2-4~2-5: 20m, 풍화토 구간 펜스방향 변함 동북방향 N82W
			16	14	10	18	18	14	16	15	12	16							
17	녹회색 이암	0	64	55	62	41	46	65	50	54	66	48	48					2-5~2-6: 10m	
			66	63	50	50	40	46	64	62	60	50							
18	양회색 이암	0	32	48	22	49	38	22	29	52	44	38	38					2-6~2-7: 19m	
			28	24	42	52	32	32	35	20	30	24							
19	풍화암	0	15	15	14	22	16	22	30	18	16	20	20					2-7 지점의 우측 50cm, 풍화대	
			20	17	10	18	18	18	17	15	19	17							
20	양회색 이암	0	64	62	65	63	62	62	59	50	62	52	52					2-7~2-9: 12m 풍화대	
			60	52	60	54	54	59	58	58	58	56							
IA : Impact angle			R : Averaged Rebound Values										R : Averaged Rebound Values						
AUCS : Assumed Uniaxial Compressive Strength			ΔR : Corrected Rebound Values										ΔR : Corrected Rebound Values						
			R_0 : Reference Rebound Values(R+ ΔR)										R_0 : Reference Rebound Values(R+ ΔR)						

Date		10/3		Survey Location										황령산 파괴시험				Pukyong National University		8 of 8
No	Rock Type	IA	Schmidt Hammer Rebound Values										R	ΔR	R_0	AUCS	Remarks			
39	풍화암	0	22	27	23	22	18	10	20	30	24	20					사면 끝 5m 균열 없음			
			18	22	22	25	17	17	22	16	26									
40	풍화암	0	13	15	35	28	28	34	32	18	29	23					3-1~3-2 : 6m			
			28	17	33	42	36	33	44	43	44	40								
41	풍화암	0	12	10	10	15	10	12	10	10	10	10					3-2~3-3 : 4m			
			18	18	18	18	20	24	22	24	28	20								
42	풍화암	0	27	32	32	31	35	25	24	33	34	30					3-3~3-4 : 3m			
			32	34	20	12	10	30	17	20	38	34								
43	풍화암	0	52	40	40	50	32	34	34	40	43	30					3-4지점 우측			
			38	40	36	34	46	37	28	44	42	37								
44	풍화암	0	26	17	10	38	41	40	40	28	36	38					3-4~4-6 : 10m 균열 없음			
			41	37	40	29	30	36	45	40	34	30								
45	풍화암	0	10	10	10	12	12	10	10	20	21	18								
			28	17	24	31	27	24	31	22	24	22								
46	풍화암	0	10	10	10	10	10	10	10	14	30	10					3-7의 하부 0.5m 3-7과 비교하여 3-80이 심하게 풍화된 지 역(서로 비교하기 위함)			
			17	16	18	19	10	11	18	10	16	10								
																3-8~ 사면 끝: 5m				
IA : Impact angle												R : Averaged Rebound Values								
AUCS : Assumed Uniaxial Compressive Strength												ΔR : Corrected Rebound Values								
												R_0 : Reference Rebound Values($R+\Delta R$)								

1. 야외 조사 결과

1.1. 시추조사

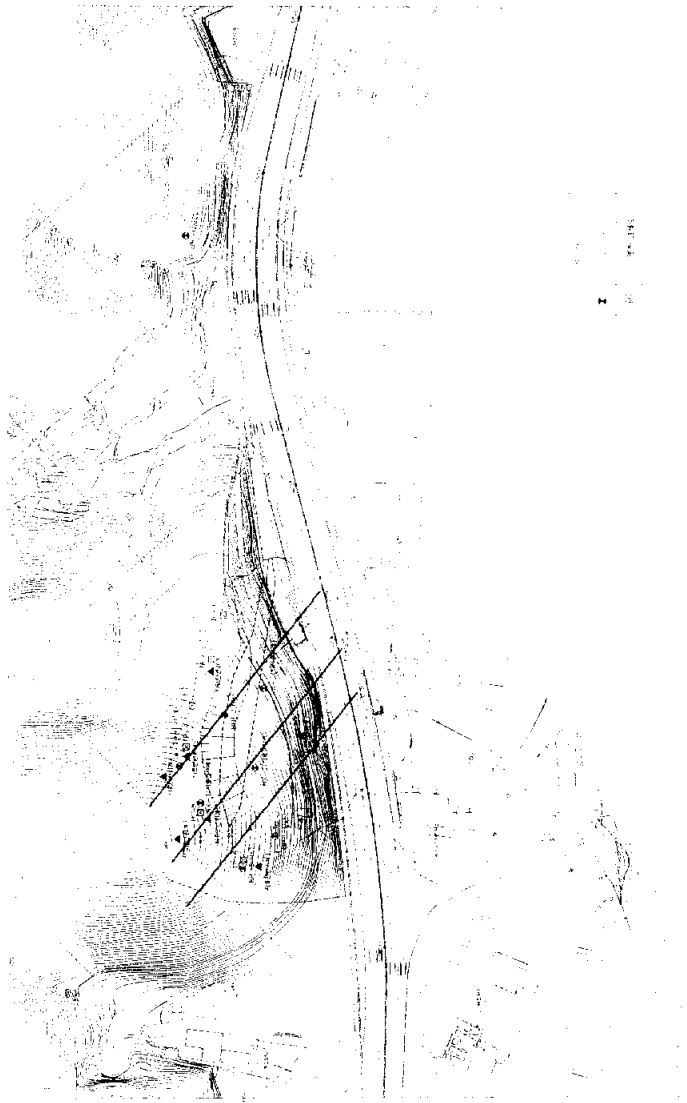


그림 1. 황령산 산사태 발생지역 시추조사 위치도

● 종단면 1(NX-1~NX-2)

1) 매립층

- 현 지표면을 형성하고 있는 본층은 NX-2번에 해당하는 지점에서 나타나며, 점토, 모래, 자갈, 암괴등으로 산사태 발생후 파괴면을 메운 성토 매립층으로 판단된다.
- 지층의 두께는 8.2m로 분포하며, 지층의 색조는 황갈색을 띤다.
- 지반조사시 병행한 표준관입시험결과 N값은 23/30~50/12회로 자갈, 암괴 및 호박돌등의 함유에 기인하여 결과값이 다소 불규칙하게 나타난다.

2) 붕적토층

-자갈질 점토층

- 조사공 NX-1번에서만 확인된 본 층은 자갈섞인 점토층으로 나타난다.
- 지층의 두께는 3.8m로 분포하며, 지층의 색조는 황갈색을 띤다.
- 지반조사시 병행한 표준관입시험결과 N값은 22/30~39/30회로 나타난다.

3) 풍화대(풍화토 및 풍화암층)

- 본 층은 조사공 NX-1번에서만 분포하고, 그 구분을 N값(50/30~50/16 : 풍화토 50/15이하 : 풍화암), 굴진속도 및 슬라임(Slime)상태 색조에 의하였다.
- 상부 풍화토층은 모래섞인 점토질 또는 점토질화 양상을 보이며, 지층의 두께는 1.7m로 분포한다. 색조는 황갈색으로 기반암의 광물성분 및 풍화양상의 차이에 따라 다양한 색조로 나타나고, 특징적으로 지형적 요인 및 풍화양상에 따라 지층의 분포두께가 다소의 차이를

보이며 나타난다. 풍화토층내에 지층의 연경도가 교호하여 나타나고, 풍화토층내에서는 전 조사지점에서 덜 풍화된 잔류암편 및 암괴가 분포하며, 코아로 회수되는 지점이 있다.

- 표준관입시험결과 N값은 50/30회로 조사지점, 심도 및 풍화정도에 따라 다소의 차이를 보인다.
- 하부 풍화암층의 지층 두께는 0.5m로 분포한다.
- 표준관입시험결과 N값은 상부에서 이미 50회를 초과하는 치밀 견고한 상태로 나타난다. 또한 본 층내에 분포하는 덜 풍화된 잔류암편 및 암괴가 코아로도 회수되기도 한다.

4) 기반암층(경암층)

- 본 조사지역의 기반암인 본층은 지질조사 표준품셈에 기준하여 분류하는 것을 원칙으로 하였으며, CR, RQD등도 고려하였다. 분포심도는 G.L -6.0 ~ -8.2m(EL.+52.17 ~ +77.42m)이후에서 분포하는 것으로 확인된다.
- 본 층의 코아 회수율(C.R) 및 암질비(R.Q.D.), 절리간격(Joint Spacing), 풍화정도(Weathering Grade) 및 불연속면 상태등은 다음과 같으며, 그림 2는 조사결과 암반내 녹색이암 및 점토 충전물이 협재된 선을 임의로 추정한 단면도이다.

(1) 코아회수율(C.R:Core Recovery) 및 암질비(R.Q.D : Rock Quality Designation)

- 코아 회수율은 그림 8의 심도에 따른 CR 및 RQD 관계(중단면 1)에 의하면 절리 및 파쇄대가 발달된 구간(NX-1:17.0~18.5, 29.0~30.0m, NX-2:8.2~11.0, 15.5~16.2, 21.3~22.0m)을 제

외하면 대부분을 70%이상을 나타낸다.

- 암질비는 그림 8의 심도에 따른 CR 및 RQD 관계(종단면 1)에서 NX-1:27.5~29.0, 30.0~31.0m NX-2:21.3~22.0m지점을 제외하면 대부분 50%이하의 불량(Poor Rock Quality)~매우 불량한(Very Poor Rock Quality)암질을 나타낸다.
- 특히 NX-2번 지점의 상부에서는 암질비가 0%값을 나타낸다.

(2) 암반의 제성질 (풍화정도, 절리간격, 거칠기)

- 풍화정도는 대부분 신선한(Fresh)상태로 산출되어지나, 암반에 발달한 불연속면은 지하수 유입에 의한 광물성분의 산화작용, 점토질 협재등으로 풍화가 다소 발달되어 있다.
- 절리간격은 전반적으로 조밀함(Close Spacing : 60 ~ 200mm)으로 나타난다. 특히, 파쇄대가 발달한 지점(NX-1:12.0~20.0, 24.5~26.0, 34.0~35.5m, NX-2:8.2~13.5m)에서는 매우 조밀함(Very Close Spacing:20 ~ 60mm)으로 나타난다. 따라서 본 조사지역에서는 전반적으로 조밀함 이하의 절리간격을 보이고 있다.
- 불연속면은 침투수의 유입으로 광물성분의 산화, 점토 충전물 협재, 특히 녹색이암으로 판단되는 암층이 풍화발달하여, 점토질화로 진행중인 것으로 관찰되어진다.

● 종단면 2(BH-5~BH-4)

1) 매립층

- 현 지표면을 형성하고 있는 본 층은 BH-4번에 해당하는 지점에서 나타나며, 점토, 모래, 자갈, 암괴 등으로 산사태 발생후 파괴면을 메운 성토 매립층으로 판단된다.
- 지층의 두께는 0.5m로 분포하며, 지층의 색조는 황갈색을 띤다.
- 지층이 소폭인 관계로 표준관입시험은 불가하였다.

2) 붕적토층

-자갈질 점토층

- 조사공 BH-5번에서만 확인된 본 층은 자갈섞인 점토층으로 나타난다.
- 지층의 두께는 2.0m로 분포하며, 지층의 색조는 황갈색을 띤다.
- 지반조사시 병행한 표준관입시험결과 N값은 10/30회로 나타난다.

3) 기반암층(경암층)

- 본 조사지역의 기반암인 본층은 지질조사 표준품셈에 기준하여 분류하는 것을 원칙으로 하였으며, CR, RQD등도 고려하였다. 분포심도는 G.L -0.5 ~ -2.0m(EL.+64.20 ~ +74.20m)이후에서 분포하는 것으로 확인된다.
- 본 층의 코아 회수율(C.R) 및 암질비(R.Q.D.), 절리간격(Joint Spacing), 풍화정도(Weathering Grade) 및 불연속면 상태등은 다음과 같으며, 그림 3은 조사결과 암반내 녹색이암 및 점토 충전물이 협재된 선을 임의로 추정된 단면도이다.

(1) 코아회수율(C.R:Core Recovery) 및 암질비(R.Q.D : Rock Quality

Designation)

- 코아회수율은 그림 9의 심도에 따른 CR 및 RQD 관계(종단면 2)에 의하면 절리 및 파쇄대가 발달된 구간(BH-4:0.5~2.0, 2.7~9.0 (5.5~7.5m:토사층), BH-5:2.0~3.5, 9.5~11.0, 18.5~20.0m)을 제외하면 대부분을 70% 이상을 나타낸다.
- 암질비는 그림 9의 심도에 따른 CR 및 RQD 관계(종단면 2)에서 전 구간 35% 이하의 불량(Poor Rock Quality)~매우 불량한(Very Poor Rock Quality) 암질을 나타낸다

(2) 암반의 제성질 (풍화정도, 절리간격, 거칠기)

- 풍화정도는 대부분 신선한(Fresh)상태로 산출되어지나, 암반에 발달한 불연속면은 지하수 유입에 의한 광물성분의 산화작용, 점토질 협재 등으로 풍화가 다소 발달되어 있다.
- 절리간격은 전반적으로 매우 조밀함(Very Close Spacing:20~60mm)~조밀함(Close Spacing:60~200mm)으로 나타난다. 특히, 파쇄대가 발달한 지점(BH-4:0.5~9.0, 13.0~13.5, 17.3~21.0, BH-5:2.0~5.0, 8.0~14.0, 15.5~21.5, 23.0~24.5m)에서는 매우 조밀함(Very Close Spacing:20~60mm)으로 나타난다. 따라서 본 조사지역에서는 전반적으로 조밀함 이하의 절리간격을 보이고 있다.
- 불연속면은 침투수의 유입으로 광물성분의 산화, 점토 충전물 협재, 특히 녹색이암으로 판단되는 암층이 풍화발달하여, 점토질화로 진행 중인 것으로 관찰되어진다.

● 종단면 3(GW-1~BH-2~GW-2)

(1) 매립층

- 현 지표면을 형성하고 있는 본층은 BH-2, GW-2번에 해당하는 지점에서 나타나며, 점토, 모래, 자갈, 암괴등으로 산사태 발생후 파괴면을 메운 성토 매립층으로 판단된다.
- 지층의 두께는 9.0~12.0m로 분포하며, 지층의 색조는 황갈색을 띤다.
- 지반조사시 병행한 표준관입시험결과 N값은 3/30~50/2회로 자갈, 암괴 및 호박돌등의 함유에 기인하여 결과값이 다소 불규칙하게 나타난다.
- 시추작업이 진행되는 동안 시추용수의 누수현상이 현저히 나타나며, 굴진로트가 자유낙하되는 지점이 나타나는 지하 공동부분(두께:5~10cm)도 확인할 수가 있었다.

(2) 풍화대(풍화토 및 풍화암층)

- 본 층의 구분은 전과 동일하다.
- 본 층은 그 구분을 N값(50/30~50/16 : 풍화토 50/15이하 : 풍화암), 굴진속도 및 슬라임(Slime)상태 색조에 의하였다.
- 상부 풍화토층은 GW-1지점에서만 분포하며, 모래석인 점토질 또는 점토질화 양상을 보이며, 지층의 두께는 3.0m로 분포한다. 색조는 황갈색으로 기반암의 광물성분 및 풍화양상의 차이에 따라 다양한 색조로 나타나고, 특징적으로 지형적 요인 및 풍화양상에 따라 지층의 분포두께가 다소의 차이를 보이며 나타난다. 풍화토층내에 지층의 연경도가 교호하여 나타나고, 풍화토층내에서는 전 조사지점에서 덜 풍화된 잔류암편 및 암괴가 분포하며, 코아로 회수되는 지점이 있다.

- 표준관입시험결과 N값은 37/30회로 조사지점, 심도 및 풍화정도에 따라 다소의 차이를 보인다.
- 하부 풍화암층은 GW-1지점에서 확인되었으며, 지층의 두께는 2.8m로 분포한다.
- 표준관입시험결과 N값은 상부에서 이미 50회를 초과하는 치밀 견고한 상태로 나타난다. 또한 본 층내에 분포하는 덜 풍화된 잔류암편 및 암괴가 코아로도 회수되기도 한다.

(3) 기반암층(경암층)

- 본 조사지역의 기반암인 본층은 지질조사 표준품셈에 기준하여 분류하는 것을 원칙으로 하였으며, CR, RQD등도 고려하였다. 분포심도는 G.L -5.8 ~ -12.0m(EL.+40.97 ~ +76.05m)이후에서 분포하는 것으로 확인된다.
- 본 층의 코아 회수율(C.R) 및 암질비(R.Q.D.), 절리간격(Joint Spacing), 풍화정도(Weathering Grade) 및 불연속면 상태등은 다음과 같으며, 그림 4는 조사결과 양반내 녹색이암 및 점토 충전물이 협재된 선을 임의로 추정된 단면도이다.

(1) 코아회수율(C.R:Core Recovery) 및 암질비(R.Q.D : Rock Quality Designation)

- 코아회수율은 그림 10의 심도에 따른 CR 및 RQD관계(종단면 3)에서 절리 및 파쇄대가 발달된 구간(BH-2:12.0~14.0, 16.0~18.0, GW-2:9.0~12.0, 13.5~15.0m)을 제외하면 대부분을 70% 이상을 나타낸다.
- 암질비는 그림 10의 심도에 따른 CR 및 RQD 관계(종단면 3)에서는

BH-2:18.0~19.5, GW-1:5.8~6.8, 8.1~9.6, 17.7~19.2, 24.1~25.5, 29.8~31.3m 지점을 제외하면 대부분 50% 이하의 불량(Poor Rock Quality)~매우 불량한(Very Poor Rock Quality) 암질을 나타낸다.

(2) 암반의 제성질 (풍화정도, 절리간격, 거칠기)

- 풍화정도는 대부분 신선한(Fresh)상태로 산출되어지나, 암반에 발달한 불연속면은 지하수 유입에 의한 광물성분의 산화작용, 점토질 협재등으로 풍화가 다소 발달되어 있다.
- 절리간격은 전반적으로 조밀함(Close Spacing:60~200mm)으로 나타난다. 특히, 파쇄대가 발달한 지점(BH-2:12.0~14.0, 16.0~ 18.0m, GW-1:9.6~2.5, 14.7~17.7, 19.2~20.0, 22.7~24.1, 25.5~27.0, 28.5~29.8m, GW-2:9.0~15.0m)에서는 매우 조밀함(Very Close Spacing:20~60mm)으로 나타난다. 따라서 본 조사지역에서는 전반적으로 조밀함 이하의 절리간격을 보이고 있다.
- 불연속면은 침투수의 유입으로 광물성분의 산화, 점토 충전물 협재, 특히 녹색어암으로 판단되는 암층이 풍화발달하여, 점토질화로 진행중인 것으로 관찰되어진다.

● 횡단면 1(BH-5~NX-1~GW-1)

(1) 붕적토층

- 자갈질 점토층

- 조사공 BH-5, NX-1번에서만 확인된 본 층은 자갈섞인 점토층으로 나타난다.
- 지층의 두께는 2.0~3.8m로 분포하며, 지층의 색조는 황갈색을 띤다.
- 지반조사시 병행한 표준관입시험결과 N값은 10/30~39/30회로 나타난다.

(2) 풍화대(풍화토 및 풍화암층)

- 본 층의 구분은 전과 동일하다.
- 상부 풍화토층은 GW-1, NX-1지점에서만 확인되어지며, 모래섞인 점토질 또는 점토질화 양상을 보이며, 지층의 두께는 1.7~3.0m로 분포한다. 색조는 황갈색으로 기반암의 광물성분 및 풍화양상의 차이에 따라 다양한 색조로 나타나고, 특징적으로 지형적 요인 및 풍화양상에 따라 지층의 분포두께가 다소의 차이를 보이며 나타난다. 풍화토층 내에 지층의 연경도가 교호하여 나타나고, 풍화토층내에서는 전 조사지점에서 덜 풍화된 잔류암편 및 암괴가 분포하며, 코아로 회수되는 지점이 있다.
- 표준관입시험결과 N값은 37/30~50/30회로 조사지점, 심도 및 풍화 정도에 따라 다소의 차이를 보인다.
- 하부 풍화암층은 GW-1, NX-1지점에서 확인되었으며, 지층의 두께는 0.5~2.8m로 분포한다.
- 표준관입시험결과 N값은 상부에서 이미 50회를 초과하는 치밀 견고한 상태로 나타난다. 또한 본 층내에 분포하는 덜 풍화된 잔류암편

및 암괴가 코아로도 회수되기도 한다.

(3) 기반암층(경암층)

- 본 조사지역의 기반암인 본층은 지질조사 표준품셈에 기준하여 분류하는 것을 원칙으로 하였으며, CR, RQD등도 고려하였다. 분포심도는 G.L -2.0 ~ -6.0m(EL.+74.20 ~ +77.42m)이후에서 분포하는 것으로 확인된다.
- 본 층의 코아 회수율(C.R) 및 암질비(R.Q.D.), 절리간격(Joint Spacing), 풍화정도(Weathering Grade) 및 불연속면 상태등은 다음과 같으며, 그림 5는 조사결과 암반내 녹색이암 및 점토 충전물이 협재된 선을 임의로 추정한 단면도이다.

(1) 코아회수율(C.R:Core Recovery) 및 암질비(R.Q.D : Rock Quality Designation)

- 코아회수율은 그림 11의 심도에 따른 CR 및 RQD 관계(횡단면 1)에서 절리 및 파쇄대가 발달된 구간(BH-5:2.0~3.5, 9.5~11.0, 18.5~20.0m, NX-1:17.0~18.5, 29.0~30.0m)을 제외하면 대부분을 70% 이상을 나타낸다.
- 암질비는 그림 11의 심도에 따른 CR 및 RQD관계(횡단면 1)에서 NX-1:27.5~29.0, 30.0~31.0m GW-1:5.8~6.8, 8.1~9.6, 17.7~19.2, 24.1~25.5, 29.8~31.3m지점을 제외하면 대부분 50% 이하의 불량(Poor Rock Quality)~매우 불량한(Very Poor Rock Quality) 암질을 나타낸다.

(2) 암반의 제성질 (풍화정도, 절리간격, 거칠기)

- 풍화정도는 대부분 신선한(Fresh)상태로 산출되어지나, 암반에 발달한 불연속면은 지하수 유입에 의한 광물성분의 산화작용, 점토질 협재등으로 풍화가 다소 발달되어 있다.
- 절리간격은 전반적으로 조밀함(Close Spacing:60~200mm)으로 나타난다. 특히, 파쇄대가 발달한 지점(NX-1:12.0~20.0, 24.5~26.0, 34.0~35.5m, BH-5:2.0~3.5, 9.5~11.0, 18.5~20.0m, GW-1:9.6~12.5, 14.7~17.7, 19.2~20.0, 22.7~24.1, 25.5~27.0, 28.5~29.8m)에서는 매우 조밀함(Very Close Spacing:20~60mm)으로 나타난다. 따라서 본 조사지역에서는 전반적으로 조밀함 이하의 절리간격을 보이고 있다.
- 불연속면은 침투수의 유입으로 광물성분의 산화, 점토 충전물 협재, 특히 녹색이암으로 판단되는 암층이 풍화발달하여, 점토질화로 진행중인 것으로 관찰되어진다.

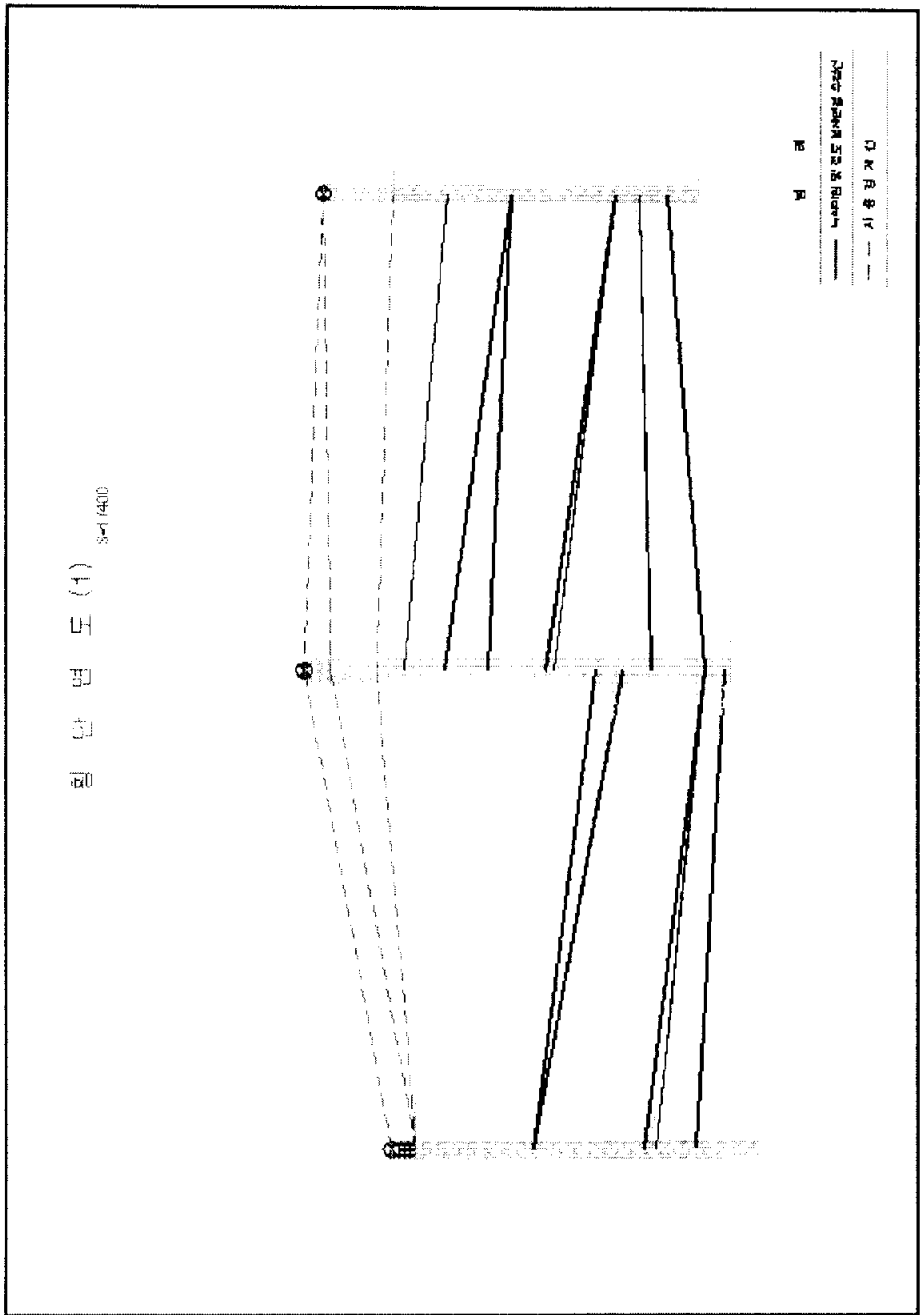


그림 5. 횡단면 1(BH-5~NX-1~GW-1)

● 횡단면 2(BH-4~NX-2~GW-2)

1) 매립층

- 현 지표면을 형성하고 있는 본 층은 횡단면 2에 해당하는 전 조사지점(BH-4, GW-2, NX-2)에서 나타나며, 점토, 모래, 자갈, 암괴등으로 산사태 발생후 파괴면을 메운 성토 매립층으로 판단된다.
- 지층의 두께는 0.5~9.0m로 분포하며, 지층의 색조는 황갈색을 띤다.
- 지반조사시 병행한 표준관입시험결과 N값은 3/30~50/5회로 자갈, 암괴 및 호박돌등의 함유에 기인하여 결과값이 다소 불규칙하게 나타난다.

2) 기반암층

- 본 조사지역의 기반암인 본 층은 지질조사 표준품셈에 기준하여 분류하는 것을 원칙으로 하였으며, CR, RQD등도 고려하였다. 분포심도는 G.L -0.5 ~ -9.0m(EL.+40.97 ~ +64.20m)이후에서 분포하는 것으로 확인된다.
- 본 층의 코아 회수율(C.R) 및 암질비(R.Q.D.), 절리간격(Joint Spacing), 풍화정도(Weathering Grade) 및 불연속면 상태등은 다음과 같으며, 그림 6은 조사결과 암반내 녹색이암 및 점토 충전물이 함유된 선을 임의로 추정하 단면도이다.

(1) 코아회수율(C.R:Core Recovery) 및 암질비(R.Q.D : Rock Quality Designation)

- 코아회수율은 그림 12의 심도에 따른 CR 및 RQD 관계(횡단면 2)에서 절리 및 파쇄대가 발달된 구간(BH-4:0.5~2.0, 2.7~9.0(5.5~ 7.5m :토사층), GW-2:9.0~12.0, 13.5~15.0m, NX-2:8.2 ~11.0, 15.5~16.2, 21.3~22.0m)을 제외하면 대부분을 70% 이상을 나타낸다.

- 암질비는 그림 12의 심도에 따른 CR 및 RQD 관계(횡단면 2)에서 NX-2:21.3~22.0m 지점을 제외하면 대부분 50% 이하의 불량(Poor Rock Quality)~매우 불량한(Very Poor Rock Quality) 암질을 나타낸다.
- 특히 NX-2번 지점의 상부에서는 암질비가 0% 값을 나타낸다.

(2) 암반의 재성질 (풍화정도, 절리간격, 거칠기)

- 풍화정도는 대부분 신선한(Fresh)상태로 산출되어지나, 암반에 발달한 불연속면은 지하수 유입에 의한 광물성분의 산화작용, 점토질 협재등으로 풍화가 다소 발달되어 있다.
- 절리간격은 전반적으로 조밀함(Close Spacing:60~200mm)으로 나타난다. 특히, 파쇄대가 발달한 지점(GW-2:9.0~15.0m, 34.0~35.5m, BH-4:0.5~9.0, 13.0~13.5, 17.3~21.0, NX-2:8.2~13.5m)에서는 매우 조밀함(Very Close Spacing:20~60mm)으로 나타난다. 따라서 본 조사지역에서는 전반적으로 조밀함 이하의 절리간격을 보이고 있다.
- 불연속면은 침투수의 유입으로 광물성분의 산화, 점토 충전물 협재, 특히 녹색이암으로 판단되는 암층이 풍화발달하여, 점토질화로 진행 중인 것으로 관찰되어진다.

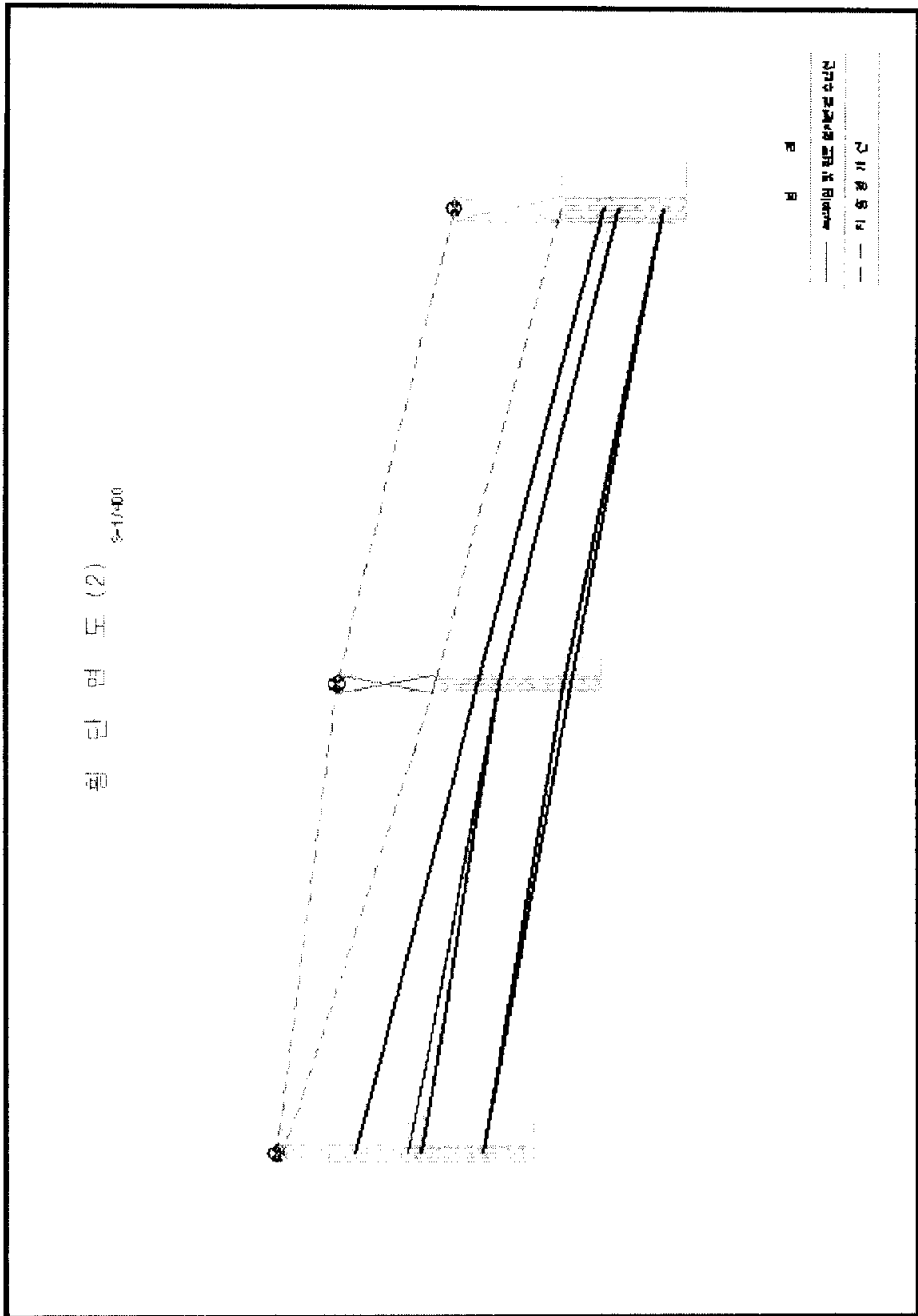


그림 6. 횡단면 2(BH-4~NX-2~GW-2)

● 향후 사면대책구간 (BH-1)

1) 붕적토층

-자갈질 점토층

- 본 층은 자갈섞인 점토층으로 나타난다.
- 지층의 두께는 3.8m로 분포하며, 지층의 색조는 황갈색을 띤다.
- 지반조사시 병행한 표준관입시험결과 N값은 8/30~10/30회로 나타난다.

2) 풍화대(풍화토 및 풍화암층)

- 본 층의 구분은 전과 동일하다.
- 상부 풍화토층은 모래섞인 점토질 또는 점토질화 양상을 보이며, 지층의 두께는 2.2m로 분포한다. 색조는 황갈색으로 기반암의 광물성분 및 풍화양상의 차이에 따라 다양한 색조로 나타난다.
- 표준관입시험결과 N값은 23/30회로 나타난다.
- 하부 풍화암층의 지층 두께는 1.6m로 분포한다.
- 표준관입시험결과 N값은 상부에서 이미 50회를 초과하는 치밀 견고한 상태로 나타난다.

3) 기반암층(경암층)

- 본 조사지역의 기반암인 본층은 지질조사 표준품셈에 기준하여 분류하는 것을 원칙으로 하였으며, CR, RQD등도 고려하였다. 분포심도는 G.L -7.6m(EL.+32.0m)이후에서 분포하는 것으로 확인된다.
- 본 층의 코아 회수율(C.R) 및 암질비(R.Q.D.), 절리간격(Joint Spacing), 풍화정도(Weathering Grade) 및 불연속면 상태등은 다음과 같다.

(1) 코아회수율(C.R:Core Recovery) 및 암질비(R.Q.D : Rock Quality

Designation)

- 코아회수율은 그림 13의 심도에 따른 CR 및 RQD 관계(향후 사면대책구간)]에서는 전 구간:BH-1)에서 대부분 70% 이상을 나타낸다.
- 암질비는 그림 13의 심도에 따른 CR 및 RQD 관계(향후 사면대책구간:BH-1)에서 전 구간에서 30% 이하의 불량(Poor Rock Quality)~매우 불량한(Very Poor Rock Quality) 암질을 나타낸다.

(2) 암반의 제성질 (풍화정도, 절리간격, 거칠기)

- 풍화정도는 대부분 신선한(Fresh)상태로 산출되어지나, 암반에 발달한 불연속면은 지하수 유입에 의한 광물성분의 산화작용, 점토질 협재등으로 풍화가 다소 발달되어 있다.
- 절리간격은 전반적으로 매우 조밀함(Very Close Spacing:20~ 60mm)으로 나타난다.
- 불연속면은 침투수의 유입으로 광물성분의 산화, 점토 충전물 협재, 특히 녹색이암으로 판단되는 암층이 풍화발달하여, 점토질화로 진행중인 것으로 관찰되어진다.

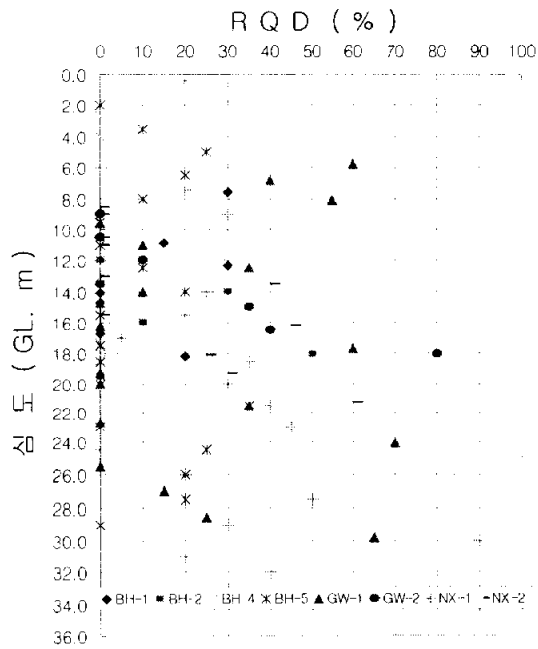
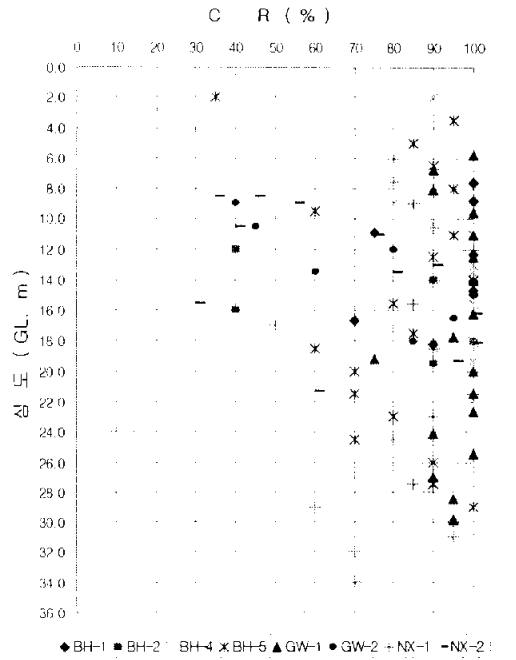


그림 7. 심도에 따른 CR 및 RQD 관계(총괄)

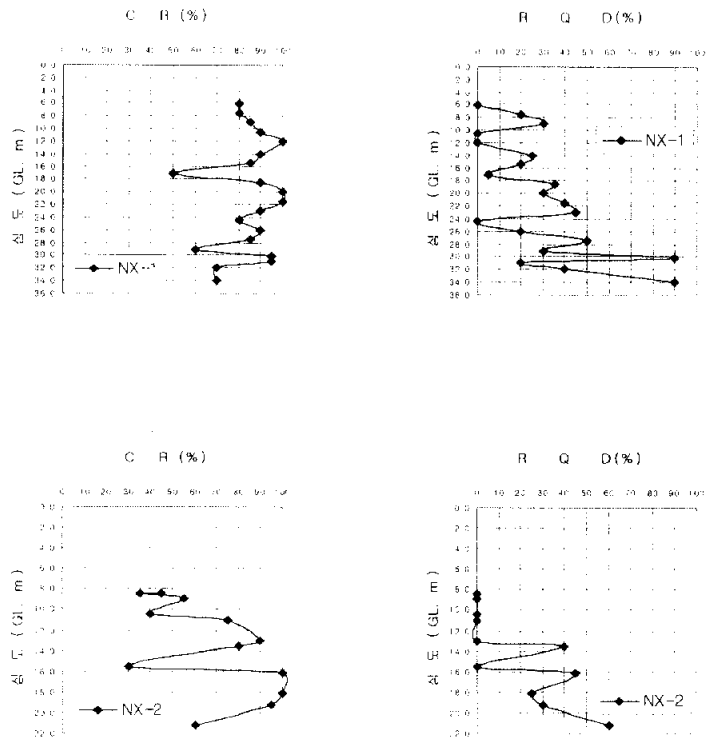


그림 8. 심도에 따른 CR(%) 및 RQD(%) 관계(중단면 1)

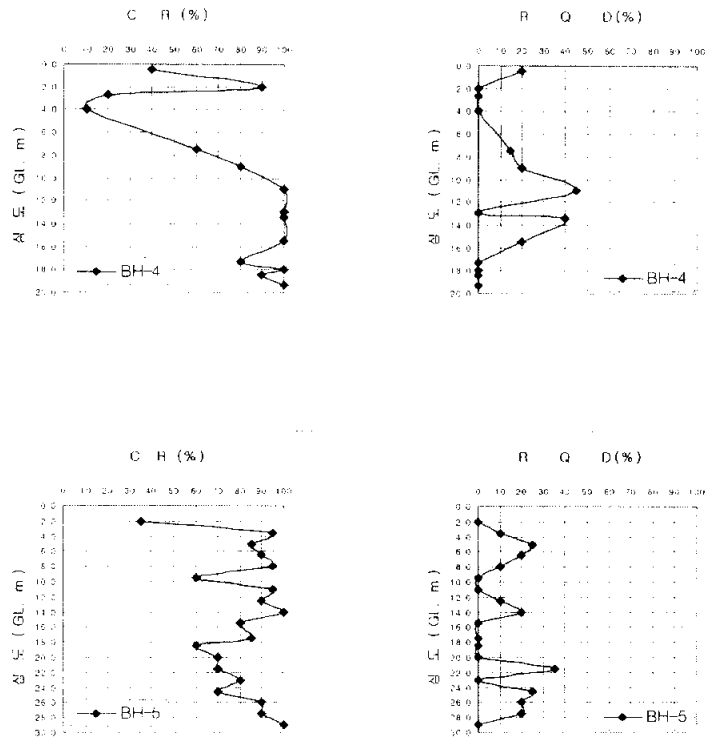


그림 9. 심도에 따른 CR(%) 및 RQD(%) 관계(종단면 2)

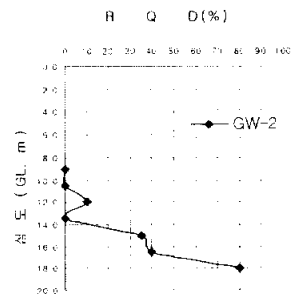
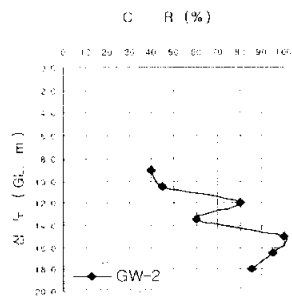
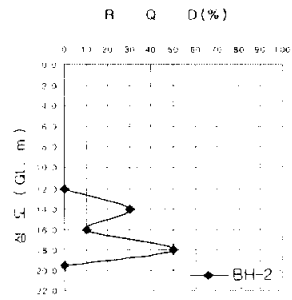
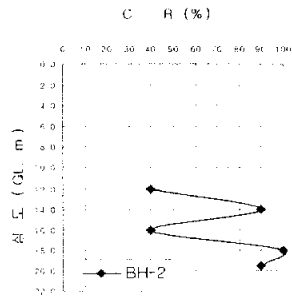
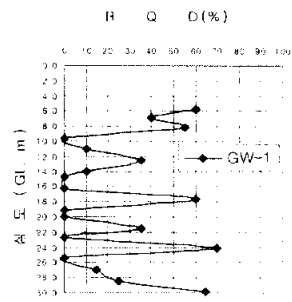
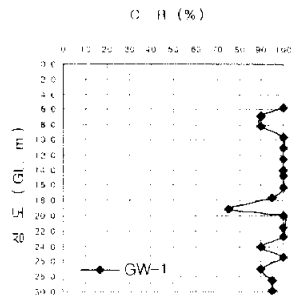


그림 10. 심도에 따른 CR(%) 및 RQD(%) 관계(종단면 3)

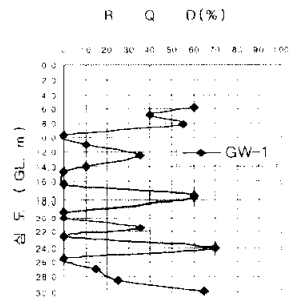
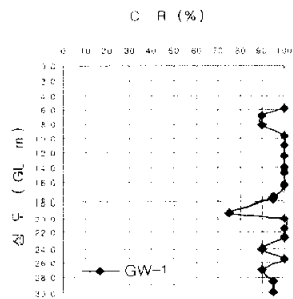
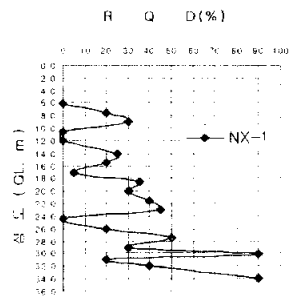
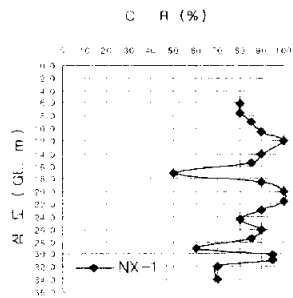
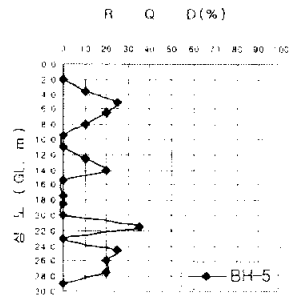
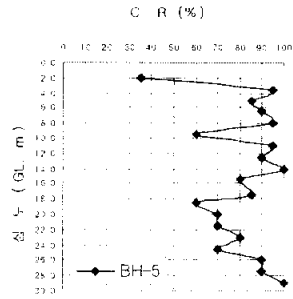


그림 11. 심도에 따른 CR(%) 및 RQD(%) 관계(횡단면 1)

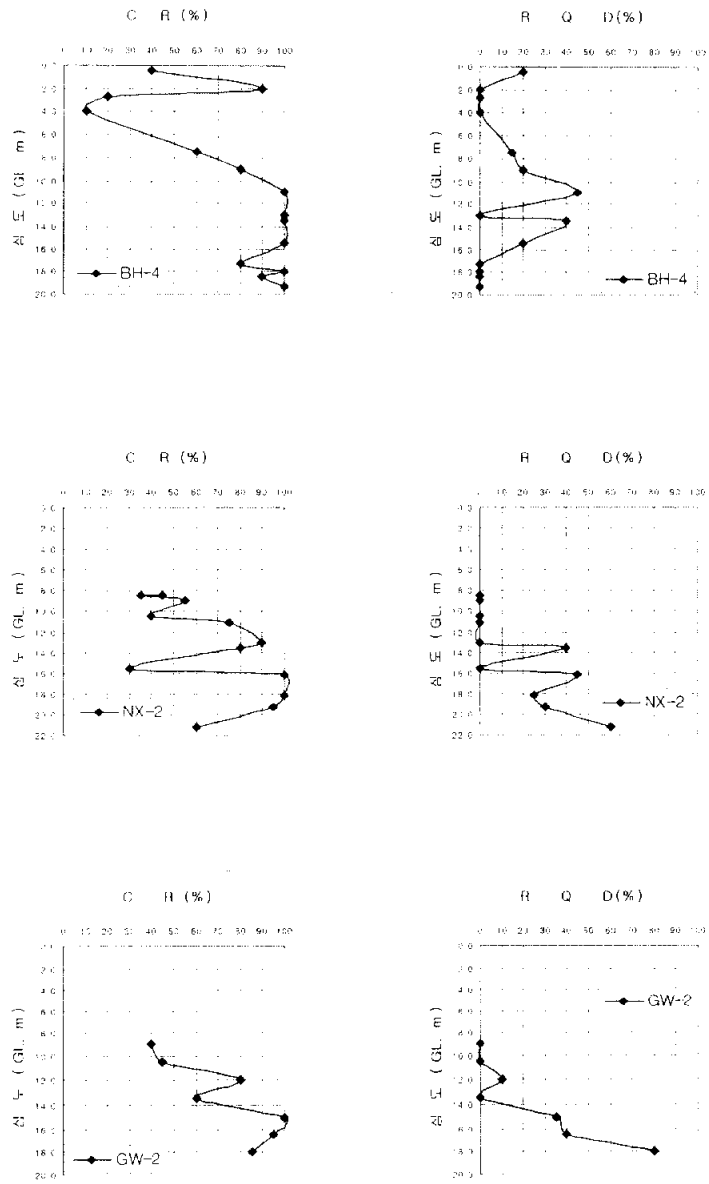


그림 12. 심도에 따른 CR(%) 및 RQD(%) 관계(횡단면 2)

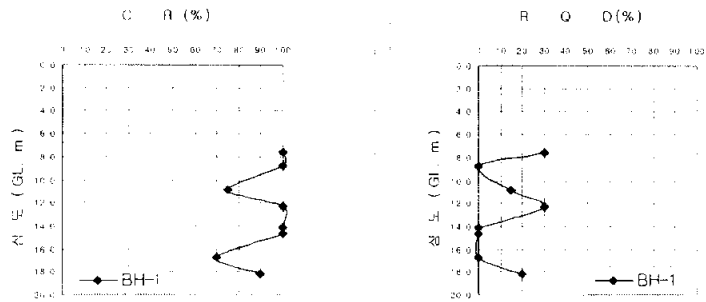


그림 13. 심도에 따른 CR(%) 및 RQD(%) 관계(향후사면대책구간: BH-1)

표 1. 지반조사 총괄표

(단위: 회, m)

지층명 구분	매 립	봉적층	풍화대		기반암 (경암)	계	S.P.T (회)
		자갈질 점토	풍화토	풍화암			
BH-1	-	3.8	2.2	1.6	12.4	20.0	5
BH-2	12.0	-	-	-	9.2	21.2	0
BH-4	0.5	-	-	-	20.5	21.0	0
BH-5	-	2.0	-	-	28.5	30.5	1
GW-1	-	-	3.0	2.8	25.5	31.3	3
GW-2	9.0	-	-	-	10.3	19.3	5
NX-1	-	3.8	1.7	0.5	29.5	35.5	5
NX-2	8.2	-	-	-	13.8	22.0	3
계	29.7	9.6	6.9	4.9	149.7	200.8	22

● 표준관입시험결과

전술한 표준관입시험은 조사지점 심도에 따라 1.5~2.0m 간격 또는 지층의 변화시에 시행하는 것을 원칙으로 하였다.

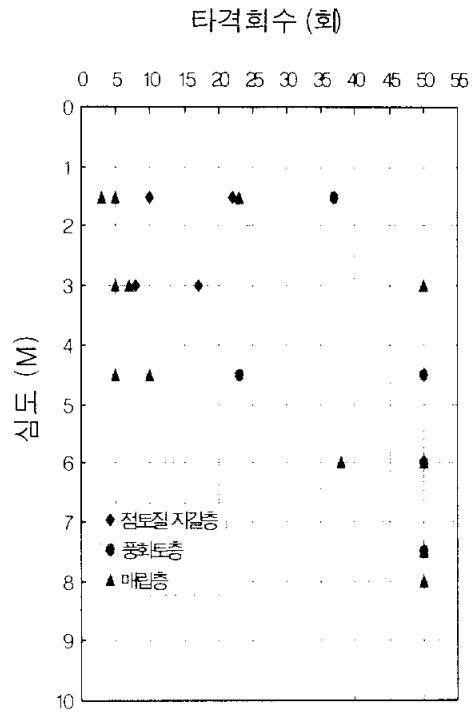


그림 14. 지층별 표준관입시험 결과표

● 공내수위 측정결과

공내수위 측정결과는 다음과 같다.

표 2. 공내수위 측정 결과표 (단위 : m)

공 번	공 내 수 위		비 고
	GL. 기준	EL. 기준	
BH-1	-15.00	+24.60	
BH-2	-13.20	+49.04	
BH-4	-13.20	+51.50	
BH-5	-22.60	+53.60	
NX-1	-16.80	+66.62	
NX-2	-15.00	+45.37	
GW-1	-17.50	+64.35	
GW-2	-14.60	+35.37	

- 상기 결과표에 의하면 전체적으로 GL-13.20~22.60m로 분포 범위가 다소 넓게 형성하고 있다. 이는 작업 순환수 및 상부 지표수 유입으로 인한 것으로 판단된다.
- 그러나, 본 조사지역은 급경사의 산지부와 계곡부가 연결되어 있어 수계형성이 잘 발달되어 있으며, 암석내 불연속면의 풍화발달 및 침투수 흔적 등을 감안하여 볼 때 우기시에는 지표수의 유입이 절리 및 불연속면들이 발달한 파쇄대등을 통하여 지표수 유입이 다량 있을 것으로 판단된다.

2. 실내 시험 결과

2.1. 암석 절리면 충전물의 물성치

- 본 시험은 산사태 원인 규명 및 복구대책에 따른 토질시험으로서, 전단강도를 평가하기 위해 6개지점에서 블록샘플링을 실시하였으며, 발주자측에서 제공한 암석 절리면의 충전물(녹색 이암)에 대하여도 전단시험을 실시하였다.
- 각종 실내 시험결과는 다음과 같다.(표 3과 표 4 참조)

표 3. 블록 샘플링 시료에 의한 물리시험 및 역학시험(전단시험) 결과표

구 분			분포범위	평 균
토 질 분 류			CL, CH	
No200체 통과량		%	63 ~ 95	85
자연함수비		W_n %	23.7 ~ 32.3	26.6
습윤단위중량		γ_t t/m ³	1.884 ~ 1.919	1.895
액 성 한 계		W_L %	37.2 ~ 65.9	46.4
소 성 한 계		W_p %	20.5 ~ 28.8	24.2
소 성 지 수		I_p	16.7 ~ 37.1	22.3
전 단 강 도	자 연 상 태	C_u kg/cm ²	0.36 ~ 0.54	0.44
		ϕ deg	37.7 ~ 47.6	43.0
전 단 강 도	포 화 상 태	C_u kg/cm ²	0.06 ~ 0.23	0.13
		ϕ deg	22.8 ~ 40.3	30.3

표 4. 암석 절리면의 충전물에 의한 물리시험 및 전단시험 결과표

구 분	측정값	구 분	토성치
토질분류	CL	자연상태	-
NO.200 %	66	점착력 kg/cm^2	0.11
단위중량 g/cm^3	1.88	내부마찰각 $^\circ$	21.4
자연함수비 %	20.4	포화상태	-
액성한계 %	41.6	점착력 kg/cm^2	0.11
소성한계 %	17.8	내부마찰각 $^\circ$	16.8

2.2. 흙의 물리적 특성

- 전단시험을 하기위하여 채취된 활동면 점토에 대하여 흙의 공학적인 분류와 연경도 한계 및 자연상태에 대한 물리적 특성을 확인하였다.
- 흙의 물리적 특성은 함수비, 비중, 간극비, 간극율, 포화도, 압도, 아터버그한계 등을 구하는 시험은 흙의 상태나 기본적인 성질을 구하고, 그 흙의 기본적 물성값의 상호간의 계산에 이용되며, 흙의 판별분류를 하는데 있어서 중요한 자료가 된다.
- 흙의 물리적 특성은 물리적 특성 그 자체값도 중요하지만, 이 특성값으로부터 흙의 역학적 성질, 즉 흙의 전단강도 특성 및 압밀 특성 등을 추정하는데 중요한 의미가 있다.
- 본 지역에 분포하고 있는 지층중에서 상부 풍화대층(풍화토층 및 풍화암층)은 실내시험 성과에 의하여 대부분 CL로 나타나며, TP-1, 6 지점에서는 CH등으로 구성되어 있다. 또한 암석 절리면의 충전물은 CL로 나타난다.

1) NO.200체 통과량

- 풍화대층의 NO.200체 통과량 63~95%(평균85.1%)로 분포하고 있다(그림 15 참조).

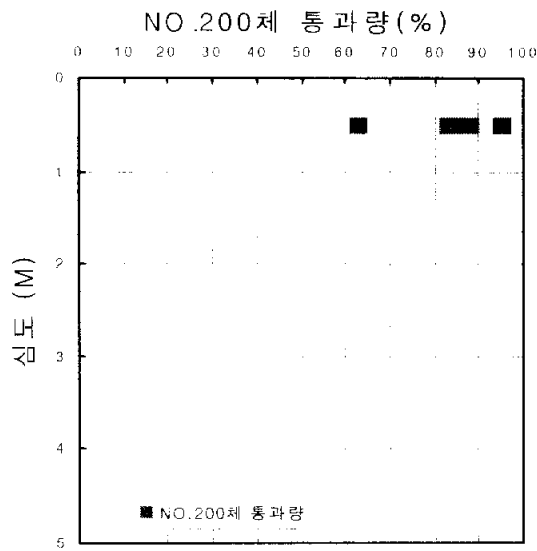


그림 15. 공번별 NO.200체 통과량

2) 액성한계와 함수비

- 채취된 시료의 자연함수비는 23.75~32.33%(평균26.61)로 전반적으로 낮게 나타난다.
- 액성한계는 37.2~65.9%(평균46.4)로 자연 함수비보다 높은 상태로 존재하며, 소성한계는 자연함수비와 비슷하게 나타난다(그림 16 참조).

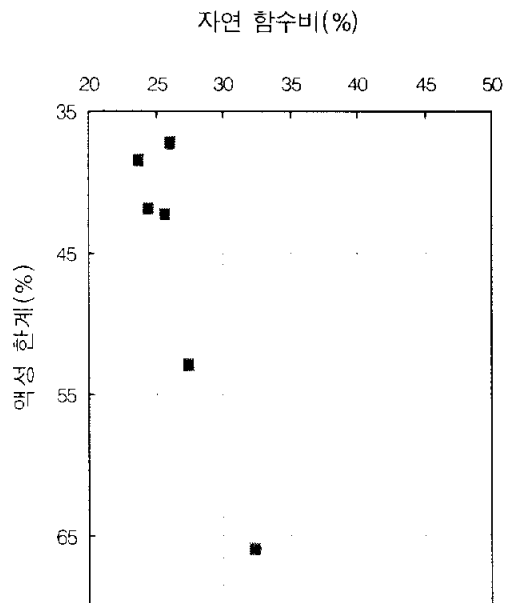


그림 16. 공변별 자연 함수비 및 액성한계 분포

3) 비 중

- 흙의 비중은 흙을 구성하는 주요 광물의 비중에 의해 결정되며 모래의 경우 일반적인 조성광물인 석영의 비중 2.65에 가까운 값을 나타냄이 보통이다.
- 흙의 비중은 2.613~2.646의 범위로 나타낸다(그림 17 참조).

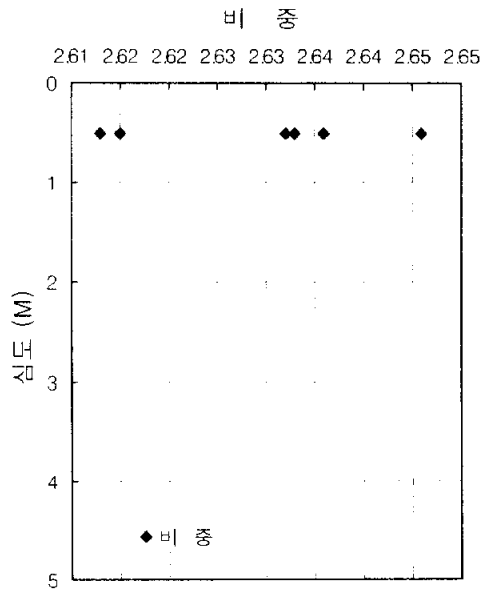


그림 17. 공변별 비중 분포

2.3. 흙의 역학적 특성

- 흙의 역학적 특성은 구조물을 계획하거나 안정성을 검토하는데 있어서 가장 지배적인 요소이다. 흙의 역학적 특성(전단특성)은 흙의 배수상태(배수조건)에 따라 달라진다.
- 즉, 재하로 인한 과잉간극수압의 소산정도에 따라 그 특성을 달리 평가하여야 할 것이다.
- 또한 원지반의 강도정수를 평가하는 것은 흙을 등방성으로 보고 또 균질하다고 가정하는 대전제 이외에도 흙의 역학적 특성을 평가하기 위한 조사 및 시험과정에서 응력상태가 원지반과 다르게 되어 원위치시험(In-SituTest)과정에서 조차 진정한 전단강도를 구하기는 어렵다는 제한이 있음에 유의하여야 한다.

1) 전단시험결과

- 사면안정해석을 위해 사면내 6개 지점에 대해 블록샘플링을 실시하여 원지반에 대한 전단강도를 평가하였다.
- 전단강도는 자연상태에서의 최대강도와 잔류강도, 포화상태의 최대강도와 잔류강도로 분류하여 측정하였으며, 시험결과 확인된 토성치와 상관그래프는 아래와 같다(그림 18).

● 시험굴 시료 및 암석내 충전물에 대한 토질특성

- 6개소에서 채취된 풍화대의 토질은 모래섞인 점토로 나타나고 통일분류법상으로 CL,CH로 분류된다.
- 채취된 시료의 자연함수비는 23.7~32.3%로 전반적으로 낮게 나타나고, 습윤단위중량은 1.88~1.92t/m³로 확인된다.
- 액성한계는 37.2~65.9%로 자연 함수비보다 높은 상태로 존재하며,

소성한계는 자연함수비와 비슷하게 나타난다.

- 직접전단시험에 의한 강도정수 평가는 자연상태와 포화상태에 대해서 확인하였다.
- 그 결과, 자연상태의 강도정수는 $C=0.36\sim 0.54\text{kg/cm}^2$, $\Phi=37.7\sim 47.6^\circ$ 이고, 포화상태의 강도정수는 $C=0.06\sim 0.23\text{kg/cm}^2$, $\Phi=22.8\sim 40.3^\circ$ 으로 나타난다.
- 강도정수값은 절리 등을 고려하지 않은 것이므로, 자연상태보다 다소 높게 나타날 수 있다.
- 또, 기반암내에 협재된 충진토에 대한 강도정수평가를 위해 현장에서 충진토의 일부를 채취하여 토성치와 강도를 확인하였다.
- 채취된 시료는 모래섞인 점토로 나타나고, CL로 분류된다.
- 자연 함수비는 $W_n=20.4\%$ 이고, 액성한계 $W_L=41.6\%$, 소성한계 $W_p=17.8\%$ 로 $W_p < W_n < W_L$ 순으로 분포한다.
- 충진토의 강도정수는 자연상태에서 $C=0.11\text{kg/cm}^2$, $\Phi=21.4^\circ$, 포화상태에서 $C=0.11\text{kg/cm}^2$, $\Phi=16.8^\circ$ 로 확인됨으로서 기반암과 풍화대의 강도정수보다 충진토의 강도정수가 현저하게 작은 것으로 나타난다(그림 18 참조).

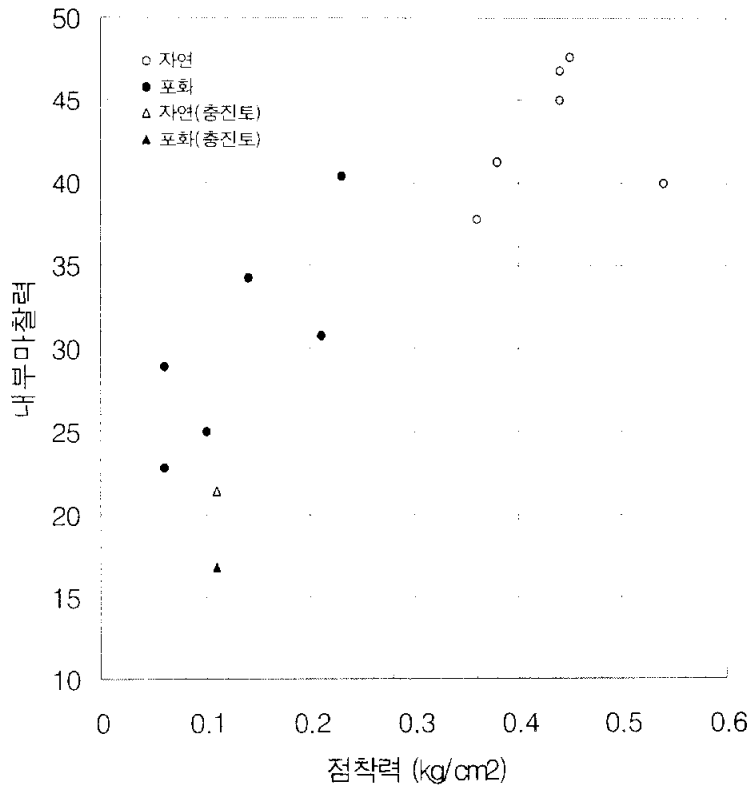


그림 18. 전단시험 결과 그래프

감사의 글

이 논문이 완성되기까지 도움과 격려를 주신 많은 분들께 감사드립니다. 특히 대학원 생활 및 논문을 지도해 주신 최정찬 교수님께 진심으로 감사드립니다. 또한, 본 논문을 지도해 주신 정상용 교수님과 백인성 교수님께도 감사드립니다. 많은 학부지식 및 관심과 조언을 전해 주신 박맹연 교수님, 송용선 교수님께도 감사드리며, 좋은 말씀과 관심을 가져 주신 박계현 교수님과 이민희 교수님께도 감사드립니다.

늦은 대학원 생활이었지만, 여러 도움과 조언을 주신 강동환 선배님께 감사드리며, 학부에서 대학원까지 늘 도움을 준 김남훈 후배에게도 감사드립니다. 그리고 논문에 집중할 수 있도록 배려해 준 실험실 후배인 김현태 후배와 채희운 후배에게도 감사드립니다.

장남이 잘되기를 바라시며, 늘 기도하는 맘으로 응원해 주신 어머니께 특별한 감사를 드립니다. 여러 가지로 신경써 주신 장인, 장모님께 감사드리고 처남, 처제, 동생들에게도 고마움을 전합니다.

힘든 대학원 생활이 편할 수 있도록 남편에게 충실한 사랑과 내조를 보여 준 사랑하는 아내와 말 한마디에도 행복함을 느끼게 해 주는 딸 희주와 이 결실을 함께 나누고 싶습니다.

이제 조그마한 숙제 하나를 마쳤습니다. 앞으로 살아가면서 늘 배움의 자세로 살아가겠습니다.