



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학박사 학위논문

강우 침투로 인한 흡입응력의 변화가 불포화사면의 안정성에 미치는 영향

Effect of Variation of Suction Stress due to Transient Infiltration
on Stability of Unsaturated Soil Slope during Rainfall



지도교수 김 태 형

1945

2012년 08월

한국해양대학교 대학원

토목환경공학과
강 기 민

본 논문을 강 기 민의 공학박사 학위논문으로 인준함.

위원장 서 영 교



위 원 송 영 석



위 원 김 도 삼



위 원 경 갑 수



위 원 김 태 형



2012년 06월 22일

한국해양대학교 대학원

목 차

목 차	i
그림 목 차	iii
표 목 차	x
Abstract	xi
제 1 장 서 론	1
1.1 연구의 필요성	1
1.2 연구목적 및 내용	3
1.3 논문의 구성	4
제 2 장 불포화토의 기본이론	6
2.1 불포화토의 기본구조	6
2.2 흡수력	10
2.3 함수특성곡선	14
2.3.1 함수특성곡선의 정의	14
2.3.2 함수특성곡선 모델	18
2.4 불포화투수계수	21
2.5 유효응력	25
2.5.1 불포화토의 유효응력	25
2.5.2 유효응력계수 χ 의 여러 형태	27
2.6 전단강도	29
2.6.1 유효응력 접근법에 의한 전단강도	29
2.6.2 독립응력상태변수 접근법에 의한 전단강도	30
2.7 불포화토의 유효응력과 전단강도에 대한 최근 연구결과	32
제 3 장 함수특성시험	35
3.1 시료의 특성 및 준비	35
3.1.1 시료의 특성	36
3.1.2 시료의 준비	36

3.2	함수특성시험 장치 및 시험절차	37
3.2.1	함수특성시험 장치의 구성	37
3.2.2	측정원리 및 시험절차	44
제 4 장	시험결과 및 분석	46
4.1	함수특성시험 데이터	46
4.2	함수특성곡선의 추정	49
4.3	투수계수특성곡선의 추정	55
4.4	흡입응력특성곡선의 추정	57
제 5 장	불포화무한사면의 침투 및 사면안정	62
5.1	사면의 모델링 및 경계조건	62
5.2	불포화 무한사면의 비정상 침투해석	65
5.2.1	주문진 모래 사면	65
5.2.2	인제 화강풍화토 사면	69
5.2.3	도계 화강풍화토 사면	73
5.3	사면안정해석	77
5.3.1	주문진 모래 사면	79
5.3.2	인제 화강풍화토 사면	85
5.3.3	도계 화강풍화토 사면	91
제 6 장	결론 및 향후 연구를 위한 제언	97
6.1	결론	97
6.2	향후 연구를 위한 제언	100
	참 고 문 헌	101

그림 목 차

1.1	Flow chart of study	5
2.1	Three-phase structure and volume-mass relationship of unsaturated soil(after Fredlund and Morgenstern, 1977)	7
2.2	Surface tension phenomenon at the air-water interface: (a) Intermolecular forces on contractile skin and water; (b) Pressure and surface tension acting on a curved two-dimensional surface	11
2.3	General soil water characteristic curve(Fredlund and Xing, 1994)	15
2.4	Soil water characteristic curve for soil type(Fredlund and Xing, 1994)	16
2.5	Scanning curves of SWCC(Muraleetharan et al., 2009)	17
2.6	Capillary tube model for demonstrating ink-bottle effect(Lu and Likos, 2004)	17
2.7	Water droplet on inclined surface illustrating difference between wetting and drying contact angles(Lu and Likos, 2004)	17
2.8	Experimental verification of Darcy's law for water flow through an unsaturated soil(Childs and Collis-George, 1950)	23
2.9	Experimental results showing the dependency of Bishop's effective stress parameter χ on degree of saturation(Lu and Likos, 2004)	27
2.10	Relationship between the effective stress parameter χ and the suction ratio $(u_a - u_w)/(u_a - u_w)_b$	28

2.11	Extended Mohr-Coulomb failure surface for unsaturated soil (Lu and Likos, 2004)	32
2.12	Extended Mohr-Coulomb failure surface for unsaturated soil (Lu and Likos, 2004, modified from Vanapalli et al., 1996)	33
2.13	Effect for suction stress according to shear strength(Lu and Likos, 2006)	34
3.1	Particle size distribution curve of Joomunjin sand	35
3.2	Preparation and saturation of soil and HAE disk	37
3.3	Automated soil water characteristic curve measurement apparatus (Song et al., 2012)	38
3.4	Pressure panel: (a) Backside; (b) Frontside	39
3.5	Water reservoir	39
3.6	Flowcell	41
3.7	Air bubble trap	42
3.8	Measurement apparatus	42
3.9	SWRC program	43
3.10	Diagram of test apparatus	45
4.1	Results of soil water retention test for Jumunjin sand	46
4.2	Results of soil water retention test for Inje weathered granite soil . . .	47
4.3	Results of soil water retention test for Dogye weathered granite soil . .	47
4.4	Results of soil water retention test for Jumunjin sand	48
4.5	Results of soil water retention test for Inje weathered granite soil . . .	48
4.6	Results of soil water retention test for Dogye weathered granite soil . .	49
4.7	SWCC for Jumunjin sand	52

4.8	SWCC for Inje weathered granite soil	53
4.9	SWCC for Dogye weathered granite soil	54
4.10	HCCC for Jumunjin sand	55
4.11	HCCC for Inje weathered granite soil	56
4.12	HCCC for Dogye weathered granite soil	56
4.13	SSCC for Jumunjin sand	59
4.14	SSCC for Inje weathered granite soil	60
4.15	SSCC for Dogye weathered granite soil	61
5.1	Geometry of seepage analysis	63
5.2	In-situ measured matric suction (이인모 등, 2003)	64
5.3	Development of wetting front with time of seepage analysis for infinite slope using Jumunjin drying SWCC	66
5.4	Variation of suction profile with time of seepage analysis for infinite slope using Jumunjin drying SWCC	67
5.5	Variation of volumetric water content profile with time of seepage analysis for infinite slope using Jumunjin drying SWCC	67
5.6	Development of wetting front with time of seepage analysis for infinite slope using Jumunjin wetting SWCC	68
5.7	Variation of suction profile with time of seepage analysis for infinite slope using Jumunjin wetting SWCC	68
5.8	Variation of volumetric water content profile with time of seepage analysis for infinite slope using Jumunjin wetting SWCC	69
5.9	Development of wetting front with time of seepage analysis for infinite slope using Inje drying SWCC	70

5.10	Variation of suction profile with time of seepage analysis for infinite slope using Inje drying SWCC	70
5.11	Variation of volumetric water content profile with time of seepage analysis for infinite slope using Inje drying SWCC	71
5.12	Development of wetting front with time of seepage analysis for infinite slope using Inje wetting SWCC	72
5.13	Variation of suction profile with time of seepage analysis for infinite slope using Inje wetting SWCC	72
5.14	Variation of volumetric water content profile with time of seepage analysis for infinite slope using Inje wetting SWCC	73
5.15	Development of wetting front with time of seepage analysis for infinite slope using Dogye drying SWCC	74
5.16	Variation of suction profile with time of seepage analysis for infinite slope using Dogye drying SWCC	74
5.17	Variation of volumetric water content profile with time of seepage analysis for infinite slope using Dogye drying SWCC	75
5.18	Development of wetting front with time of seepage analysis for infinite slope using Dogye wetting SWCC	76
5.19	Variation of suction profile with time of seepage analysis for infinite slope using Dogye wetting SWCC	76
5.20	Variation of volumetric water content profile with time of seepage analysis for infinite slope using Dogye wetting SWCC	77
5.21	Behavior of shear strength and effective stress with suction stress . . .	78

5.22	Variation of suction stress profile with time of stability analysis for infinite slope using Jumunjin drying SWCC	81
5.23	Variation of suction stress profile with time of stability analysis for infinite slope using Jumunjin wetting SWCC	81
5.24	Variation of factor of safety profile with time of stability analysis for infinite slope using Jumunjin drying SWCC	82
5.25	Variation of factor of safety profile with time of stability analysis for infinite slope using Jumunjin wetting SWCC	82
5.26	Variation of factor of safety with time at each location of stability analysis for infinite slope using Jumunjin drying SWCC	83
5.27	Variation of factor of safety with time at each location of stability analysis for infinite slope using Jumunjin wetting SWCC	83
5.28	Variation of factor of safety and suction stress with time at each location of stability analysis for infinite slope using Jumunjin drying SWCC	84
5.29	Variation of factor of safety and suction stress with time at each location of stability analysis for infinite slope using Jumunjin wetting SWCC	84
5.30	Variation of suction stress profile with time of stability analysis for infinite slope using Inje drying SWCC	87
5.31	Variation of suction stress profile with time of stability analysis for infinite slope using Inje wetting SWCC	87
5.32	Variation of factor of safety profile with time of stability analysis for infinite slope using Inje drying SWCC	88

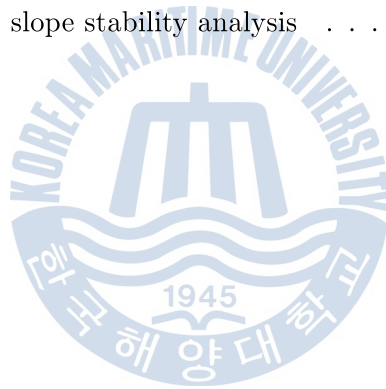
5.33	Variation of factor of safety profile with time of stability analysis for infinite slope using Inje wetting SWCC	88
5.34	Variation of factor of safety with time at each location of stability analysis for infinite slope using Inje drying SWCC	89
5.35	Variation of factor of safety with time at each location of stability analysis for infinite slope using Inje wetting SWCC	89
5.36	Variation of factor of safety and suction stress with time at each location of stability analysis for infinite slope using Inje drying SWCC	90
5.37	Variation of factor of safety and suction stress with time at each location of stability analysis for infinite slope using Inje wetting SWCC	90
5.38	Variation of suction stress profile with time of stability analysis for infinite slope using Dogye drying SWCC	92
5.39	Variation of suction stress profile with time of stability analysis for infinite slope using Dogye wetting SWCC	93
5.40	Variation of factor of safety profile with time of stability analysis for infinite slope using Dogye drying SWCC	93
5.41	Variation of factor of safety profile with time of stability analysis for infinite slope using Dogye wetting SWCC	94
5.42	Variation of factor of safety with time at each location of stability analysis for infinite slope using Dogye drying SWCC	94
5.43	Variation of factor of safety with time at each location of stability analysis for infinite slope using Dogye wetting SWCC	95
5.44	Variation of factor of safety and suction stress with time at each location of stability analysis for infinite slope using Dogye drying SWCC	95

5.45 Variation of factor of safety and suction stress with time at each location of stability analysis for infinite slope using Dogye wetting SWCC 96



표 목 차

3.1	Physical properties for three soil samples	36
4.1	SWCC fitting parameters for three soil samples	51
5.1	Boundary condition of seepage analysis for infinite slope	64
5.2	Matric suction at wetting front for three soils during drying and wetting processes	66
5.3	Soil properties for slope stability analysis	79



Effect of Variation of Suction Stress due to Transient Infiltration on Stability of Unsaturated Soil Slope during Rainfall

Ki-Min Kang

Department of Civil and Environmental Engineering
*Graduate School of
Korea Maritime University*

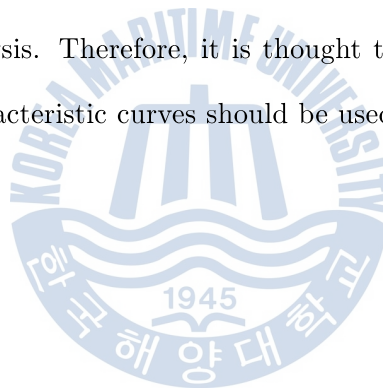
ABSTRACT

In this study, the effect of variation of suction stress due to transient infiltration on the stability of unsaturated soil slope during rainfall was investigated for more understanding on landslide. In order to achieve the aim of the research, a series of soil-water retention tests were performed for three soils (e.g. Jumunjin standard sand, Inje and Dogye granite weathered soils). In the tests, both first drying and wetting processes were measured by the semi-auto soil-water retention apparatus. Based on the results of tests, the soil-water characteristic curves, hydraulic conductivity characteristic curves and suction stress characteristic curves for drying and wetting processes of each soil were estimated. In addition, using these characteristic curves, transient seepage and stability analyses were carried out by the finite element method and limit equilibrium analysis, respectively.

According to the results of the experiments, the soil-water characteristic curve is dependent on the soil type and subsequently, hydraulic conductivity characteristic curve and suction stress characteristic curve are also influenced. It is observed that there are hysteresis phenomena between drying and wetting curves and these are also

dependent on the soil type.

Moreover, according to the results of the numerical analysis, rainfall-induced infiltration into the soil slope changes a magnitude of suction stress, which attributes to the shear strength of unsaturated soil, and consequently the factor of safety of the slope is varied. Especially, due to the continuously infiltration of rainwater, the suction stress is vanished and thus, the safety factor in subsurface soil is reduced below 1 and the failure of slope is occurred. In comparisons between analyses using drying and wetting characteristic curves, it is shown that there is a significant difference in an advance of a wetting front and a development of a wetting band according to the characteristic curves applied in seepage analysis and also in the variation of the factor of safety in stability analysis. Therefore, it is thought that in the analysis of slope stability, appropriate characteristic curves should be used.



제 1 장 서론

1.1 연구의 필요성

최근 지구온난화가 갈수록 심각해짐에 따라 태풍이나 토네이도 같은 강력한 폭풍이나 폭염 같은 기상이변이 자주 발생하고 있다. 이와 같은 영향으로 국내에서도 하절기 집중호우의 규모가 점점 증가하고 있으며, 그로 인한 인명 및 재산 피해도 갈수록 증가하고 있는 추세이다. 특히, 2011년 7월 25일 저녁부터 7월 28일까지 내린 집중호우로 수도권, 강원도 영서지역, 경상남도 등에서 강물이 범람하고, 주택이 침수되는 등 많은 피해가 발생되었다. 특히, 서울시 서초구 우면동에 위치한 우면산에서 산사태가 발생하여 18명의 사망자를 낳았다. 따라서 최근 토목공학분야에서도 방재개념을 적용한 설계 및 시공이 지속적으로 증가하고 있다. 특히, 우리나라와 같이 산악지역이 많은 경우 집중호우로 인한 사면의 안정성에 대하여 이론적, 실험적, 수치해석적 연구가 필요하다.

일반적으로 지반은 지하수위 위치 및 강우침투 등에 따라 포화토, 불포화토 및 건조토로 구분되어지지만 일반적으로 포화토 및 건조토를 대상으로 한 지반구조물의 설계가 진행되어 왔다. 특히, 사면지반의 경우 강우 등 기후조건의 영향으로 일반적으로 포화토나 건조토가 아닌 불포화상태로 존재하지만 설계시 이를 반영하지 않고 있다. 그 이유는 지반설계 시 자연지반을 포화상태로 간주하면 비교적 해석이 간단한 설계를 수행할 수 있기 때문이다. 하지만 최근 들어 지반공학 연구 분야에 있어 불포화토에 대한 관심이 급증하고 있다. 고전적인 포화토의 개념과 원리로는 실제 지반에서 발생하는 현상과 거동을 합리적으로 해석 및 예측하기 어렵고 이로 인하여 많은 공학적 문제점이 발생되었기 때문이다.

흡에 있어서 흡입자를 제외한 물과 공기가 차지하는 체적을 간극이라 하고, 이 간극이 물로 채워져 있는 경우를 포화토(saturated soil) 또는 완전 포화토(fully saturated soil), 일부만 물로 채워져 있는 경우를 불포화토(unsaturated soil) 또는 부분 포화토(partially saturated soil)로 정의한다. 불포화토의 간극에는 물과 공기의 압력 차이에 의한 표면장력과 흡입자가 물 분자를 끌어 당기는 표면력이 발생하게 되고, 이는 각각 모세관현상과 흡착현상의 원인이 된다. 따라서 불포화영역에서는 물과 공기에 의한 부의 간극수압이 발생되고 이로 인해 유효응력과 물의 흐름이 변화된다.

불포화토에 관한 연구는 1900년도 초부터 모관흡수력(matric suction) 개념의 도입으로부터 시작되었다(Buckingham, 1907; Edlefsen and Anderson, 1943; Childs and Collis-George, 1948; Bolt and Miller, 1958). 모관흡수력은 간극 속에 있는 물과 공기의 압력 차로 정의되며 표면장력을 일으켜 모관현상을 발생시키는 대표적인 요인이다.

현재까지의 연구동향을 살펴보면, 불포화토는 부간극수압의 영향으로 겉보기 점착력뿐만 아니라 간극 속에 공기 함입으로 인한 투수성 저하 등과 같은 포화토와 다른 거동특성을 나타내는 것으로 알려져 있다(Jennings and Burland, 1962; Fredlund and Morgenstern, 1977; Fredlund et al., 1978; Lu and Likos, 2006; 이승래 등, 2001; 김찬기, 2003; 성상규와 이인모, 2003; 김태형, 2008). 이러한 불포화토는 포화토에 비해 이해하기 어렵고 복잡하기 때문에 불포화토에 대한 다양한 연구와 이해가 지속적으로 필요하다.

불포화토의 연구는 주로 불포화토에 대한 이론적인 해석, 불포화토의 물성을 측정하는 실험적인 방법, 불포화토의 거동예측 등이 이루어지고 있다. 이때 함수특성곡선은 모관흡수력과 포화도 혹은 체적함수비 사이의 관계를 나타내는 불포화토 고유의 물성으로서 불포화토의 거동 및 흐름 특성을 이해하고 해석하는데 있어서 필수적인 요소로 활용된다. 이러한 함수특성곡선은 이력현상으로 인하여 건조 및

습윤과정에서 서로 다른 곡선을 갖게되며, 이를 반영한 정확한 함수특성곡선 추정은 불포화토 연구에 있어 매우 중요한 사항이라 할 수 있다. 하지만 함수특성시험의 어려움과 큰 시간적 비용으로 인해 대부분 건조과정의 시험만 수행하고 있어 습윤 과정에 대한 함수특성시험을 수행하고 이를 활용한 연구가 필요하다. 특히, 강우 시 불포화사면의 침투는 습윤과정에 해당하므로 습윤과정의 함수특성곡선을 이용하여 해석하는 것이 보다 합리적인 것으로 제안되고 있다(Ng and Pang, 2000; Ebel et al., 2010; Ma et al., 2011).

1.2 연구목적 및 내용

최근 국내에서 발생한 산사태는 대부분 하절기 집중강우 동안에 발생되고 있으며, 지표면으로부터 2m 이내의 깊이에서 발생하는 얇은 파괴로 평면파괴형태를 나타내고 있다(Kim et al., 2007). 강우로 인한 사면파괴의 경우, 지하수위의 상승으로 인한 지반 내 간극수압의 증가로 인한 것이 아니라, 강우의 침투로 인한 습윤전선(wetting front)의 발달과 포화대(wetting band)의 형성으로 인해 얇은 사면파괴가 발생하는 것으로 알려져 있다(Fredlund and Rahardjo, 1995).

따라서 본 연구에서는 강우 시 침투에 의한 흡입응력의 변화가 불포화 사면의 안정성에 미치는 영향을 분석하고자 한다. 또한, 흙의 입도에 따른 함수특성곡선, 투수계수특성곡선, 흡입응력특성곡선의 특징을 비교하고 이를 불포화사면의 침투 및 사면안정해석에 이용하여 각 결과에 대하여 비교 분석하고자 한다. 이를 위해 반자동화된 함수특성시험장치를 이용하여 주문진 표준사 및 실제 강우 시 사면파괴가 발생한 강원도 인제군 인제읍 및 삼척시 도계읍 현장에서 채취한 시료에 대하여 함수특성시험을 수행하여, 각 시료의 함수특성곡선, 투수계수특성곡선 그리고 흡입응력특성곡선을 추정하였다. 특히, 앞서 언급한 것과 같이 강우 시 불포화사면의 침투 과정에 해당하는 습윤과정의 함수특성시험을 수행하고 이를 건조과정과 비교

하였다.

마지막으로, 시험결과로부터 얻어진 세 가지 시료에 대한 불포화 특성곡선을 이용하여 불포화 무한사면을 가정하여 건조 및 습윤과정에 대한 사면의 안정성을 평가하고 흡입응력이 지반강도와 사면의 안정성에 미치는 영향을 파악하였다. 이를 위해 Lu and Likos (2004, 2006)가 흡입응력곡선을 토대로 Terzaghi (1943)와 Bishop (1959)의 유효응력이론을 확장한 새로운 불포화토 유효응력이론을 이용하였다.

1.3 논문의 구성

본 논문은 총 6장으로 구성되어 있으며, 각 장에 대한 내용이 아래에 설명되어 있으며, Fig. 1.1의 플로우 차트는 본 연구의 진행 과정을 나타낸다.

제1장에서는 본 연구의 배경과 연구의 필요성에 대하여 논의하고 본 연구의 목적과 내용 그리고 본 논문의 구성에 대하여 기술하였다.

제2장에서는 불포화토의 기존 문헌연구를 통해 불포화토의 기본이론을 살펴보았다. 불포화토의 기본구조, 흡수력, 함수특성곡선, 불포화투수계수, 불포화토 유효응력 및 전단강도에 대한 정의 및 배경지식에 대하여 자세히 설명되었다. 특히, 불포화토의 유효응력 및 전단강도에 대한 최근 연구결과에 대하여 자세히 설명하였다.

제3장에서는 본 연구의 실험에 사용된 세 가지(주문진 모래, 인제 화강풍화토, 도계 화강풍화토) 시료에 대한 특성 및 함수특성시험을 위한 시료의 준비과정에 대하여 설명하고, 건조 및 습윤과정의 함수특성곡선을 얻기 위한 반자동화된 함수특성시험 장치의 구성과 기능 그리고 시험절차에 대하여 자세히 설명하였다.

제4장에서는 3장에서 수행된 함수특성시험 결과를 바탕으로 세 가지 시료에 대한 건조 및 습윤과정의 함수특성곡선을 추정하고, 함수특성곡선으로부터 투수계

수곡선과 흡입응력특성곡선을 각각 추정하고 각 시료에 대한 특징을 분석하였다.

제5장에서는 강우 시 침투에 의한 흡입응력의 변화가 불포화 무한사면의 안정성에 미치는 영향을 검토하기 위하여 비정상 침투해석 및 사면안정해석을 수행하였다. 해석결과를 바탕으로 강우 시 시간에 따른 지반 내 흡입응력의 변화가 사면의 안정성에 미치는 영향을 분석하였다.

제6장에서는 본 연구 결과를 정리 및 요약하고 향후 연구를 위한 제언을 하였다.

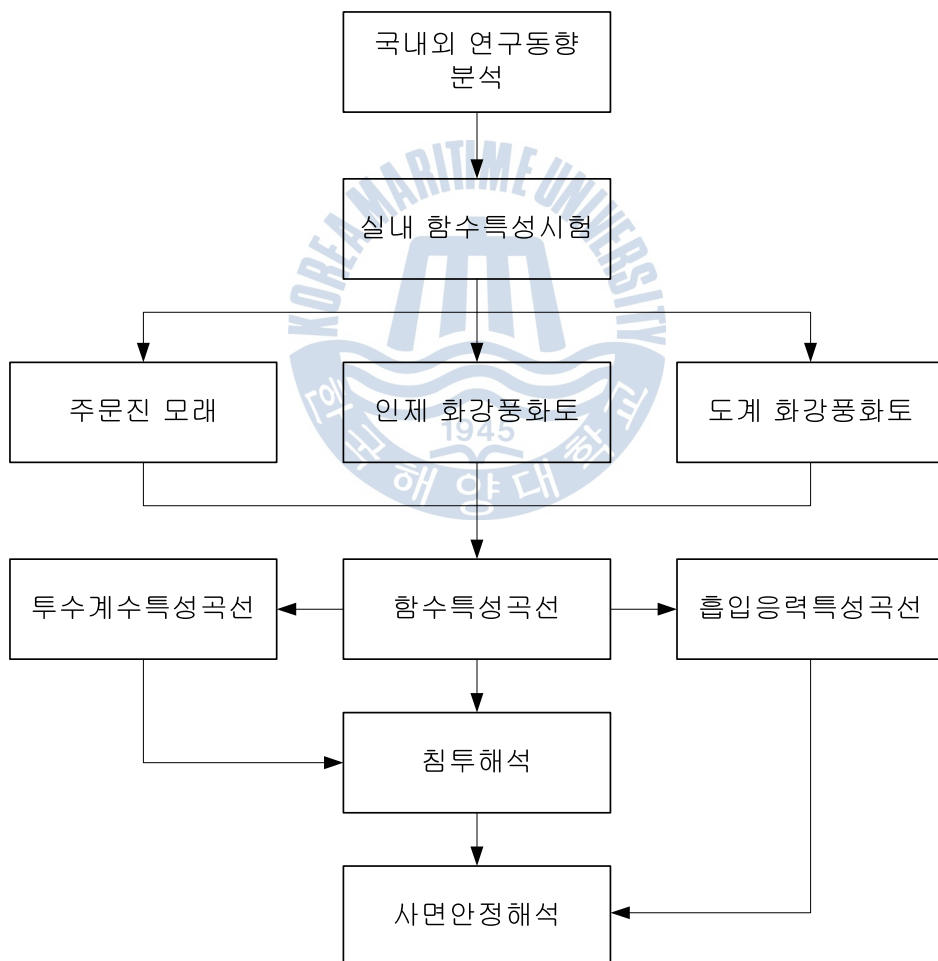


Figure 1.1 Flow chart of study

제 2 장 불포화토의 기본이론

2.1 불포화토의 기본구조

흙은 다상체로써 고체상(solid phase)과 액체상(liquid phase) 그리고 기체상(gas phase)으로 이루어진 삼상재료(three phase material)이다. 일반적으로 고체상은 흙 입자(soil particle)를 나타내고, 액체상과 기체상을 합쳐 간극이라고 한다. 또한, 유기질토의 경우 유기물질이 섞여 있는 경우도 있다. 이와 같이 흙의 주성분은 흙 입자이고 흙 입자 사이에는 반드시 간극이 존재하며 간극 속에는 물 또는 공기로 차 있거나 물과 공기가 동시에 존재한다. 특히, 불포화토의 간극은 포화토와 같이 물로만 채워져 있지 않으며 공기와 물이 접촉되어 있는 상태로 동시에 존재하고, 물-공기 접촉면에서 발생하는 표면장력에 의해 불포화토의 역학적 거동특성이 복잡하게 나타난다. 다음은 일반적인 흙의 상태를 흙 입자 사이의 간극을 차지하는 성분에 따라 나타낸 것이다.

1. 흙 입자가 있고 간극에 물과 공기가 있는 습윤상태
2. 흙 입자와 공기로만 채워져 있는 건조상태
3. 흙 입자 사이 간극이 물로 채워져 있는 포화상태

Figure. 2.1은 불포화토의 삼상구조 및 체적-질량 관계를 개략적으로 도시한 것이다. 흙의 구성요소에 대한 개략도는 흙 입자, 물, 공기 등 3가지 성분이 불규칙하게 섞여 있는 자연상태 흙의 구성상태를 이해하기 위해 기둥모양의 그림으로 표시한다. 기호의 대문자는 부피(V : volume)와 무게(W : weight)를 뜻하고, 아래첨자는 흙 입자(s : solid), 물(w : water), 공기(a : air)를 뜻하므로 각 기호의 의미는 다음과 같다.

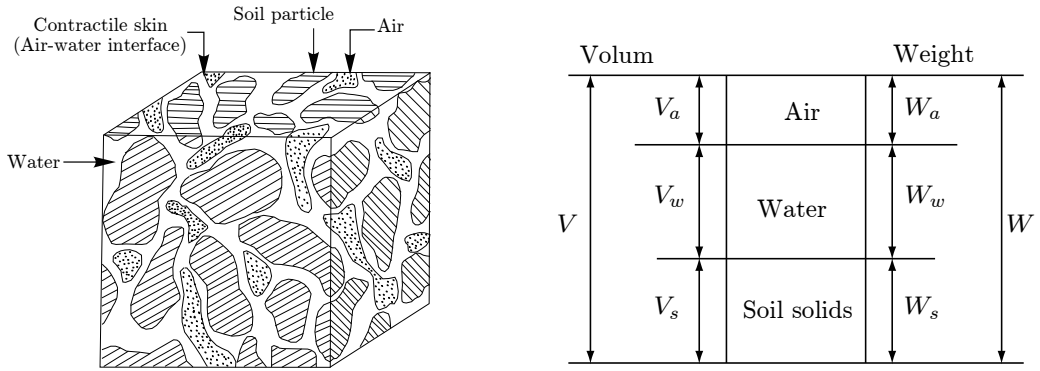


Figure 2.1 Three-phase structure and volume-mass relationship of unsaturated soil(after Fredlund and Morgenstern, 1977)

여기서,

V ; 흙 전체의 부피(total volume of soil)

V_s ; 흙 입자의 부피(volume of solid)

V_w ; 물의 부피(volume of water)

V_a ; 공기의 부피(volume of air)

V_v ; 간극의 부피(volume of void)

W ; 흙 전체의 무게(total weight of soil)

W_s ; 흙입자의 무게(weight of solid)

W_w ; 물의 무게(weight of water)

W_a ; 공기의 무게(weight of air)

공학적 관점에서 흙입자, 물 및 공기의 체적-질량의 관계는 흙의 기본적인 성질로서 이는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

간극률(n)은 전체 체적 V 에 대한 간극 체적 V_v 의 비로 정의된다.

$$n = \frac{V_v}{V} \times 100 (\%) \quad (2.1)$$

간극비(e)는 흡입자 체적 V_s 에 대한 간극 체적 V_v 의 비로 정의된다.

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (2.2)$$

물이 간극 체적 중 차지하고 있는 비율은 포화도(S)로 표현된다.

$$S = \frac{V_w}{V_v} \times 100 (\%) \quad (2.3)$$

포화도는 $0 \leq S \leq 100\%$ 의 범위에 있으며 포화도의 값을 통해 흙의 상태를 판단할 수 있다. 건조상태의 경우 물이 존재하지 않고 오직 흡입자와 공기만으로 이루어지기 때문에 포화도는 0이 된다. 반면 포화상태의 경우 공기없이 흡입자와 물로 이루어지기 때문에 포화도는 100%가 된다. 불포화토는 이 중간상태에 위치하며 공기상이 연속적인가 닫힌 상태인가에 따라 의미가 달라진다. 연속적인 공기가 있는 불포화토는 대략 80% 보다 낮은 포화도를 가지는 반면, 닫힌 공기방울이 존재하는 경우에는 포화도가 90%보다 높다.

함수비는 중량함수비(w)와 체적함수비(θ) 등으로 나타낼 수 있고 포화 토질역학에서는 다음과 같은 중량함수비를 사용하며, 중량함수비는 다음과 같이 흡입자 무게에 대한 물 무게의 비로 표현된다.

$$w = \frac{W_w}{W_s} \times 100(\%) \quad (2.4)$$

불포화 토질역학에서는 일반적으로 중량함수비보다 체적률(volume fraction)을 이용한 체적함수비(volumetric water content)가 많이 쓰이고 다음과 같이 표현된다.

$$\theta = \frac{V_w}{V} \quad (2.5)$$

이는 다시 포화도와 간극비의 관계로 표현할 수 있다.

$$\theta = S \cdot n = \frac{S \cdot e}{1 + e} \quad (2.6)$$

체적함수비와 중량함수비는 흙에서 체적변형이 발생하지 않는다고 가정할 때 다음과 같은 관계식을 가진다.

$$\theta = \frac{w \cdot G_s}{1 + e} \quad (2.7)$$

또한 체적함수비를 포화체적함수비(saturated volumetric water content, θ_s)와 잔류체적함수비(residual volumetric water content, θ_r)의 차이로 정규화하여 사용하기도 하는데 이를 정규체적함수비(normalized volumetric water content, Θ) 또는 유효체적함수비(effective volumetric water content, θ_e)라 하고 다음과 같이 표현된다.

$$\Theta = \theta_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (2.8)$$

포화도(S)와 유효체적함수비(θ_e)와의 관계를 살펴볼 때 잔류체적함수비(θ_r)가 0이라고 가정한다면, 유효체적함수비는 포화도와 같아진다.

$$\theta_e = \frac{\theta_w}{\theta_s} = \frac{V_w/V}{V_v/V} = \frac{V_w}{V_v} = S \quad (2.9)$$

그리고 유효포화도(effective degree of saturation, S_e)는 다음과 같이 정의된다.

$$S_e = \frac{S - S_r}{1 - S_r} \quad (2.10)$$

여기서, S_r 는 잔류포화도이다. 결과적으로, 유효포화도와 유효체적함수비는 동일한 값을 지니는 것을 알 수 있다.

$$\theta_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{V_w/V - V_{wr}/V}{V_v/V - V_{wr}/V} = \frac{V_w/V_v - V_{wr}/V_v}{V_v/V_v - V_{wr}/V_v} = \frac{S - S_r}{1 - S_r} = S_e \quad (2.11)$$

2.2 흡수력

물-공기 접촉면(contractile skin)에는 표면장력(surface tension)이 유발되는 성질이 있다. 표면장력 현상은 이 면에 있는 분자들 상호간 작용하는 힘으로부터 발생한다. 이러한 힘은 물 내부에 있는 분자에 작용하는 것과는 다르다. 물-공기 접촉면은 탄성 고무막처럼 거동하는데 접촉면을 따라 공기압이 작용하게 되면 접촉면은 곡선의 형태를 띠게 되며, 그 면을 따라 공기압에 저항하는 인장응력이 발생하게 된다. 이러한 인장응력으로 인해 불포화토는 일정 공기압에서 일정 수분을 유지할 수 있으며 이를 함수특성이라 한다.

물-공기 접촉면에 작용하는 압력은 Fig. 2.2(b)의 u 와 $(u + \Delta u)$ 이며 물-공기 접촉면은 곡률반경(R_s)과 표면장력(T_s)을 가진다. 그리고 물-공기 접촉면을 따라 수평방향의 힘은 평형을 이루고 있으므로 수직방향의 평형을 생각해보면 식 (2.12)과 같이 유도할 수 있다.

$$2T_s \sin \beta = 2\Delta u R_s \sin \beta \quad (2.12)$$

여기서,

T_s ; 표면장력

R_s ; 접촉면의 곡률반경

Δu ; 접촉면에서의 응력차이

$2R_s \sin \beta$; 수평면에 투사된 고무막의 길이

식 (2.12)를 Δu 에 대하여 정리하면 식 (2.13)과 같다.

$$\Delta u = \frac{T_s}{R_s} \quad (2.13)$$

이는 2차원적인 굴곡진 표면에 대한 압력차를 뜻하고 Laplace방정식을 사용하여 3

차원으로 확장될 수 있으며, 식 (2.14)와 같다.

$$\Delta u = T_s \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (2.14)$$

여기서, R_1, R_2 는 두 개의 수직인 주평면에서의 고무막의 곡률반경이다. 만약 모든 방향으로의 곡률반경이 같다면 식 (2.15)와 같이 정리된다.

$$\Delta u = \frac{2T_s}{R_s} \quad (2.15)$$

불포화토에서 물-공기 접촉면에 작용하는 응력은 간극 공기압(u_a)과 간극 수압(u_w)이므로 응력의 차이 Δu 는 ($u_a - u_w$)이며, 이를 모관 흡수력이라 한다.

$$(u_a - u_w) = \frac{2T_s}{R_s} \quad (2.16)$$

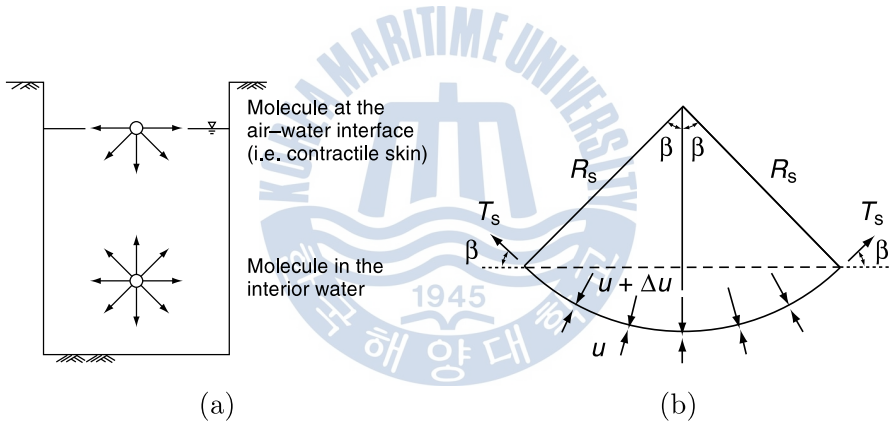


Figure 2.2 Surface tension phenomenon at the air-water interface: (a) Intermolecular forces on contractile skin and water; (b) Pressure and surface tension acting on a curved two-dimensional surface

즉, 식 (2.16)을 Kelvin의 모세관 모델방정식(capillary model equation)이라 하고 흡의 모관흡수력이 커짐에 따라 물-공기 접촉면의 곡률반경은 감소한다. 또한 굴곡진 물-공기 접촉면은 메니스커스(meniscus)라 불리기도 한다.

물은 물리화학적 작용에 의하여 흡속 간극 내에 유지된다. 이처럼 흡이 물을 보유하게 되는 이유는 간극 내 물과 공기의 접촉면에서 발생하는 모관력(capillary

force)과 물 분자를 흡착하는 흡입자의 표면력(surface force) 때문이다. 점토는 특히 표면력이 우세하다.

이렇게 흙이 보유하는 물을 에너지로 표현할 수 있는데 대기압보다 낮은 압력에서 흙 내부에서 물이 평형상태에 있거나 흙이 물을 빨아들이기 위하여 힘을 발휘하는 상태를 자유에너지 상태(free energy state)라 정의한다. 그리고 이러한 힘을 흙의 흡수력이라 한다(Edlefsen and Anderson, 1943). 자유에너지는 흙 속에 존재하는 물의 부분증기압(partial vapor pressure)에 의하여 측정된다(Richards, 1965). 흙의 흡수력과 간극수증기의 부분압력과 열역학적 관계는 다음과 같다.

$$\Psi = -\frac{RT}{v_{wo}w_v} \ln \left(\frac{\bar{u}_v}{\bar{u}_{v0}} \right) \quad (2.17)$$

여기서,

Ψ ; 흙의 전흡수력(kPa)

R ; 절대 기체상수[8.31432 J/(mol · K)]

T ; 절대 온도[T=(273.16 + t°)(K)]

v_{wo} ; 물의 비체적[1/ρ_w(m³/kg)]

w_v ; 수증기의 분자량(18.016 kg/mol)

\bar{u}_v ; 간극수의 부분 증기압(kPa)

\bar{u}_{v0} ; 같은 온도에서 순수한 물의 포화증기압(kPa)

흙의 전흡수력(total suction)은 모관흡수력(matric suction)과 삼투흡수력(osmotic suction)으로 구분된다. 전흡수력은 흙내 물의 자유에너지에 상응하고 모관흡수력과 삼투흡수력은 이러한 자유에너지의 요소들이다. 모관흡수력은 물 표면에서 공기압과 수압의 차이로 정의되고 삼투흡수력은 간극수에 용해된 염분 등으로 인해

나타난다. 전흡수력을 수식으로 표현하면 다음 식 2.18과 같다.

$$\psi_t = \psi_m + \psi_o = (u_a - u_w) + \psi_o \quad (2.18)$$

여기서,

ψ_t ; 전흡수력

ψ_m ; 모관흡수력($u_a - u_w$)

ψ_o ; 삼투흡수력

모관흡수력은 간극공기압(u_a)과 간극수압(u_w)의 차($u_a - u_w$)로 정의되며 간극 공기압이 대기압과 같다면 불포화토의 부간극수압으로 작용하게 된다. 이런 모관흡수력은 외부환경의 변화에 의해 변하며 흙의 평형상태에도 영향을 미친다. 물론 토양용액의 변화로 인한 삼투흡수력의 변화 또한 흙의 역학적 거동에 영향을 미치지만 무시할 수 있을 정도로 미미하다. 따라서 일반적인 지반공학적 문제에서 외부환경의 변화에 의한 전흡수력의 변화는 모두 모관흡수력의 변화와 같다고 할 수 있기 때문에 모관흡수력은 전흡수력의 주요성분으로 고려되어 불포화토의 모관현상을 발생시키는 대표적인 성질이 된다.

흙에서의 간극은 물이 지하수면 위로 상승하게 하는 모세관과 같은 역할을 한다. 이러한 모세관 현상은 모관흡수력과 관련이 있으며 모관흡수력의 크기는 간극크기 분포에 따라 영향을 받는다. 따라서 간극 내 물과 흙의 접촉면에서 평형은 모관흡수력과 표면장력이 균형을 이룸으로써 유지되고, 이 때 물-공기 접촉면을 통해 물의 자중이 흙 구조에 압축력을 가하여 결국 모관흡수력에 의해 전단강도는 증가하게 된다.

2.3 함수특성곡선

불포화토에서 모관흡수력은 포화토와 구분되는 가장 중요한 요소이고 불포화 지반의 거동에 상당한 영향을 미친다. 따라서 모관흡수력은 불포화토와 관련한 지반 내 간극수의 흐름특성, 지반안정에 대한 강도특성 및 압밀에 대한 변형특성 등을 명확히 이해하기 위해서 반드시 고려되어야 하는 중요한 요소이다(Fredlund and Xing, 1994; Vanapalli et al., 1996; Lu and Likos, 2004). 함수특성곡선은 이러한 모관흡수력과 불포화토의 포화정도를 나타내는 상관관계를 보여준다. 따라서 함수특성곡선은 불포화토와 관련한 지하수 흐름, 댐 및 사면의 안정성, 그리고 기체를 포함한 지반의 압밀특성 등과 같은 거동특성을 규명하기 위해서 반드시 고려해야 할 지반특성이다.

2.3.1 함수특성곡선의 정의

함수특성곡선(soil water characteristic curve, SWCC)은 흡-수분보유곡선(soil water retention curve, SWRC)라고 불리기도 하며, 흡 속에 존재하는 물의 양과 모관흡수력의 관계로 정의되고, 흡 속에 존재하는 물의 양은 중량함수비(gravimetric water content), 체적함수비(volumetric water content) 또는 포화도로 나타낼 수 있으며 일반적으로 체적함수비와 모관흡수력의 관계로 정의된다.

전형적인 함수특성곡선의 모양은 Fig. 2.3과 같이 S자 형태를 보인다. 포화영역(saturated zone or capillary fringe zone)에서 포화된 간극은 모관흡수력의 증가에도 불구하고 공기함입치(air-entry value(AEV), ψ_{aev})를 초과하지 않으면 간극으로부터 물이 유출되지 않는다. 이러한 공기함입치는 간극 내부로 공기가 유입되기 시작하는 압력으로 정의된다. 전이영역(transition or funicular zone)은 모관흡수력의 증가에 따라 흡 내부의 간극으로 공기가 계속 유입되면서 간극수가 유출되는 영역을 나타낸다. 그리고 잔류영역(residual or pendular zone)은 모관흡수력의 증가에도 불구하고 더 이상 물이 유출되지 않는 영역을 나타내고 이때의 함수비를 잔류체적

함수비(residual volumetric water content, θ_r)라 한다. 이 함수비에서 보유하고 있는 물은 오로지 열에 의해서만 제거될 수 있다. Figure. 2.3에 표시된 θ_s 는 포화체적함수비로 흙의 간극 당 보유할 수 있는 최대체적함수비를 의미한다. 하지만 이러한 포화체적함수비는 흙의 간극률과 일치하지 않는다. 그 이유는 현장지반에서의 포화체적함수비는 일반적으로 갇힌 상태거나 간극 속에 용해된 공기를 포함하기 때문에 간극률보다 약 5~10% 정도 더 낮게 나타난다.

비교적 낮은 모관흡수력(0~1기압)에서 보유된 함수량은 주로 모세관 효과와 간극크기 분포에 따라 좌우되므로 흙 구조의 영향을 크게 받는다. 하지만 더 높은 모관흡수력 범위에서 보유된 수분은 표면력에 점차적으로 더 크게 좌우되므로 흙의 비표면적과 흡입자 표면의 확산이중층이 더 큰 영향을 미친다. Figure. 2.4는 모래, 실트, 점토의 세 가지 흙 종류에 대한 함수특성곡선의 형태를 나타내며, 일반적으로 소성이 큰 흙일수록(즉, 일반적으로 세립토일수록) 포화체적함수비와 공기함입저항치가 커지고 동일한 모관흡수력에서 더 큰 체적함수비를 가지며 전이영역의 기울기가 더욱 완만한 것을 확인할 수 있다.

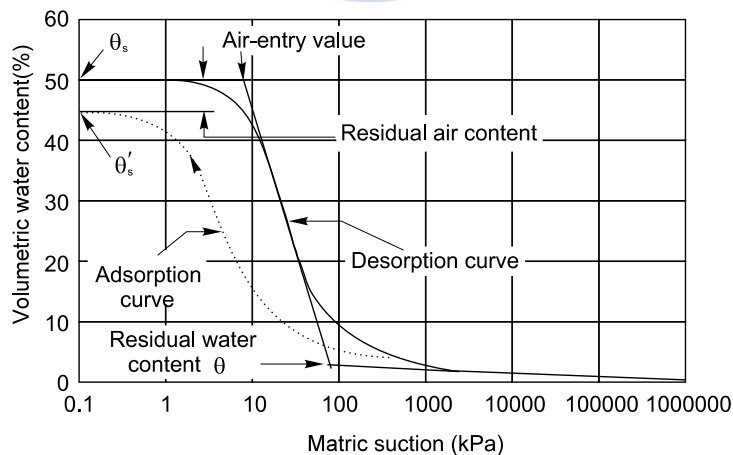


Figure 2.3 General soil water characteristic curve(Fredlund and Xing, 1994)

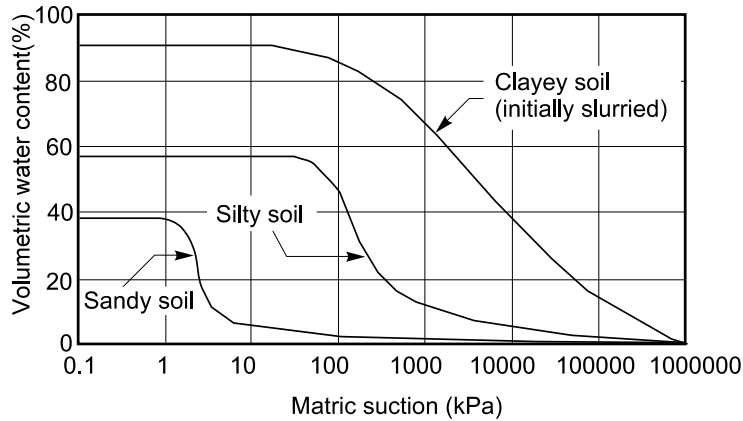


Figure 2.4 Soil water characteristic curve for soil type(Fredlund and Xing, 1994)

2.3.1.1 함수특성곡선의 이력현상

또한, 함수특성곡선은 흙의 종류나 특성에 따라 정도의 차이는 있으나 일반적으로 건조 과정과 습윤 과정이 다르게 나타나며(Fig. 2.5), 이를 이력현상(hysteresis phenomenon)이라 한다. 이력현상의 대표적인 원인으로는 잉크병 효과(Ink-bottle effect)와 접촉각의 차이(different contact angle effect)를 들 수 있다. Guymon (1994)은 잉크병효과는 건조과정에서는 물이 배수되는데 더 작은 간극의 영향을 받으며 습윤과정에서 물의 흡수는 큰 간극의 영향을 받는다고 설명하였다(Fig. 2.6). 즉, 건조상태나 습윤상태로 변화할 때의 간극의 반지름 차이에 의하여 같은 함수비에서도 모관흡수력의 차이가 발생하게 된다. 또한 기체와 액체의 접촉면을 기준으로 접촉각의 변화 또한 이력현상에 있어서 중요한 요인이다(Fig. 2.7). 모관상승과 수직침투에 대한 모래의 실험적 연구에 의하면 습윤접촉각(α_w)은 약 $60 \sim 80^\circ$ 의 범위로 나타나며(Letey et al., 1962; Kumar and Malik, 1990) 건조접촉각(α_d)은 $0 \sim 20^\circ$ 내지 30° 의 범위로 습윤접촉각에 비해 작은 것($\alpha_w > \alpha_d$)을 확인하였다(Laroussi and DeBacker, 1979).

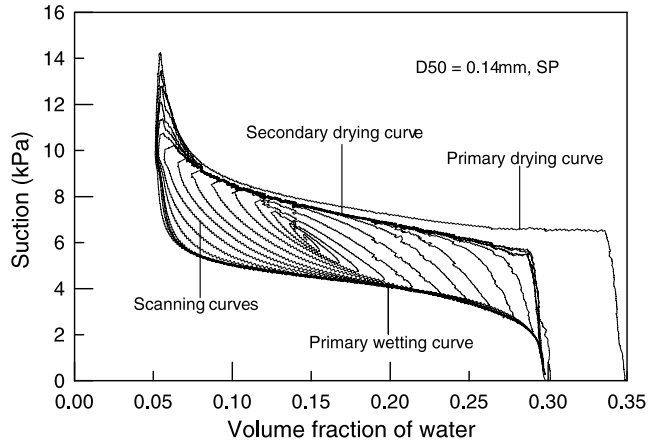


Figure 2.5 Scanning curves of SWCC(Muraleetharan et al., 2009)

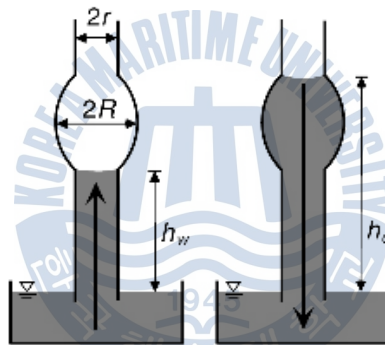


Figure 2.6 Capillary tube model for demonstrating ink-bottle effect(Lu and Likos, 2004)

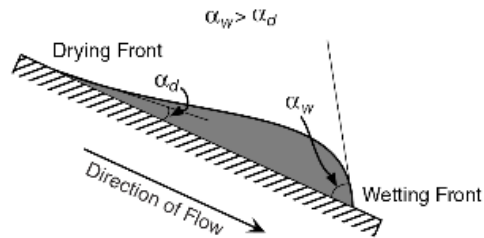


Figure 2.7 Water droplet on inclined surface illustrating difference between wetting and drying contact angles(Lu and Likos, 2004)

2.3.2 함수특성곡선 모델

함수특성곡선에 대한 연구는 많은 연구자들에 의해 수행되고 있으며, 불포화 토의 종류에 따른 함수특성곡선의 예측방법은 크게 두 가지 방법이 있다. 첫 번째 방법은 함수특성시험을 통한 데이터로부터 경험적 방정식을 이용하는 방법이 있으며, 두 번째는 흡입자의 구조, 소성지수 및 습윤단위중량과 같은 흙의 기본물성으로 함수특성곡선을 예측하는 방법이 있다.

실내시험을 통해 얻은 모관흡수력과 함수비의 관계로부터 많은 함수특성곡선 모델들이 제시되었다. 하지만 연구 초기에는 실험적인 제약 등에 의해 전체 모관흡수력 범위에 대해 만족할 만한 모델을 제시하지 못했으며, 공기함입치보다 작은 모관흡수력 범위에서만 신뢰할 수 있거나 그 보다 큰 모관흡수력 범위에서 신뢰할 수 있는 제한적인 모델들이 제시되었다(Gardner, 1958; Brooks and Corey, 1964; Farrell and Larson, 1972; McKee and Bumb, 1984; Williams et al., 1983). 하지만 최근에는 계속적인 연구로 일반적인 함수특성곡선의 형태인 S자 모양을 이루고 모관흡수력 전체 범위에 대하여 표현할 수 있는 모델들이 제안되었다(McKee and Bumb, 1987; van Genuchten, 1980; Fredlund and Xing, 1994).

2.3.2.1 Brooks & Corey 모델

Brooks and Corey (1964)는 간극크기분포지수(pore-size distribution index)를 지수로 하는 함수특성곡선식을 다음과 같이 제안하였다.

$$\Theta = S_e = \begin{cases} 1 & \text{if } \psi < \psi_b \\ \left(\frac{\psi_b}{\psi}\right)^\lambda & \text{if } \psi \geq \psi_b \end{cases} \quad (2.19)$$

여기서,

Θ ; 정규체적함수비

S_e ; 유효포화도

ψ ; 모관흡수력

ψ_b ; 공기함입치

λ ; 간극크기분포지수

간극크기분포지수(λ)는 곡선의 기울기로 정의가 되는데, 다양한 간극크기의 범위를 가지는 흙에서는 간극크기분포지수가 작다. 흙의 간극크기분포가 더 균일할수록 지수는 더 커지게 된다.

2.3.2.2 McKee & Bumb 모델

McKee and Bumb (1984)은 함수특성곡선을 지수함수의 형태로 표현하였다.

$$\Theta = S_e = \exp\left(-\frac{\psi - a}{b}\right) \quad (2.20)$$

여기서, a , b 는 맞춤변수이다.

위 식은 지반의 공기함입치보다 큰 모관흡수력 범위에서 유용한 결과를 보여주지만 최대모관흡수력 부근이나 완전 포화된 상태에서는 그렇지 못하다(Fredlund and Xing, 1994). 이러한 문제점을 개선하여 McKee and Bumb (1987)은 다음과 같은 모델을 제안하였다.

$$\Theta = S_e = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{\psi - a}{b}\right)} \quad (2.21)$$

제안된 식은 낮은 모관흡수력 범위에서 좋은 근사결과를 보여주지만, 높은 모관흡수력 범위에서는 곡선이 급격히 감소하는 경향을 보이기 때문에 적절한 결과를 보여주지 못한다.

2.3.2.3 van Genuchten 모델

van Genuchten (1980)은 3개의 맞춤변수를 통해 앞서 제안된 모델들 보다 좀더 유연한 다음 모델을 제안하였다.

$$\Theta = S_e = \left(1 + (\alpha\psi)^n\right)^{-m} \quad (2.22)$$

여기서,

α ; 공기함입치와 관련된 변수

n ; 변곡점의 기울기와 관련된 변수

m ; 잔류함수비와 관련된 변수

2.3.2.4 Gardner 모델

Gardner (1958)는 불포화투수계수 함수를 구하기 위한 함수특성곡선을 제안하였는데, 그 형태는 앞서 언급한 van Genuchten (1980)이 제안한 식 (2.22)과 유사하다 ($m = 1$ 인 특수한 경우).

$$\Theta = S_e = \left(1 + (a\psi)^n\right)^{-1} \quad (a, n; \text{맞춤변수}) \quad (2.23)$$

2.3.2.5 Fredlund & Xing 모델

Fredlund and Xing (1994)은 모관흡수력이 1,000,000 kPa이 될 때 체적함수비가 0에 접근한다는 실험결과 (Croney and Coleman, 1961)에 근거해 보정계수 $C(\psi)$ 를 도입하여 모관흡수력의 최대제한값(10^6 kPa)을 고려하여 전체 모관흡수력 범위를 적용할 수 있는 함수특성곡선식을 다음과 같이 제안하였다.

$$\theta = C(\psi)\theta_s \left[\frac{1}{\ln(e + (\psi/a)^n)} \right]^m \quad (2.24)$$

$$C(\psi) = \left[1 - \frac{\ln(1 + \psi/\psi_r)}{\ln(1 + 10^6/\psi_r)} \right] \quad (a, n, m; \text{맞춤변수})$$

여기서, ψ_r 은 잔류함수비에 대응하는 모관흡수력이다.

2.4 불포화투수계수

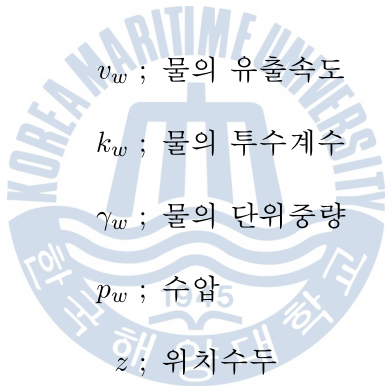
불포화지반에서 간극은 액체와 기체의 2가지 상으로 이루어져 있기 때문에 포화토와는 다른 유체의 흐름특성을 갖게 된다. 물과 공기로 이루어져 있는 간극유체의 흐름을 해석하기 위해서는 흐름률(flow rate)과 작용포텐셜(driving potential)의 상관관계를 알아야 하며, 이러한 상관관계를 나타내는 값을 투수계수(hydraulic conductivity or coefficient of permeability)라고 한다. 불포화토에서 물의 흐름에 대한 작용포텐셜은 함수비 경사(water content gradient), 모관흡수력 경사(matric suction gradient), 동수경사(hydraulic head gradient) 등이 사용되어 왔지만 물의 흐름은 포함된 흙의 종류에 변화가 존재하거나 이력효과 또는 응력이력의 변화에 의해서 함수비가 낮은 곳에서 높은 곳으로 흐를 수 있으므로 함수비 차이는 물 흐름의 근본적인 작용포텐셜이 될 수 없다(Fredlund, 1981). 그리고 간극내 각 유체는 모관흡수력 경사와 상관없이 각 상의 압력경사에 따라 흐름이 발생하고, 모관흡수력이 큰 곳에서 작은 곳으로도 유체의 흐름이 발생할 수 있으므로 흐름의 작용포텐셜이라 할 수 없다. 일반적으로 물의 흐름을 유발시키는 작용포텐셜은 위치수두(elevation head)와 압력수두(pressure head)를 포함한 동수경사이다.

일반적으로 포화토에서의 물의 흐름은 Darcy의 법칙에 따른다. Darcy (1856)는 흙의 단위면적을 통과하는 물의 유출속도는 식 (2.25)에서와 같이 동수경사에 비

레한다고 가정하였고, Childs and Collis-George (1950)와 Richards (1931)는 불포화 토에서의 물의 흐름도 Darcy의 법칙을 만족함을 실험을 통해서 증명하였다. 일정한 함수비와 수압을 갖는 불포화토 시료에 수두를 다양하게 변화시켜 실험한 결과, 특정 함수비에서 다양한 동수경사에도 불구하고 투수계수가 일정하게 나타났다(Fig. 2.8). 이는 불포화토를 통과하는 물의 흐름률이 수두에 선형적으로 비례한다는 것을 의미한다. 그러므로 Darcy의 법칙이 완전 포화된 지반에서 물의 흐름조건을 정의하고 있지만, 불포화토에서도 적용이 가능하다.

$$v_w = -k_w \nabla \left(\frac{p_w}{\gamma_w} + z \right) = -k_w \left(\frac{\partial h_w}{\partial y} \right) \tag{2.25}$$

여기서,



v_w ; 물의 유출속도
 k_w ; 물의 투수계수
 γ_w ; 물의 단위중량
 p_w ; 수압
 z ; 위치수두
 $\partial h_w / \partial y$; y방향 동수경사

불포화토의 투수계수는 항상 일정한 값을 가지지 않고 간극비와 함수비의 영향을 받는 것으로 알려져 있다. Lambe and Whitman (1979)은 물의 투수성은 흙의 종류, 흙입자의 구성요소, 간극비, 흙입자의 구조(fabric), 포화도에 의존한다고 하였다. 만약 압밀과정에서 흙입자 구조가 변형을 일으키지 않는 경우에는 간극비와 포화도가 침투율의 변화에 주요한 인자라고 규정하였다. 그중 간극비(e)에 대한 영향은 보다 분명히 제시되었으며, 많은 실험자료들로부터 $\log k_w$ 와 간극비(e)가 선형적인 관계를 가진다는 것을 알아내었다. 따라서 포화된 지반인 경우 물의 투수계수는 간

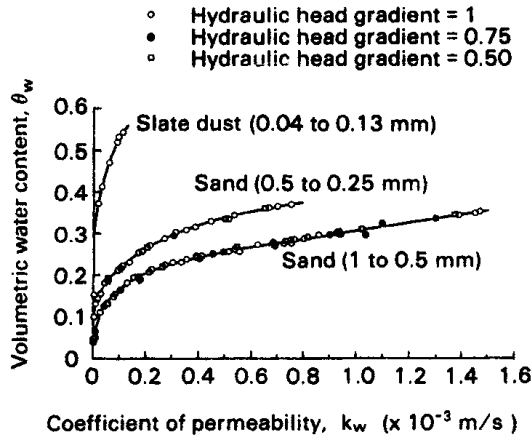


Figure 2.8 Experimental verification of Darcy's law for water flow through an unsaturated soil(Childs and Collis-George, 1950)

극비의 함수라고 정의할 수 있으며(Lambe and Whitman, 1979), 불포화된 경우에는 간극비와 포화도 또는 함수비가 연관된 복합적인 함수로 정의할 수 있다.

불포화토의 투수곡선은 간극 내에 존재하는 물의 양에 따라서 영향을 받는다. 즉 함수비에 따라서 투수성이 변하게 되는 것이다. 이러한 함수비를 표현하는 곡선이 함수특성곡선이므로 불포화토의 투수곡선은 함수특성곡선과 유사한 형태를 보이는 것이 당연하다.

흔히 투수계수를 표현하기 위해서 상대투수계수(relative coefficient of permeability) k_r 을 사용하고 식 (2.26)으로 정의된다.

$$k_r(\psi) = \frac{k(\psi)}{k_s}, \quad k_r(\Theta) = \frac{k(\Theta)}{k_s} \quad (2.26)$$

여기서,

k_r ; 상대투수계수

k_s ; 포화투수계수

$k(\psi)$ 또는 $k(\Theta)$; 불포화투수계수

불포화토의 투수계수함수를 결정하기 위한 방법으로는 대표적으로 실험을 통한 방법과 이론적인 방법으로 나눌 수 있다. 우선 실험적인 방법으로는 수직기둥을 이용한 정상상태 해석(Richards, 1931), 반영구적인 멤브레인을 이용한 정상상태 해석(Hassler and Brunner, 1943), 그리고 비정상상태 해석(Welge, 1952)이 가장 많이 사용되고 있다. 반면, 이론적으로 불포화토의 투수계수를 결정하는 방법으로는 계수추정방법과 역해석기법이 가장 많이 사용되고 있으며 많은 연구자들에 의해 제안되었다(Zachman DW, 1981; Dane and Hruska, 1983; Abu-Hejleh et al., 1993; Wildenschild et al., 1997). 보통 실험적인 방법으로 불포화토의 투수계수함수를 얻기 위해 실험적 방법을 이용하는 것은 시간과 비용적 측면에서 비효율적이고 실험 방법이 어려워 오차가 많이 발생하기 때문에 매번 실험을 수행하는 것은 한계가 있다. 따라서 이론적인 방법을 선호하고 있으며 그 중 흡-함수특성곡선 계수를 통해 불포화토의 투수계수함수를 추정하는 계수추정방법이 주로 사용되고 있다. 특히 Mualem (1976)의 모델을 기초로 한 van Genuchten (1980)의 투수계수함수 (2.27)가 계수추정방법으로 가장 많이 이용되고 있다.

$$k = k_s \times S_e^{1/2} \left[1 - (1 - S_e^{1/m})^m \right]^2 \quad (2.27)$$

여기서,

k ; 불포화투수계수

k_s ; 포화투수계수

S_e ; 유효포화도

m ; van Genuchten 모델의 맞춤계수

2.5 유효응력

흙은 액체(물), 기체(공기), 고체(흙입자)로 이루어진 다상재료이므로 그 거동 특성이 흙입자에 작용하는 응력뿐 아니라 간극수압과 간극공기압의 영향을 동시에 받는다. 이러한 다상재료인 흙을 포함한 지반공학 문제를 다루는데 있어 유효응력 원리는 가장 중요한 개념이다. 압축 및 전단저항과 같은 흙의 공학적 거동은 유효응력에 상당히 의존하고, 흙막이 구조물에 작용하는 토압, 기초의 지지력과 침하 및 흙사면의 안정 등과 같은 실질적인 문제를 해결하는데 있어 중요한 개념이다.

2.5.1 불포화토의 유효응력

Terzaghi (1925, 1936)는 포화토에 대한 유효응력식을 다음 식 (2.28)과 같이 전 응력과 간극수압의 차로 정의하고 간극수압으로 인해 유효응력이 감소함을 설명하였다. 하지만 이 식은 간극이 모두 물로 채워져 있는 포화상태의 흙에 대해서만 유효하고 불포화 상태로 존재하는 흙의 유효응력을 표현할 수 없다. 따라서 Bishop (1959)은 유효응력계수 χ 를 도입해 Terzaghi의 포화토에 대한 유효응력식을 확장하여 불포화토에 대한 유효응력식을 다음 식 (2.29)와 같이 제안하였다.

유효응력계수 χ 는 간극내 존재하는 물의 양과 밀접한 관계가 있음을 직관적으로 알 수 있으며 그 결정은 불포화토의 유효응력을 평가하기 위해 필수적이다. Bishop (1959)은 유효응력계수 χ 를 포화도(S)로 간주하고 완전건조상태에 대한 0부터 완전포화상태에 대한 1까지의 범위를 가진다고 제안하였고, 포화시 Terzaghi (1925, 1936)의 유효응력 식 (2.28)과 동일한 것을 알 수 있다. 기타 다른 유효응력계수의 여러 형태에 대하여 2.5.2절에 설명되어 있다.

χ 는 일반적으로 모관흡수력 조절하의 전단시험을 통하여 결정되지만 이를 실험적으로 구하는 것이 쉽지 않고 특히 낮은 포화도에서의 실험이 상당히 어렵다. Figure 2.9는 몇 가지 종류의 흙에 대한 포화도와 χ 의 상관관계를 나타내며, 상당히

비선형적이지만 아니라 일정하지 않은 관계를 보여준다.

$$\sigma' = \sigma - u_w \quad (2.28)$$

$$\sigma' = \sigma - u_a + \chi(u_a - u_w) \quad (2.29)$$

여기서,

σ ; 전응력

σ' ; 유효응력

u_a ; 간극공기압

u_w ; 간극수압

χ ; 유효응력계수

$(u_a - u_w)$; 모관흡수력

Jennings and Burland (1962)는 Bishop (1959)의 유효응력이 대부분의 흙 특히 한계포화도 이하(모래나 실트에 대하여 20%, 점토에 대하여 85 ~ 90%)의 흙에 대하여 유효응력과 체적변화 사이의 관계를 적절히 설명하지 못한다고 제안하였다. 또한 Coleman (1962)은 불포화도에 대한 응력-변형 관계를 설명하기 위한 응력변수로써 순수직응력($\sigma - u_a$)와 모관흡수력($u_a - u_w$)의 사용을 제안하였고, Bishop and Blight (1963)는 응력상태변수로써 순수직응력과 모관흡수력의 독립적인 사용에 대한 장점을 언급하였다.

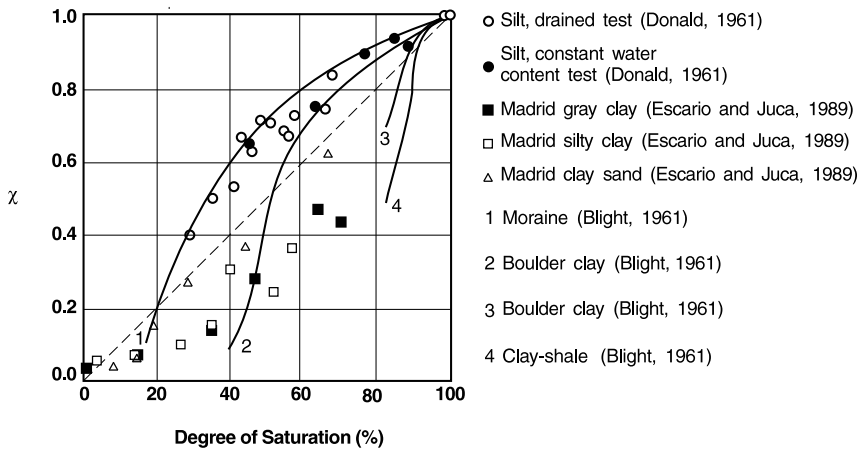


Figure 2.9 Experimental results showing the dependency of Bishop's effective stress parameter χ on degree of saturation(Lu and Likos, 2004)

2.5.2 유효응력계수 χ 의 여러 형태

Bishop(1959)은 전단시험 결과를 바탕으로 유효응력계수 χ 와 포화도 S 사이의 관계가 비선형적이라는 것을 언급하였다. 이후 여러 연구자에 의한 실험결과에서 이러한 사실이 확인되었다(Fig. 2.9). 또한, 많은 연구자들이 불포화토의 유효응력계수를 수학적 형태로 제안하였다. 이런 수학적 유효응력의 형태는 유효응력계수를 포화도의 함수로 정의하거나(Oberg and Salfors, 1997) 유효응력계수를 모관흡수력의 함수(Khalili and Khabbaz, 1998)로 정의하는 방법이 있다.

Oberg and Salfors (1997)은 모래 및 실트와 같은 비점성토에 대한 불포화 전단 강도를 결정하기 위하여 유효응력계수를 포화도(즉, $\chi = S$)로 가정하였고, 문헌을 통해 얻어진 불포화토의 전단강도와 이러한 가정에 의해 계산된 전단강도가 잘 일치함을 보여주었다. 또한, 이와 같은 가정이 불포화토의 유한요소 모델링에서 몇몇 연구자들에 의해 사용되었다(Schrefler, 1984; Sheng et al., 2003a).

Khalili and Khabbaz (1998)는 직접전단실험을 통해 Fig. 2.10에서와 같이 $\chi = S$ 이 아니라는 것을 증명하였으며 모관흡수력의 함수로 정의되는 유효응력계수 χ 를

식 (2.30)과 같이 제안하였다.

$$\chi = \begin{cases} \left[\frac{u_a - u_w}{(u_a - u_w)_b} \right]^{-0.55} & \text{if } (u_a - u_w) \geq (u_a - u_w)_b \\ 1 & \text{if } (u_a - u_w) = (u_a - u_w)_b \end{cases} \quad (2.30)$$

여기서, $(u_a - u_w)_b$ 는 공기함입치이다.

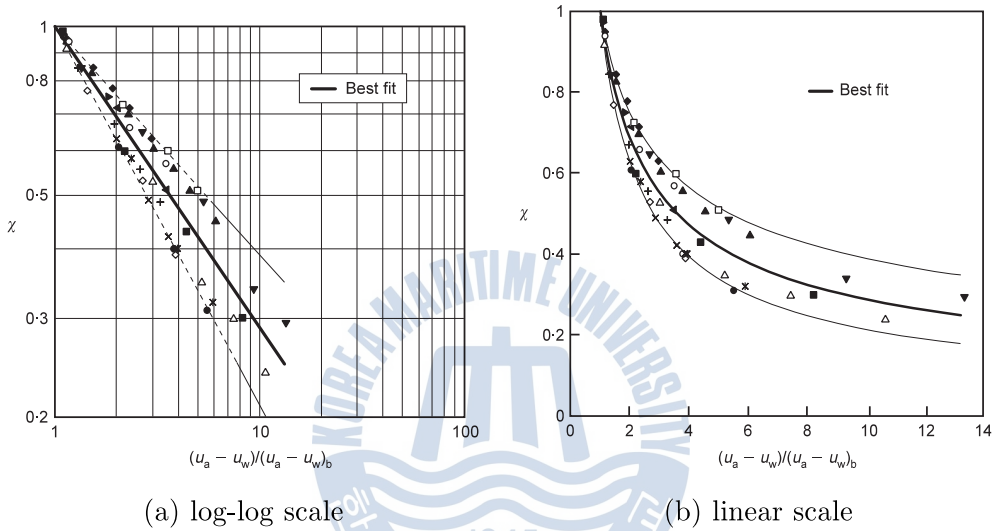


Figure 2.10 Relationship between the effective stress parameter χ and the suction ratio $(u_a - u_w)/(u_a - u_w)_b$

Tarantino and Tombolato (2005)는 전통적인 포화도(S)을 대신하여 미시간극을 제외한 거시간극의 포화도(S_M)를 이용하여 유효응력계수를 식 (2.31)과 같이 정의하였다.

$$\chi = S_M = \frac{\theta - \theta_m}{\theta_s - \theta_m} \quad (2.31)$$

여기서, θ_m 은 미시간극에서의 함수비이다.

Lu and Likos (2006)는 실험결과를 바탕으로 유효체적함수비와 유효응력계수 χ 가 잘 일치한다고 판단하여 van Genuchten (1980)의 함수특성곡선 함수식을 이용하

여 유효응력계수 χ 를 다음과 같이 정의하였다.

$$\chi = \theta_e = \left(\frac{1}{1 + (\alpha(u_a - u_w))^n} \right)^{1-1/n} \quad (2.32)$$

여기서, θ_e 는 유효체적함수비(정규체적함수비 θ 나 유효포화도 S_e 동일, 식 (2.8)과 (2.11) 참조)이고 α 와 n 은 van Genuchten (1980) 함수특성곡선 모델의 맞춤계수이다.

2.6 전단강도

지반의 안정과 관련한 문제는 지반이 받고 있는 전단응력과 전단강도에 의하여 지배된다. 모관흡수력의 변화에 의한 불포화토의 전단강도를 확인하기 위한 많은 실험적 연구가 진행되어 왔으며 대표적으로 두 가지 접근법이 제안되었다. 하나는 Bishop and Blight (1963)의 유효응력에 기반을 둔 유효응력 접근법(effective stress approach)이며, 다른 하나는 Fredlund et al. (1978)에 의해 제안된 독립응력상태변수 접근법(independent stress state variable approach)이다.

2.6.1 유효응력 접근법에 의한 전단강도

포화토의 경우 전단강도는 Terzaghi (1925)의 유효응력과 Mohr-Coulomb의 파괴 기준에 의해서 식 (2.33)과 같이 설명된다. 불포화토의 경우 앞서 제안된 (Bishop, 1959)의 유효응력 식 (2.29)를 적용하여 식 (2.34)와 같이 나타낼 수 있다. 식 (2.34)는 식 (2.33)의 일반화된 개념으로 식 (2.33)은 식 (2.34)의 χ_f 가 1인 특별한 경우에 해당한다.

불포화토의 전단강도를 결정하는 중요한 요소인 유효응력계수 χ 의 경우 앞서 2.5.2절에서 언급한 것과 같이 여러 연구자들에 의해 다양하게 제시되어 왔다.

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_w)_f \tan \phi' \quad (2.33)$$

$$\tau_f = c' + ((\sigma - u_a)_f + \chi_f(u_a - u_w)_f) \tan \phi' \quad (2.34)$$

여기서, 아래첨자 f 는 파괴시 파괴면에서의 값을 나타내고,

τ_f ; 전단강도

$(\sigma - u_w)_f$; 유효수직응력

$(\sigma - u_a)_f$; 순수직응력

$(u_a - u_w)_f$; 모관흡수력

χ_f ; 유효응력계수

c' ; 유효점착력

ϕ' ; 유효내부마찰각

2.6.2 독립응력상태변수 접근법에 의한 전단강도

Fredlund and Morgenstern (1977)은 2.5.1절에서 설명된 여러 연구자들의 제안을 바탕으로 $(\sigma - u_w)$ 및 $(\sigma - u_a)$ 와 $(u_a - u_w)$ 의 독립적인 세 가지 응력변수 중 두개를 이용하여 불포화토의 응력상태를 설명할 수 있다고 제안하였다. 이후, Fredlund et al. (1978)은 순수직응력 $(\sigma - u_a)$ 과 모관흡수력 $(u_a - u_w)$ 을 이용하여 불포화토의 전단강도를 식 (2.35)와 같이 정의하였다. 이를 세 개의 응력변수($\tau, \sigma - u_a, u_a - u_w$)로 이루어진 3차원 공간좌표 상에 표시하면 Fig. 2.11과 같이 나타난다.

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a)_f \tan \phi' + (u_a - u_w)_f \tan \phi^b \quad (2.35)$$

여기서, 아래첨자 f 는 파괴시 파괴 면에서의 값을 나타내고, 각 변수는 다음과 같다.

τ_f ; 전단강도

$(\sigma - u_a)_f$; 순수직응력

$(u_a - u_w)_f$; 모관흡수력

c' ; 유효점착력

ϕ' ; 모관흡수력이 일정할 때 순수직응력의 변화에 따른 내부마찰각

ϕ^b ; 순수직응력이 일정할 때 모관흡수력의 변화에 따른 내부마찰각

Figure 2.11에 보이는 것과 같이 식 (2.35)에서 모관흡수력에 따른 전단강도의 증가를 나타내는 내부마찰각 ϕ^b 는 최초 모관흡수력에 따라 선형적인 것으로 가정되었다. 하지만, Fig. 2.12에 나타난 것과 같이 이후 많은 실험적 연구에 의해 ϕ^b 의 값이 모관흡수력의 증가에 따라 공기함입치 이전에는 ϕ' 와 동일하게 선형적으로 나타나지만 공기함입치 이후에는 비선형적으로 나타남을 알 수 있었다(Gan et al., 1988; Escario and Juca, 1989; Vanapalli et al., 1996; Khalili and Khabbaz, 1998). 따라서 이러한 불포화토의 전단강도를 이용하기 위해서는 각 모관흡수력에서의 ϕ^b 값을 실험을 통해 구해야 하는 어려움이 있다.

이러한 비선형성을 고려하기 위하여 Vanapalli et al. (1996)은 Gan et al. (1988) 및 Escario and Juca (1989)의 직접전단시험결과 및 자신의 실험을 바탕으로 각 모관흡수력 단계에서의 체적함수비와 전단강도 데이터를 곡선 맞춤하여 맞춤계수(fitting parameter) k 를 이용한 식 (2.36)을 제안하였다. 하지만 이 식 또한 각 시료에 대한 전단시험을 통해 맞춤계수 k 를 구해야 하는 어려움이 존재한다. 따라서 Vanapalli et al. (1996)은 함수특성곡선으로부터 구해진 포화체적함수비 θ_s 및 잔류체적함수비 θ_r 을 이용하여 전단강도를 예측하기 위한 식 (2.37)을 제안하였다. 하지만, 이 경우

식 (2.34)의 한 형태임을 알 수 있다.

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a)_f \tan \phi' + (u_a - u_w)_f \left[\left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^k \tan \phi' \right] \quad (2.36)$$

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a)_f \tan \phi' + (u_a - u_w)_f \left[\left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) \tan \phi' \right] \quad (2.37)$$

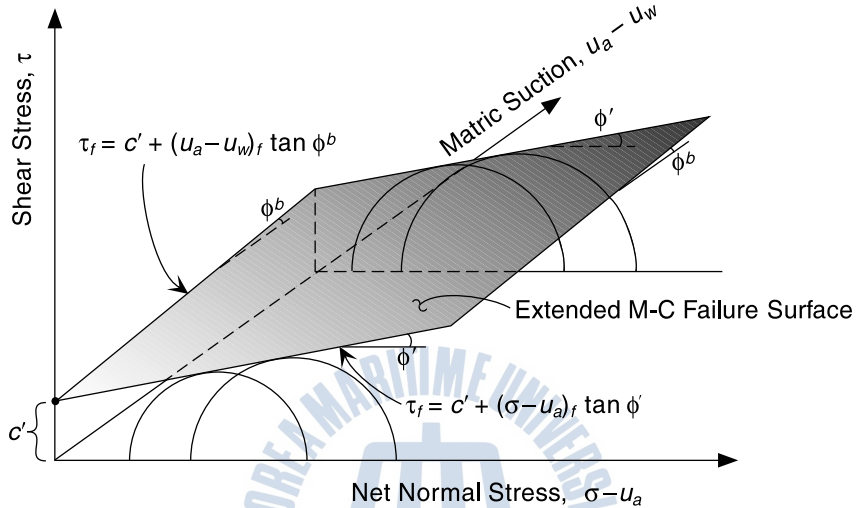


Figure 2.11 Extended Mohr-Coulomb failure surface for unsaturated soil (Lu and Likos, 2004)

2.7 불포화토의 유효응력과 전단강도에 대한 최근 연구결과

2.5.2절에 논의된 것과 같이 최근 연구결과에 따르면 유효응력계수 χ 의 적절한 선택으로 Bishop (1959)이 제안한 단일 응력상태변수인 유효응력으로 불포화토의 전단강도를 표현할 수 있는 것으로 나타났다. 여기서, 식 (2.30) ~ (2.32)를 살펴보면, 공통적으로 유효응력에 영향을 미치는 간극수와 그렇지 않은 간극수로 구분한 것을 알 수 있다. 특히 Khalili and Khabbaz (1998)와 Lu and Likos (2006)가 제안한 식의 경우 유효응력계수 χ 가 모두 유효포화도(S_e)의 한 형태로 Khalili and Khabbaz (1998)는 Brooks and Corey (1964)의 함수특성곡선 식 (2.19)을 Lu and Likos (2006)는 van Genuchten (1980)의 함수특성곡선 식 (2.22)을 사용하고 있음을 알 수 있다.

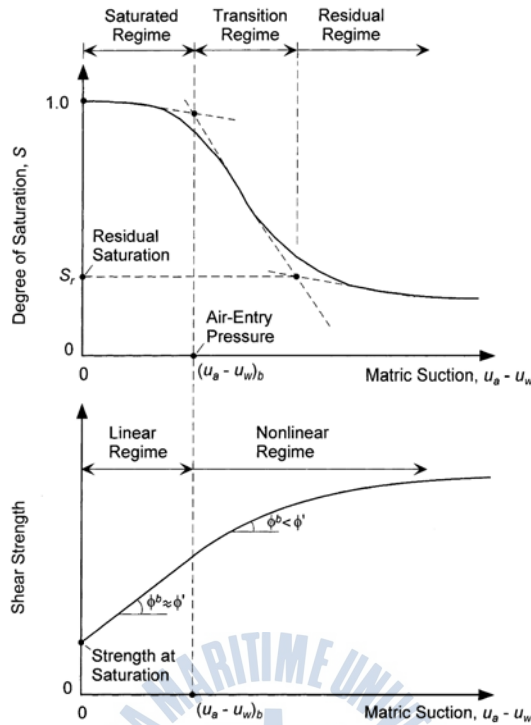


Figure 2.12 Extended Mohr-Coulomb failure surface for unsaturated soil (Lu and Likos, 2004, modified from Vanapalli et al., 1996)

특히, Lu and Likos (2004, 2006)는 유효응력계수로 S_e 를 적용하고 모관흡수력 ($u_a - u_w$)과의 곱을 통해 흡입응력(suction stress, σ^s)이라는 개념을 도입하였다. 흡입응력은 다음 식 (2.38)과 같이 나타낼 수 있으며, 식 (2.32)을 이용하여 유효포화도나 모관흡수력만으로 각각 식 (2.39) 및 (2.40)과 같이 나타낼 수 있다. 이를 바탕으로 불포화토에 대한 전단강도를 식 (2.41)과 같이 제안하였다.

$$\sigma^s = S_e(u_a - u_w) \quad (2.38)$$

$$\sigma^s = \frac{S_e}{\alpha} (S_e^{\frac{n}{n-1}} - 1)^{1/n} \quad \text{if } 0 < S_e \leq 1 \quad (2.39)$$

$$\sigma^s = \begin{cases} (u_a - u_w) & \text{if } (u_a - u_w) \leq 0 \\ \frac{(u_a - u_w)}{(1 + [\alpha(u_a - u_w)]^n)^{1-1/n}} & \text{if } (u_a - u_w) > 0 \end{cases} \quad (2.40)$$

$$\tau_f = c' + ((\sigma - u_a)_f + \sigma_f^s) \tan \phi' \quad (2.41)$$

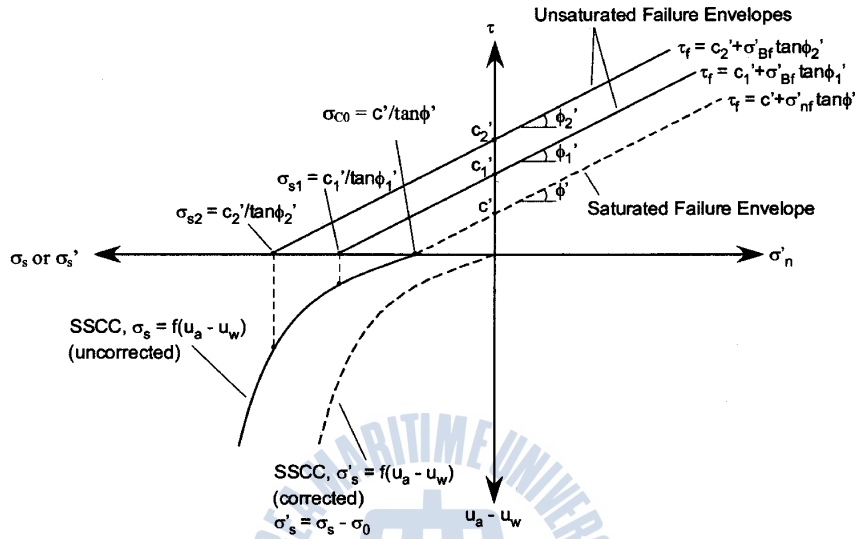


Figure 2.13 Effect for suction stress according to shear strength(Lu and Likos, 2006)

제 3 장 함수특성시험

3.1 시료의 특성 및 준비

본 연구에서는 강우 시 침투로 인한 불포화 사면의 안정성을 검토하기 위하여 불포화 해석에 있어 가장 중요한 함수특성곡선을 얻기 위한 함수특성시험을 수행하였다. 일반적인 함수특성시험은 실험의 어려움과 시간적 비용의 문제로 일반적으로 건조과정의 시험만 수행된다. 하지만 흙의 상태나 주위환경에 따라 건조 및 습윤과정의 함수특성곡선을 적절히 선택하여 이용하는 것이 합리적이다(Ng and Pang, 2000; Ebel et al., 2010; Ma et al., 2011). 따라서 본 연구에서는 건조뿐 아니라 습윤과정의 함수특성시험을 수행하여 건조 및 습윤과정 함수특성곡선의 적용에 따른 차이점도 분석하고자 하였다.

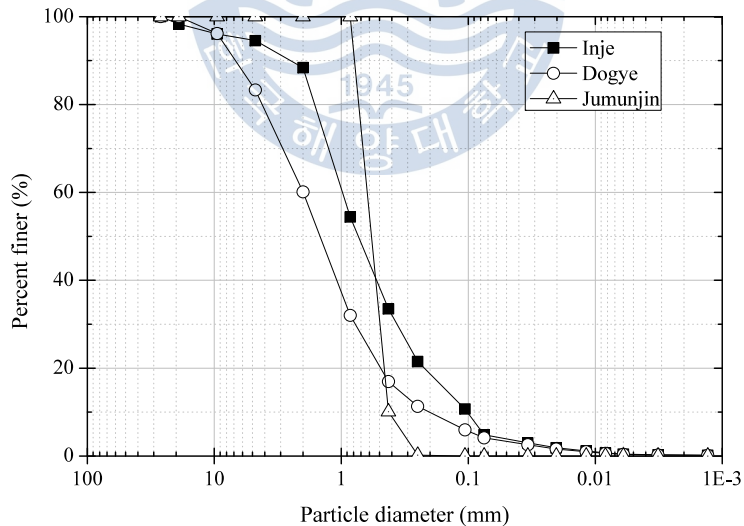


Figure 3.1 Particle size distribution curve of Joomunjin sand

3.1.1 시료의 특성

함수특성시험 대상 시료로는 주문진 표준사 및 강우 시 산사태가 일어난 강원도 인제군 인제읍과 삼척시 도계읍에서 채취한 화강풍화토로 세 가지 시료는 모두 교란 시료이다. 세 가지 시료에 대한 입도분포곡선 및 물리적 특성은 Fig. 3.1과 Table 3.1에 각각 나타나있다.

Table 3.1 Physical properties for three soil samples

Soil properties	Test method	Jumunjin	Inje	Dogye
Specific gravity (G_s)	KS F 2308	2.621	2.637	2.632
Maximum dry unit weight ($\gamma_{d_{max}}$, kN/m ³)	ASTM D 4253	15.8	17.7	-
Minimum dry unit weight ($\gamma_{d_{min}}$, kN/m ³)	ASTM D 4254	13.4	13.2	-
Coefficient of uniformity (C_u)	KS F 2302	1.56	10.17	9.27
Coefficient of curvature (C_g)	KS F 2302	0.96	1.32	1.47
Plastic limit (PL, %)	KS F 2303	N.P	19.85	12.17
Plastic index (PI, %)	KS F 2303	N.P	12.54	16.18
Saturated hydraulic conductivity (k_s , m/sec)	ASTM D 5084 - 03	1.48 $\times 10^{-5}$	7.19 $\times 10^{-7}$	4.76 $\times 10^{-7}$
USCS		SP	SW	SW

3.1.2 시료의 준비

함수특성시험에 사용되는 세 가지 시료는 모두 교란시료로서 실내실험을 위해 재성형되었다. 주문진표준사의 경우 ASTM D 4253-83 및 ASTM D 4254-83 시험법에

의거하여 최대 및 최소 건조단위중량을 산정하고 상대밀도 75%로 시험을 계획하였다. 인제 및 도계 화강풍화토의 경우 시료를 채취한 자연사면의 현장단위중량과 동일한 단위중량으로 성형하여 시험을 수행하였다.

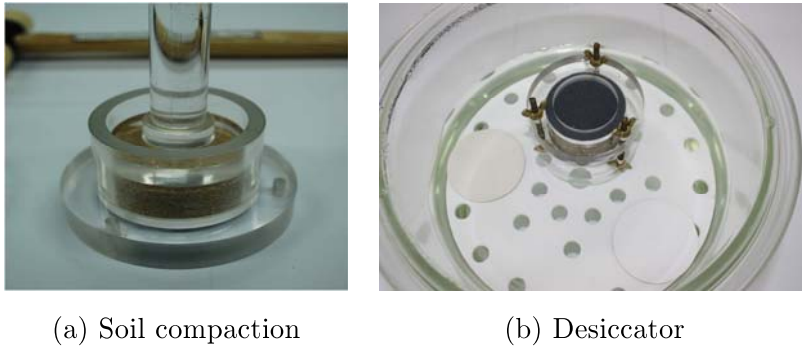


Figure 3.2 Preparation and saturation of soil and HAE disk

우선 시료를 성형하기 위한 플라스틱 몰드(직경 $D = 5.05\text{cm}$, 높이 $H = 3.89\text{cm}$, 부피 $V = 78.06\text{cm}^3$)에 Fig. 3.2(a)와 같이 높이별 3층 다짐을 실시하여 균일한 시료를 성형하였다. 시험시료 및 high air entry(HAE) 디스크가 100% 포화되어 있지 않으면 측정값의 초기값을 정하는데 많은 어려움이 존재하며 시험결과의 오차를 야기한다. 따라서 Fig. 3.2(b)와 같이 정제된 증류수가 담긴 데시케이터에 시료 및 HAE 디스크를 넣고 진공상태로 약 24시간 이상 방치하였다. 이때 데시케이터 내부에 석션을 가함으로써 시료 및 HAE 디스크의 포화를 보다 확실하게 하였다.

3.2 함수특성시험 장치 및 시험절차

3.2.1 함수특성시험 장치의 구성

Figure 3.3은 자동 함수특성곡선 측정장치의 전반적인 모습을 나타내었다. 시험장치는 크게 압력 조절장치(pressure panel), 물 저장소(water reservoir), 시료 포화장치(saturation system), 플로우셀(flowcell), 공기 제거 장치(air bubble trap), 측정 시스템(measurement system)으로 이루어져 있다. 시험장치는 일정 공기함입치(air-entry

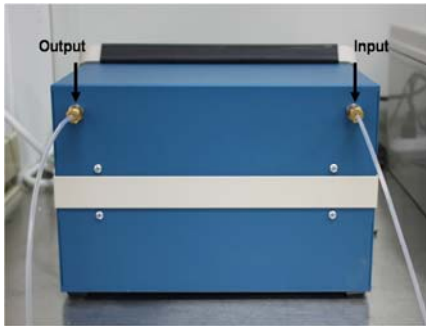
value)를 갖는 HAE 디스크를 설치한 후 그 위에 시료를 올려놓고 셀 내부에 공기압을 가하여 흡시료에서 추출되는 물의 양을 측정하고, 그에 따라 변화하는 체적함수비를 측정하는 방법으로서 시험장치에 대한 세부적인 특징은 다음과 같다(송영석 등, 2010).



Figure 3.3 Automated soil water characteristic curve measurement apparatus (Song et al., 2012)

3.2.1.1 압력조절장치

압력조절장치(pressure panel)는 컴프레셔에서 공급된 압력을 조절하며 조절된 압력을 플로우셀에 전달한다. Figure. 3.4(a)에 보이는 오른쪽 튜브는 컴프레셔와 연결되어 있으며 왼쪽 튜브를 통해 계획된 공기압을 플로우셀 안에 설치된 시료에 전달한다. Figure. 3.4(b)에 보이는 왼쪽의 레귤레이터로 비교적 작은 0 ~ 15kPa까지의 압력을 조절하며, 오른쪽 레귤레이터는 15 ~ 300kPa의 큰 압력을 조절한다. 이 압력은 흡 입자에 부착되어 있는 수분추출에 요구되는 압력으로서 모관흡수력, 즉 불포화토의 부간극수압으로 작용하게 된다. 본 연구에서는 주문진 표준사에 대하여 1bar의 공기함입치를 갖는 HAE 디스크를 사용하였고, 인제 및 도계 화강풍화토에 대하여 3bar의 공기함입치를 갖는 HAE 디스크를 사용하여 시험이 수행되었다.



(a) Backside



(b) Frontside

Figure 3.4 Pressure panel: (a) Backside; (b) Frontside

3.2.1.2 물 저장소

물 저장소(water reservoir)는 측정장치와 플로우셀 및 공기제거장치와 연결된다. Figure 3.5(b)와 같이 밸브를 열고 닫아 각 연결장치 마다 물을 공급할 수 있기 때문에 장치 별 연결튜브 및 공기제거장치, 공기방울제어시스템(air bubble flushing system)과 HAE 디스크 사이를 포화시켜 시험과정 중 발생할 수 있는 공기를 제거하는데 목적이 있다. 물 저장소는 정제된 증류수로 채워져 있고 다른 시험장치보다 높게 위치시켜 수두차를 이용하여 각 장치 및 튜브를 포화시킬 수 있다.



(a) Injection of distilled water



(b) Connection of water reservoir

Figure 3.5 Water reservoir

3.2.1.3 플로우셀

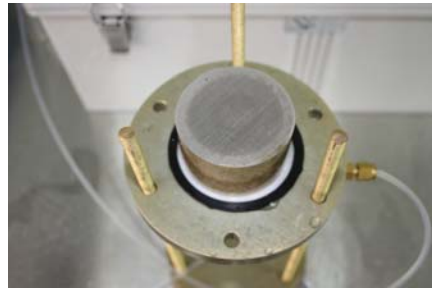
플로우셀(flowcell)은 포화된 시료가 설치된 후 가해진 간극공기압이 모관흡수력으로 작용하여 시료내 간극수를 유출시키거나 공기압을 감소시켜 물이 다시 흡수되는 곳으로 본 시험장치의 핵심부분이다. Figure 3.6은 플로우셀을 나타낸 것으로 공기압의 주입부, 시료가 놓이는 cell 내부, 간극수의 유출입부 그리고 공기방울 제어시스템(air bubble flushing system) 등으로 구성되어 있다. 그림에서 보는 바와 같이 공기압력은 상부를 통하여 전달되며, 공기방울 제어시스템은 튜브를 통하여 공기방울트랩과 물 저장소로 연결된다. 공기방울 제어시스템에 HAE 디스크가 위치하고 이는 O-ring을 통하여 고정 및 공기유입을 방지한다. 그리고 HAE 디스크 위에 포화된 시료를 설치한다. Figure 3.6(b)는 HAE 디스크 위에 놓인 포화된 시료를 나타낸 것이다. 그림에서 나타낸 시료는 직경 5.05cm, 높이 3.89cm의 원통형 공시체로서, 플라스틱 몰드를 이용하여 성형 및 설치된다. HAE 디스크와 공기방울 제어시스템 사이에는 1.59mm의 가느다란 튜브와 이를 둘러싸고 있는 원형의 공간이 존재하는데, 이 공간은 시료내 간극수압의 측정경로로서 측정시스템과 연결되어 있다. 시료 내 존재하는 간극수는 포화된 HAE 디스크를 통하여 이동이 가능하지만 시료 내 존재하는 공기는 HAE 디스크를 통과할 수 없으므로 간극공기압과 간극수압을 분리하여 제어 및 측정이 가능하다.

3.2.1.4 공기제거장치

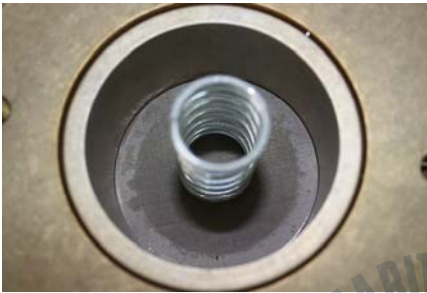
Figure 3.7과 같이 공기제거장치(air bubble trap)에는 총 4개의 연결로가 있으며 튜브 및 배출구로 이루어져 있다. 튜브는 각각 물 저장소, 플로우셀, 저울로 연결되며 배출구를 통해 공기 제거 장치를 포화시킬 수 있다. 시험과정 중 공기압 증가로 인하여 흡 시료의 간극수는 HAE 디스크를 통해 빠져나오게 되며 빠져나온 물은 저울을 통해 측정된다. 여기서, 흡 시료 내의 공기압은 물의 압력 보다는 항상 커서



(a) Air bubble flushing system



(b) HAE disk and saturated soil



(c) Fixing the soil



(d) Connection of flowcell

Figure 3.6 Flowcell

공기는 물속으로 확산될 수 있으며 이렇게 확산된 공기는 흙 시료 내의 공기가 가압될 때 HAE 디스크 통하여 물과 함께 빠져 나오게 된다. 하지만 HAE 디스크 아래 공간에 존재하는 물의 압력은 시료내의 공기압력에 비해 작으므로 물속에 확산되어 있던 공기가 이탈되어 HAE 디스크 아래에 공기방울이 생기게 되며 이는 시험과정상의 오차로 작용할 수 있다. 이러한 오차는 공기제거장치를 이용해 공기와 물을 분리시킴으로서 제거할 수 있다. 공기제거장치에는 부피별 눈금이 매겨져 있어 시험 중 발생가능한 공기량을 정량화 할 수 있으며 이러한 공기방울의 체적은 시료의 체적함수비 변화량에 포함되어 있으므로 저울에서 측정된 양으로부터 감해져야만 한다.

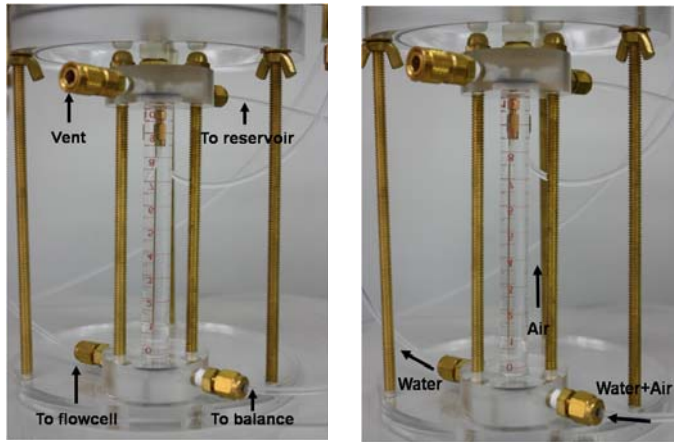


Figure 3.7 Air bubble trap

3.2.1.5 측정시스템

측정시스템(measurement system)은 저울과 SWRC(soil water retention curve) 프로그램으로 이루어져 있다. 저울위에는 흡수력 단계에 따라 변화되는 물의 양을 측정하기 위해 작은 캡을 올려놓으며 일정량의 증류수를 담아 놓아 Fig. 3.8(a)와 같이 저울로 전달되는 튜브를 잠기게 해야 한다. 그 이유는 튜브를 증류수와 연결시킴으로서 대기 중으로 흡입될 수 있는 공기를 미연에 방지하고 튜브에서 배출되어 떨어지는 물의 충격으로 인해 실시간 측정되는 저울데이터의 오차를 막기 위함이다.



(a) Small reservoir cap

(b) Balance

Figure 3.8 Measurement apparatus

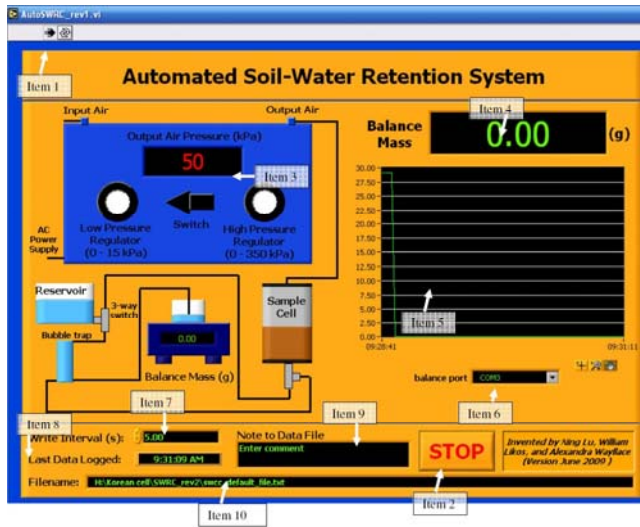


Figure 3.9 SWRC program

저울에서 측정된 데이터는 컴퓨터로 전달되어지며 Fig. 3.9와 같은 SWRC 프로그램을 통해 확인할 수 있다. SWRC 프로그램의 실시간 그림을 통해 흡의 함수 거동을 확인할 수 있으며 데이터 저장간격을 조절할 수 있어 시험을 보다 신속하고 정밀하게 측정할 수 있다. 다음은 프로그램에 대한 세부적인 특징을 나타내었다.

Item 1 시작 버튼을 의미한다.

Item 2 종료버튼을 의미한다.

Item 3 현재 시료에 주입되고 있는 공기압력을 의미한다.

Item 4 현재 저울의 측정값을 의미하며 프로그램에서 저울 측정값을 실시간으로 읽어 드린다.

Item 5 저울에서 측정되어진 값을 좌표를 형성해 실시간으로 표현한다.

Item 6 저울의 연결 포트를 의미한다.

Item 7 저장간격을 의미한다.

Item 8 마지막으로 측정값이 저장된 시간을 의미한다.

Item 9 사용자 노트로서, 측정값에 대한 추가적인 코멘트를 적을 수 있다.

Item 10 측정값을 어느 위치에 어떤 이름으로 저장했는지 알 수 있다.

3.2.2 측정원리 및 시험절차

함수특성시험 장치는 시료에 공기압력을 가해 포화시료를 불포화상태로 만드는 건조과정과 불포화상태의 시료를 포화상태로 만드는 습윤과정에 따른 함수변화특성을 파악할 수 있는 시험기로서 Fig. 3.10에 나타난 것과 같이 장치는 크게 압력조절장치 - 플로우셀 - HAE 디스크 - 공기제거장치 - 저울 - 프로그램 순으로 연결된다.

컴프레서에서 발생된 공기압을 압력조절장치에서 조절하고 계획된 공기압을 포화된 흙 시료에 가한다. 본 시험 장비는 축이동기법(axis translation technique)을 사용한 것으로, 가해진 공기압은 불포화토의 모관흡수력으로 작용하며 시료가 가지는 일정 공기함입저항치를 넘어서게 되면 흙입자에 부착되어 있는 간극수가 배출된다. 이때 간극수는 HAE디스크를 통과하여 저울을 통해 측정되어진다. 저울은 컴퓨터와 연결되어 있기 때문에 측정값은 SWRC 프로그램을 통해 실시간으로 확인 및 저장이 가능하다. 따라서 SWRC 프로그램에 나타난 실시간 그래프를 통해 간극수의 유출입 변화를 확인할 수 있으며 다음 단계의 모관흡수력을 계획할 수 있다. 본 시험기는 모관흡수력을 단계별로 증가시켜 흙 시료를 탈수시키는 건조과정 및 흡수력을 단계별로 감소시키면서 다시 흙을 포화시키는 습윤과정의 대한 함수특성 시험을 수행할 수 있다. 일련의 과정은 불포화토의 체적함수비에 따른 모관흡수력 관계를 파악하기 위한 것이며 이는 함수특성곡선을 통해 설명되어진다.

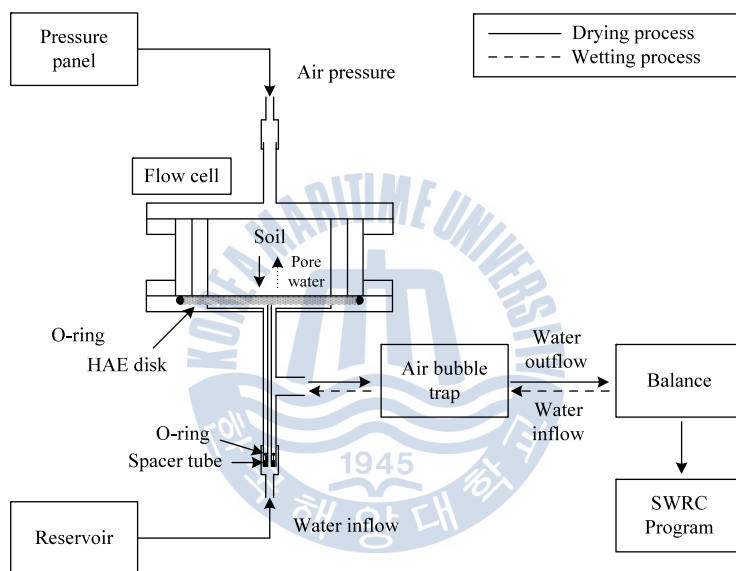


Figure 3.10 Diagram of test apparatus

제 4 장 시험결과 및 분석

4.1 함수특성시험 데이터

Figures 4.1 ~ 4.3은 각각 주문진표준사와 두개의 화강풍화토에 대한 함수특성시험동안에 SWRC 프로그램을 통해 수집된 단계별 모관흡수력과 간극수의 유출량을 시계열로 나타낸 것이다. 건조 및 습윤과정을 연속적으로 수행하여 측정한 시험데이터를 나타낸다. 점선은 단계별 재하 또는 제하된 모관흡수력을, 실선은 모관흡수력에 의해 시료 외부로 유출된 간극수의 양을 나타낸다. 그림에서와 같이 일정 모관흡수력 단계에서 유출된 간극수의 양이 일정하게 수렴되었을 때 해당 모관흡수력에서 흡이 평형상태에 도달한 것으로 보고 다음 단계의 모관흡수력을 재하 또는 제하하였다.

Figures 4.4 ~ 4.6은 각 시료의 측정데이터로부터 평형상태하의 모관흡수력과 체적함수비의 관계를 산점도로 도시한 것이다. 그림에 나타난 것과 같이 모관흡수력이 증가함에 따라 체적함수비는 감소하는 것으로 나타났다.

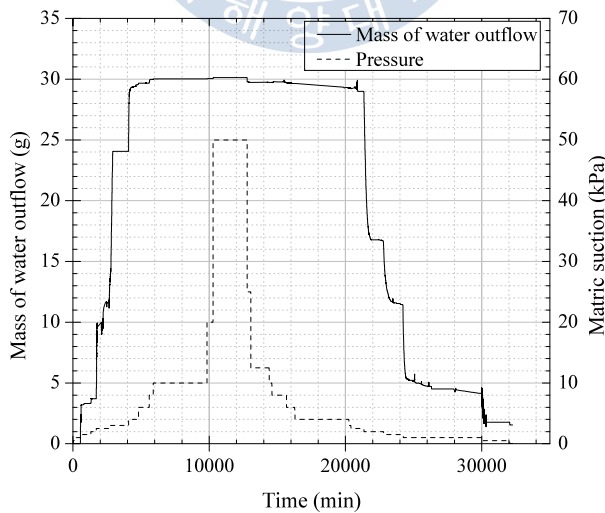


Figure 4.1 Results of soil water retention test for Jumunjin sand

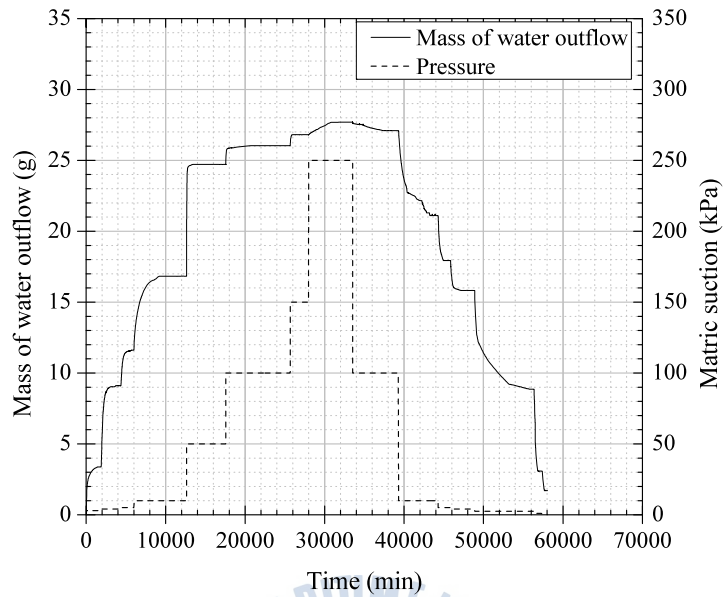


Figure 4.2 Results of soil water retention test for Inje weathered granite soil

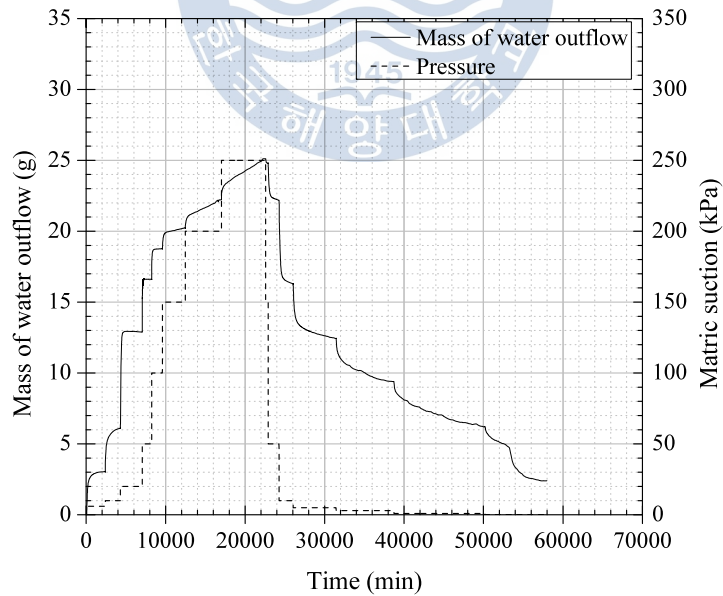


Figure 4.3 Results of soil water retention test for Dogye weathered granite soil

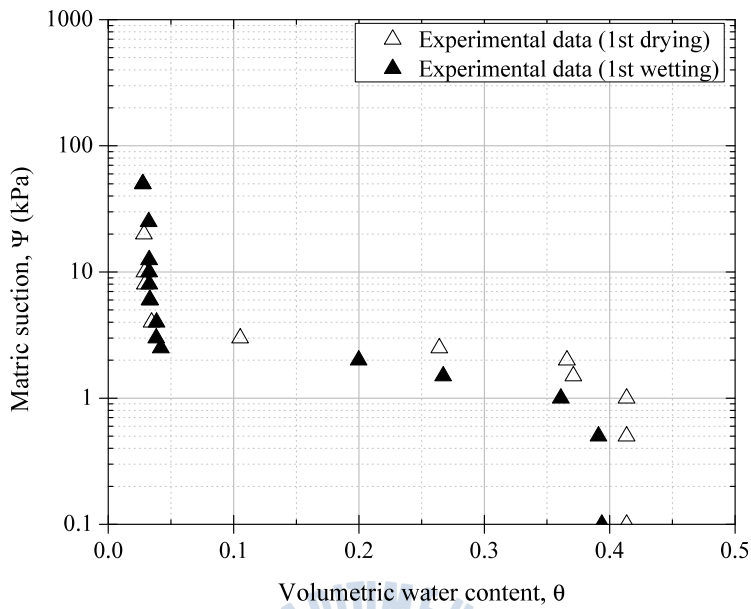


Figure 4.4 Results of soil water retention test for Jumunjin sand

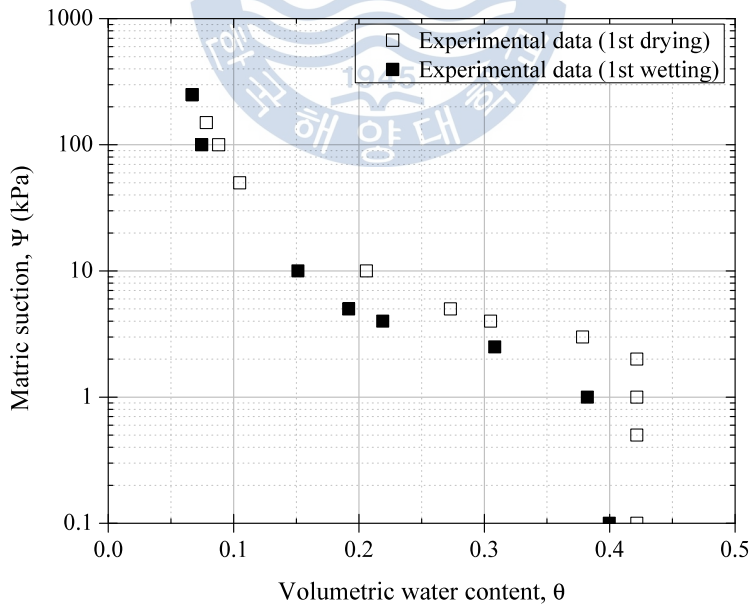


Figure 4.5 Results of soil water retention test for Inje weathered granite soil

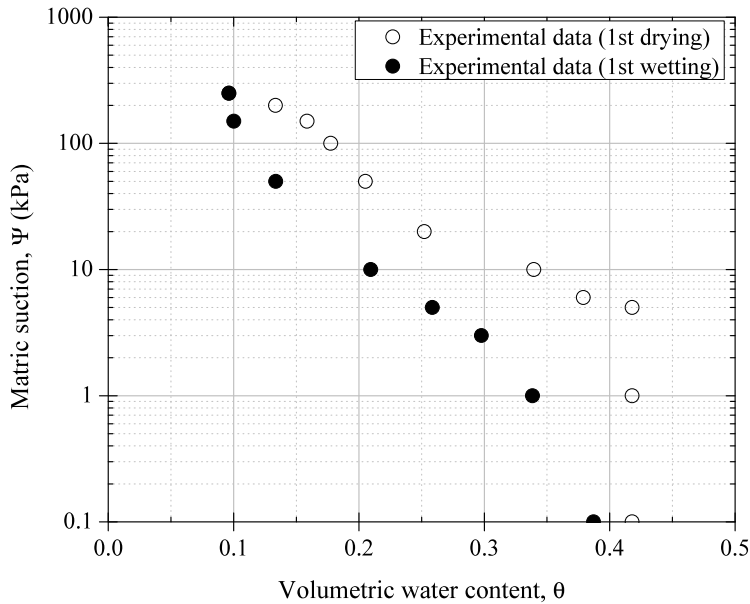


Figure 4.6 Results of soil water retention test for Dogye weathered granite soil

4.2 함수특성곡선의 추정

측정 결과에 대한 함수특성곡선을 산정하기 위한 많은 모델들(Gardner, 1958; Brooks and Corey, 1964; van Genuchten, 1980; Fredlund and Xing, 1994) 중에서 van Genuchten (1980) 모델이 가장 대표적으로 사용되고 있으며 최소한의 계수로 closed-form 해석이 가능하다고 알려져 있다(Lu and Likos, 2004). van Genuchten (1980)은 Mualem (1976)의 제안 식을 토대로 유효포화도(S_e)와 모관흡수력(ψ)의 상관관계를 이용하여 함수특성곡선을 식 (2.22)와 같이 나타내었다. 따라서 본 연구에서는 van Genuchten (1980)의 모델을 사용하여 함수특성곡선을 도출하였다.

함수특성곡선은 2.3.1.1절에서 설명한 것과 같이 이력현상을 나타내고 경계 건조/습윤 곡선(boundary drying/wetting curve)과 주 건조/습윤곡선(primary drying/wetting curve) 그리고 scanning curve들을 나타낸다. 일반적으로 2차 경계 건조곡선과 1차 경계 건조곡선의 포화체적함수비는 갇힌 공기의 영향으로 다르게 나타나고, scanning 곡선 또한 2차 경계 건조곡선과 1차 경계 습윤곡선 사이에서 나타난다

(Fig. 2.5). 따라서 1차 경계 건조곡선을 주 경계 곡선으로 선택하는 것은 적절하지 않고 2차 경계 건조곡선을 주 경계 건조곡선으로 선택하였다. 이러한 곡선을 모두 포함한 함수특성곡선의 완전한 구성을 실험으로 구하는 것은 실험의 어려움 및 상당한 노력과 시간이 요구된다. 따라서 일반적으로 1차 경계 건조곡선만이 주로 측정되고 있다.

본 연구에서는 1차 경계 건조 및 습윤과정에 대한 시험을 수행하였고, 시험 결과를 바탕으로 1차 경계 건조 및 습윤에 대한 함수특성곡선을 추정하였다. 함수특성곡선의 추정을 위해 van Genuchten (1980)의 모델 식 (2.22)가 사용되었다. 또한, 앞서 언급한 것과 같이 주 경계 곡선으로 2차 경계 건조곡선을 사용하기 위하여 2차 경계 건조곡선이 추정되었다. 이를 위해, 2차 경계 건조곡선의 모델계수 값들은 포화체적함수비(θ_s)를 제외하고 모두 1차 경계 건조곡선과 동일하며, 포화체적함수비는 1차 경계 습윤곡선과 동일한 것으로 가정하였다. Table 4.1은 각 시료에 대한 1차 경계 건조 및 습윤 곡선에 대한 van Genuchten 모델 식의 맞춤계수들(fitting parameters)을 나타낸다. Figures 4.7 ~ 4.9의 (a)는 세 시료에 대하여 측정된 실험 데이터와 추정된 1차 경계 건조 및 습윤곡선과 2차 경계 건조곡선을 나타낸다. 그리고 Figures 4.7 ~ 4.9의 (b)는 정규화된 함수특성곡선으로 주 경계 곡선으로 사용될 2차 경계 건조곡선과 1차 경계 습윤곡선을 나타낸다. 이후 본 연구에 사용될 특성곡선들은 모두 주 경계 곡선들이 이용된다.

함수특성곡선에서 세 가지 시료에 대한 공기함입치는 주문진 표준사, 인제 화강풍화토, 도계 화강풍화토 순으로 점점 증가하는 것으로 나타났으며, 전이영역에서 주문진 표준사의 경우 모관흡수력 변화에 따라 급격한 함수비 변화를 보이며 매우 가파른 기울기를 나타내고 도계 화강풍화토는 가장 완만한 기울기를 보였다. 이러한 원인은 주문진 표준사의 경우 매우 균등한 입도분포를 가지고 세립토를 포함하고 있지 않은 반면, 두 화강풍화토의 경우 입도 분포가 양호하고 세립토를 일부 포함하고

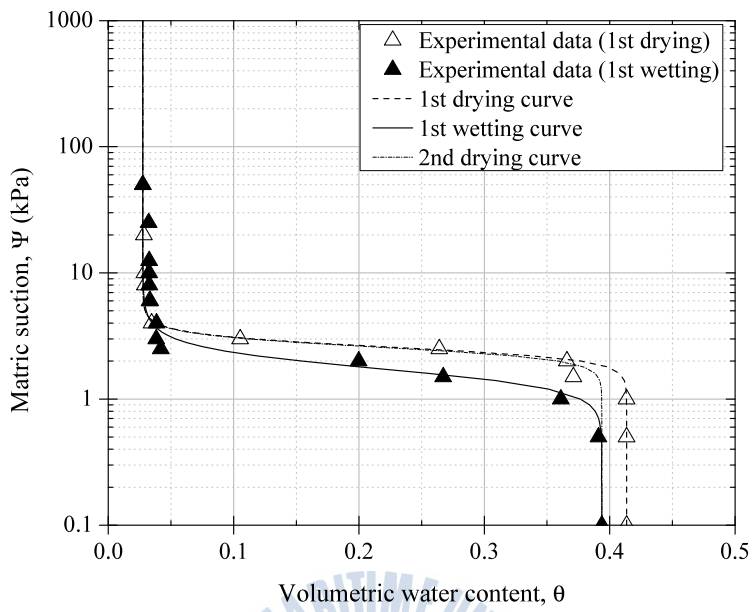
있기 때문에 판단된다(황응기 등, 2012). 건조 및 습윤과정의 함수특성시험 결과 두 과정의 곡선 사이에 이력현상을 보였으나, 세가지 시료에 대한 일관된 경향을 나타내지는 않았다.

Table 4.1 SWCC fitting parameters for three soil samples

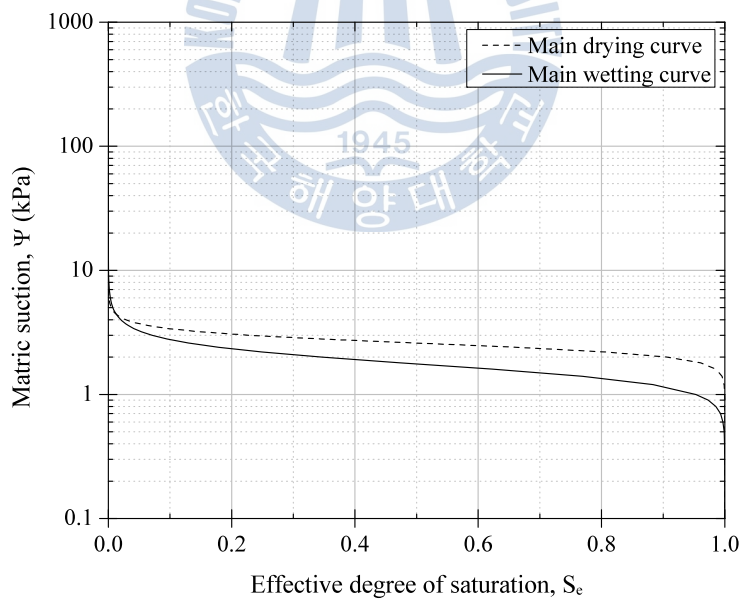
SWCC		θ_s	$\theta_r(S_r)$	$\alpha(\text{kPa}^{-1})$	n	m	R^{2*}
Jumunjin	Drying	0.414	0.028(0.068)	0.393	8.855	0.887	0.995
	Wetting	0.394	0.028(0.071)	0.598	5.462	0.817	0.984
Inje	Drying	0.422	0.067(0.159)	0.231	2.083	0.520	0.989
	Wetting	0.400	0.067(0.168)	0.404	2.125	0.529	0.993
Dogye	Drying	0.418	0.032(0.077)	0.100	1.469	0.319	0.978
	Wetting	0.387	0.032(0.083)	0.643	1.353	0.261	0.997

R^2 : 결정계수



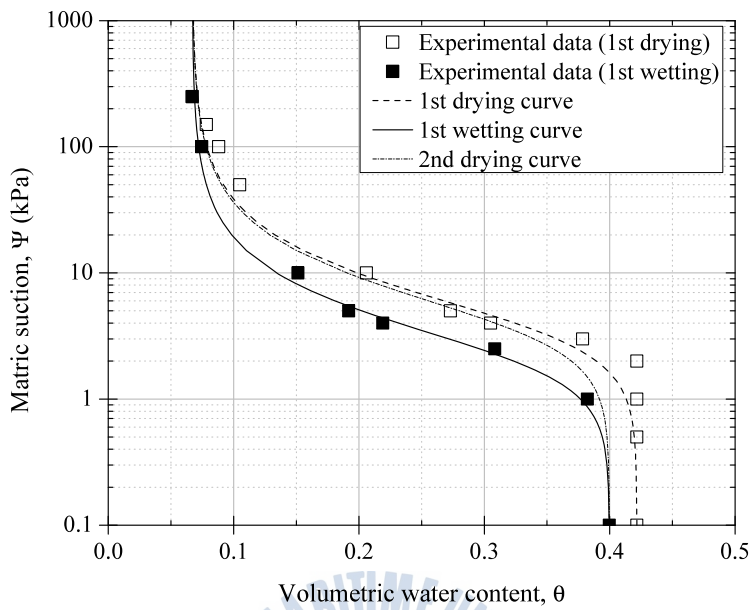


(a)

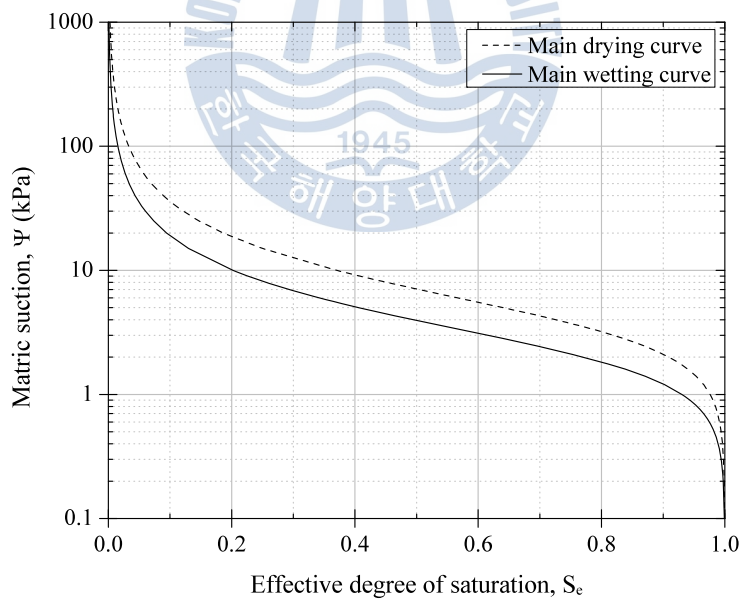


(b)

Figure 4.7 SWCC for Jumunjin sand

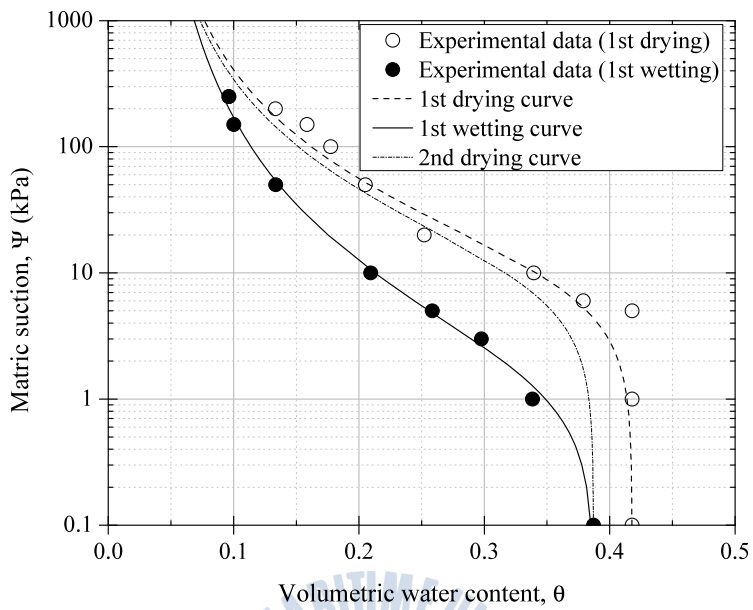


(a)

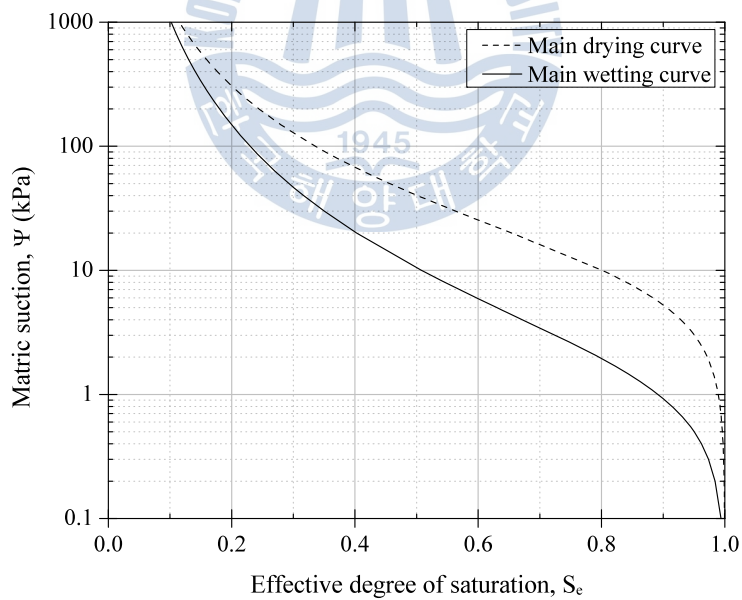


(b)

Figure 4.8 SWCC for Inje weathered granite soil



(a)



(b)

Figure 4.9 SWCC for Dogye weathered granite soil

4.3 투수계수특성곡선의 추정

2.4절에서 설명한 것과 같이 불포화토 내 간극수의 흐름은 모관흡수력에 따른 함수비의 변화로 인하여 포화토에서의 흐름과 다르다. 따라서 강우 등으로 인한 불포화 지반 내 간극수의 흐름을 파악하기 위해서는 불포화 투수계수특성함수(hydraulic conductivity characteristic curve, HCCC)의 추정이 반드시 필요하다. 본 연구에서는 강우 시 사면의 침투해석을 위하여 세가지 시료에 대한 주 경계 함수특성곡선(2차 경계 건조곡선 및 1차 경계 습윤곡선)으로 부터 van Genuchten (1980)이 Mualem (1976)의 모델을 바탕으로 제안한 식 2.27과 Table 3.1에 나타난 각 시료의 포화투수계수를 이용하여 투수계수특성함수를 추정하였다. Figures 4.10 ~ 4.12는 세 시료에 대한 투수계수특성곡선을 나타낸다.

HCCC 또한 SWCC와 마찬가지로 건조와 습윤과정 사이에 모관흡수력에 따른 이력현상이 나타남을 알 수 있으며, 이는 각 모관흡수력 단계에서 함수비가 다르게 나타나는 함수특성으로 인해 투수계수 또한 이력현상이 나타남을 알 수 있다.

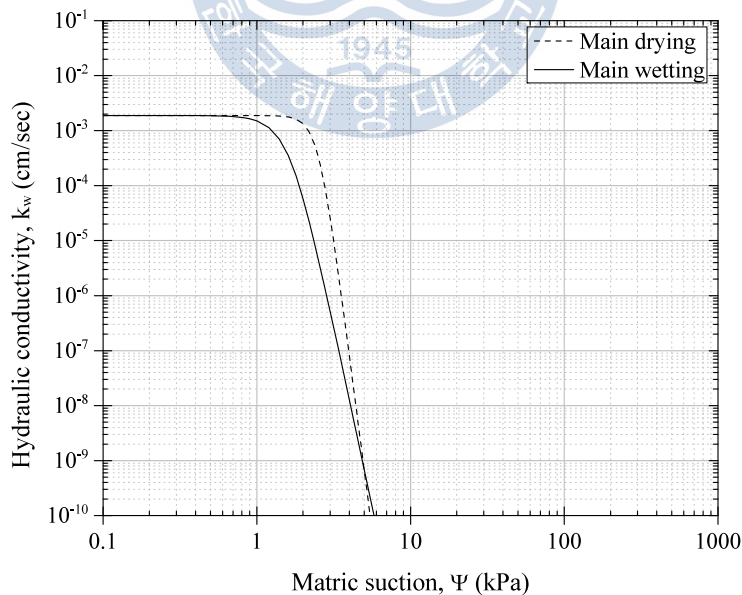


Figure 4.10 HCCC for Jumunjin sand

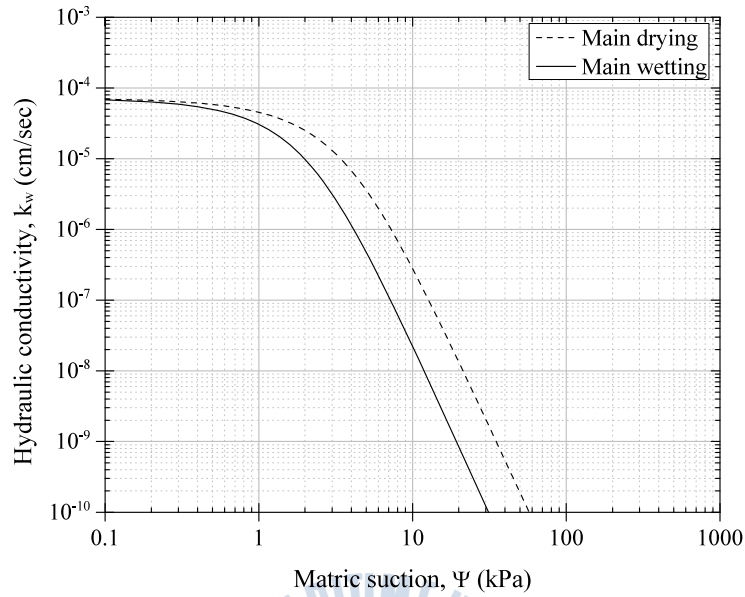


Figure 4.11 HCCC for Inje weathered granite soil

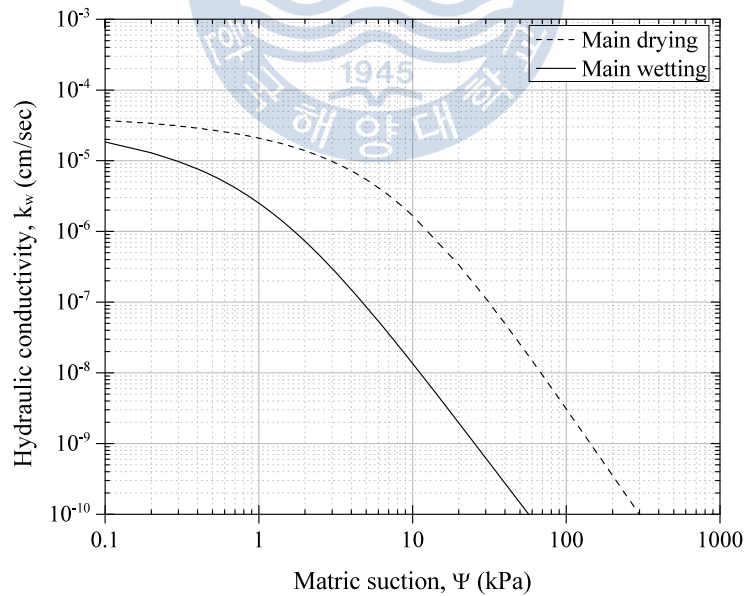


Figure 4.12 HCCC for Dogye weathered granite soil

4.4 흡입응력특성곡선의 추정

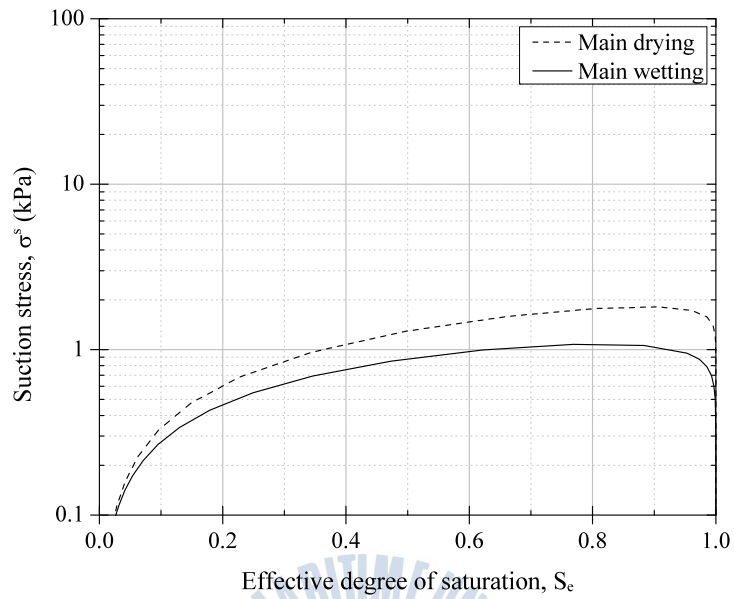
변형 및 안정과 관련된 지반공학적 문제들은 흡입자에 작용하는 유효응력에 의해서 지배된다. 이는 포화토뿐 아니라 불포화토에서도 유효하다. 포화토의 경우 Terzaghi (1925, 1936)에 의하여 제안된 식 2.28에 의하여 지반 내 작용하는 유효응력을 산정할 수 있다. 하지만 불포화토의 경우 부간극수압의 작용으로 인하여 포화토와는 달리 지반 내 간극수로 인하여 토립자간의 겉보기 점착력이 발생한다(김태형, 2002; 김태형 등, 2004). 불포화토의 경우 Bishop (1959)에 의해 제안된 식 2.29를 이용하여 불포화토의 유효응력 내 모관흡수력의 영향을 반영할 수 있다. 하지만 2.5.2절에서 설명한 것과 같이 불포화토의 유효응력을 나타내기 위해 도입된 유효응력계수 χ 는 여러 연구자들에 의해 다양하게 제안되어 왔다(Schrefler, 1984; Oberg and Sallfors, 1997; Khalili and Khabbaz, 1998; Sheng et al., 2003b; Tarantino and Tombolato, 2005; Lu and Likos, 2006).

본 연구에서는 불포화토의 유효응력을 평가하기 위하여 Lu and Likos (2006)가 제안한 흡입응력(suction stress)을 사용하였다. Figures 4.13 ~ 4.15의 (a)와 (b)는 각각 유효포화도(S_e) 및 모관흡수력(ψ)의 변화에 따른 흡입응력의 변화를 나타내고 있다. 주문진표준사의 경우 공기함입치까지는 흡입응력이 모관흡수력과 동일한 크기로 증가하고, 공기함입치 이후 감소하여 대략 4kPa 정도에서 흡입응력이 사라지는 것으로 나타났다. 인제 화강풍화토의 경우 공기함입치 이전에는 주문진표준사와 동일한 경향을 보였으나, 공기함입치 이후 일정한 흡입응력에 수렴하는 것으로 나타났다. 도계 화강풍화토의 경우 공기함입치 이전에는 주문진 표준사 및 인제 화강풍화토와 동일한 경향을 보이나, 공기함입치 이후에도 비선형적인 경향을 나타내며 지속적으로 증가하는 경향을 보였다.

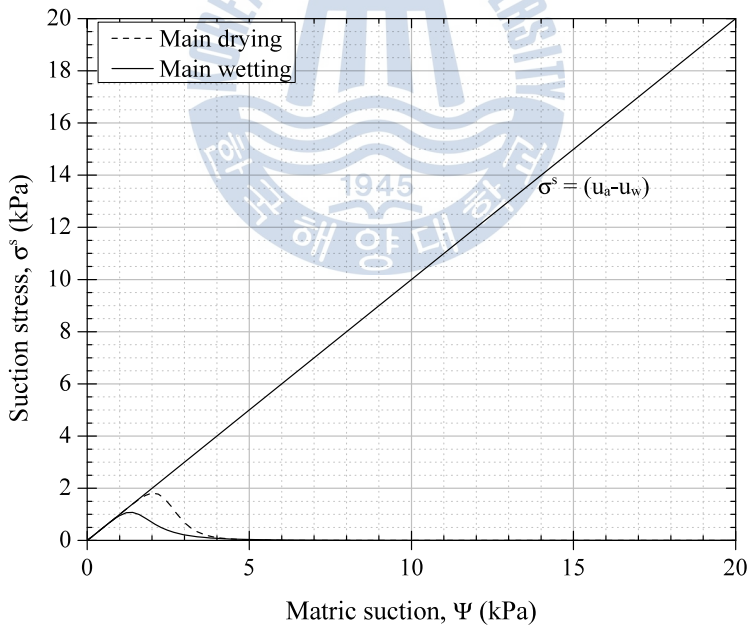
더욱이 흡입응력특성곡선(suction stress characteristic curve, SSCC) 또한 함수특성곡선(SWCC) 및 투수계수특성곡선(HCCC)과 마찬가지로 건조와 습윤과정 사

이에 모관흡수력에 따른 이력현상이 나타남을 알 수 있으며, 이는 앞서 언급한 것과 같이 흙의 함수특성에 기인된다. 건조과정의 흡입응력특성곡선이 습윤과정의 흡입응력특성곡선보다 더 큰 흡입응력 범위를 가지는 것으로 나타났다. 이는 불포화토의 유효응력 및 전단강도의 차이를 유발하고, 이후 사면안정해석에 영향을 미칠 것으로 생각된다.





(a)



(b)

Figure 4.13 SSCC for Jumunjin sand

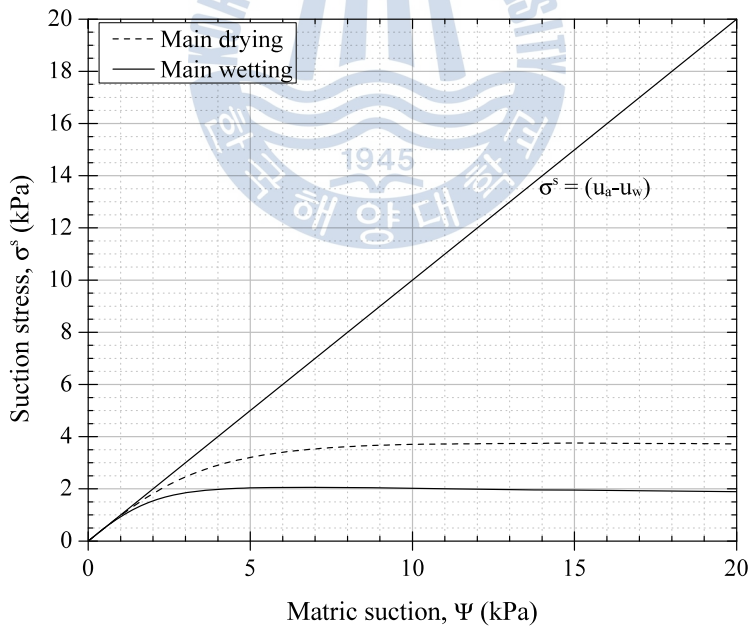
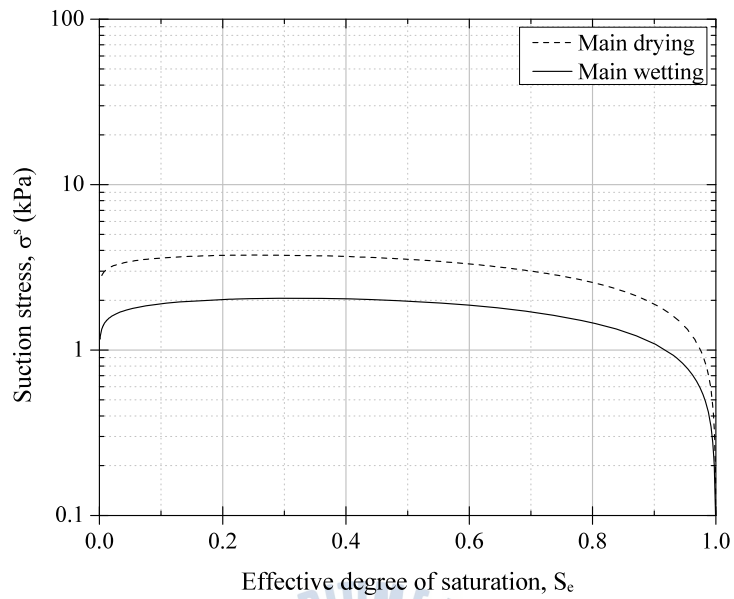
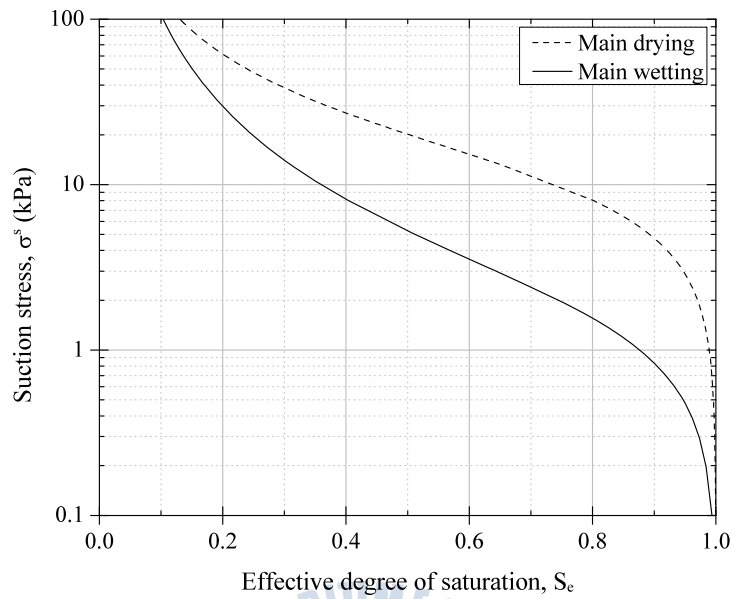
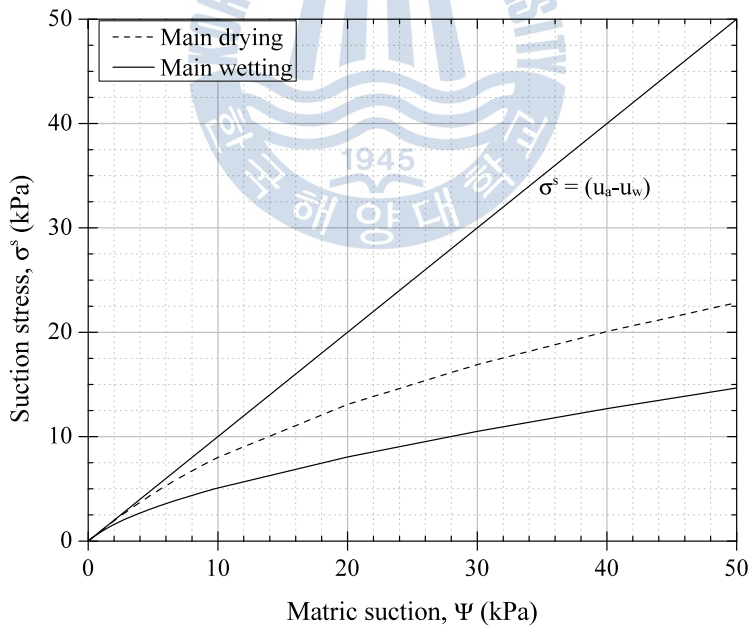


Figure 4.14 SSCC for Inje weathered granite soil



(a)



(b)

Figure 4.15 SSCC for Dogye weathered granite soil

제 5 장 불포화무한사면의 침투 및 사면안정

최근 국내에서 발생한 산사태는 대부분 하절기 집중강우 동안에 발생되고 있으며, 지표면으로부터 2m 이내의 깊이에서 발생하는 얇은 파괴로 평면파괴 형태를 나타내고 있다(Kim et al., 2007). 강우로 인한 사면파괴의 경우, 지하수위의 상승으로 인한 지반 내 간극수압의 증가로 인한 것이 아니라, 강우의 침투로 인한 습윤전선(wetting front)의 발달과 포화대(wetting band)의 형성으로 인해 얇은 사면파괴가 발생하는 것으로 알려져 있다(Fredlund and Rahardjo, 1995).

따라서 본 장에서는 강우의 침투가 불포화 사면의 안정성에 미치는 영향을 검토하기 위해 수치해석을 수행하였다. 불포화 사면의 침투해석 및 안정해석을 위하여 Geo-Slope International사의 Geostudio2012의 Seep/W 및 Slope/W를 사용하였다.

5.1 사면의 모델링 및 경계조건

앞서 언급한 것과 같이 강우 시 발생하는 대부분의 사면파괴는 얇은 평면파괴 형태로 무한사면의 안정해석으로 평가될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 해석대상 사면을 무한사면으로 가정하였다. 또한 해석사면은 국내사면 설계 시 흙막기 사면의 표준인 1V:1.5H의 기울기를 가지고, 3m의 사면깊이를 가지는 것으로 고려하였으며, 그 아래 지반은 불투수층으로 가정하였다.

Figure 5.1은 침투해석 사면의 형상 및 경계조건을 나타낸다. 침투해석을 위하여 유한요소법이 적용되었다. 침투해석을 위한 초기조건으로 지표면 3m 아래에 지하수위가 지표면과 평행하게 존재하며, 지하수위 위로 부간극수압이 거리에 비례하여 정수압적으로 증가하지만 최대 부간극수압 수두를 1m로 제한하였다. Figure. 5.2는 국내 사면에서 측정된 모관흡수력으로 범위가 10kPa 내외인 것으로 나타났으므로

이와 같은 가정이 적절한 것으로 판단된다. 경계조건으로는 각 지반에서 충분한 침투가 발생하도록 포화투수계수보다 약간 더 큰 단위 침투량을 지표면 경계조건으로 설정하여 해석을 수행하였다. Table 5.1은 각 지반에 대한 침투해석에 적용된 단위 침투량으로 시간당 강우량을 나타낸다.

강우 시 불포화 지반의 시간에 따른 모관흡수력 변화를 검토하기 위하여 비정상 해석(transient analysis)을 수행하였으며 강우조건은 Table 5.1에 나타난 침투량을 48 시간동안 지속되는 것으로 하였다. 또한, 대기와 접해있는 일반적인 사면의 경우 초기 간극공기압은 0으로 가정할 수 있고, 해석 동안 전 해석영역에서의 간극공기압은 변하지 않고 0을 유지하는 것으로 가정하였다.

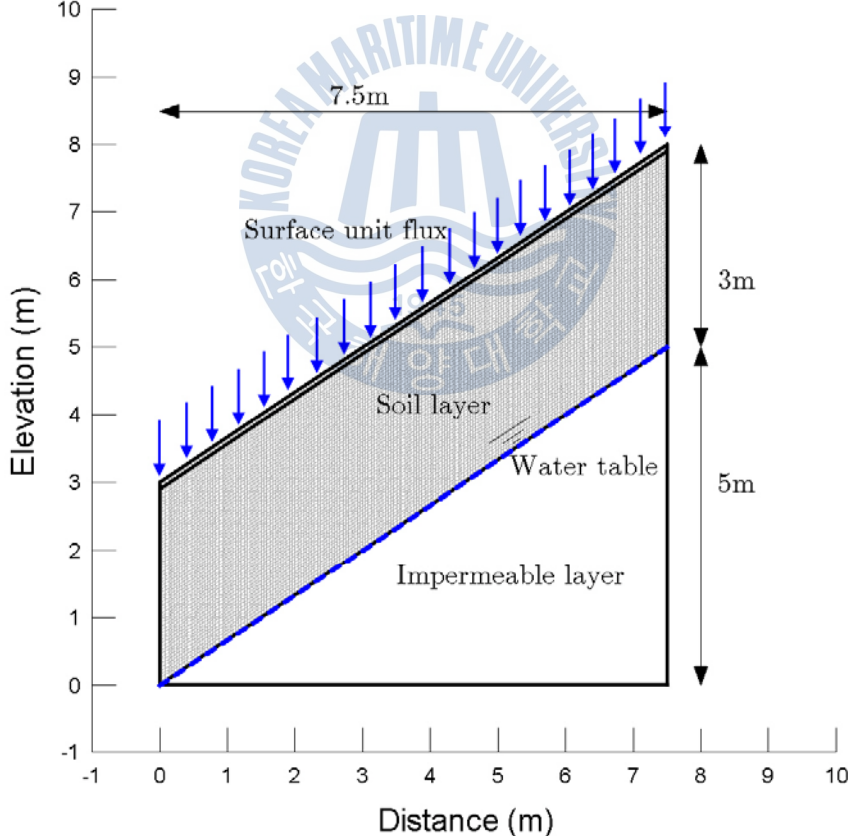


Figure 5.1 Geometry of seepage analysis

Table 5.1 Boundary condition of seepage analysis for infinite slope

Soil	Unit flux (m/hr)
Jumunjin	0.0700
Inje	0.0026
Dogye	0.0018

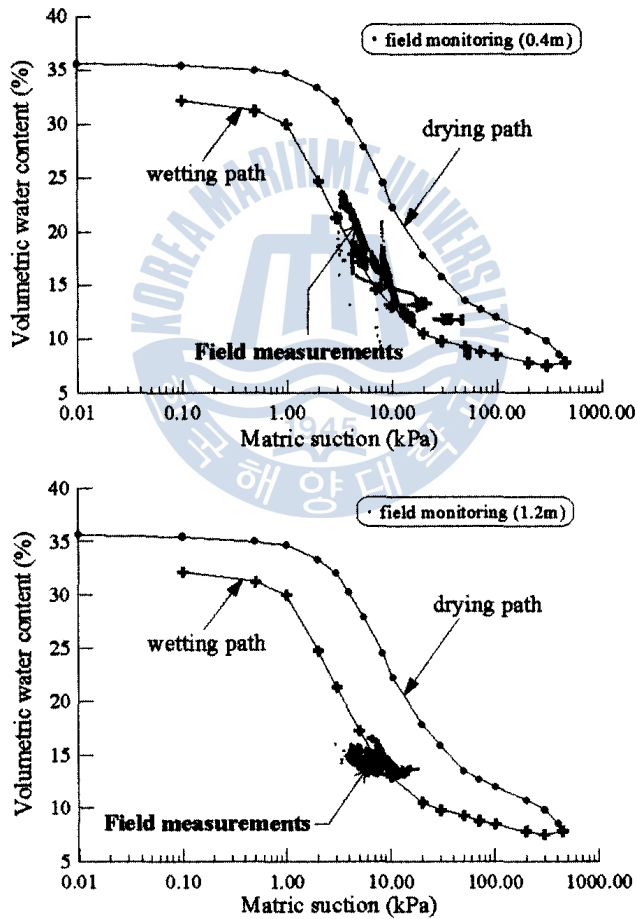


Figure 5.2 In-situ measured matric suction (이인모 등, 2003)

5.2 불포화 무한사면의 비정상 침투해석

강우시 침투에 의한 지반내 간극수압 및 함수비의 변화를 시간에 따라 분석하기 위하여 비정상 침투해석(transient seepage analysis)을 수행하였다. 불포화토 침투해석을 위한 지반의 기본물성으로 함수특성곡선과 투수계수특성곡선이 반드시 필요하며, 이는 3장의 함수특성시험을 통하여 4장에서 각각 구하였다. 주문진 표준사와 인제 및 도계 화강풍화토에 대한 함수특성곡선 및 투수계수특성곡선은 Figs. 4.7 ~ 4.12에 각각 나타나 있으며, 함수특성곡선의 맞춤계수 및 포화투수계수는 Table 4.1 과 Table 3.1에 각각 제시되었다.

5.2.1 주문진 모래 사면

Figures 5.3 ~ 5.5는 주문진 모래로 형성된 사면에 대한 건조과정의 특성곡선들을 이용한 비정상 침투해석에 의한 시간에 따른 습윤전선의 발달과 지반 내 간극수압 그리고 지반 내 체적함수비의 변화를 보여준다. 습윤전선(wetting front)은 지반 내 물의 침투시 습윤부분과 건조부분의 경계면을 나타내고, Brakensiek and Onstad (1977)가 제안한 식 (5.1)을 이용하여 습윤전선에서의 모관흡수력을 산정할 수 있다. 이 식으로 부터 산정된 세 지반의 건조 및 습윤과정에 대한 습윤전선에서의 모관흡수력은 Table 5.2와 같다.

$$\psi_f = \frac{2 + 3\lambda}{1 + 3\lambda} \left(\frac{\psi_b}{2} \right) \quad (5.1)$$

여기서, ψ_f ; 습윤전선에서의 모관흡수력, ψ_b , λ ; 각각 식 (2.19)에 나타난 계수.

Figures 5.3 ~ 5.5를 살펴보면, 강우 침투이후 시간이 경과함에 따라 습윤전선이 지표면에서부터 점점 깊어져 상부에 포화대(wetting band)가 형성됨을 알 수 있으며, 11시간 경과 후 사면의 전 영역이 거의 포화되며 초기 사면내 존재하던 모관흡수력이 거의 0에 가까워지지만 사면 전체적으로 양의 간극수압을 나타내진 않는다. 하지만, 약 11.5시간 이후 전 영역이 급격히 포화되어 사면내 양의 간극수압이 정수압 형

태로 발생됨을 알 수 있다. 이러한 현상은 상대적으로 큰 주문진 모래의 투수계수 때문으로 판단된다.

Figures 5.6 ~ 5.8은 습윤과정의 특성곡선들을 이용한 침투해석 결과를 보여 준다. 해석결과 습윤과정의 함수특성곡선을 이용한 경우 전반적으로 건조과정의 함수특성곡선을 이용한 해석과 비슷한 결과가 나타났다.

Table 5.2 Matric suction at wetting front for three soils during drying and wetting processes

Soil	Matric suction at wetting front (kPa)	
	Drying process	Wetting process
Jumunjin	1.069	0.959
Inje	1.747	0.860
Togye	3.548	1.118

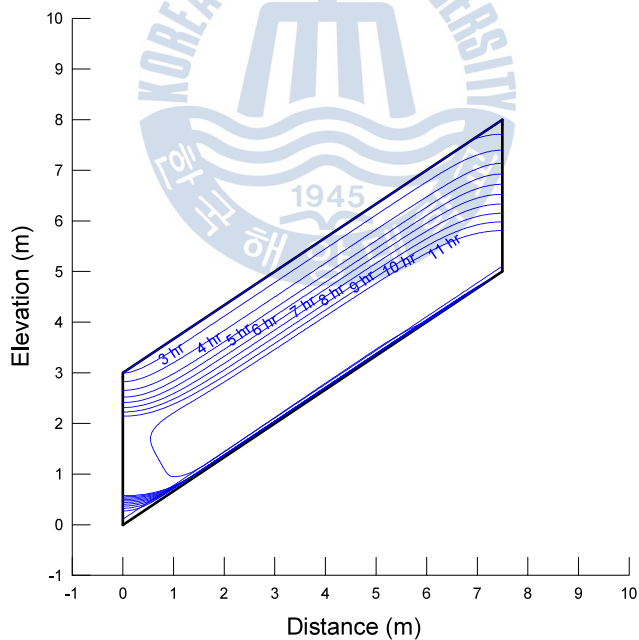


Figure 5.3 Development of wetting front with time of seepage analysis for infinite slope using Jumunjin drying SWCC

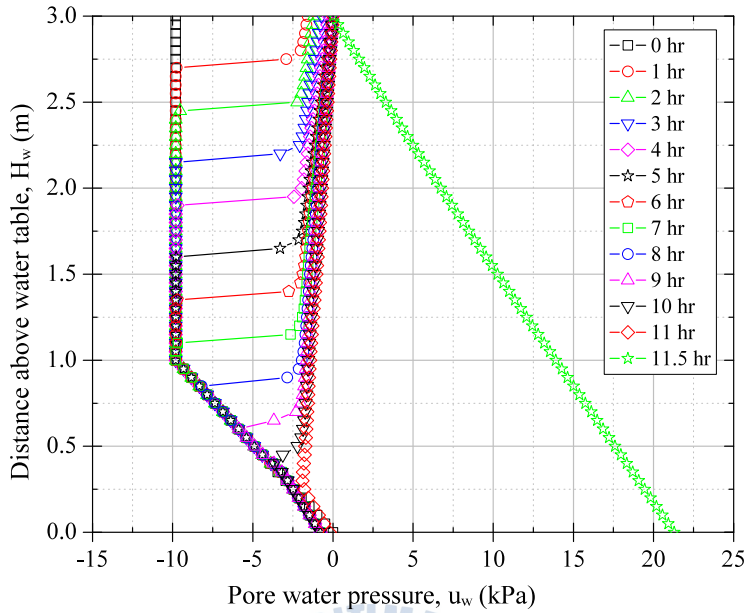


Figure 5.4 Variation of suction profile with time of seepage analysis for infinite slope using Jumunjin drying SWCC

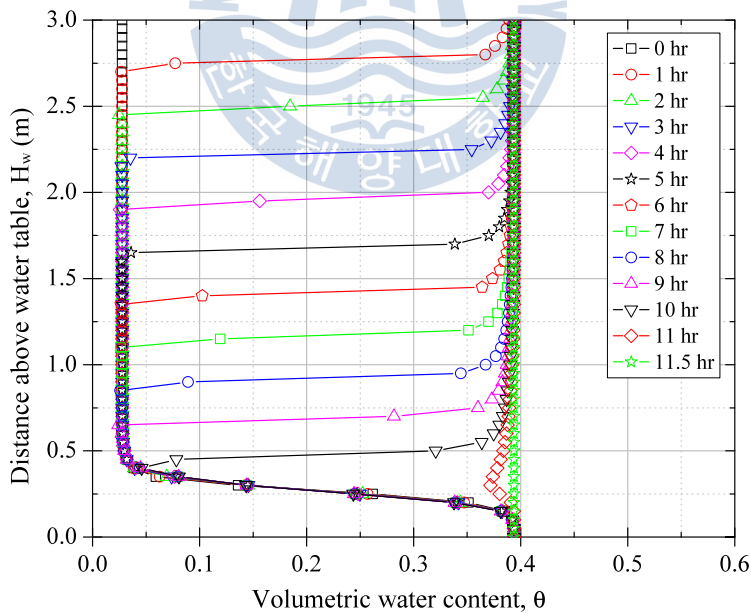


Figure 5.5 Variation of volumetric water content profile with time of seepage analysis for infinite slope using Jumunjin drying SWCC

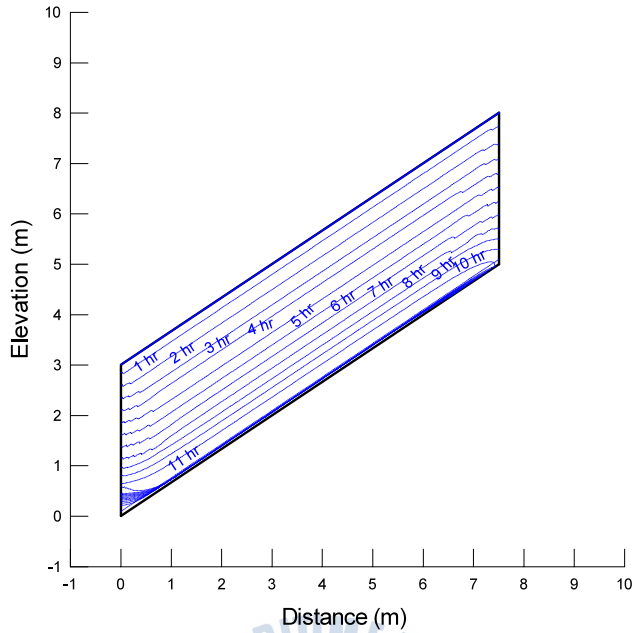


Figure 5.6 Development of wetting front with time of seepage analysis for infinite slope using Jumunjin wetting SWCC

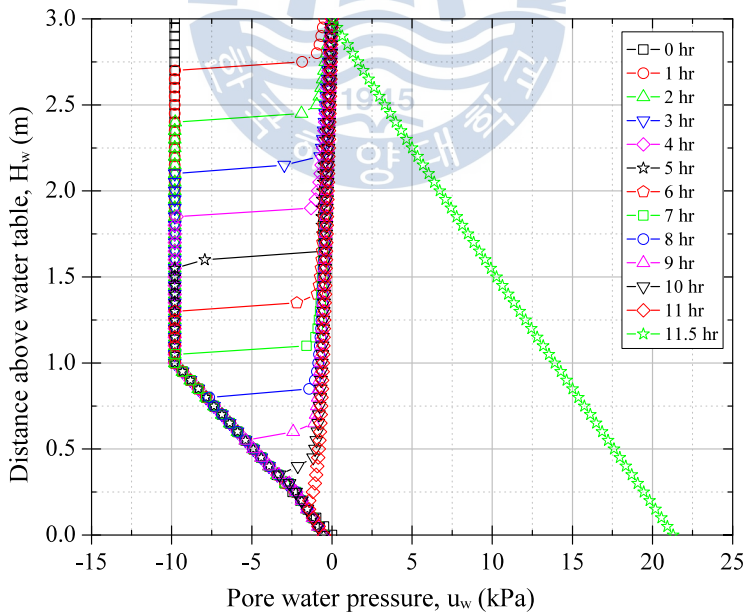


Figure 5.7 Variation of suction profile with time of seepage analysis for infinite slope using Jumunjin wetting SWCC

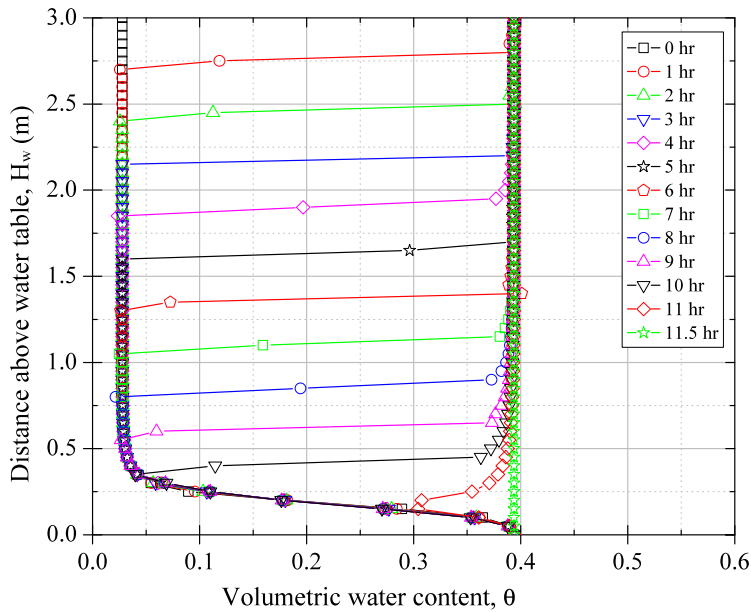


Figure 5.8 Variation of volumetric water content profile with time of seepage analysis for infinite slope using Jumunjin wetting SWCC

5.2.2 인제 화강풍화토 사면

Figures 5.9 ~ 5.11은 인제 화강풍화토로 형성된 사면에 대한 건조과정의 특성 곡선들을 이용한 비정상 침투해석에 의한 시간에 따른 습윤전선의 발달과 지반 내 간극수압 그리고 지반 내 포화체적함수비의 변화를 보여준다.

인제 화강풍화토의 경우 주문진 표준사와 달리 강우 침투로 인한 습윤전선의 발달이 느리며 48시간이 경과하여도 지표면으로부터 약 60cm 아래까지만 습윤전선이 발달함을 알 수 있다. 이는 인제 화강풍화토의 포화투수계수가 주문진 표준사의 포화투수계수보다 훨씬 작기 때문으로 판단된다. 모관흡수력 또한 지표면으로부터 약 85cm 깊이 아래는 초기 모관흡수력을 그대로 유지하고 있음을 알 수 있다.

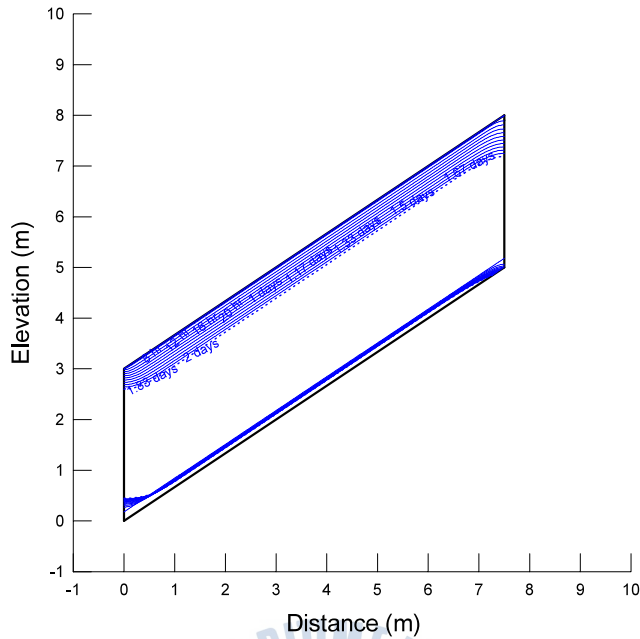


Figure 5.9 Development of wetting front with time of seepage analysis for infinite slope using Inje drying SWCC

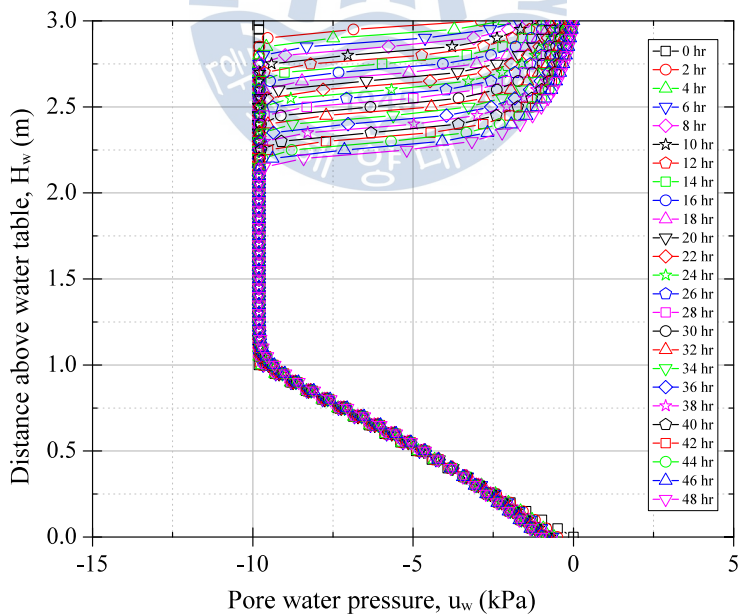


Figure 5.10 Variation of suction profile with time of seepage analysis for infinite slope using Inje drying SWCC

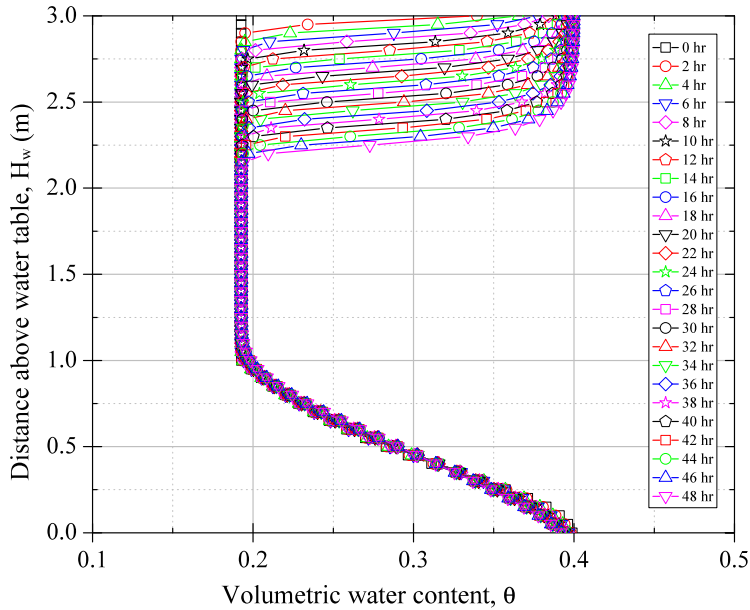


Figure 5.11 Variation of volumetric water content profile with time of seepage analysis for infinite slope using Inje drying SWCC

Figures 5.12 ~ 5.14는 습윤과정의 특성곡선들을 이용한 침투해석 결과를 보여주는 것으로, 습윤전선은 강우 침투 48시간 경과 후에도 약 48cm 발달한 것으로 나타났다. 이는 동일한 모관흡수력에서 습윤과정이 건조과정보다 더 적은 유효포화도를 나타내므로 투수계수가 더 작아 강우로 인한 습윤전선의 발달이 느리게 나타난 것으로 판단된다. 또한 약 65cm 깊이 아래는 초기 모관흡수력을 유지하며 건조과정을 이용한 해석보다 습윤전선 깊이에서의 모관흡수력의 변화가 더욱 가파른 것을 알 수 있다.

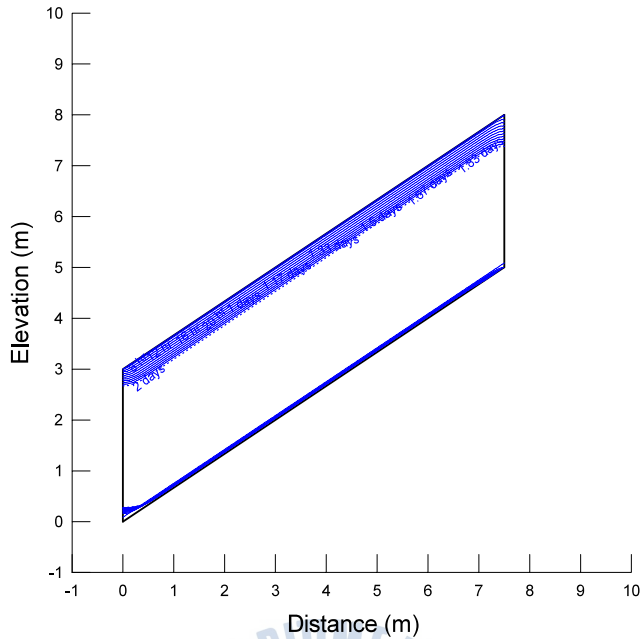


Figure 5.12 Development of wetting front with time of seepage analysis for infinite slope using Inje wetting SWCC

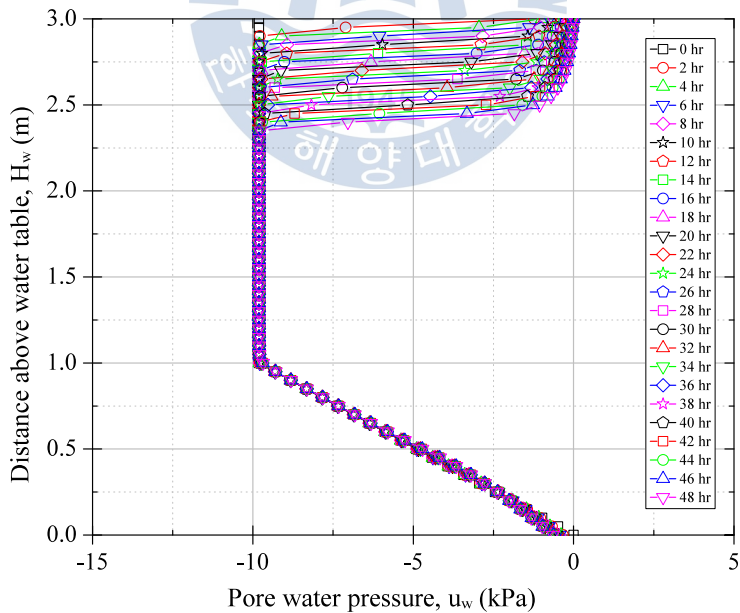


Figure 5.13 Variation of suction profile with time of seepage analysis for infinite slope using Inje wetting SWCC

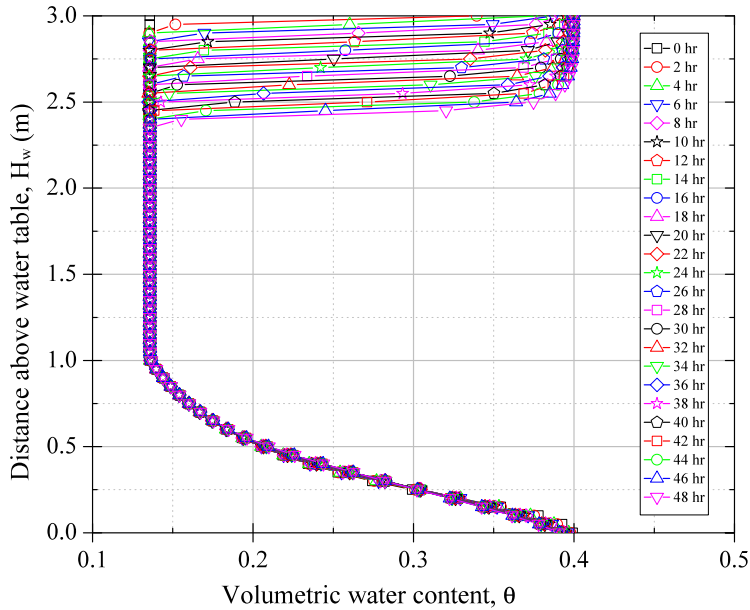


Figure 5.14 Variation of volumetric water content profile with time of seepage analysis for infinite slope using Inje wetting SWCC

5.2.3 도계 화강풍화토 사면

Figures 5.15 ~ 5.17은 도계 화강풍화토로 형성된 사면에 대한 건조과정의 특성 곡선들을 이용한 비정상 침투해석에 의한 시간에 따른 습윤전선의 발달과 지반 내 간극수압 그리고 지반 내 포화체적함수비의 변화를 보여준다.

도계 화강풍화토의 경우 인제 풍화토와 같이 강우 침투로 인한 습윤전선의 발달이 느리며 48시간 경과이후 지표면으로 부터 약 120cm 아래까지 습윤전선이 발달함을 알 수 있다. 이는 초기 10kPa의 모관흡수력에 대한 불포화투수계수에서 도계 풍화토의 불포화투수계수가 인제 풍화토의 그것보다 크기 때문으로 판단된다. 또한, 습윤전선 이후의 모관흡수력 변화가 주문진 표준사나 인제 풍화토에 비해 완만한 것으로 나타났다.

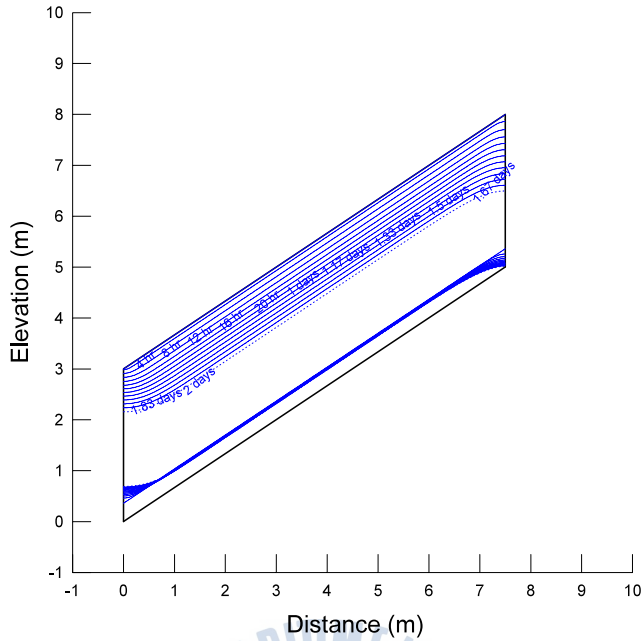


Figure 5.15 Development of wetting front with time of seepage analysis for infinite slope using Dogye drying SWCC

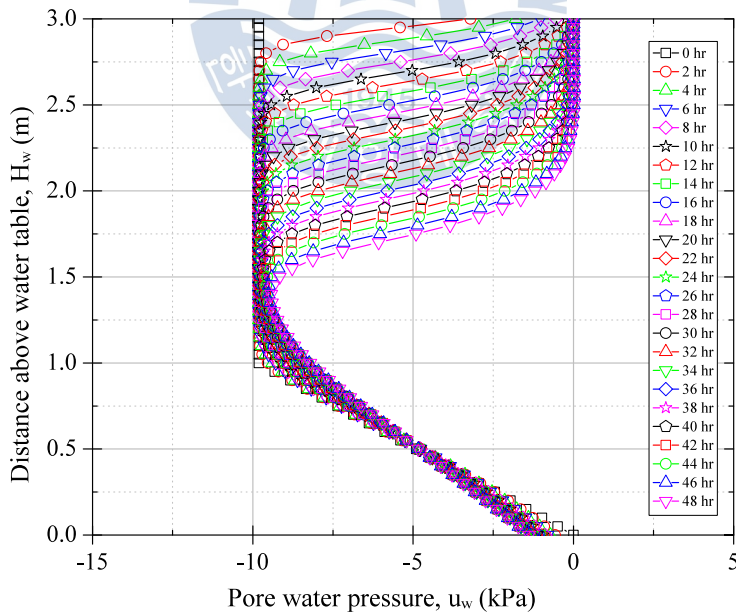


Figure 5.16 Variation of suction profile with time of seepage analysis for infinite slope using Dogye drying SWCC

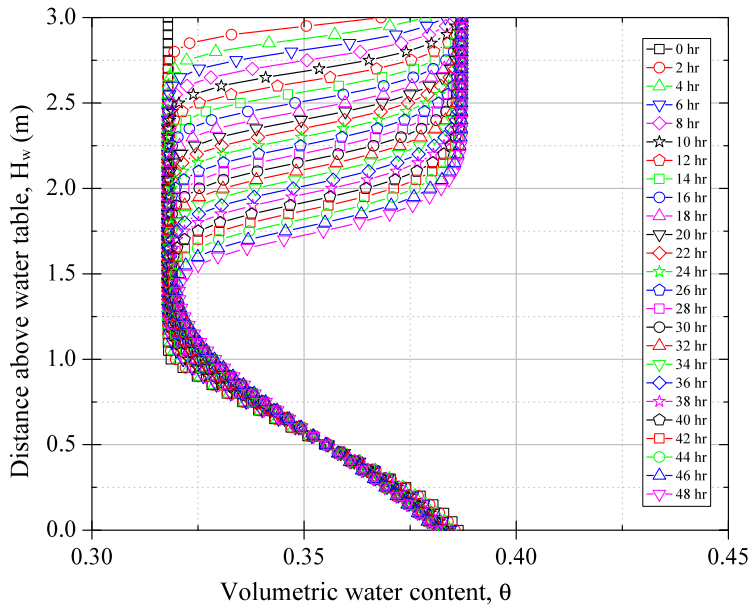


Figure 5.17 Variation of volumetric water content profile with time of seepage analysis for infinite slope using Dogye drying SWCC

Figures 5.18 ~ 5.20는 습윤과정의 특성곡선들을 이용한 침투해석 결과를 보여주는 것으로, 강우 침투 48시간 경과후 습윤전선이 약 40cm 발달한 것으로 나타나 건조곡선의 경우와 상당한 차이를 보인다. 이는 도계 풍화토의 경우 함수특성곡선의 이력이 다른 두 개의 흙에 비하여 상대적으로 크기 때문으로 판단된다. 또한 초기 지표면의 투수계수가 인제 풍화토의 경우보다 작아 습윤전선의 발달이 작은 것으로 판단된다. 약 40cm 깊이 아래는 초기 모관흡수력을 유지하며 건조과정을 이용한 해석보다 습윤전선 깊이에서의 모관흡수력의 변화가 더욱 가파른 것을 알 수 있다.

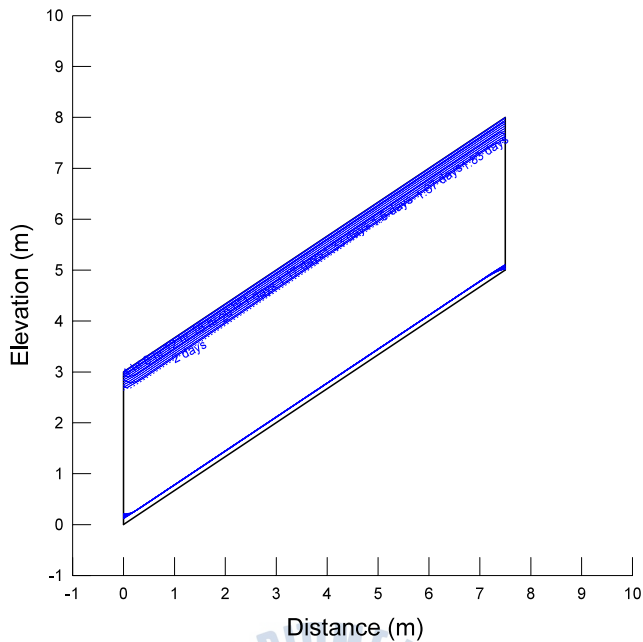


Figure 5.18 Development of wetting front with time of seepage analysis for infinite slope using Dogye wetting SWCC

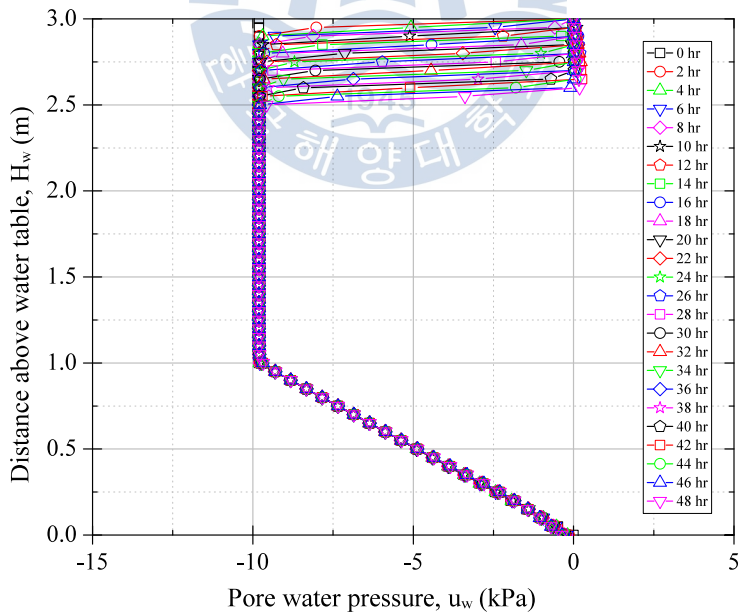


Figure 5.19 Variation of suction profile with time of seepage analysis for infinite slope using Dogye wetting SWCC

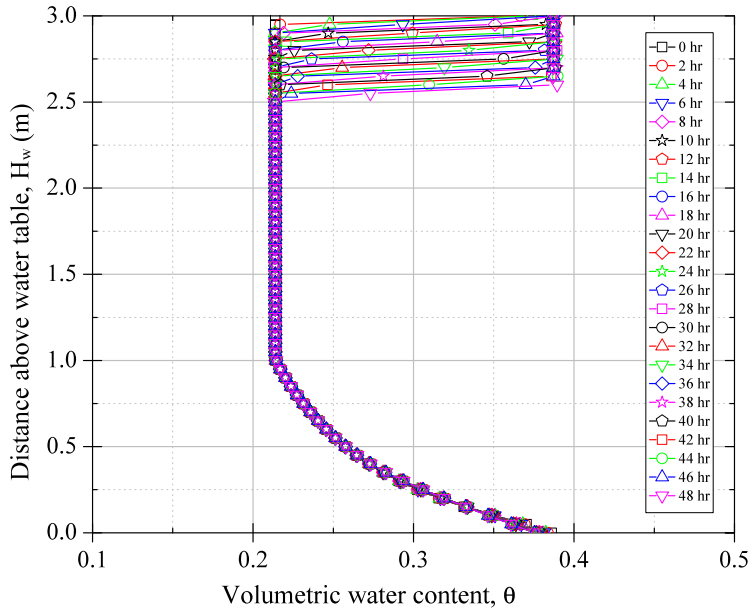


Figure 5.20 Variation of volumetric water content profile with time of seepage analysis for infinite slope using Dogye wetting SWCC

5.3 사면안정해석

본 절에서는 강우 시 침투에 의한 지반 내 흡입응력의 변화가 사면의 안정성에 미치는 영향을 검토하고자 한다. 이를 위하여 앞서 수행된 비정상 침투해석결과로부터 강우 시 시간에 따른 지반 내 모관흡수력의 변화를 산정하여 Lu et al. (2010)가 제안한 흡입응력 식 (2.38)에 기반을 둔 유효응력 식 (2.29)와 전단강도 식 (2.41)을 이용하여 불포화 무한사면의 안정성을 평가하였다. 한계평형해석을 이용한 일반적인 무한사면의 안전율은 식 (5.2)와 같이 표현할 수 있고, Lu et al.의 유효응력을 대입하면 불포화 무한사면에 대한 안전율은 식 (5.3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_s = \frac{\tau_f}{\tau} = \frac{c' + \sigma' \tan \phi'}{\gamma H_{ss} \sin \beta \cos \beta} \quad (5.2)$$

$$\begin{aligned}
 F_s &= \frac{c' + (\gamma H_{ss} \cos^2 \beta + \sigma^s) \tan \phi'}{\gamma H_{ss} \sin \beta \cos \beta} \\
 &= \frac{\tan \phi'}{\tan \beta} + \frac{2c'}{\gamma H_{ss} \sin 2\beta} + \frac{\sigma^s}{\gamma H_{ss}} (\tan \beta + \cot \beta) \tan \phi' \quad (5.3)
 \end{aligned}$$

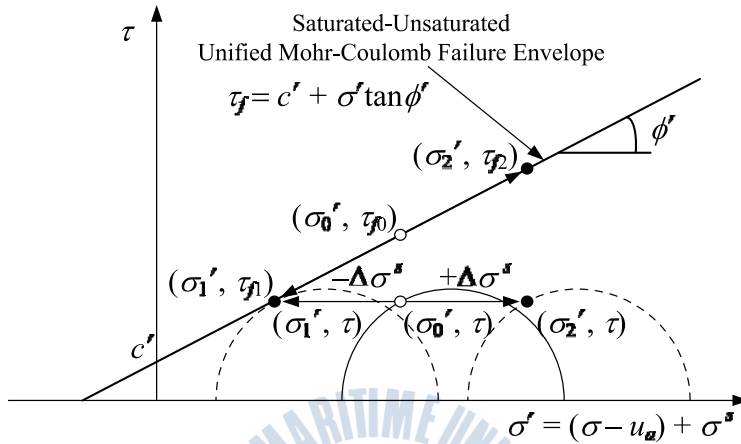


Figure 5.21 Behavior of shear strength and effective stress with suction stress

Figure 5.21은 Lu and Likos (2004, 2006)가 제안한 흡입응력을 통한 유효응력을 바탕으로 한 포화 및 불포화토에 대한 전단강도 포락선으로 흡입응력을 이용할 경우 그림에서와 같이 포화 및 불포화토에 대하여 유일한 파괴포락선으로 나타난다. 그림에서 알 수 있듯이 흡입응력의 변화에 따라 불포화토의 유효응력 및 전단강도가 변화되고 지반 요소 내 전단응력이 전단강도와 같아지면 파괴가 발생함을 이해할 수 있다. 강우 침투로 인해 지반 내 간극수압과 함수비가 변화되면 흡입응력이 감소 또는 증가하고, 이로 인해 불포화토의 유효응력과 전단강도가 동시에 변화되며 사면의 안전율에 상당한 영향을 미칠 것으로 예상할 수 있다.

실무에서 일반적인 사면안정해석 시 흙의 종류가 일정하면 깊이에 상관없이 내부마찰각 ϕ' 는 일정하다고 가정하여 해석을 수행하고 있다. 하지만 실제 지반은 깊이에 따라 유효 구속압이 달라지고 이는 지반의 간극률 및 밀도를 비롯한 여러 특성에 영향을 미친다. 이러한 간극률 및 밀도의 차이는 지반의 강도정수 ϕ' 에 영향

Table 5.3 Soil properties for slope stability analysis

Soil properties	Jumunjin	Inje	Togye
Effective cohesion, c' (kN/m ²)	0	0	0
Effective angle of internal friction, ϕ' (°)	43.3	41.2	40.1
Variation of ϕ' , $\Delta\phi'$ (°)	10	10	10
Unit weight, γ (kN/m ³)	19.83	19.83	20.00

을 미치며 가장 느슨한 상태에서 가장 조밀한 상태로 바뀔 때 따라 많게는 15°까지 차이가 보임을 여러 연구자들의 실험적 근거를 통해 밝혀졌다(Duncan and Wright, 2005; Cornforth, 2005). 특히 사면의 경우 식생 및 풍화작용 등의 여러 원인으로 표토에서 하부 지층보다 상대적으로 큰 간극률을 나타낸다. 따라서 본 연구에서는 이러한 지표층의 영향을 고려하기 위해 기준 깊이 하부는 동일한 유효내부마찰각을 이용하였으며, 기준 깊이 상부는 깊이에 비례하는 것으로 가정하였다.

Table 5.3은 사면안정해석을 위한 지반 물성을 나타낸다. 강도정수 c' , ϕ' 는 직접전단시험을 통하여 산정하였으며, 지반의 단위중량은 보수적인 사면안정해석을 위하여 포화단위중량을 각각 적용하였다. $\Delta\phi'$ 는 위에서 언급한 지반의 깊이에 따라 유효내부마찰각을 달리 적용하기 위하여 도입되었으며, 지표면과 지표하부 1m에서의 ϕ' 의 차이를 나타낸다. 사면안정해석은 지하수위로 부터 0.1m 간격으로 지표면 아래 0.1m까지 각 시간마다 수행하였다.

5.3.1 주문진 모래 사면

Figures 5.22와 5.23은 각각 건조 및 습윤과정에 대한 깊이별 시간에 따른 흡입 응력의 변화를 나타낸다. 시간에 따른 흡입응력의 변화는 비슷한 경향을 나타내며, 두 과정 모두 최소 흡입응력은 강우 침투 11.5시간 경과 후 -21.29kPa로 사면 전체의 포화로 인한 양의 간극수압임을 알 수 있다. 최대 흡입응력은 건조 및 습윤과정에서 각각 1.87kPa와 1.08kPa로 나타났다. 이는 Figure 4.13에서 두 흡입응력특성곡선의

이력으로 인한 차이 때문이다.

Figures 5.24와 5.25는 각각 건조 및 습윤과정에 대한 깊이별 시간에 따른 안전율의 변화를 나타낸다. 초기 사면의 안전율은 건조 및 습윤과정 모두에 대해서 내부마찰각이 가장 작은 지표면 아래 0.1m에서 1.02로 동일한 최소안전율을 나타낸다. 최대안전율은 건조 및 습윤과정 모두 흡입응력이 최대인 지점에서 각각 1.48과 1.45를 보이나, 그 위치는 지하수위 상부 0.2m와 0.1m에서 나타났다. 이는 앞의 Figures 5.22와 5.23에서 최대 흡입응력이 각각 다른 모관흡수력에서 나타나기 때문이다.

또한, 강우 침투 1시간 후 지표아래 0.3m까지 안전율에 변화가 있으며 초기 최소안전율을 나타내던 지표면 아래 0.1m에서 건조 및 습윤과정 모두 각각 최대안전율 2.28과 1.51을 나타낸다. 이것은 Figures 5.22와 5.23에서 나타난 것처럼 강우 침투로 인한 흡입응력의 증가 때문이다. 이후 지속적인 강우 침투로 인해 건조 및 습윤과정 모두 습윤전선 부근에서 일시적인 안전율 증가를 보이나 지반이 점점 포화됨에 따라 습윤전선 상부에서 안전율이 다시 감소하며, 약 11.5시간 경과 후 사면전체가 포화되고 양의 간극수압이 발생되어 안전율이 0.52 ~ 0.69의 범위로 1이하의 값을 보인다.

Figures 5.26과 5.27은 각각 건조 및 습윤과정에 대한 사면내 임의 위치에서의 시간에 따른 안전율의 변화를 나타낸다. 강우 침투 초기 지하수위 상부 2.9m(즉, 지표아래 0.1m)에서 상당한 안전율 증가를 보이고, 이후 습윤전선의 발달과 함께 안전율이 감소하는 것으로 나타났다. 지하수위 0.1m에서는 강우 침투 후 11시간까지 거의 일정한 안전율을 보이며 11.5시간 이후 급격한 안전율 감소를 나타낸다. 습윤과정의 흡입응력을 이용한 경우가 최대안전율 범위가 작게 나타나는 것은 앞서 언급한 흡입응력특성곡선의 이력현상 때문이다.

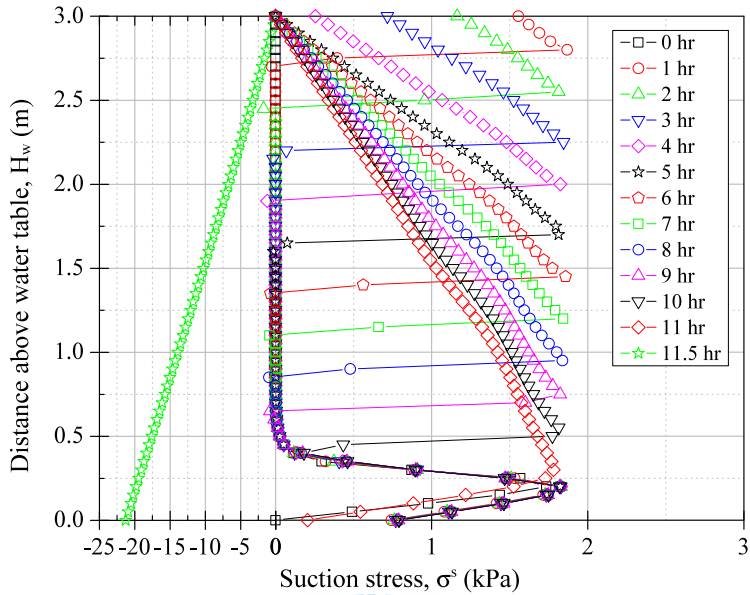


Figure 5.22 Variation of suction stress profile with time of stability analysis for infinite slope using Jumunjin drying SWCC

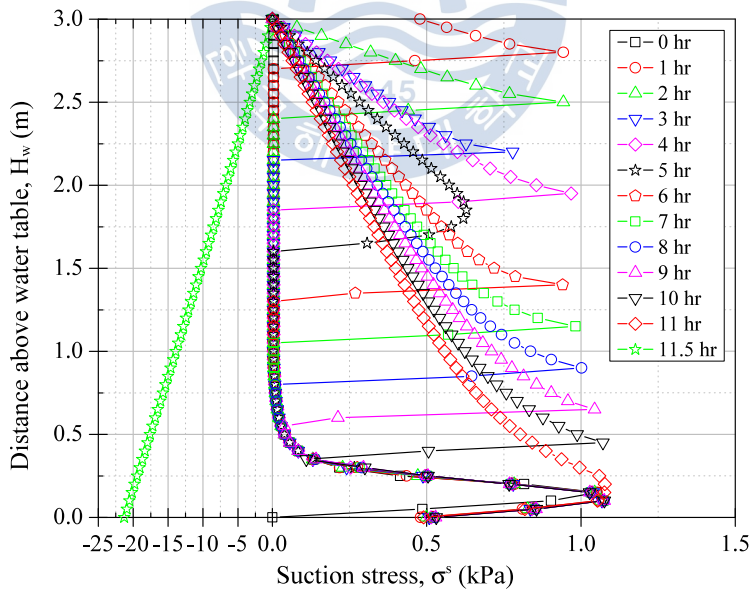


Figure 5.23 Variation of suction stress profile with time of stability analysis for infinite slope using Jumunjin wetting SWCC

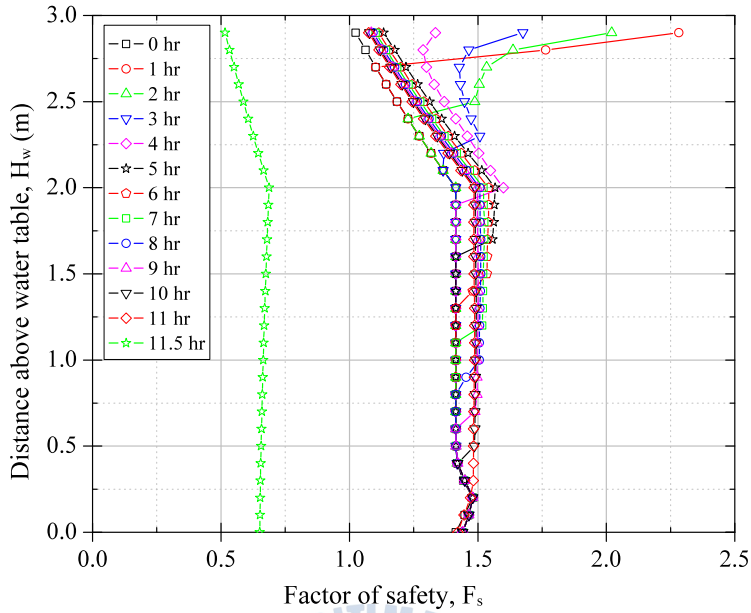


Figure 5.24 Variation of factor of safety profile with time of stability analysis for infinite slope using Jumunjin drying SWCC

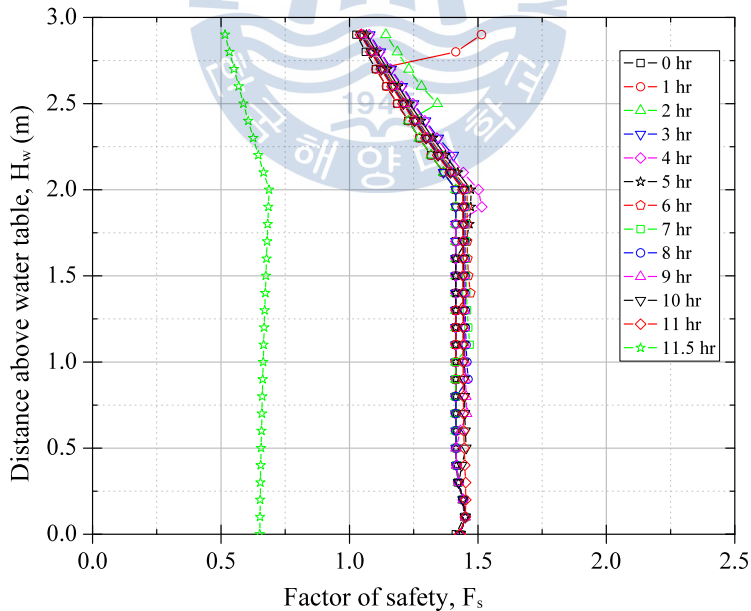


Figure 5.25 Variation of factor of safety profile with time of stability analysis for infinite slope using Jumunjin wetting SWCC

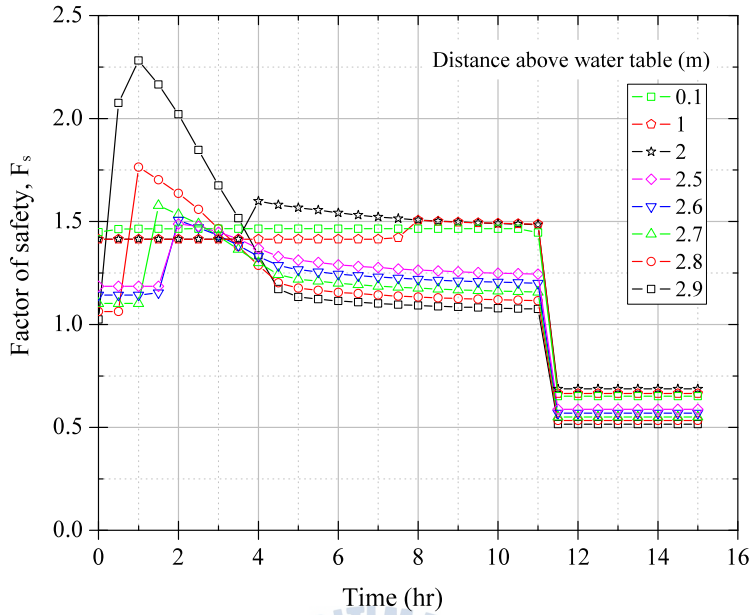


Figure 5.26 Variation of factor of safety with time at each location of stability analysis for infinite slope using Jumunjin drying SWCC

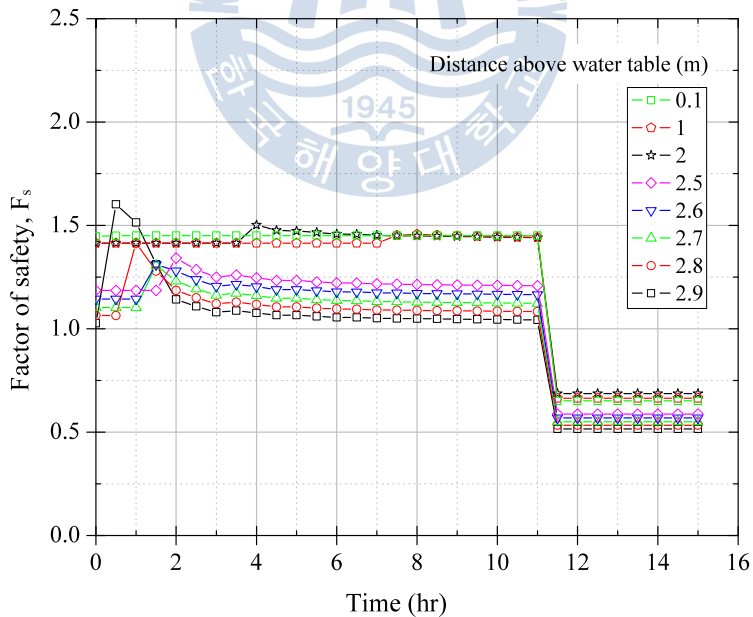


Figure 5.27 Variation of factor of safety with time at each location of stability analysis for infinite slope using Jumunjin wetting SWCC

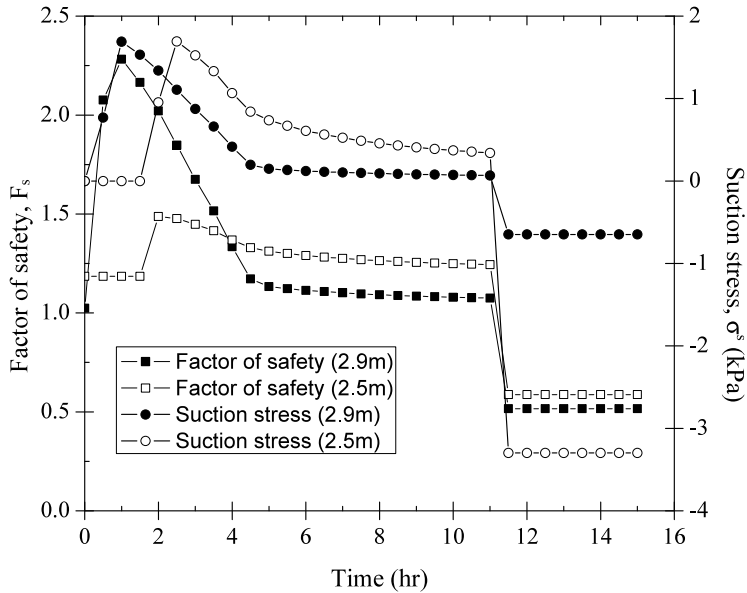


Figure 5.28 Variation of factor of safety and suction stress with time at each location of stability analysis for infinite slope using Jumunjin drying SWCC

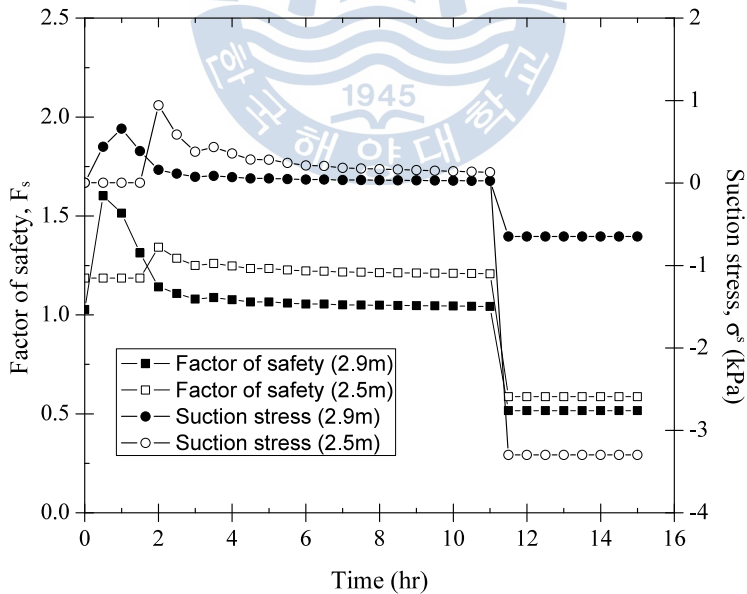


Figure 5.29 Variation of factor of safety and suction stress with time at each location of stability analysis for infinite slope using Jumunjin wetting SWCC

Figures 5.28과 5.29는 지하수위 상부 2.5m 및 2.9m에서의 흡입응력 및 안전율의 변화를 동시에 나타낸 것으로, 두 지점에서 모두 흡입응력 및 안전율이 동일한 경향을 나타냄을 알 수 있다. 즉, 흡입응력이 증가함에 따라 안전율이 증가하고 흡입응력이 감소함에 따라 안전율도 감소하는 것으로 나타났다.

주문진 표준사로 가정한 사면의 해석에서 사면 전체가 포화된 후 안전율이 1 이하로 떨어진 원인은 투수계수가 큰 단일지층으로 사면을 가정하였기 때문으로 판단된다. 만약 주문진 모래지층 하부에 투수계수가 작은 지층이 존재한다면 이 지층을 경계로 파괴가 발생할 것으로 예상된다.

5.3.2 인제 화강풍화토 사면

Figures 5.30과 5.31은 각각 건조 및 습윤과정에 대한 깊이별 시간에 따른 흡입응력의 변화를 나타낸다. 시간에 따른 흡입응력의 변화는 비슷한 경향을 나타내며, 두 과정 모두 최소 흡입응력은 강우침투로 인해 지표면에서 0kPa로 나타났다. 최대 흡입응력은 건조 및 습윤과정에서 각각 3.70kPa과 2.06kPa로 차이를 보인다. 이는 Figure 4.14에서 두 흡입응력특성곡선의 이력력으로 인한 차이 때문이다. 침투에 따라 일시적인 흡입응력의 증가를 보인 주문진 모래 사면의 경우와는 달리 강우 침투에 따라 지표면이 흡입응력이 0kPa로 감소하고 습윤전선을 발달과 동시에 지표면부터 흡입응력의 크기가 지속적으로 감소됨을 알 수 있다. 이는 주문진 표준사의 경우 Figure 4.13에서와 같이 초기 지반의 모관흡수력인 10kPa에서 흡입응력이 거의 존재하지 않고 모관흡수력이 감소함에 따라 좁은 모관흡수력 범위에서 약간의 흡입응력을 보이는 것과 달리 Figure 4.14에 나타난 인제 풍화토의 흡입응력곡선은 10kPa의 모관흡수력에서 거의 수렴된 흡입응력을 나타내고 일정 이하의 모관흡수력 범위에서 모관흡수력이 감소함에 따라 흡입응력이 지속적으로 감소하기 때문이다.

또한 강우 침투 48시간 경과 후 지표면으로 부터 약 0.85m 까지 흡입응력의

변화를 보인 건조과정과는 달리 습윤과정은 약 0.65m 까지 흡입응력의 변화를 나타낸다. 이는 동일한 모관흡수력에서 습윤과정의 불포화투수계수가 더 작게 나타나는 투수계수곡선의 이력현상 때문이며(Figure 4.11), 초기경계조건으로 인한 10kPa의 모관흡수력에서 습윤과정의 투수계수가 건조과정의 투수계수보다 작아 초기 습윤전선의 발달이 늦기 때문이다.

Figures 5.32와 5.33은 각각 건조 및 습윤과정에 대한 깊이별 시간에 따른 안전율의 변화를 나타낸다. 초기 사면의 최소 안전율은 건조 및 습윤과정 모두 지하수위 위치에서 1.31을 나타낸다. 최대 안전율은 두 과정 모두 지표 아래 0.1m에서 나타났으나, 건조 및 습윤과정에 대하여 각각 3.49 및 2.34로 나타났다. 이러한 안전율의 차이는 흡입응력곡선의 이력에 기인한 것이며, 초기 지하수위 근처에서 최대 안전율을 보이던 주문진 사면과 달리 인제 사면은 지표에서 가장 큰 안전율을 보인다. 이러한 원인은 앞서 언급한 것과 같이 흡입응력의 특성에 기인된다. 이후 지속적인 강우 침투에 따라 습윤전선의 발달과 함께 흡입응력이 감소함에 따라 사면의 안전율이 지속적으로 감소하는 것으로 나타났다. 강우 침투 약 48시간 경과 후 건조 및 습윤과정 각각 지표면에서 0.8m 및 0.6m 깊이까지 안전율이 감소하였으며, 두 경우 모두 지표면 아래 0.1m 깊이에서 최소안전율 1.01 및 0.98을 나타낸다.

Figures 5.34와 5.35는 각각 건조 및 습윤과정에 대한 사면내 임의 위치에서의 시간에 따른 안전율의 변화를 나타낸다. 두 과정 모두 습윤전선의 발달과 함께 안전율이 감소하는 것을 알 수 있으며, 갑작스런 안전율 감소를 보인 주문진 사면과 달리 지속적인 안전율 감소를 보인다. 또한 습윤과정이 건조과정에 비하여 늦은 안전율 감소 경향을 보인다. 이것은 주문진 표준사와 동일하게 투수계수곡선의 이력이 그 원인이다. Figures 5.36과 5.37은 지하수위 상부 2.5m 및 2.9m에서의 흡입응력 및 안전율의 변화를 동시에 나타낸 것으로, 두 지점에서 모두 흡입응력 및 안전율이 동일한 경향을 나타냄을 알 수 있다.

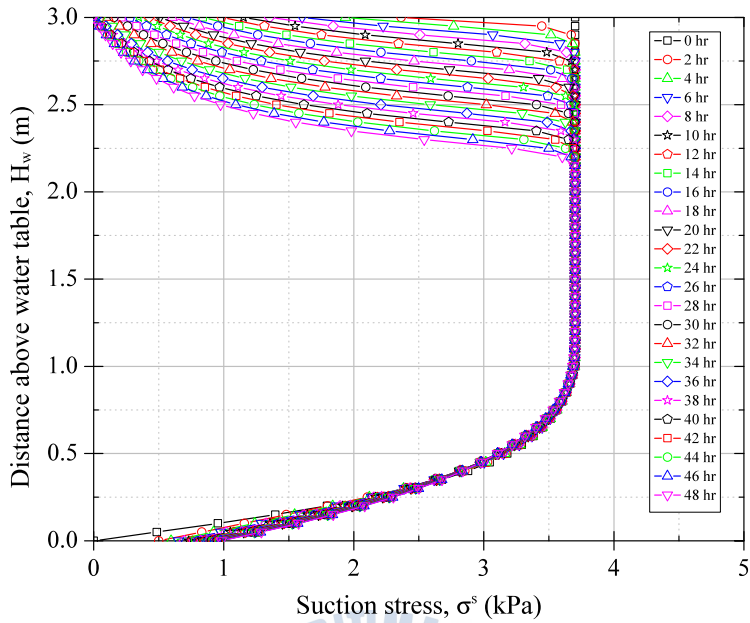


Figure 5.30 Variation of suction stress profile with time of stability analysis for infinite slope using Inje drying SWCC

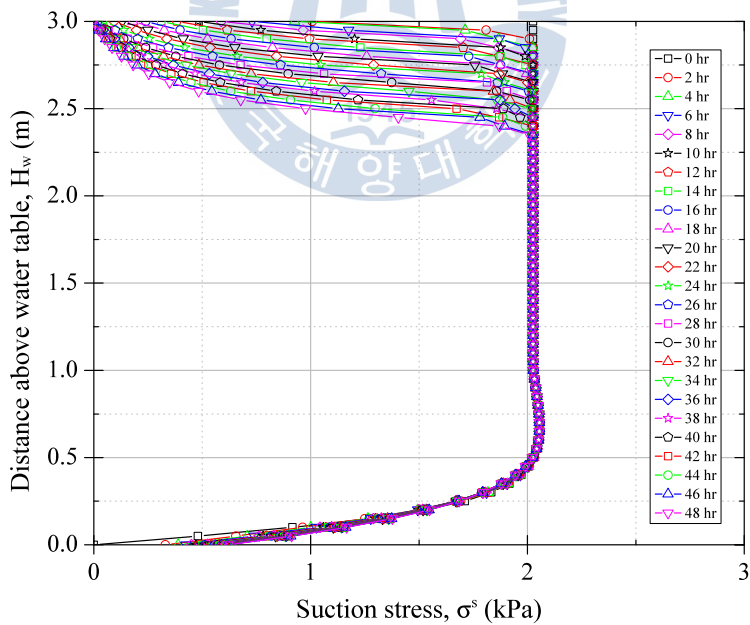


Figure 5.31 Variation of suction stress profile with time of stability analysis for infinite slope using Inje wetting SWCC

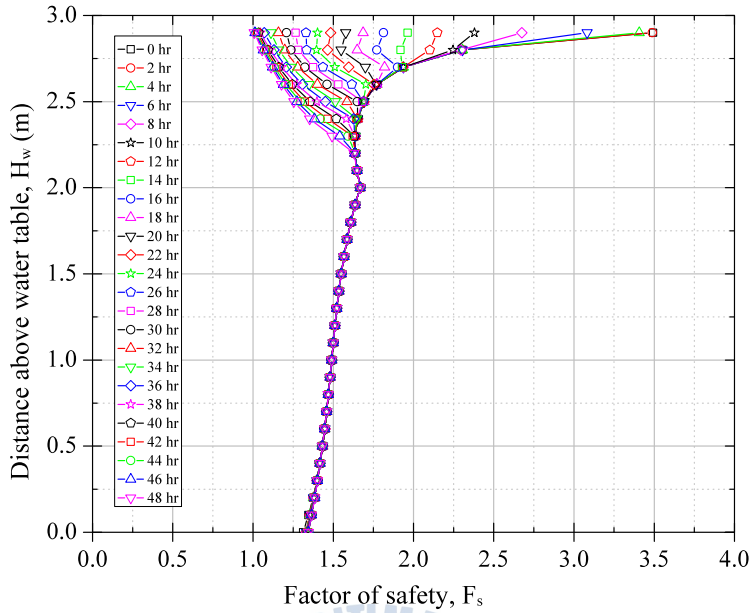


Figure 5.32 Variation of factor of safety profile with time of stability analysis for infinite slope using Inje drying SWCC

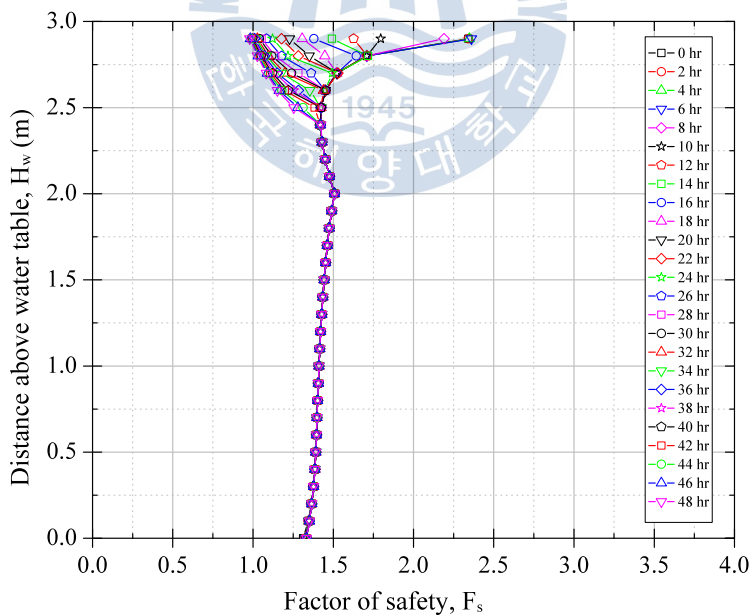


Figure 5.33 Variation of factor of safety profile with time of stability analysis for infinite slope using Inje wetting SWCC

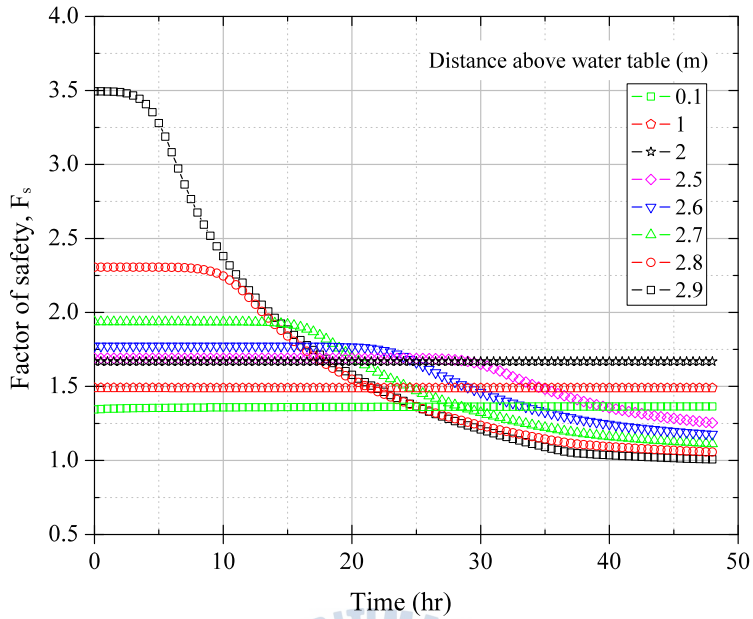


Figure 5.34 Variation of factor of safety with time at each location of stability analysis for infinite slope using Inje drying SWCC

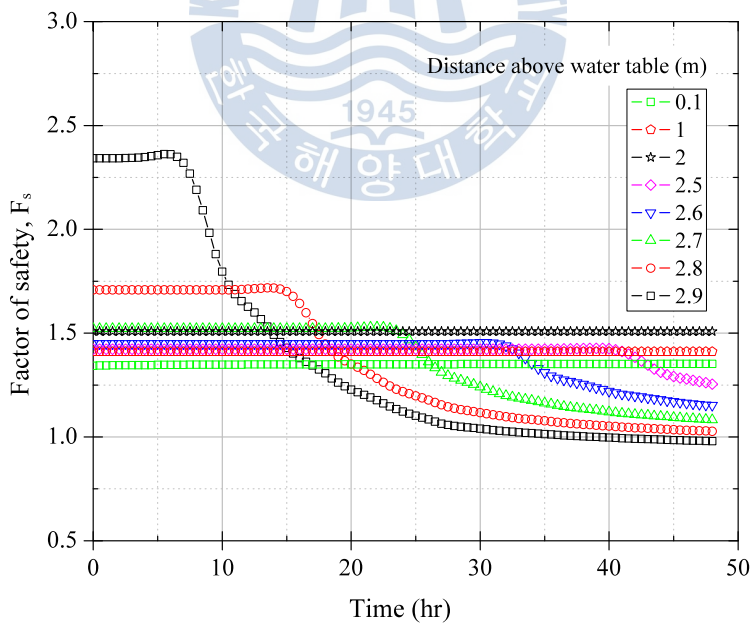


Figure 5.35 Variation of factor of safety with time at each location of stability analysis for infinite slope using Inje wetting SWCC

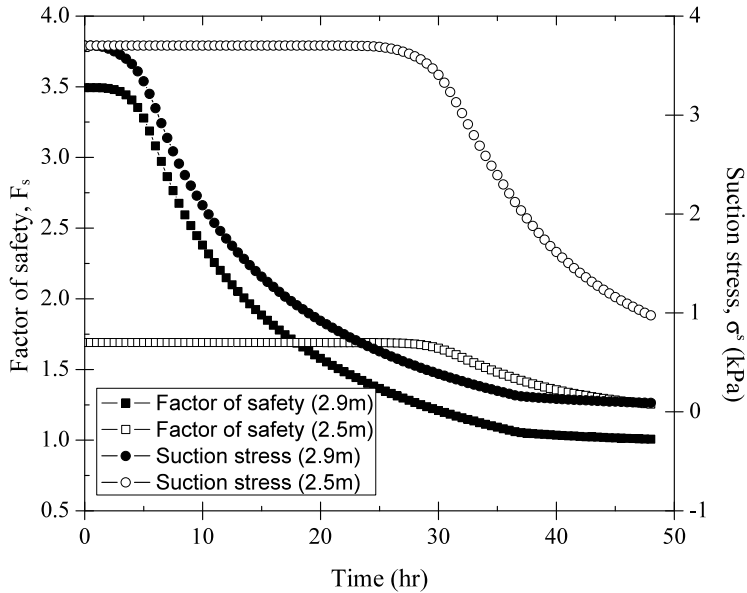


Figure 5.36 Variation of factor of safety and suction stress with time at each location of stability analysis for infinite slope using Inje drying SWCC

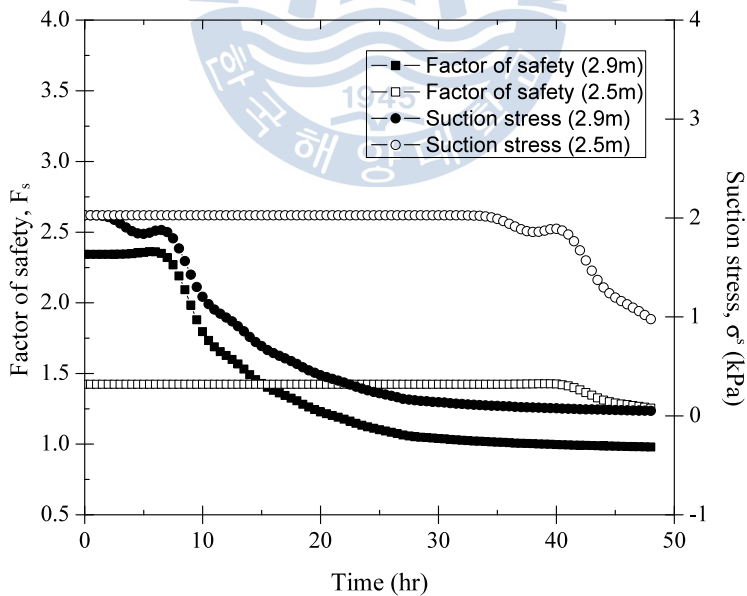


Figure 5.37 Variation of factor of safety and suction stress with time at each location of stability analysis for infinite slope using Inje wetting SWCC

5.3.3 도계 화강풍화토 사면

Figures 5.38과 5.39는 각각 건조 및 습윤과정에 대한 깊이별 시간에 따른 흡입응력의 변화를 나타낸다. 건조과정의 경우 최소 흡입응력은 지표면 부근에서 약 0kPa을 나타내며, 습윤과정의 경우 강우 침투 42시간 경과 후 지표 아래 0.45m에서 -0.26kPa로 양의 간극수압이 발생함을 알 수 있다. 최대 흡입응력은 건조 및 습윤과정에서 각각 7.42kPa과 4.33kPa로 차이를 보이며, 이는 인제 사면의 경우와 같이 흡입응력곡선의 이력 때문이다. 건조 및 습윤과정에 대한 습윤전선의 발달에서 강우 침투 48시간 경과 후 지표면으로 부터 약 1.5m 까지 흡입응력의 변화를 보인 건조과정과는 달리 습윤과정은 약 0.4m 까지 흡입응력의 변화를 나타내며 다른 사면보다 훨씬 큰 차이를 보이고, 습윤과정의 경우 습윤전선을 경계로 급격한 흡입응력의 차이를 나타내며 지표 일부에서 양의 간극수압이 발생하는 것을 알 수 있다. 이는 함수특성곡선 (Figure 4.9)이 다른 두 시료보다 훨씬 더 큰 이력을 가지고 그에 따라 투수계수곡선 또한 상당한 이력을 나타내기 때문으로 판단된다.

Figures 5.40와 5.41은 각각 건조 및 습윤과정에 대한 깊이별 시간에 따른 안전율의 변화를 나타낸다. 초기 사면의 안전율은 인제 사면과 동일하게 지하수위에서 가장 작고 지표에 가까워질수록 큰 안전율을 보이며, 최소 안전율은 건조 및 습윤과정 모두 지하수위 위치에서 1.26을 나타낸다. 최대 안전율은 두 과정 모두 지표 아래 0.1m에서 나타났으나, 건조 및 습윤과정에 대하여 각각 6.06 및 4.18로 나타났다. 최대 안전율의 차이 또한 흡입응력곡선의 이력과 관련된다. 이후 지속적인 강우 침투에 따라 습윤전선의 발달과 함께 흡입응력이 감소함에 따라 사면의 안전율이 지표에서 지속적으로 감소하는 것으로 나타났다. 강우 침투 약 48시간 경과 후 건조 및 습윤과정 각각 지표면에서 1.4m 및 0.4m 깊이까지 안전율이 감소하였으며, 두 경우 모두 지표면 아래 0.1m 깊이에서 최소안전율 0.91 및 0.87을 나타낸다. 특히 도계 사면의 경우 건조 및 습윤과정에 대하여 각각 강우 침투 17시간 및 14.5시간 후

지표면 하부 0.1m 지점에서 1.0 이하의 안전율을 보인다. Figures 5.44와 5.45는 지하 수위 상부 2.5m 및 2.9m에서의 흡입응력 및 안전율의 변화를 동시에 나타낸 것으로, 두 지점에서 모두 흡입응력 및 안전율이 동일한 경향을 나타냄을 알 수 있다.

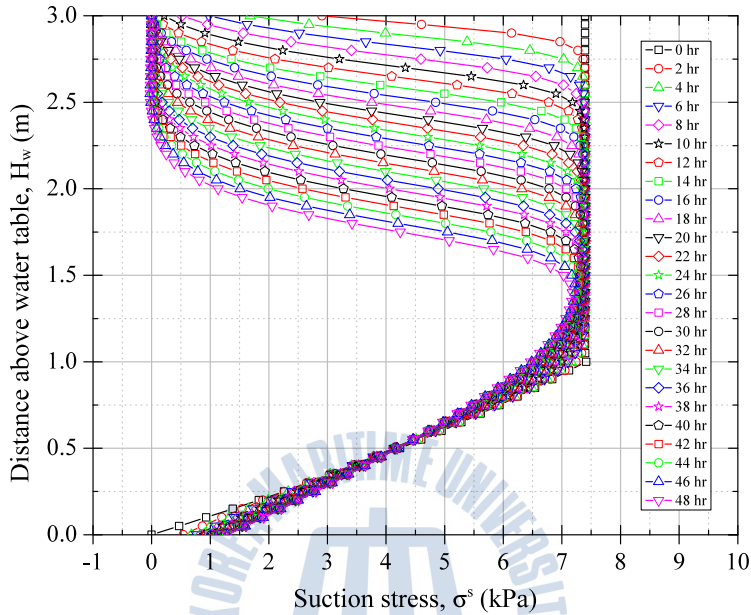


Figure 5.38 Variation of suction stress profile with time of stability analysis for infinite slope using Dogye drying SWCC

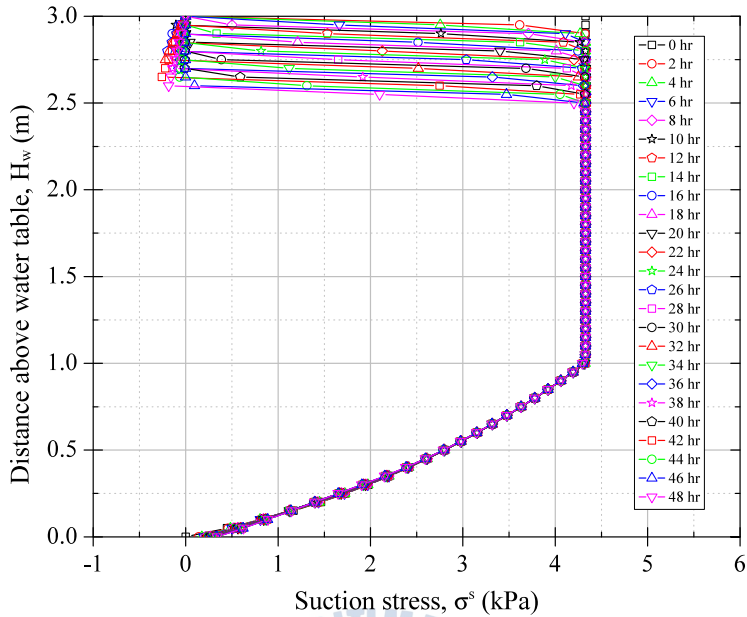


Figure 5.39 Variation of suction stress profile with time of stability analysis for infinite slope using Dogye wetting SWCC

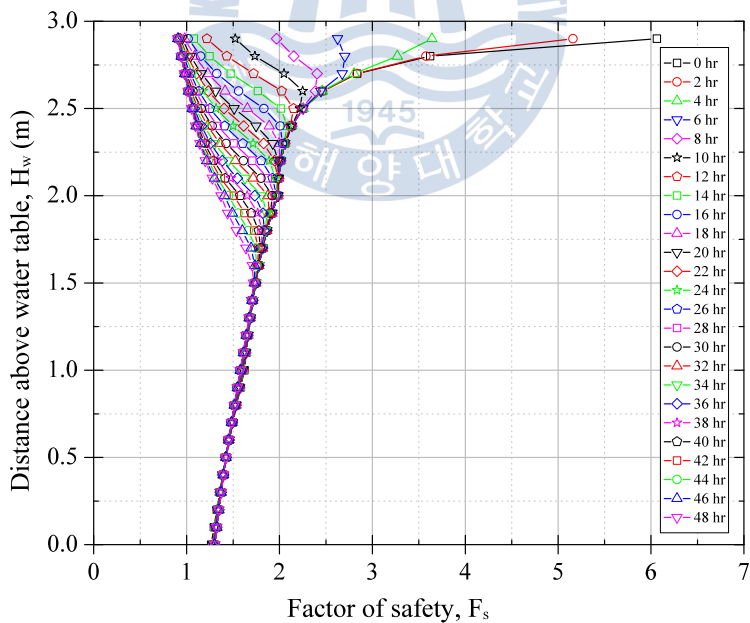


Figure 5.40 Variation of factor of safety profile with time of stability analysis for infinite slope using Dogye drying SWCC

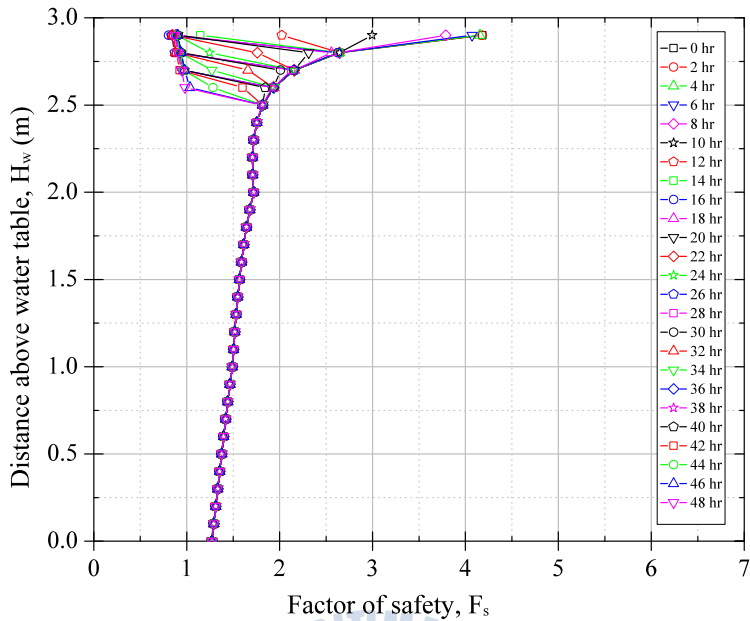


Figure 5.41 Variation of factor of safety profile with time of stability analysis for infinite slope using Dogye wetting SWCC

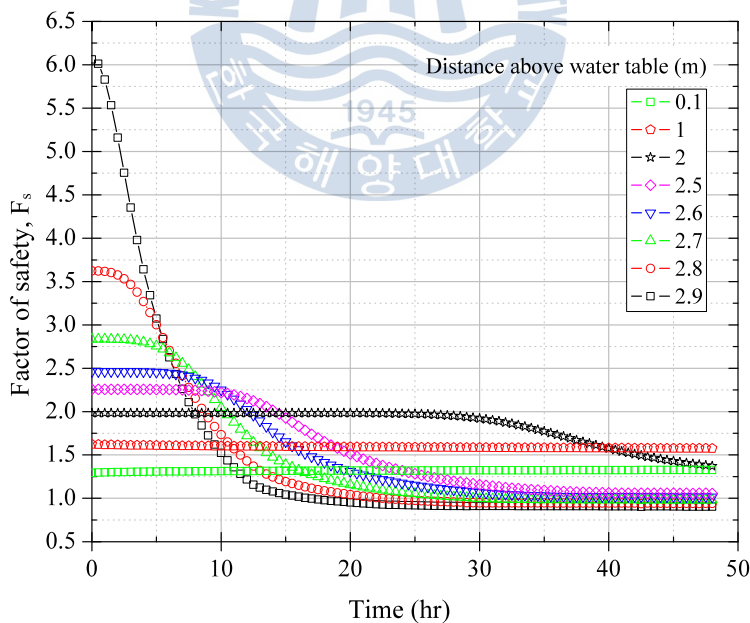


Figure 5.42 Variation of factor of safety with time at each location of stability analysis for infinite slope using Dogye drying SWCC

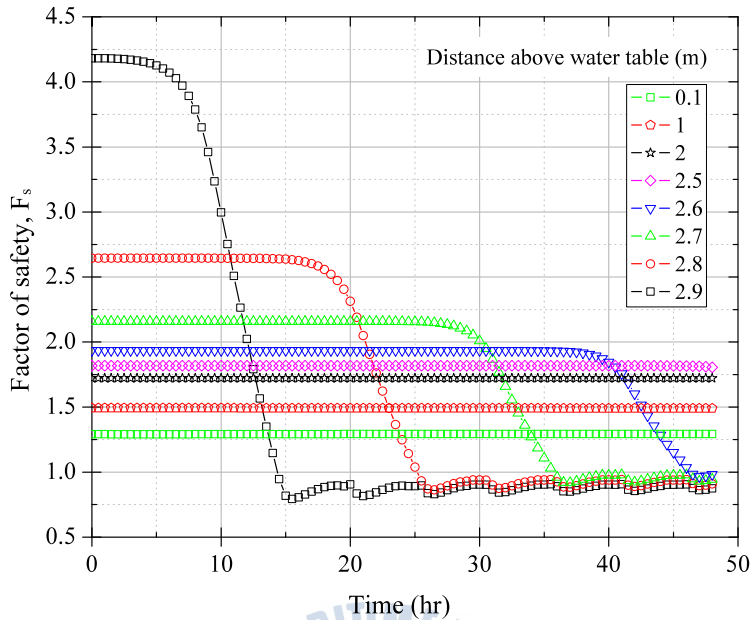


Figure 5.43 Variation of factor of safety with time at each location of stability analysis for infinite slope using Dogye wetting SWCC

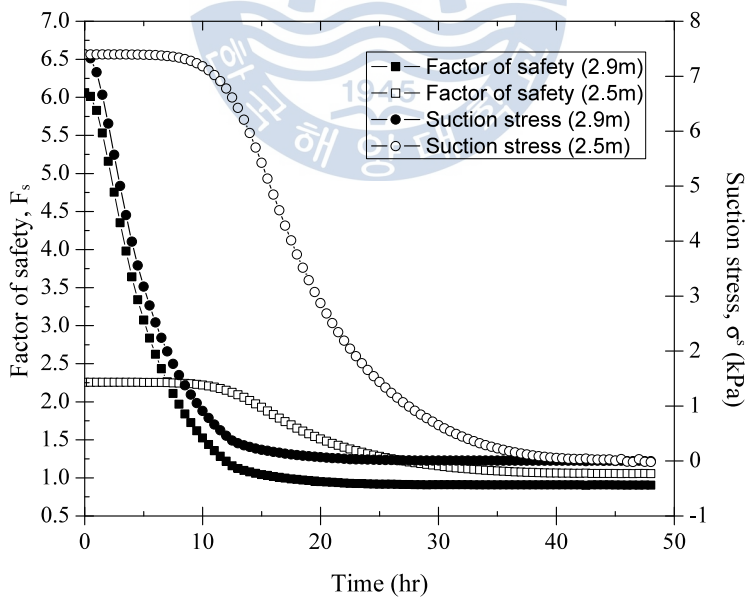


Figure 5.44 Variation of factor of safety and suction stress with time at each location of stability analysis for infinite slope using Dogye drying SWCC

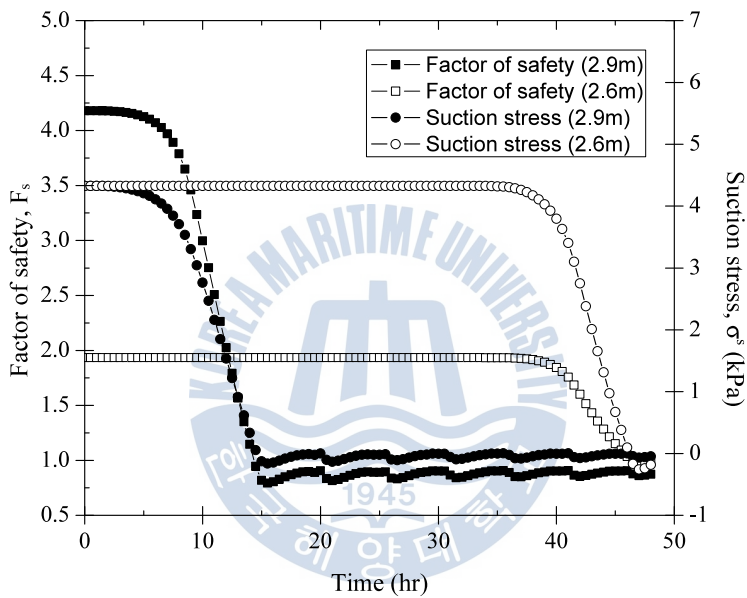


Figure 5.45 Variation of factor of safety and suction stress with time at each location of stability analysis for infinite slope using Dogye wetting SWCC

제 6 장 결론 및 향후 연구를 위한 제언

6.1 결론

최근 국내에서 하절기 집중 강우로 인해 산사태가 빈번히 발생하고, 그 규모 또한 대형화 되고 있는 추세이다. 이러한 산사태로 인해 인명 및 재산 피해가 증가하고 있어, 강우로 인한 산사태 발생 메카니즘에 대한 고찰이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 불포화토의 유효응력 및 전단강도에 기여하는 흡입응력을 중심으로 강우 시 비정상 침투에 의한 흡입응력의 변화가 불포화 사면의 안정성에 미치는 영향에 관한 연구를 수행하였다. 또한 일반적으로 적용하고 있는 건조과정의 함수특성곡선으로부터 추정된 불포화 특성곡선들뿐 아니라 습윤과정에 대한 함수특성시험을 수행하여 습윤과정의 특성곡선들을 이용한 침투 및 사면안정 해석을 수행하여 건조과정에 대한 해석과 비교·검토하였다. 다음은 본 연구에서 수행된 연구 내용을 간략히 나타낸 것이다.

- 세 가지 시료(주문진 모래와 인제 및 도계 화강풍화토)에 대한 함수특성시험을 수행하고, 시험 결과로부터 함수특성곡선과 투수계수특성곡선 그리고 흡입응력특성곡선을 추정하였다.
- 함수특성시험은 건조과정에 대한 시험뿐 아니라 습윤과정에 대한 시험을 동시에 수행하여 건조과정과 습윤과정에 대해 비교 분석하였다.
- 강우 시 지반 내 침투현상을 모사하기위해 불포화 무한사면을 가정하고 시험결과를 바탕으로 유한요소법을 이용한 비정상 침투해석을 수행하여 강우 침투로 인한 시간에 따른 지반 내 모관흡수력과 흡입응력의 변화를 분석하였다.

- 강우 시 사면의 안정성을 검토하기 위하여 비정상 침투해석 결과를 바탕으로 한계평형해석을 수행하여 강우 시 불포화 무한사면에 대한 안정성을 평가하였다.

다음은 본 연구를 통해 얻은 주요 결과를 정리한 것이다.

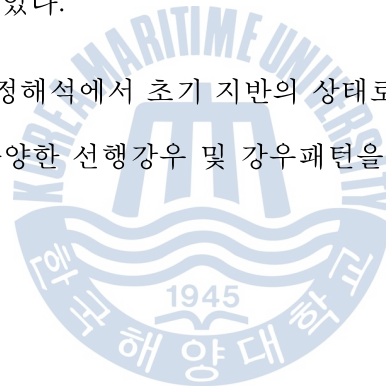
- 함수특성곡선에서 세 가지 시료에 대한 공기함입치는 주문진 표준사, 인제 화강풍화토, 도계 화강풍화토 순으로 점점 증가하는 것으로 나타났으며, 전이영역에서 주문진 표준사의 경우 모관흡수력 변화에 따라 급격한 함수비 변화를 보이며 매우 가파른 기울기를 나타내고 도계 화강풍화토는 가장 완만한 기울기를 보였다. 이러한 원인은 주문진 표준사의 경우 매우 균등한 입도분포를 가지고 세립토를 포함하고 있지 않은 반면, 두 화강풍화토의 경우 입도 분포가 양호하고 세립토를 일부 포함하고 있기 때문으로 판단된다.
- 건조 및 습윤과정의 함수특성시험 결과 두 과정의 곡선 사이에 이력현상을 보였으나, 세가지 시료에 대한 일관된 경향을 나타내지는 않아, 향후 더 많은 시료에 대한 지속적인 연구를 통해 이력현상에 영향을 미치는 인자와 그 상관성을 연구할 필요가 있다.
- 투수계수특성곡선 또한 주문진 표준사의 경우 공기함입치 이후 급격한 감소를 보이며, 도계 화강풍화토의 경우 가장 완만한 변화를 나타냈다. 이는 투수계수 특성곡선이 함수특성곡선으로부터 추정되기 때문이다.
- 흡입응력특성곡선에서 주문진 표준사의 경우 매우 낮은 모관흡수력에서 매우 좁은 범위의 흡입응력을 나타냈으며, 인제 화강풍화토는 모관흡수력의 증가에 따라 일정한 흡입응력 수준으로 수렴하는 경향을 그리고 도계 화강풍화토의 경우 모관흡수력의 증가에 따라 지속적이고 비선형적인 흡입응력의 증가를 보였다.

- 불포화 사면의 비정상 침투해석 결과, 흙의 종류에 따른 특성곡선들의 특징에 따라 습윤전선의 발달과 사면 내 모관흡수력 및 포화도의 분포양상에 상당한 차이를 보였다. 주문진 표준사로 이루어진 사면의 경우 두 화강풍화토에 비하여 습윤전선의 발달이 빠르게 나타났으며, 이는 주문진 표준사의 투수계수특성곡선의 영향에 기인한 것으로 판단된다. 따라서 불포화 사면의 침투해석 시 시험을 통한 적절한 투수계수곡선의 추정이 필요할 것으로 판단된다.
- 사면안정해석 결과, 주문진 표준사의 경우 강우 침투 초기 흡입응력의 증가로 인해 지표면에서 일시적인 안전율의 증가를 보였는데 이는 주문진 표준사의 흡입응력특성에 기인한 것으로 판단되며, 지속적인 강우 침투에 의해 흡입응력이 감소함에 따라 지표의 안전율이 감소하고 이후 파괴에 도달하는 것으로 나타났다. 두 화강풍화토에서는 강우 침투에 따라 지속적인 흡입응력의 감소로 인해 지표의 안전율이 지속적으로 감소하고 흡입응력의 소멸로 인해 지표부터 파괴가 발생하는 것으로 나타났다. 따라서 강우 시 불포화 사면의 안정성을 파악하기 위해서는 적절한 흡입응력의 추정과 이를 이용한 사면안정 해석이 필요할 것으로 판단된다.
- 건조 및 습윤과정에 따라 추정된 특성곡선들을 이용하여 침투 및 사면안정해석을 수행한 결과 이력현상의 정도에 따라 상당한 차이를 보였다. 특히, 습윤과정의 경우 습윤전선의 발달 속도는 느리나, 안전율의 감소 속도가 더 빨라 사면파괴에 더 빨리 도달되는 것으로 나타났다. 따라서 향후 현장 계측 및 지속적인 데이터 수집을 통해 적절한 함수특성곡선의 선택이 필요할 것으로 판단된다.

6.2 향후 연구를 위한 제언

다음은 향후 수행해야 할 연구내용으로 본 연구에서 다루어지지 못한 내용들이다.

- 본 연구에서는 세 가지 시료에 대한 함수특성시험을 통해 각 시료에 대한 함수특성곡선을 추정하였으나, 추후 연구를 통해 보다 여러 종류의 흙에 대한 함수특성시험을 수행할 필요가 있다.
- 본 연구에서는 불포화 투수계수특성곡선이나 흡입응력특성곡선을 함수특성곡선으로부터 추정하였으나, 이러한 특성곡선을 실제 시험을 수행하여 측정된 값과 비교할 필요가 있다.
- 침투해석 및 사면안정해석에서 초기 지반의 상태로 한계 모관흡수력을 10kPa로 제한하였으나, 다양한 선형강우 및 강우패턴을 반영하여 사면의 안정성을 평가할 필요가 있다.



참 고 문 헌

- 김찬기 (2003). 불포화 풍화 화강토의 응력-변형을 거동 특성. *대한토목학회 논문집*, 23(3C):177-184.
- 김태형 (2002). 모래의 인장강도에 미치는 함수비의 영향. *한국지반공학회 논문집*, 18(3):13-21.
- 김태형, 김찬기, 김태훈 (2004). 흙-수분 특성 곡선을 이용한 불포화모래의 인장강도 모델링. *한국지반공학회 논문집*, 20(7):171-181.
- 김태형 (2008). 습윤 모래에서 인장강도의 예측(I): 이론. *한국지반공학회 논문집*, 24(6):27-35.
- 성상규, 이인모 (2003). 화강풍화잔적토의 불포화전단강도에 미치는 순연직응력의 영향. *한국지반공학회 논문집*, 19(2):27-38.
- 송영석, 이남우, 황웅기, 김태형 (2010). 자동 흙-함수특성곡선 시험장치 구축 및 활용. *대한지질공학회*, 20(3):281-295.
- 이인모, 조우성, 김영옥, 성상규 (2003). 풍화토 사면에서 강우로 인한 간극수압 변화에 대한 실험연구. *한국지반공학회 논문집*, 19(1):41-49.
- 이승래, 이성진, 변위용, 장범수 (2001). 화강풍화토 지반의 불포화 특성을 고려한 최적화기법에 의한 사면안정해석 방법. *한국지반공학회 논문집*, 17(6):123-133.
- 황웅기, 강기민, 김태형, 송영석 (2012). 불포화토에서 흙의 구조가 흙-함수특성에 미치는 영향. *한국지반공학회 논문집*, 28(2):33-42.

- Abu-Hejleh, A. N., Znidarcic, D., and Illangasekare, T. H. (1993). Permeability determination for unsaturated soils. *ASCE GSP 39*, pages 163–174.
- Bishop, A. W. (1959). The principle of effective stress. *Teknisk Ukeblad I Samarbeide Med Teknikk*, 106(39):859–863.
- Bishop, A. W. and Blight, G. E. (1963). Some aspects of effective stress in saturated and partly saturated soils. *Géotechnique*, 13(3):177–197.
- Bolt, G. H. and Miller, R. D. (1958). Calculation of total component potentials of waters in soil. *Trans. Am. Geophys. Union.*, 39:917–928.
- Brakensiek, D. L. and Onstad, C. A. (1977). Parameter estimation of the green and ampt infiltration equation. *Water Resource Research*, 13(6):1009–1012.
- Brooks, R. H. and Corey, A. T. (1964). Hydraulic properties of porous media. *Colorado State University, Hydrology Paper*, 3.
- Buckingham, E. (1907). *Studies on the movement of soil moisture*. U.S. Government Printing Office, Washington, DC.
- Childs, E. C. and Collis-George, N. (1948). Interaction of water and porous materials. *Soil geometry and soil-water equilibria. Disc. Faraday Soc.*, 3:79–85.
- Childs, E. C. and Collis-George, N. (1950). The permeability of porous materials. *Proceedings of the Royal Society London A*, 201:392–405.
- Coleman, J. D. (1962). Stress strain relations for partly saturated soil. *Correspondence to Géotechnique*, 12(4):348–350.

- Cornforth, D. H. (2005). *Landslides in Practice*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, N.J.
- Croney, D. and Coleman, J. D. (1961). Pore pressure and suction in soils. In *Proceedings of Conference on Pore Pressure and Suction in Soils*, pages 31–37, London. Butterworths.
- Dane, J. H. and Hruska, S. (1983). In-situ determination of soil hydraulic properties during drainage. *Soil Science Society of America Journal*, 47:619–624.
- Darcy, H. (1856). Dètermination des lois d'écoulement de l'eau à travers le sable. In Dalmont, V., editor, *Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon*, pages 590–594, Paris.
- Duncan, J. M. and Wright, S. G. (2005). *Soil strength and slope stability*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, N.J.
- Ebel, B. A., Loague, K., and Borja, R. I. (2010). The impacts of hysteresis on variably saturated hydrologic response and slope failure. *Environmental Earth Sciences*, 61(6):1215–1225.
- Edlefsen, N. E. and Anderson, A. B. C. (1943). Thermodynamics of soil moisture. *Hilgardia*, 15:31–298.
- Escario, V. and Juca, J. F. T. (1989). Strength and deformation of partly saturated soils. In de Janeiro, R., editor, *Proceedings of the 12th international conference on soil mechanics and foundation engineering (ICSMFE)*, volume 1, pages 43–46.
- Farrell, D. and Larson, W. (1972). Modeling the pore structure of porous media. *Water Resour. Res.*, 3:699–706.

- Fredlund, D. G. (1981). the shear strength of unsaturated soils and its relationship to slope stability problems in hong kong. *Journal of the Hong Kong institution of Engineers*, 9(4):37–45.
- Fredlund, D. G. and Morgenstern, N. R. (1977). Stress state variables for unsaturated soils. *Journal of Geotech. Engng Div. ASCE*, 103(5):447–466.
- Fredlund, D. G., Morgenstern, N. R., and Widger, R. A. (1978). Shear strength of unsaturated soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 15(3):313–321.
- Fredlund, D. G. and Rahardjo, H. (1995). *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. John Wiley and Sons.
- Fredlund, D. G. and Xing, A. (1994). Equations for the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 31(3):521–532.
- Gan, J. K. M., Fredlund, D. G., and Rahardjo, H. (1988). Determination of the shear strength parameters of an unsaturated soil using the direct shear test. *Canadian Geotechnical Journal*, 25:500–510.
- Gardner, W. R. (1958). Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with applications to evaporation from a water table. *Soil Science*, 85:228–232.
- Guymon, G. L. (1994). *Unsaturated Zone Hydrology*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J.
- Hassler, G. L. and Brunner, E. (1943). Measurements of capillary pressure in small core samples. *Transactions AIME*, 160:114–123.

- Jennings, J. E. B. and Burland, J. B. (1962). Limitations to the use of effective stresses in partly saturated soils. *Géotechnique*, 12(2):125–144.
- Khalili, N. and Khabbaz, M. H. (1998). A unique relationship for χ for the determination of the shear strength of unsaturated soils. *Géotechnique*, 48(5):681–687.
- Kim, K.-S., Song, Y.-S., Chae, B.-G., Cho, Y.-C., and Lee, C.-O. (2007). Geometric characteristics of landslides on natural terrain according to the geological condition. *Engineering geology*, 17(1):75–87.
- Kumar, S. and Malik, R. S. (1990). Verification of quick capillary rise approach for determining pore geometrical characteristics in soils of varying texture. *Soil Science*, 150(6):883–888.
- Lambe, T. W. and Whitman, R. V. (1979). *Soil mechanics*. Wiley, New York.
- Laroussi, C. H. and DeBacker, L. W. (1979). Relations between geometrical properties of glass bead media and their main $\psi(\theta)$ hysteresis loops. *Soil Science Society of America Journal*, 43:646–650.
- Letey, J., Osborn, J., and Pelishek, R. E. (1962). Measurement of liquid-solid contact angles in soil and sand. *Soil Science*, 93:149–153.
- Lu, N., Godt, J. W., and Wu, D. T. (2010). A closed-form equation for effective stress in unsaturated soil. *Water Resources Research*, 46:W05515.
- Lu, N. and Likos, W. (2006). Suction stress characteristic curve for unsaturated soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(2):131–142.
- Lu, N. and Likos, W. J. (2004). *Unsaturated Soil Mechanics*. John Wiley and Sons, Hoboken, New Jersey.

- Ma, K. C., Tan, Y. C., and Chen, C. H. (2011). The influence of water retention curve hysteresis on the stability of unsaturated soil slopes. *Hydrological Processes*, 25(23):3563–3574.
- McKee, C. R. and Bumb, A. C. (1984). The importance of unsaturated flow parameters in designing a monitoring system for hazardous wastes and environmental emergencies. In *Proceedings of the Hazardous Materials Control Research Institute National Conference*, pages 50–58, Houston, Tex.
- McKee, C. R. and Bumb, A. C. (1987). Flow-testing coalbed methane production wells in presence of water and gas. *Formation Evaluation*, 3(4):699–706.
- Mualem, Y. (1976). A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, 12(3):513–522.
- Muraleetharan, K. K., Liu, C., Wei, C., Kibbey, T. C. G., and Chen, L. (2009). An elastoplastic framework for coupling hydraulic and mechanical behavior of unsaturated soils. *International Journal of Plasticity*, 25:473–490.
- Ng, C. W. W. and Pang, Y. W. (2000). Influence of stress state on soil-water characteristics and slope stability. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(2):157–166.
- Oberg, A. and Sallfors, G. (1997). Determination of shear strength parameters of unsaturated silts and sands based on the water retention curve. *Geotech. Test. J.*, 20(1):40–48.
- Richards, B. G. (1965). *Measurement of free energy of soil moisture by the psychrometric technique using thermistors*. Butterworth & Co. Ltd., Sydney, Australia.

- Richards, L. A. (1931). Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics*, 1(5):318–333.
- Schrefler, B. A. (1984). *The finite element method in soil consolidation (with application to surface subsidence)*. PhD thesis, University College of Swansea.
- Sheng, D., Sloan, S. W., Gens, A., and Smith, D. W. (2003a). Finite element formulation and algorithms for unsaturated soils. part i: Theory. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 27:745–765.
- Sheng, D., Smith, D., Sloan, S., and Gens, A. (2003b). Finite element formulation and algorithms for unsaturated soils. part ii: Verification and application. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 27:767–790.
- Song, Y. -S., Hwang, W. -K., Jung, S. -J., and Kim, T. H. (2012). A comparative study of suction stress between sand and silt under unsaturated conditions. *Engineering Geology*, 124(4):90–97.
- Tarantino, A. and Tombolato, S. (2005). Coupling of hydraulic and mechanical behaviour in unsaturated compacted clay. *Géotechnique*, 55(4):307–317.
- Terzaghi, K. (1925). *Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer grundlage*. Franz Deuticke, Leipzig und Wien, Germany and Austria.
- Terzaghi, K. (1936). Relation between soil mechanics and foundation engineering. In *Proceedings of the 1st International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, volume 3, pages 13–18, Cambridge, Massachusetts.
- Terzaghi, K. (1943). *Theoretical Soil Mechanics*. Wiley, New York.

- van Genuchten, M. T. (1980). A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44:892–898.
- Vanapalli, S., Fredlund, D., Pufahl, D., and Clifton, A. (1996). Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction. *Canadian Geotechnical Journal*, 33(3):379–392.
- Welge, H. J. (1952). A simplified method for computing oil recovery by gas or water drive. *Transactions AIME*, 195:91–98.
- Wildenschild, D., Jensen, K. H., Hollenbeck, K. J., Illangasekare, T. H., Znidarcic, D., Sonnenborg, T., and Butts, M. B. (1997). A two stage procedure for determining unsaturated hydraulic characteristics using a syringe pump and outflow observation. *Soil Science Society of America Journal*, 61(2):347–359.
- Williams, J., Prebble, R. E., Williams, W. T., and Hignett, C. T. (1983). The influence of texture, structure and clay mineralogy on the soil moisture characteristics. *Australian Journal of Soil Research*, 21(1):15–32.
- Zachman DW, Duchateau PC, K. A. (1981). The calibration of the richards flow equation for a draining column by parameter identification. *Soil Science Society of America Journal*, 45:1012–1015.

감사의 글

항상 앞만 보며 달려왔습니다. 무엇이든 열심히 하면 되겠지! 하는 생각에 뒤도 옆도 안보고 앞만 보고 달려왔습니다. 토목분야 중에서도 지반분야 전문가가 되기 위해 배움에서부터 시작하여 어언 25년이란 세월이 흘렀습니다. 비록, 저 자신의 학문적 지식이 미미하고 부족해서 주위의 많은 지인들의 도움이 없었으면 불가능했을 수도 있었다는 것을 인식하면서도 제 인생에 또 한번의 발자취를 남길 수 있는 기회가 되어서 무한한 기쁨을 감출 수 없습니다.

지구상에 세상을 창조해 나가는 토목엔지니어의 일인으로서 이 분야의 발전을 위해서 무언가 해야 된다는 생각은 항상 앞서 있었지만 모든 것이 마음먹은 대로 쉽지는 않았습니다. 마스크를 통해 건설현장의 사고, 기존 구조물 및 주변시설의 붕괴로 인한 인명피해를 접하면서도 재발 방지를 위한 해결책을 제시할 수 없음이 안타까울 뿐이었습니다. 설계업체에 근무하는 엔지니어로서 대가를 받아야 현장을 검토하고 일시적인 해결책을 제시하는 게 고작이었을 테니까요. 이런 마음에서 바라건대, 이 논문이 세상의 단 한 사람의 무고한 희생이라도 줄이는데 조그만 한 연구성과가 됐으면 하며, 완성되기까지 많은 도움을 아끼지 않은 주위의 지인들에게 이 공간을 빌어 감사의 마음을 전하려 합니다.

항상 부족한 저에게 지속적인 학문의 길을 열어줄려고 친구처럼 많은 조언을 아끼지 않았던 김태형 지도교수님, 학생들 가르침에 분주한 학기 중에도 본 논문의 질적 향상을 위해 논문심사에 매진해 주신 토목공학과 서영교 교수님, 김도삼 교수님, 경갑수 교수님, 그리고 매사 연구활동으로 바쁜 와중에도 귀한 시간을 내어 연구방향에 대해 조언을 해준 한국지질자원연구원의 송영석 박사님께 깊은 감사의 마음을 전합니다.

특히, 본 논문이 있기까지 만사를 뒤로 하고 불철주야 다수의 실험 및 논문작업을 도와 준 대학원 토질연구실 박사과정에 있는 황웅기 연구원에게 누구보다 진심어린 마음으로 고마움을 표합니다. 또한, 동연구실에서 연구 활동중인 윤성규, 이민아 연구원의 헌신적인 도움에 대해서도 고맙다는 말 전합니다.

아프리카 속담중에 “빨리가려면 혼자 가고 멀리가려면 함께 가라”는 이 말을 되새기며 토목기술자로 설계회사에 입사하여 현재 예담엔지니어링에서 재직하면서 본 논문을 연구하게 되었고, 회사 발전을 위한 많은 어려움 속에서도 시간을 배려해 주신 임윤식 회장님, 조봉제 사장님, 김종원 대표님, 또한 함께 동고동락하며 많이 격려해 주신 예담 임직원 모든 분들께 심심찮은 감사의 마음을 전합니다.

끝으로, 지금까지 저에게 꾸준한 배움의 길을 갈 수 있도록 길을 열어 주시고, 오래도록 건강하게 삶을 사셨으면 하는 부모님, 그리고 늘 멀리서나마 격려해 주고 지켜봐 주는 형제들, 두 아이 뒷바라지에 한시도 자기 몸이 고단한 줄 모르고 물심양면으로 내조해 준 나의 사랑스런 인생의 반려자 김경미, 이제는 사춘기에 접어들어서 부모속도 썩히지만 이쁜 딸과 멋진 아들이 되려고 노력하는 소이와 태훈에게 이 논문을 바치려고 합니다.

2012년 08월 강 기민