

현장 내 다짐효과를 고려한
도로의 안전성 확보 연구

유진욱

- 목 차 -

목 차	i
표 목차	iii
그림목차	iv
Abstract	xiii
제 1 장 서 론	1
1.1 연구배경 및 목적	1
1.2 연구동향	2
1.3 논문구성	4
제 2 장 이론적 배경	5
2.1 흙의 다짐 특성	5
2.1.1 실내다짐시험	5
2.1.2 흙의 다짐 특성	7
2.1.3 현장에서의 흙의 다짐	11
2.2 흙의 전단강도 특성	12
2.2.1 Mohr-Coulomb의 파괴이론	13
2.2.2 강도정수 결정을 위한 실내시험	14
제 3 장 현장 다짐토의 물리적 특성	23
3.1 현장의 개요	23
3.1.1 현장의 위치 및 지층조건	23
3.1.2 현장의 흙쌓기 단면	24

3.2 흙의 물리적 특성 25

제 4 장 다짐토의 강도정수 변화 분석 29

4.1 현장 다짐에 따른 건조단위중량의 변화 분석 29

4.1.1 현장 다짐조건 29

4.1.2 다짐조건에 따른 건조단위중량의 변화 분석 31

4.2 강도정수의 변화 분석 36

4.3 현장에서의 안정성 변화 분석 44

제 5 장 결 론 52

참고문헌 54

- 표 목차 -

표 2.1 KS F 2312에 제시된 실내다짐시험 방법	6
표 2.2 다짐시험에 사용되는 몰드와 래머의 규격	7
표 2.3 시료의 준비방법에 따른 예상 시료량	7
표 2.4 삼축압축시험의 종류와 결과이용	19
표 3.1 기초지반의 시추조사 결과	24
표 3.2 연구에 사용된 흙의 물리적 특성	25
표 3.3 다짐시험 결과	27
표 4.1 현장에서의 다짐조건	29
표 4.2 다짐조건에 따른 단위중량의 변화	31
표 4.3 다짐조건에 따른 다짐도의 변화	34
표 4.4 직접전단시험에서의 시험조건	37
표 4.5 안정해석에 사용된 강도정수	44
표 4.6 비탈면 안정해석 결과	50

- 그림 목차 -

그림 2.1 실내다짐시험에 사용되는 래머와 몰드	6
그림 2.2 일반적인 흙의 다짐곡선	8
그림 2.3 흙의 종류에 따른 다짐곡선의 변화	8
그림 2.4 다짐에너지에 따른 다짐곡선의 변화	9
그림 2.5 점토질 흙의 구조에 대한 다짐의 영향	9
그림 2.6 점토질 흙의 압축성에 대한 다짐의 영향	10
그림 2.7 점토질 흙의 투수성에 대한 다짐의 영향	10
그림 2.8 현장에서 사용되는 다짐장비	11
그림 2.9 실내다짐시험과 현장다짐 결과 비교	12
그림 2.10 Mohr-Coulomb의 파괴이론	14
그림 2.11 직접전단시험의 개요	15
그림 2.12 직접전단시험 장비	15
그림 2.13 직접전단시험에 사용되는 전단상자	15
그림 2.14 일축압축시험 장비	16
그림 2.15 일축압축시험에서의 Mohr-Coulomb 파괴이론	17
그림 2.16 삼축압축시험 장비	18
그림 2.17 CD-Test에서의 Mohr-Coulomb 파괴이론	20
그림 2.18 CU-Test에서의 Mohr-Coulomb 파괴이론	21
그림 2.19 UU-Test에서의 Mohr-Coulomb 파괴이론	22
그림 3.1 현장의 위치	23
그림 3.2 OO도로 건설공사의 표준단면	25
그림 3.3 액성한계시험에 따른 흙의 유동곡선	26
그림 3.4 흙의 입도분포곡선	26
그림 3.5 흙의 다짐곡선	28

그림 4.1	현장에서의 다짐방법	30
그림 4.2	건조단위중량 측정을 위한 모래치환법 적용	32
그림 4.3	현장 다짐조건에 따른 단위중량의 변화	33
그림 4.4	다짐조건에 다짐도의 변화	35
그림 4.5	다짐도를 만족하기 위해 필요한 다짐두께별 다짐횟수	36
그림 4.6	본 연구에 사용된 직접전단시험 장비	37
그림 4.7	직접전단시험 결과($D_r=100\%$)	38
그림 4.8	직접전단시험 결과($D_r=95\%$)	39
그림 4.9	직접전단시험 결과($D_r=90\%$)	40
그림 4.10	직접전단시험 결과($D_r=85\%$)	41
그림 4.11	직접전단시험 결과($D_r=80\%$)	42
그림 4.12	다짐도에 따른 강도정수의 변화	43
그림 4.13	안정해석에 사용된 검토 단면	44
그림 4.14	다짐도 100%에 대한 비탈면 안정 검토결과	45
그림 4.15	다짐도 95%에 대한 비탈면 안정 검토결과	46
그림 4.16	다짐도 90%에 대한 비탈면 안정 검토결과	47
그림 4.17	다짐도 85%에 대한 비탈면 안정 검토결과	48
그림 4.18	다짐도 80%에 대한 비탈면 안정 검토결과	49
그림 4.19	다짐도에 따른 비탈면 안전율의 변화	50

제 1 장 서 론

1.1 연구배경 및 목적

우리나라는 경제성장에 따른 교통수요 및 원활한 물류의 이동을 위해 국토개발계획을 수립한 1960년대부터 고속국도와 일반국도, 지방도의 건설이 이루어졌고, 최근에도 고속국도 50km와 특별·광역시도 19 km, 지방도 20 km를 비롯하여 총 623 km의 도로건설이 진행되고 있다(국토교통부, 2019). 건설되고 있는 대부분의 도로의 경우, 경제적이고 효율적인 설계 및 시공이 이루어질 수 있도록 도로의 종단 및 평면선형을 결정하고 있으며, 이에 따라 현장에서는 흙 깎기 및 흙 쌓기로 대변되는 토공사가 빈번하게 진행되고 있다. 도로의 건설을 위한 토공사 중 흙 깎기가 진행되는 구간의 경우, 해당 위치에 대한 지반조사를 실시하고, 채취한 흙에 대해 실내시험을 수행한 후 지반조사 및 실내시험 결과를 종합하여 지지력 확보 여부에 대하여 충실하게 검토한다면 도로의 안정성을 쉽게 확보할 수 있다. 그러나 흙 쌓기가 이루어지는 구간의 경우에는 설계단계에서 결정된 종단 및 평면선형을 일치시키기 위해 흙 쌓기를 실시하고 있으며, 쌓기가 이루어진 흙에 대해서는 침하(Settlement)가 발생하지 않고, 충분한 지지력을 확보할 수 있도록 유도하기 위해 다짐(Compaction)을 실시하여야 한다.

일반적인 다짐의 경우, 일정한 무게의 추를 낙하시킴으로써 다짐에너지(E_c , Compaction Energy)를 전달하는 것을 의미하며, 다짐을 통해 흙 사이에 존재하는 공기를 배출시켜 간극(Void)을 감소시키고, 단위중량(Unit Weight)을 증가시킬 수 있다. 그러나 현장에서는 큰 다짐에너지를 가하기 어렵기 때문에 큰 중량을 갖는 머캐덤롤러(Macadam Roller) 또는 탠덤롤

러(Tandem Roller), 탬핑롤러(Tamping Roller)와 같은 장비의 주행을 통해 다짐을 진행하고 있어 다짐방법과 다짐에너지의 차이를 보이고 있다. 또한 현장의 경우 함수비, 흙의 종류 및 입도 등 현장의 조건이 실내시험 조건과 다를 수 있어 다짐의 효과가 다르게 나타날 수 있으나 이와 관련된 규정과 연구가 충분히 이루어지지 않아 규정된 품질의 흙만을 사용하여 다짐두께는 일률적으로 20~30 cm를 적용하고 있어 합리적인 토공사 수행과 품질관리가 어려운 측면이 있다.

따라서 본 연구에서는 현장에서의 장비의 주행횟수와 다짐두께와 같은 다짐조건이 변화된 경우에 대해 현장에서 모래치환법(Sand Replacement Method)을 실시하여 흙의 단위중량의 변화와 다짐도의 만족여부를 검토하고, 다짐도(Degree of Compaction) 80, 85, 90, 95, 100 %로 제작된 시편(Specimen)에 대해 직접전단시험(DST, Direct Shear Test)을 수행하여 각 다짐조건에 따른 흙의 강도정수의 변화를 검토함으로써 합리적인 토공사의 수행과 품질관리에 필요한 연구결과를 도출하고자 하였다.

1.2 연구동향

다짐은 흙을 효과적으로 개량할 수 있는 가장 간편한 방법으로 Proctor (1933)에 의해 개념이 정리된 이후, 대부분의 나라가 Proctor가 제안한 방법을 다소 개량하고, 일반적으로 사용하고 있어 다짐과 관련된 연구는 활발하게 진행되지 않고 있다. 그러나 최근에는 건설 기술과 탐사장비가 발달함에 따라 모래치환법과 같은 시험을 실시하지 않고, 현장에서 비파괴 밀도측정장비를 사용하여 다짐도를 평가하는 방법에 관한 연구가 2000년대부터 활발하게 진행되고 있다. 심한수(2002)는 GPS를 장착한 다짐장비를 사용하여 다짐장비의 운행 궤적, 속도, 왕복 횟수 등을 수치화하고, 이

를 토대로 다짐관리 기술을 정량화하는 연구를 수행하였고, 유완규 등(2008)은 평판재하시험의 결과와 지오게이지(Geogauge), 동평판재하시험기(LFWD, Light Falling Weight Deflectometer), 간이지지력측정기(CASPFOL) 등 다양한 현장밀도측정 방법의 상관관계 분석을 통해 다짐도 및 지반계수를 추정하는 연구를 수행하였다. 황성춘(2011)은 휴대용 콘관입시험기를 통해 단시간에 다짐도를 평가하는 방법에 대한 연구를 수행하였다. 박근현 등(2019)은 자유낙하 콘 관입시험법을 활용하여 다짐도를 측정하기 위해 실내시험을 실시하고, 시험결과를 비교·분석하는 연구를 수행하였다. 또한 다짐장비의 발달로 인하여 실내 및 현장의 다짐장비의 개선에 관한 연구도 다양하게 이루어지고 있다. 이관호 등(2009)은 현장에서 흙 입자의 배열을 동일하게 재현할 수 있는 선회다짐시험장비를 사용하여 다짐곡선을 평가하는 방법에 대해 연구하였고, 안신환(2017)은 다짐에 따른 지반의 개량심도를 향상시킬 수 있는 새로운 탬퍼(Tamper)의 형태를 개발하기 위한 연구를 수행하였다.

한편 다짐 자체에 대한 연구도 꾸준히 수행되었다. 류재학(2000)은 암성토 현장에서 흙의 함유율이 현장의 다짐정도에 미치는 영향에 대해 연구하였고, 문장식(2005)은 다짐을 불포화토의 비배수 압축거동으로 가정하고, 다짐방법의 차이에 따른 흡인력(Matric Suction)의 변화와 역학적 거동을 규명하였고, 강성곤(2006)은 다짐횟수에 따른 흙 재료의 최적함수비와 다짐도의 변화에 대해 규명하는 연구를 수행하였고, 민경준(2008)은 암성토가 이루어지는 현장에 대해 평판재하시험과 현장에서의 물치환법을 적용하여 암성토 두께, 토사캡핑 유무 등 다짐관리방안을 제시하였다. 이재민(2010)은 보조기층재료에 대해 KS F와 ASTM에 제시된 다짐방법의 차이를 분석하는 연구를 수행하였고, 이승택(2011)은 준설토를 현장에서 다짐하는 경우, 다짐방법에 따른 강도특성의 변화를 분석하여 다짐관리기준을 제시하는 등 다양한 연구가 진행되고 있다.

그러나 현재까지의 연구는 상기에 서술한 바와 같이 기술 및 다짐장비가 발달함에 따라 기존의 다짐장비 또는 방법을 개선하는 연구가 대부분 이루어지고 있고, 현장에서의 다짐조건이 건조단위중량 및 다짐도, 흙의 강도정수에 미치는 영향을 분석하는 연구가 이루어지지 않고 있다. 이에 따라 정확한 다짐관리방안이 마련되지 않고 있어 현장에서는 품질확보에 어려움을 겪고 있다.

제 2 장 이론적 배경

2.1 흙의 다짐 특성

다짐은 역학적 에너지를 가하여 흙 속의 공기를 제거하고, 입자를 재배열하여 단위중량(γ , Unit Weight)을 증가시킬 수 있으며, 지반의 전단강도 증가, 비탈면 안정성 및 구조물의 지지력 확보 등 흙을 효과적으로 개량할 수 있어 많은 현장에서 사용되고 있는 방법이다. 그러나 흙은 흙의 종류와 입도분포, 함수비, 다짐에너지에 따라 다짐의 영향이 다르게 나타나기 때문에 다짐특성을 정확하게 이해할 필요가 있다.

2.1.1 실내다짐시험

Proctor(1933)는 흙 댐(Earth Dam)공사에서 함수비에 따른 건조단위중량의 변화를 시험을 통해 규명하는 과정에서 직경(D) 101.6 mm, 체적(V) 944 cm³의 몰드(Mold)에 2.5 kg의 래머(Rammer)를 30.5 cm에서 25회씩 3층으로 나누어 다짐을 실시하는 표준다짐시험(Proctor Compaction Test)을 제안하였다(Braja et al., 2016). 그러나 세계 2차 대전 중 대형항공기를 지지할 수 있는 활주로를 건설하기 위해 높은 다짐에너지를 가하여 다짐을 실시할 필요성이 높아짐에 따라 미공병단(US Army Corps. of Engineers)에서는 표준다짐시험을 토대로 수정한 수정다짐시험(Modified Compaction Test)을 제안하였다. 이후 표준다짐시험과 수정다짐시험은 AASHTO(American Association of State Highway and Transportation Officials)와 ASTM(American Society for Testing and Materials)에 의해 여러 번 개정되었고, 국내에서는 ASTM과 AASHTO에 제시된 방법과 대동소이한 KS방법이 사용되고 있다(강대익, 1999). 그림 2.1에는 실내다짐

시험에 사용되는 래머와 몰드를 나타내었고, 표 2.1에는 국내 KS F 2312에 제시된 다양한 시험방법, 표 2.2에는 래머와 몰드의 규격, 표 2.3에는 시료의 준비방법에 따른 소요량을 정리하여 나타내었다.



그림 2.1 실내다짐시험에 사용되는 래머와 몰드

표 2.1 KS F 2312에 제시된 실내다짐시험 방법

다짐방법	래머		몰드 내경 (mm)	다짐 층수	1층당 다짐 횟수	허용 최대입경 (mm)	
	무게 (N)	낙하고 (mm)					
표준	A	24.52	300	100	3	25	19.0
	B	44.13	450	150	3	55	37.5
수정	C	24.52	300	100	5	25	19.0
	D	44.13	450	150	5	55	19.0
	E	44.13	450	150	3	92	37.5

표 2.2 다짐시험에 사용되는 몰드와 래머의 규격

구분 \ 치수	몰드(Mold)		래머(Rammer)		
	내경 (mm)	부피 (mm ³)	내경 (mm)	무게 (N)	낙하고 (mm)
소형	100 ± 0.4	100.0×10 ⁶ ± 1.2	50 ± 0.12	24.5 ± 0.1	300 ± 1.5
대형	150 ± 0.6	220.9×10 ⁶ ± 2.6	50 ± 0.12	44.1 ± 0.2	450 ± 2.5

표 2.3 시료의 준비방법에 따른 예상 시료량

호칭	시료 준비방법	허용입경 (mm)	사용몰드 (mm)	시료의 소요량(N)
a	건조법 + 반복법	19.0	소형(100)	49.1
		19.0	대형(150)	78.5
		37.5	대형(150)	147.1
b	건조법 + 비반복법	19.0	소형(100)	196.0(24.5×8회)
		37.5	대형(150)	352.8(44.1×8회)
c	습윤법 + 비반복법	19.0	소형(100)	196.0(24.5×8회)
		37.5	대형(150)	352.8(44.1×8회)

2.1.2 흙의 다짐 특성

흙에 일정한 다짐에너지를 가하는 경우, 그림 2.2에 나타난 것과 같이 건조단위중량(γ_d , Dry Unit Weight)은 증가하여 정점(Peak)을 나타낸 후 감소하는 경향을 나타내며, 가장 큰 값을 나타내는 건조단위중량을 최대 건조단위중량(γ_{d-max} , Maximum Dry Unit Weight)라 하고, 최대건조단위중량에 대응하는 함수비를 최적함수비(ω_{opt} , Optimum Water Content)로 정의하고 있다(Braja et al., 2016).

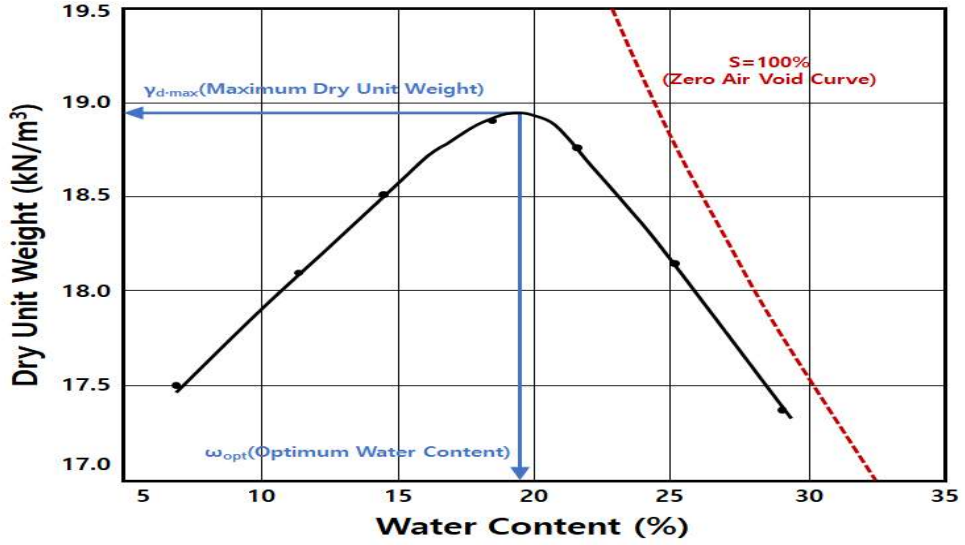


그림 2.2 일반적인 흙의 다짐곡선

흙의 다짐특성인 최대건조단위중량과 최적함수비는 그림 2.3~2.4에 나타난 것과 같이 흙의 입도분포와 종류, 점토광물의 종류와 양, 다짐에너지의 크기에 영향을 받는 것으로 알려져 있다(ASTM, 2015).

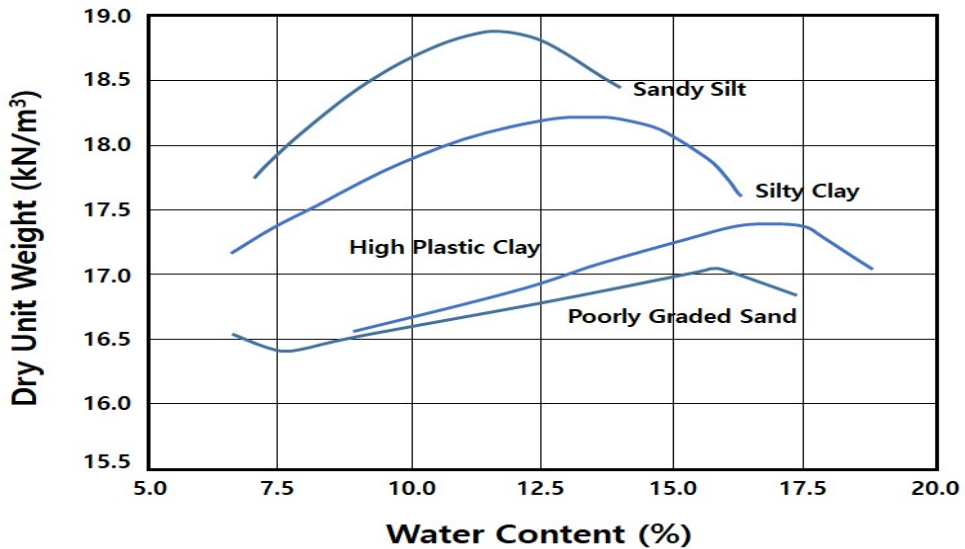


그림 2.3 흙의 종류에 따른 다짐곡선의 변화

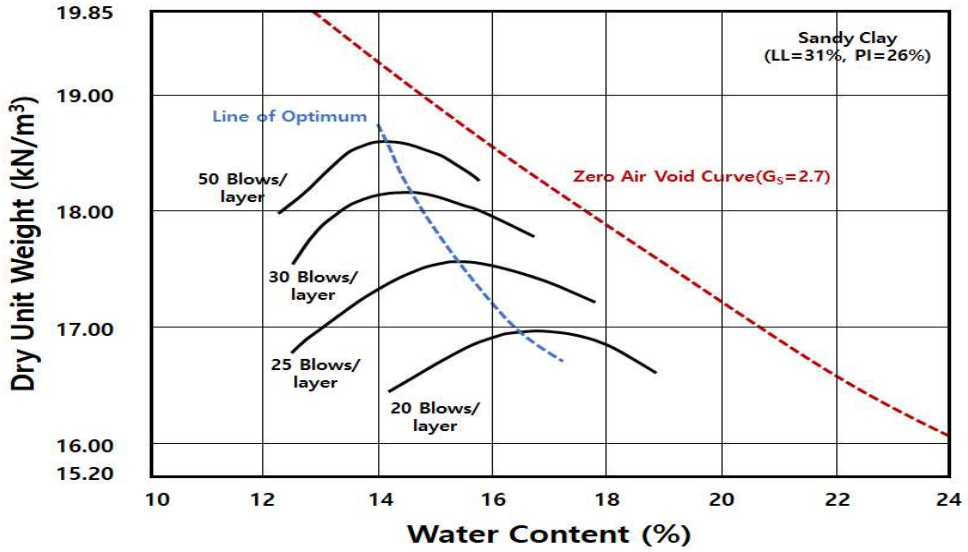


그림 2.4 다짐에너지에 따른 다짐곡선의 변화

또한 점토(Clay)질 흙의 경우, 최적함수비를 기준으로 어떠한 상태에서 다짐이 이루어지는지에 따라 그림 2.5에 나타난 것과 같이 흙의 구조가 다르게 나타난다(Lambe, 1958a).

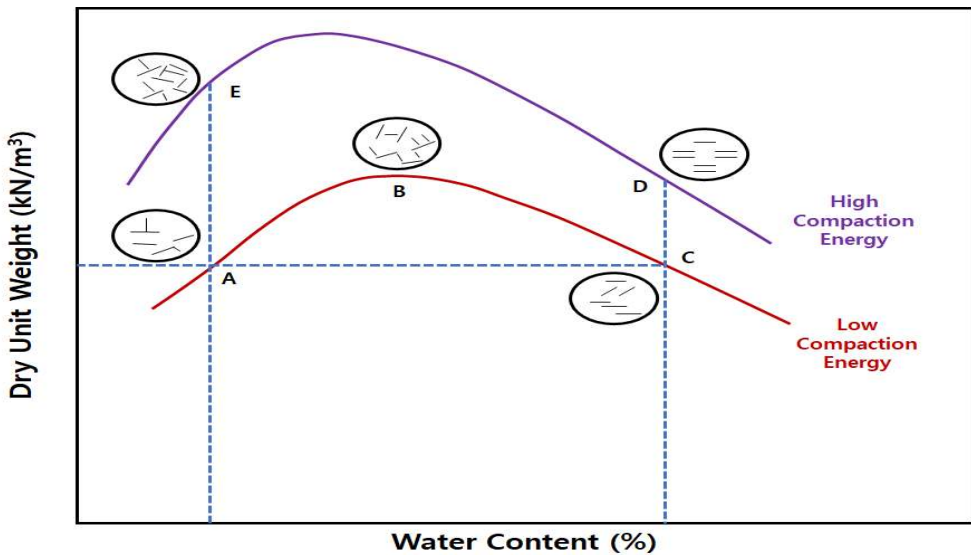
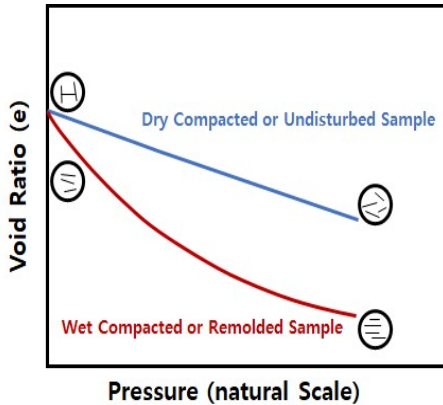
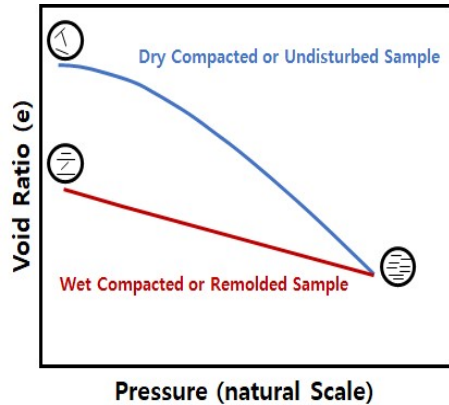


그림 2.5 점토질 흙의 구조에 대한 다짐의 영향

다짐으로 인해 흙의 구조가 변화하는 경우, 흙의 압축성과 투수성은 그림 2.6~2.7에 나타난 것과 같이 변화하게 되며, 이는 지반의 전체적인 거동에 영향을 미칠 수 있다(Lambe, 1958b). 따라서 설계 및 시공과정에서는 흙의 다짐특성을 정확하게 파악하고, 구조물의 안정성을 확보할 수 있도록 다짐하는 것이 매우 중요하다.

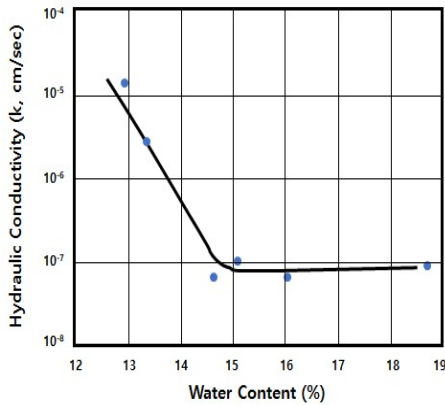


(a) 낮은 압력 상태

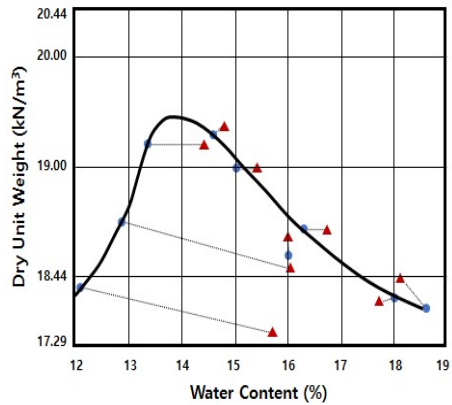


(b) 높은 압력 상태

그림 2.6 점토질 흙의 압축성에 대한 다짐의 영향



(a) 투수계수



(b) 함수비와 단위중량의 변화

그림 2.7 점토질 흙의 투수성에 대한 다짐의 영향

2.1.3 현장에서의 흙의 다짐

시공현장에서는 일반적으로 흙의 종류와 입도분포 등을 고려하여 그림 2.8에 나타난 것과 같이 평활롤러(Smooth Wheel Roller), 공기고무타이어 롤러(Pneumatic Rubber-Tired Roller), 양족롤러(Sheepfoot Roller), 진동롤러(Vibratory Roller)를 사용하여 다짐을 실시하고 있다.



(a) 평활롤러



(b) 공기고무타이어롤러



(c) 양족롤러



(d) 진동롤러

그림 2.8 현장에서 사용되는 다짐장비

그러나 다짐장비를 사용하여 현장에서 다짐을 실시하는 경우, 실제 흙에 전달되는 에너지(Energy)는 실내에서 다짐시험에서 전달되는 동적 충격(Dynamic-Impact)에너지가 아니라 다짐장비로 짓이기는(Kneading) 형태의 다짐을 실시하기 때문에 실내다짐시험의 결과와 현장의 다짐결과가

그림 2.9와 같이 다르게 나타날 수 있다(Turnbull, 1950).

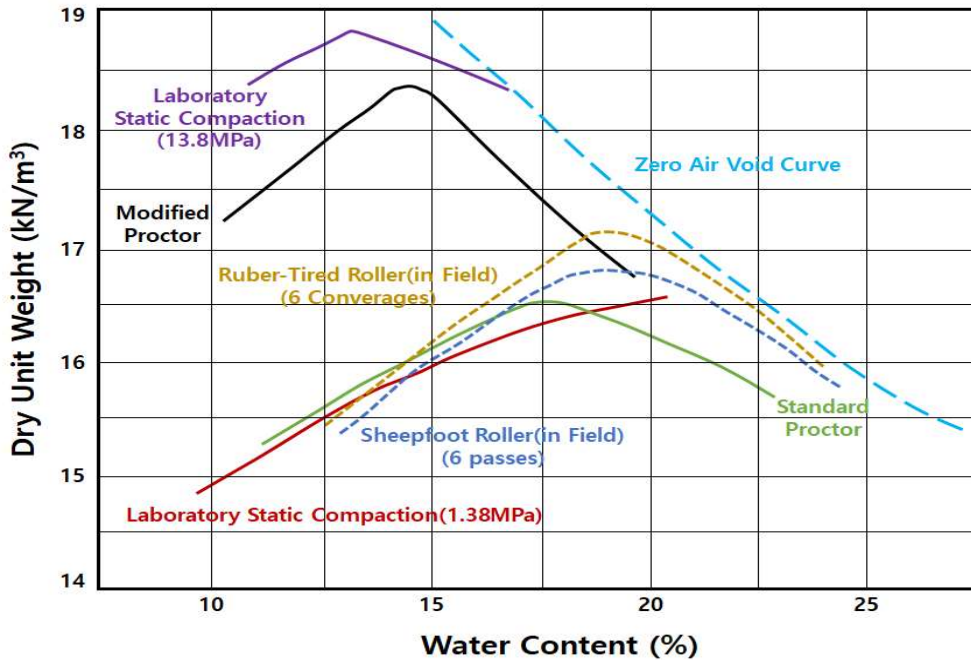


그림 2.9 실내다짐시험과 현장다짐 결과 비교

그러나 국내에서는 설계과정에서 롤러(Roller)를 사용하여 20~30 cm의 다짐두께로 8~10회 다짐하도록 일반적으로 제시하고 있고, 도로의 경우 다짐도(Degree of Compaction) 95 %만을 규정하고 있을 뿐 현장의 흙에 대한 특성은 고려되지 않고 있어 완벽한 품질관리가 어려운 측면이 있다(강대익, 1999).

2.2 흙의 전단강도 특성

흙의 전단강도(Shear Strength)는 임의의 전단면을 따라 발생하는 파괴(Failure) 및 활동(Sliding)에 저항하는 흙의 단위면적당 내부 저항력으로

지지력(Bearing Capacity), 비탈면 안정(Slope Stability), 옹벽에 작용하는 수평토압(Lateral Pressure) 등과 같은 흙의 안정성 문제를 해석하는 데 사용되고 있다(Braja, 2016).

2.2.1 Mohr-Coulomb의 파괴이론

일반적인 흙 재료의 파괴는 최대 수직응력(Maximum Normal Stress) 또는 최대 전단응력(Maximum Shear Stress)에 의해 파괴되는 것이 아니라 수직응력과 전단응력의 임계 결합상태에서 이루어진다(Mohr, 1900). 이 때 파괴 단면에서의 수직응력과 전단응력의 관계는 식 2.1과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau_f = f(\sigma) \quad (2.1)$$

여기서, τ_f = 전단응력(Shear Stress)

σ = 수직응력(Normal Stress)

식 2.1에 따른 수직응력과 전단응력의 관계는 일반적으로 포물선 형태를 나타내나, Coulomb의 마찰법칙을 적용한다면 식 2.1은 식 2.2와 같이 수정할 수 있다(Braja, 2016). 파괴 단면에서의 전단응력은 그림 2.10에 나타낸 것과 같이 수직면에 작용하는 응력과 흙의 강도정수인 점착력(c)과 내부마찰각(ϕ)의 함수로 나타낼 수 있다.

$$\tau_f = c + \sigma \cdot \tan\phi \quad (2.2)$$

여기서, c = 점착력(Cohesion)

ϕ = 내부마찰각(Friction Angle)

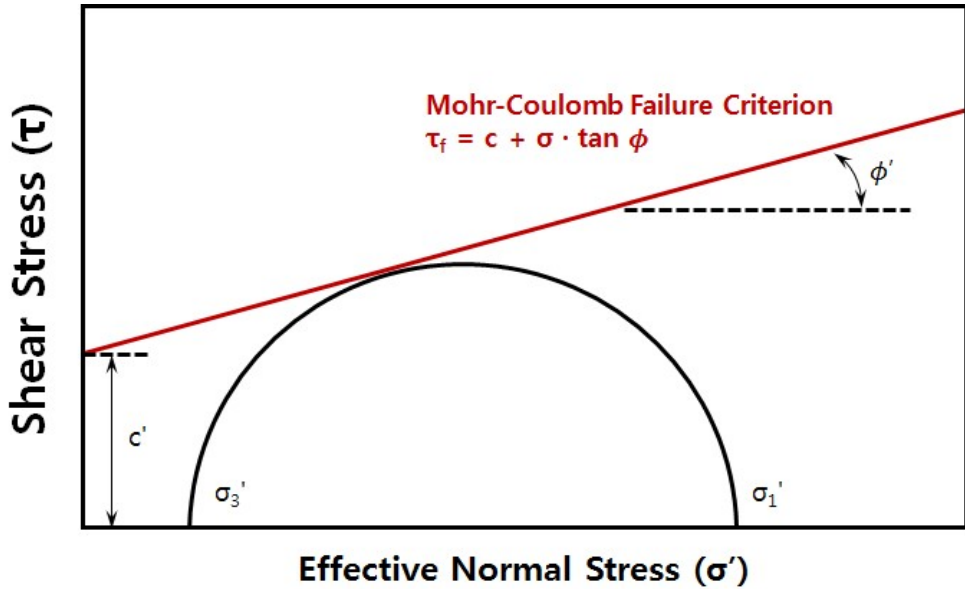


그림 2.10 Mohr-Coulomb의 파괴이론

2.2.2 강도정수 결정을 위한 실내시험

흙의 강도특성인 점착력(c)과 내부마찰각(ϕ)은 직접전단시험(Direct Shear Test), 일축압축시험(Unconfined Compression Test), 삼축압축시험(Triaxial Compression Test), 비틀림 전단시험(Torsional Ring Shear Test) 등 실내시험을 통해 결정할 수 있다.

(a) 직접전단시험(Direct Shear Test)

직접전단시험은 흙의 강도특성을 결정할 수 있는 가장 오래된 시험으로 흙 시료를 직접 전단시킬 수 있는 장비를 사용하여 짧은 시간동안에 시험 결과를 쉽게 도출할 수 있는 장점이 있다. 그림 2.11에는 직접전단시험의 개요를 나타내었고, 그림 2.12~2.13에는 국내에서 주로 사용하고 있는 직접전단시험장비와 전단상자(Shear Box)를 나타내었다.

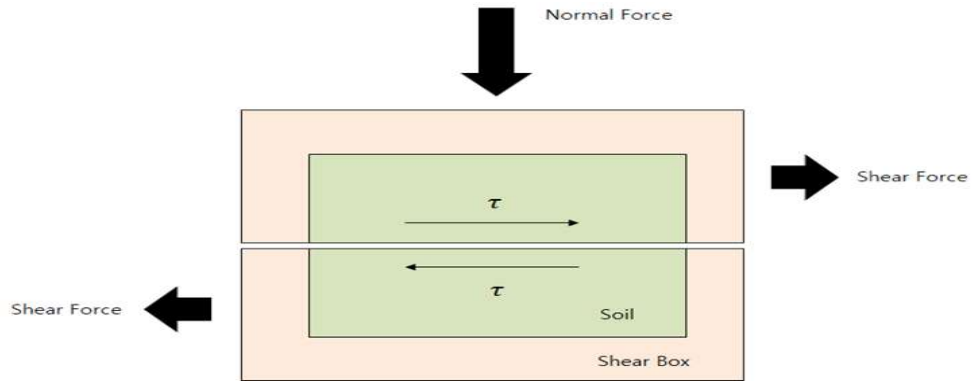
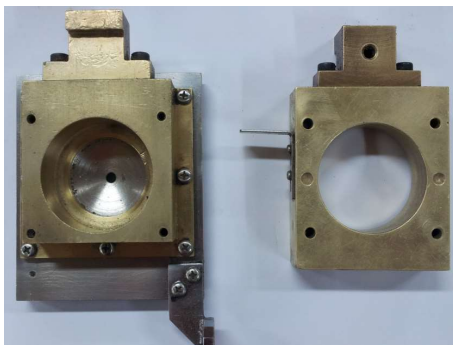


그림 2.11 직접전단시험의 개요



그림 2.12 직접전단시험 장비



(a) 상·하부 전단상자



(b) 조립된 전단상자

그림 2.13 직접전단시험에 사용되는 전단상자

직접전단시험은 전단상자(Shear Box)의 전단면을 따라 흙의 전단파괴가 이루어지기 때문에 흙의 전단강도는 실제 전단강도보다 약 5~10 % 크게 측정되는 경향이 있다. 또한 전단상자 내의 응력분포는 일정하지 않기 때문에 Mohr's Circle에서도 최대주응력(σ_1)과 최소주응력(σ_3)을 결정할 수 없고, 흙의 전단파괴 과정에서 발생하는 응력의 상태를 정확하게 반영하기 어려운 문제가 있으므로 설계과정에서 이를 적절하게 고려하는 것이 필요하다.

(b) 일축압축시험(Unconfined Compression Test)

일축압축시험은 주로 점토시료에 대해 그림 2.14에 나타난 것과 같은 시험장비를 활용하여 구속응력(σ_3)이 0(Zero)인 상태에서 축방향으로 압축하중(σ_1)을 빠르게 작용시켜 일축압축강도(q_u , Unconfined Compression Strength)를 측정하는 시험이다.



그림 2.14 일축압축시험 장비

일축압축시험의 경우 구속응력(σ_3)이 0(Zero)이므로 그림 2.15에 나타난 것과 같이 Mohr-Coulomb의 파괴이론에서의 관계식인 식 2.3을 통해 강도정수인 점착력(c)을 결정할 수 있는 시험이다.

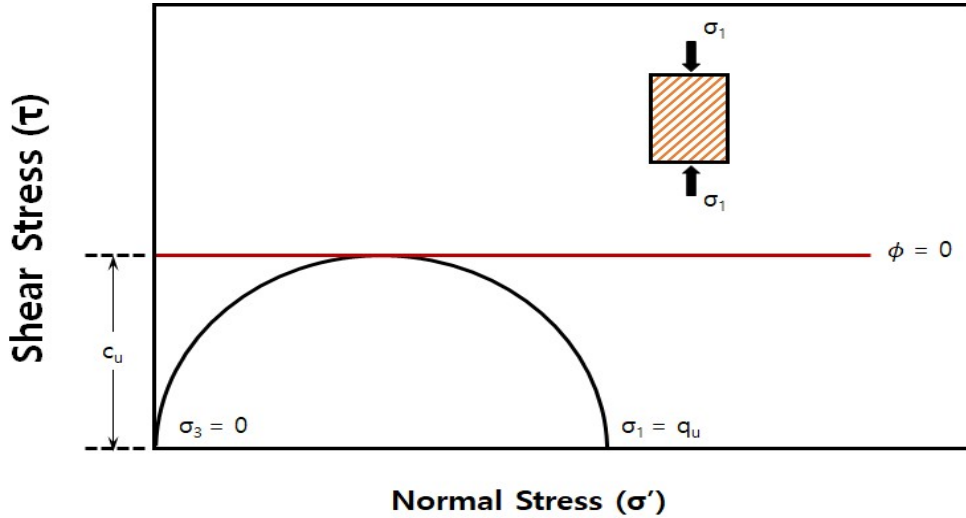


그림 2.15 일축압축시험에서의 Mohr-Coulomb 파괴이론

$$\tau_f = \sigma_1/2 = q_u/2 = c_u \quad (2.3)$$

여기서, c_u = 비배수 점착력(Undrained Cohesion)

q_u = 일축압축강도

(Unconfined Compression Strength)

일축압축시험은 시험시간이 짧고, 간단하며, 시험과정에서 얻어지는 응력-변형률 곡선(Stress-Strain Curve)에서 곡선의 기울기를 통해 변형계수(E, Deformation Modulus)를 결정할 수 있고, 일축압축강도(q_u)값을 활용하여 지반의 연경도 및 강도증가율(c_u/p)을 비롯한 다양한 안정성 문제

를 비교적 쉽게 판단할 수 있어 실무분야에서 주로 사용되고 있다. 그러나 일축압축시험의 경우, 구속응력(σ_3)이 0(Zero)이기 때문에 내부마찰각(ϕ)도 0(Zero)인 것으로 판단하고 있으나 실제 현장에서 흙의 내부마찰각(ϕ)은 0(Zero)보다 큰 값을 나타내고, 삼축압축시험을 통해 도출된 비배수 전단강도(c_u , Undrained Cohesion)보다도 큰 값을 보이는 것으로 조사되어 이를 보정하는 노력이 필요하다(서효식, 2010). 또한, 일축압축시험의 경우 시편에 포함된 이물질과 잔균(Crack)의 유무에 따라 일축압축강도가 다르게 나타날 수 있어 직접전단시험과 마찬가지로 설계과정에서 이를 적절하게 고려하는 것이 필요하다.

(c) 삼축압축시험(Triaxial Compression Test)

삼축압축시험은 그림 2.16에 나타난 것과 같이 복잡한 시험장비를 사용하여 흙의 강도정수를 결정하는 시험 중 가장 신뢰성 있는 시험방법 중의 하나이다().



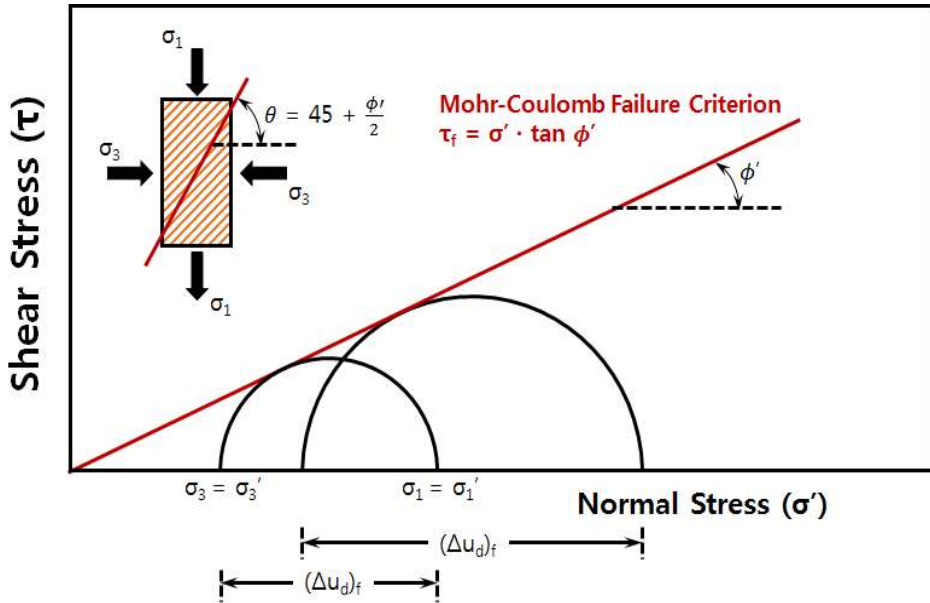
그림 2.16 삼축압축시험 장비

삼축압축시험의 경우, 실제 현장의 특성을 정밀하게 반영할 수 있고, 표 2.4에 나타난 것과 같이 배수(Drain)와 압밀(Consolidation) 상태에 따라 압밀배수시험(CD-Test), 압밀비배수시험(CU-Test), 비압밀비배수시험(UU-Test)로 구분되는 시험을 통해 다양한 상태에서 흙의 강도정수를 정확하게 도출할 수 있어 해상교량 및 초고층 빌딩과 같이 중요도가 높은 구조물의 기초(Foundation)공사시 지반의 거동을 판단하는 경우에 사용되고 있다.

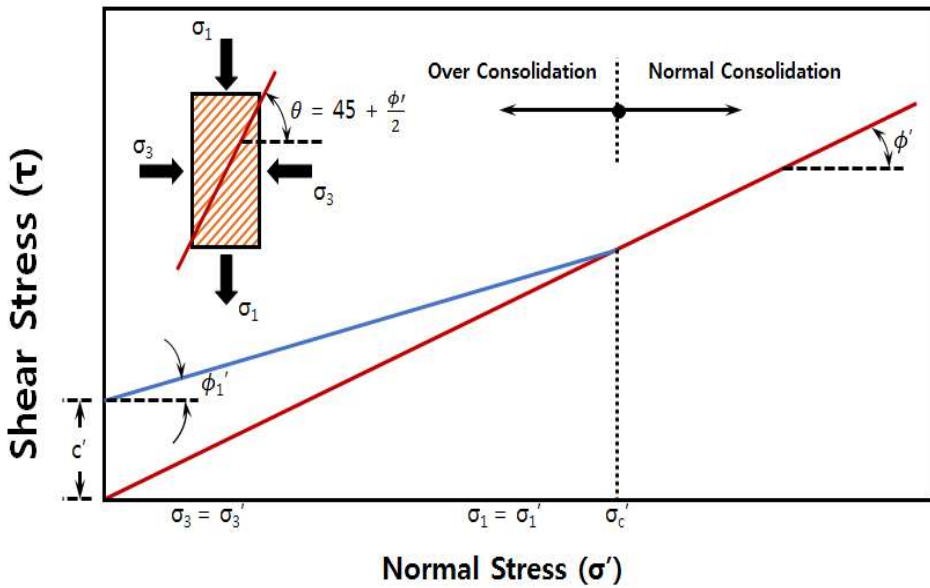
표 2.4 삼축압축시험의 종류와 결과이용

시험종류	강도정수	결과이용
압밀배수 (CD-Test)	c_u, ϕ_u	사질토 지반과 같이 수압의 영향을 받지 않는 불포화지반의 안정계산 및 장기적 안정 문제
압밀비배수 (CU-Test)	c_{cu}, ϕ_{cu}	점성토 지반에 프리로딩(Pre-Loading) 공법으로 압밀하는 경우 또는 완속시공하는 경우의 안정 문제
비압밀비배수 (UU-Test)	c_d, ϕ_d	포화된 점성토 지반에 성토 또는 구조물을 급속하게 시공하는 경우 또는 시공직후의 안정문제

압밀배수시험(CD-Test)은 현장의 유효상재하중(σ'_v)을 고려하여 다양한 구속응력(σ_3)을 가함으로써 압밀(Consolidation)을 진행한 후 시료 내부에서 간극수압(u)이 발생하지 않도록 배수(Drain) 상태에서 천천히 수직응력(σ_1)을 가하여 시료를 전단시키는 시험이다. 압밀배수시험(CD-Test)은 배수상태에서 간극수압(u)이 발생하지 않도록 천천히 시료를 전단시키기 때문에 시험시간이 오래 걸리는 특징이 있다. 또한 간극수압(u) 발생하지 않으므로 전응력(σ)과 유효응력(σ')이 동일하고, 그림 2.17에 나타난 것과 같이 각 구속응력에 대한 파괴시 최대주응력을 토대로 Mohr-Coulomb의 파괴포락선을 도출할 수 있다.



① 정규압밀점토 또는 느슨한 모래인 경우



② 과압밀점토 또는 조밀한 모래인 경우

그림 2.17 CD-Test에서의 Mohr-Coulomb 파괴이론

압밀비배수시험(CU-Test)은 압밀배수시험(CD-Test)과 동일하게 다양한 (σ_3)을 가하여 압밀(Consolidation)을 먼저 진행하고, 비배수(Undrain) 상태에서 수직응력을 (σ_1)을 가하여 시료를 전단시키는 시험이다. 압밀비배수시험의 경우, 전단과정에서 배수를 허용하지 않기 때문에 시료 내부에서 간극수압(u)이 발생하므로 그림 2.18에서와 같이 전응력(σ)과 유효응력(σ')이 동일하지 않게 나타나며, 보편적으로 전단과정에서 부(-)의 간극수압이 발생하여 유효응력에서의 Mohr's Circle은 전응력에서의 Mohr's Circle 보다 좌측에 나타나고, 유효응력에서의 내부마찰각(ϕ')이 전응력에서의 내부마찰각(ϕ)보다 큰 값을 나타낸다.

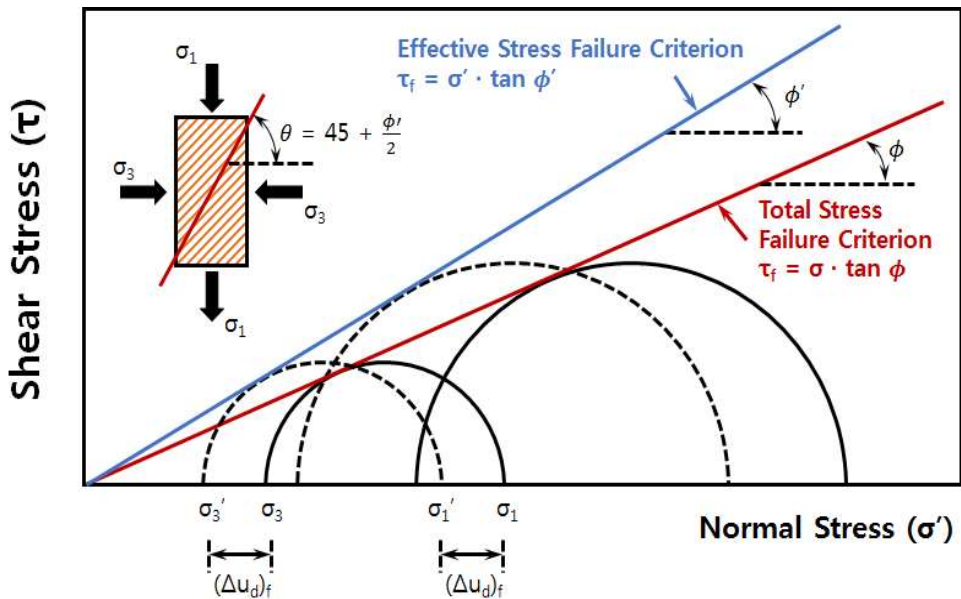


그림 2.18 CU-Test에서의 Mohr-Coulomb 파괴이론

비압밀비배수시험(UU-Test)은 시료에 구속응력(σ_3)을 가하는 과정에서 부터 비배수(Undrain)상태로 최대주응력(σ_1)을 작용시켜 시료를 전단시키는 시험으로, 배수를 허용하지 않기 때문에 단시간에 시험의 결과를 얻을 수 있다. 그러나 압밀과정과 전단과정 모두 배수를 허용하지 않기 때문에

시료에 작용하는 구속응력(σ_3)은 모두 간극수압(u)으로 작용하게 되고, 유효응력은 동일하게 작용하므로 Mohr's Circle은 그림 2.19에 나타낸 것과 같이 동일한 크기를 나타내며, 보편적으로 내부마찰각(ϕ)은 0(Zero)로 판단된다.

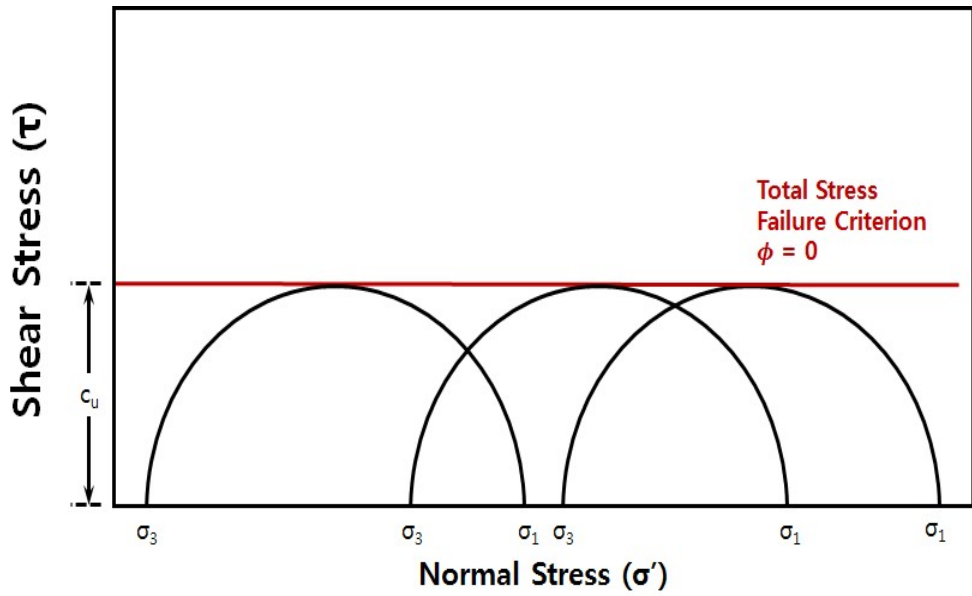


그림 2.19 UU-Test에서의 Mohr-Coulomb 파괴이론

제 3 장 현장 다짐토의 물리적 특성

다짐조건에 따라 흙의 강도정수의 변화를 판단하기 위해서는 물리적 특성을 정확하게 판단하는 것이 필요하다. 본 장에서는 흙을 채취한 현장의 개요와 채취한 흙의 물리적 특성을 파악하기 위해 실내시험을 실시하여 물리적 특성을 분석한 결과를 서술하였다.

3.1 현장의 개요

3.1.1 현장의 위치 및 지층조건

본 연구에서는 다짐조건에 따른 흙의 강도정수 변화를 검토하고자, 도로를 건설하기 위해 흙쌓기 후 진동롤러(Vibratory Roller)를 사용하여 현장에서 다짐이 진행되고 있는 전라남도 나주시 동강면 OO도로 건설공사 현장을 대상으로 검토하였고, 해당 위치를 그림 3.1에 나타내었다.

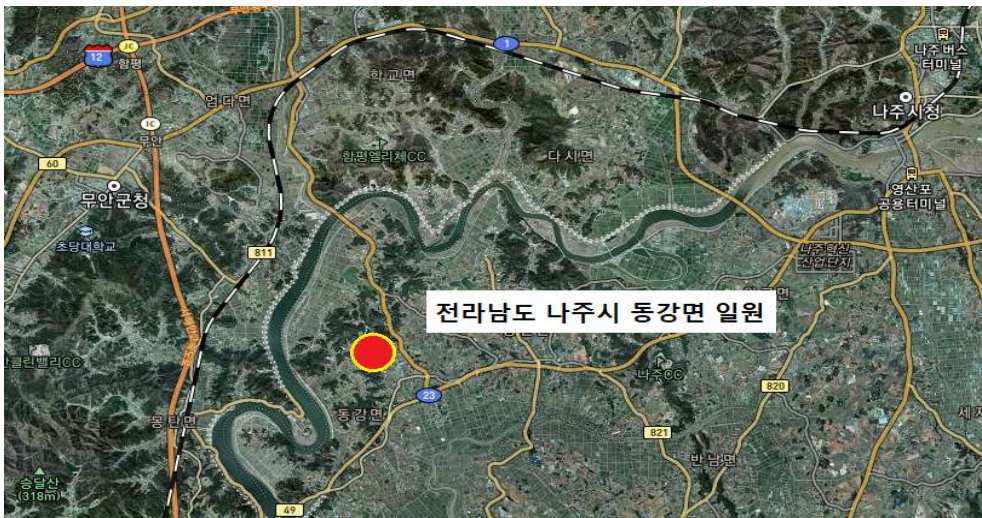


그림 3.1 현장의 위치

하부에 연약한 지반이 존재하는 지반에서 흠쌓기 후 현장에서 다짐이 이루어진다면 다짐에너지가 하부의 연약한 지반에 전달되어 전체적인 지반의 변형이 나타날 수 있다. 따라서 본 연구에서는 시추조사를 통해 하부지반의 연경도(Consistency)를 검토하였고, 검토결과를 표 3.1에 나타내었다.

표 3.1 기초지반의 시추조사 결과

지 층	심도 (m)	두께 (m)	구성상태	N치
붕 적 층	1.5	1.5	점토질 자갈	25
풍화토층	4.0	2.5	실트질 모래	31~45
풍화암층	5.5	1.5	매우 심한 풍화암	50
경 암 층	10.0	4.5	약간 풍화암	50

시추조사 결과, 붕적토층은 N치가 25인 습윤상태의 점토질 자갈(GC)이 1.5 m의 두께로 존재하고 있는 것으로 나타났고, 그 아래의 풍화토층에서는 N치가 31~45의 분포를 나타내는 실트질 모래(SM)가 2.5 m의 두께로 존재하고 있는 것으로 나타났다. 또한 풍화토층 아래에는 풍화도가 심한 풍화암과 약간 풍화된 경암이 존재하고 있는 것으로 나타나 흠쌓기에 따른 다짐진행시 하부지반에서의 변형은 나타나지 않을 것으로 분석되었다.

3.1.2 현장의 흠쌓기 단면

OO도로 건설공사는 도로의 노선을 일정하게 유지하여 차량 운행에 지장이 없도록 유도하기 위해 그림 3.2에 나타난 것과 같이 표준단면을 동일하게 적용하고, 각 위치에서 지정된 높이까지 흠쌓기 및 현장다짐을 실

시하고 있다. 본 연구에서는 도로 설계기준(국토교통부, 2016)에서 다짐도(D_c)를 통해 규정하고 있는 노상을 대상으로 실내시험과 현장시험을 실시하였다.

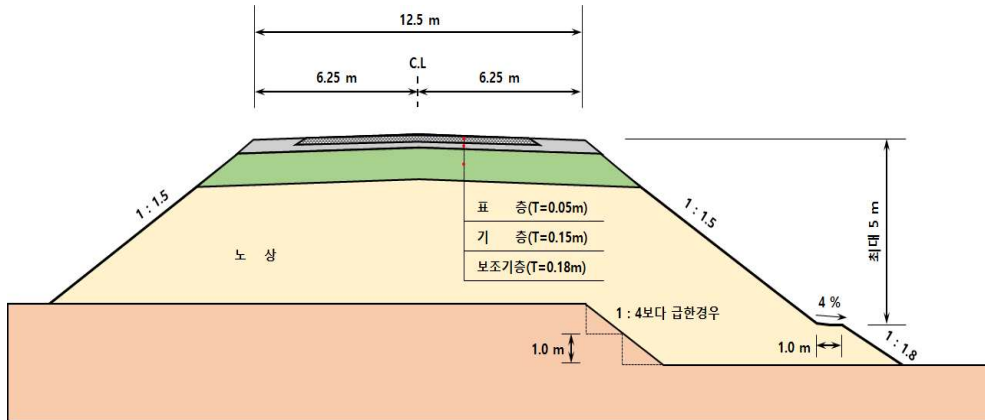


그림 3.2 OO도로 건설공사의 표준단면

3.2 흙의 물리적 특성

현장에서 채취한 흙에 대해 함수비(ω), 비중(G_s , Gravity Specific), 액·소성한계(Liquid & Plastic Limits), 입도분포(Particle Size Distribution) 등을 측정하기 위한 실내시험을 측정하였다. 신뢰할 수 있는 결과를 도출하기 위해 실내시험은 KS F에 제시된 시험방법을 사용하여 수행하였고, 시험결과를 정리하여 표 3.2과 그림 3.3~3.4에 나타내었다.

표 3.2 연구에 사용된 흙의 물리적 특성

함수비 (ω , %)	비중 (G_s)	애터버그 한계		누적통과율(%)			통일분류 (USCS)
		LL(%)	PI(%)	4.75 mm	0.075 mm	0.005 mm	
16.4	2.691	42.96	18.43	95.8	55.0	13.2	CL

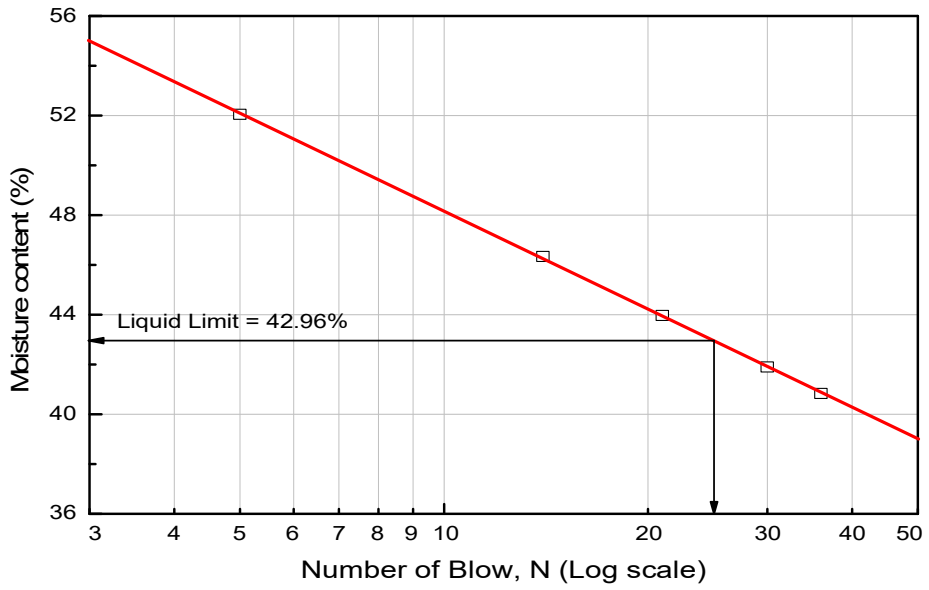


그림 3.3 액성한계시험에 따른 흙의 유동곡선

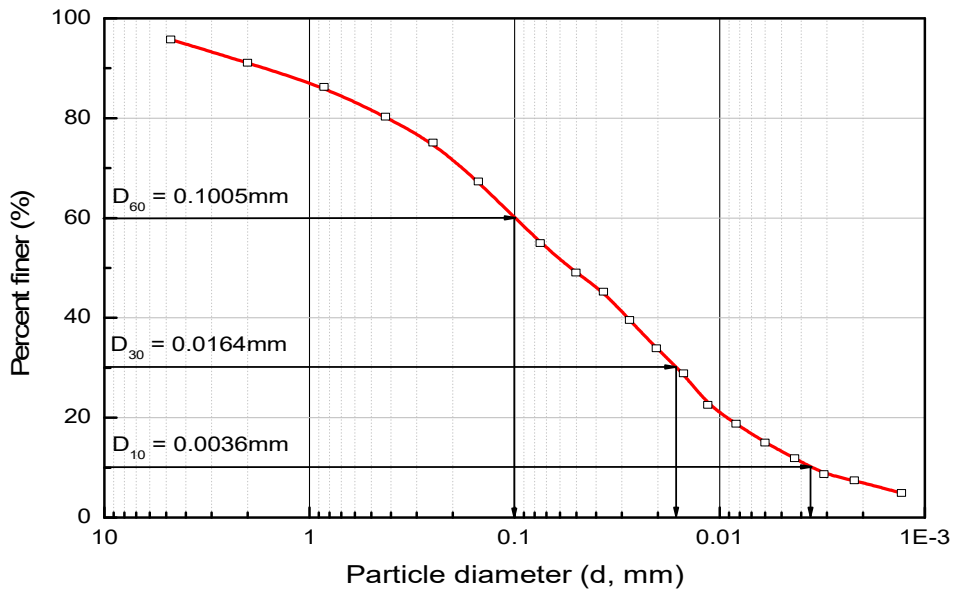


그림 3.4 흙의 입도분포곡선

실내시험 결과, 0.075mm(#200)에서의 누적통과율은 55.0 %로 세립토(Fine-Grained Soil)이고, 액성한계(Liquid Limit)는 42.96 %, 소성지수(Plastic Index)는 18.43 %로 나타나 통일분류법(USCS)으로 분류한 결과, 저소성 실트(CL)에 해당하는 것으로 나타났다. 또한 본 연구의 목적인 현장에서 다짐조건에 따른 흙의 강도정수 변화를 판단하기 위해 필요한 최대건조단위중량(Maximum Dry Unit Weight)을 판단하기 위해 채취한 흙에 대하여 KS F 2312(흙의 다짐시험)에 제시된 시험방법 중 D방법에 해당하는 다짐에너지($E_c=2,682\text{kJ/m}^3$)를 가하여 다짐시험을 실시하였고, 시험결과를 표 3.3와 그림 3.5에 정리하여 나타내었다. 다짐시험결과, 최대건조단위중량은 17.23 kN/m^3 , 최적함수비(Optimum Moisture Content)는 17.80 %인 것으로 분석되었다.

일반적으로 국내에서는 도로공사 표준시방서(국토교통부, 2016)와 도로 설계기준(국토교통부, 2016)에 제시된 내용을 토대로 흙 쌓기를 실시하는 경우, 다짐도(D_c , Degree of Compaction) 95 %에 해당하는 건조단위중량($\gamma_{d\text{-field}}$) 보다 큰 값으로 시공하고 있다. 이에 따라 다짐시험을 통해 산정된 최대건조단위중량을 기준으로 다짐도 95 %에 해당하는 건조단위중량과 시공이 가능한 함수비 범위를 산정한 결과, 건조단위중량은 16.37 kN/m^3 이고, 시공이 가능한 함수비의 범위는 12.0~21.7 %인 것으로 분석되었다.

표 3.3 다짐시험 결과

최대건조단위중량 ($\gamma_{d\text{-max}}$)	$0.95\gamma_{d\text{-max}}$	최적함수비(ω_{opt})
17.23 kN/m^3	16.37 kN/m^3	17.80 %

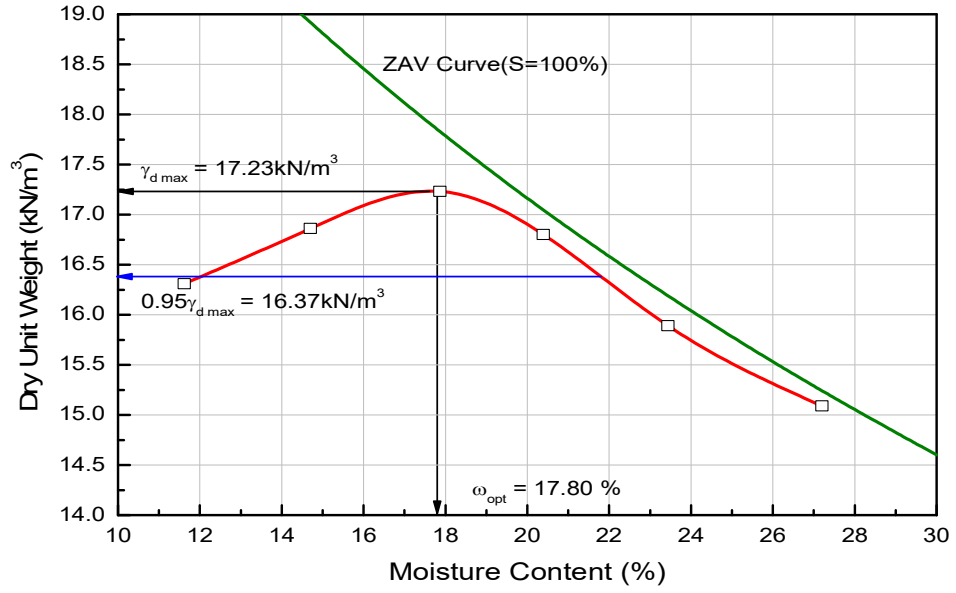


그림 3.5 흙의 다짐곡선

제 4 장 다짐토의 강도정수 변화 분석

다짐장비에 의해 다짐된 흙은 현장의 자연조건과 시공조건에 따라 다짐결과가 다르게 나타나 설계과정에서 계획된 건조단위중량과 다짐도를 만족하지 못하고, 충분한 지지력과 안정성을 확보하는 데 필요한 강도정수가 확보되지 않을 수 있다. 이에 따라 4장에서는 현장에서 채취한 흙에 대해 진동롤러(Vibratory Roller)를 사용하여 다짐두께와 왕복횟수를 다르게 한 경우에 대해 모래치환법(Sand Replacement Method)을 실시하여 다짐토의 함수비와 건조단위중량(γ_d , Dry Unit Weight)의 변화를 검토하고, 실내시험을 통해 다짐도에 따른 강도정수의 변화를 분석하여 설계 및 시공과정에서 활용될 수 있는 기초자료를 도출하고자 하였다.

4.1 현장 다짐에 따른 건조단위중량의 변화 분석

4.1.1 현장 다짐조건

현장에서의 다짐조건에 따른 건조단위중량의 변화를 검토하기 위해 표 4.1에 나타난 것과 같이 다짐두께는 10, 20, 30, 60 cm, 다짐횟수는 2, 4, 6, 8회를 왕복한 것으로 다짐조건을 설정하였고, 현장에서는 그림 4.1에 나타난 것과 같은 과정을 통해 현장다짐을 실시하였다.

표 4.1 현장에서의 다짐조건

다짐두께(cm)	다짐횟수(왕복)
- 10cm	- 2회
- 20cm	- 4회
- 30cm	- 6회
- 60cm	- 8회



① 현장토 포설



② 진동롤러를 사용한 다짐

그림 4.1 현장에서의 다짐방법

4.1.2 다짐조건에 따른 건조단위중량의 변화 분석

현장에서 다짐두께를 10, 20, 30, 60 cm로 하고, 진동롤러를 사용하여 왕복 2, 4, 6, 8회로 다짐하는 경우 건조단위중량의 변화를 분석하기 위해 그림 4.2에 나타난 것과 같이 해당 위치에서의 모래치환법(Sand Replacement Method)을 실시하여 함수비(ω , Moisture Content)와 습윤단위중량(γ_w , Unit Weight)을 측정하여 건조단위중량(γ_d , Unit Weight)을 산정하였고, 다짐조건에서의 건조단위중량을 정리하여 표 4.2와 그림 4.3에 정리하여 나타내었다.

표 4.2 다짐조건에 따른 단위중량의 변화

다짐횟수		다짐 두께			
		10cm	20cm	30cm	60cm
2회 왕복	습윤단위중량 (kN/m ³)	18.00	18.14	17.63	13.72
	건조단위중량 (kN/m ³)	16.07	16.19	15.74	12.25
4회 왕복	습윤단위중량 (kN/m ³)	18.54	18.40	18.03	14.59
	건조단위중량 (kN/m ³)	16.56	16.43	16.10	13.03
6회 왕복	습윤단위중량 (kN/m ³)	19.06	18.50	18.30	15.38
	건조단위중량 (kN/m ³)	17.02	16.52	16.34	13.73
8회 왕복	습윤단위중량 (kN/m ³)	19.05	18.69	18.51	15.94
	건조단위중량 (kN/m ³)	17.01	16.68	16.53	14.23

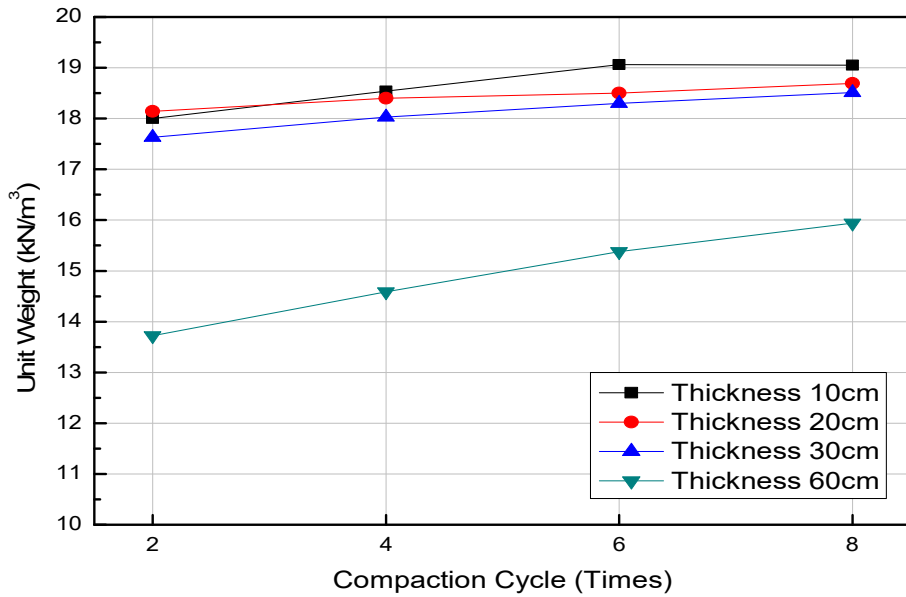


① 현장토사 채취

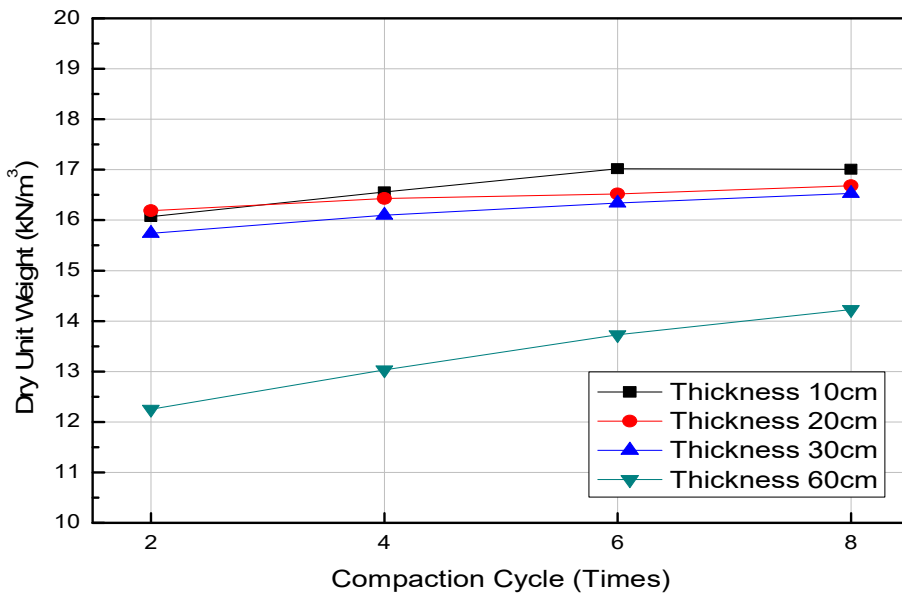


② 모래치환법 수행

그림 4.2 건조단위중량 측정을 위한 모래치환법 적용



① 습윤단위중량



② 건조단위중량

그림 4.3 현장 다짐조건에 따른 단위중량의 변화

시험결과, 대부분의 시험결과에서 다짐두께가 증가함에 따라 습윤단위중량(γ_t)과 건조단위중량(γ_d)은 감소하는 경향을 나타내었고, 특히 다짐두께가 60 cm인 경우에는 다짐두께가 10, 20, 30 cm인 경우와 비교하여 약 70~80 %에 해당하는 작은 값을 나타내었다. 도로공사 표준시방서(국토교통부, 2016)에 따르면 구조물 뒷채움재와 보조기층, 동상방지층 등 흙쌓기를 실시하는 경우 다짐도(D_c , Degree of Compaction) 95 % 이상으로 시공할 것으로 제시되어 있고, 도로 설계기준(국토교통부, 2016)에서도 노체의 경우 다짐도 90 % 이상, 노상의 경우 95 % 이상으로 시공할 것을 규정하고 있다. 따라서 모래치환법으로 산정된 건조단위중량에 대하여 실내 다짐시험에서 결정된 최대건조단위중량(γ_{d-max})을 토대로 각 다짐조건에 따른 다짐도(D_c)를 다시 산정하였고, 그 결과를 표 4.3과 그림 4.4에 정리하여 나타내었다.

표 4.3 다짐조건에 따른 다짐도의 변화

다짐 횟수		다짐 두께			
		10cm	20cm	30cm	60cm
2회 왕복	건조단위중량 (kN/m^3)	16.07	16.19	15.74	12.25
	다짐도(%)	93.3	94.0	91.4	71.1
4회 왕복	건조단위중량 (kN/m^3)	16.56	16.43	16.10	13.03
	다짐도(%)	96.1	95.4	93.4	75.6
6회 왕복	건조단위중량 (kN/m^3)	17.02	16.52	16.34	13.73
	다짐도(%)	98.8	95.9	94.8	79.7
8회 왕복	건조단위중량 (kN/m^3)	17.01	16.68	16.53	14.23
	다짐도(%)	98.7	96.8	95.9	82.6

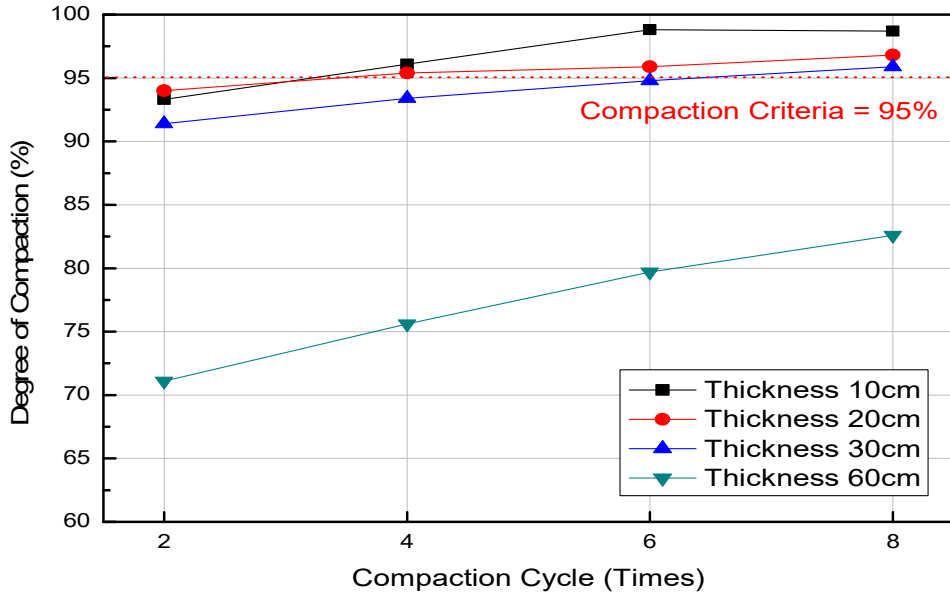


그림 4.4 다짐조건에 따른 다짐도의 변화

그림에서 다짐두께가 10~20 cm에서는 진동롤러(Vibratory Roller)를 왕복 4회 주행, 다짐두께가 30 cm인 경우에는 6회 이상 왕복 주행하는 조건에서 다짐도 95 % 이상을 나타내어 현장의 다짐기준을 만족하는 것으로 나타났고, 다짐두께가 60 cm인 경우에는 다짐도 95 % 이상을 확보하기 어려운 것으로 나타났다. 현장에서의 시험결과를 토대로 현장의 다짐기준인 다짐도 95 % 이상을 만족하기 위해 필요한 다짐횟수를 각 다짐두께별로 산정하여 그림 4.5에 나타내었다.

그림에 대한 분석결과, 다짐두께가 20 cm 미만에서는 다짐횟수의 차이가 거의 나타나지 않았으나 다짐두께 20 cm 이상에서는 다짐두께가 증가함에 따라 다짐도를 만족하기 위해 요구되는 다짐횟수도 선형적으로 비례하여 증가하는 것으로 나타났다.

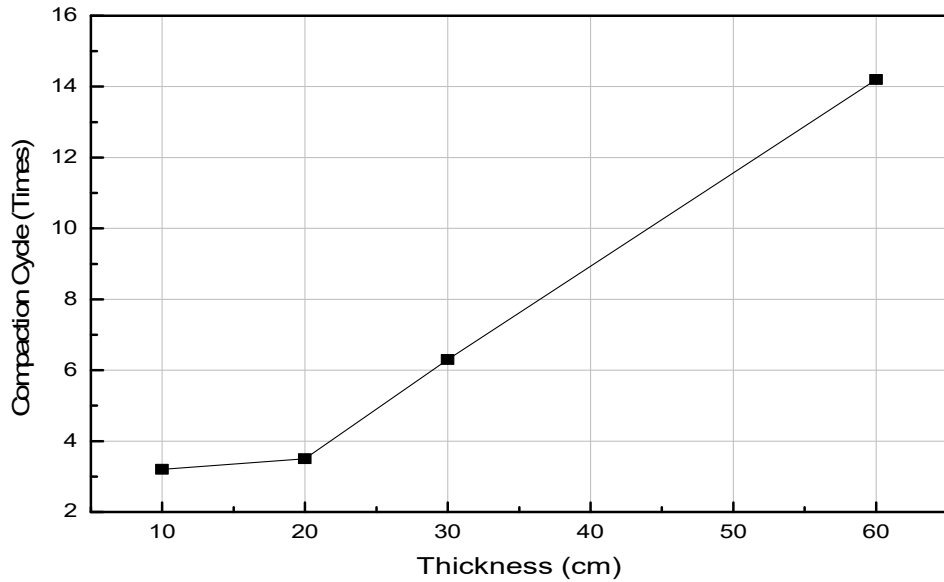


그림 4.5 다짐도를 만족하기 위해 필요한 다짐두께별 다짐횟수

4.2 강도정수의 변화 분석

현장에서의 다짐두께와 다짐횟수에 따라 흙의 건조단위중량(γ_d)과 다짐도(D_c)가 변화하는 경우, 강도정수에 미치는 영향을 분석하기 위해 실내시험을 실시하였다. 본 연구에서는 보다 변형량(Displacement)과 전단응력(τ , Shear Stress)을 정밀하게 측정하기 위해 프로그램을 사용하여 정밀한 제어가 가능한 직접전단 시험장비를 사용하였고, 사용된 장비에 대해 그림 4.5에 나타내었다.

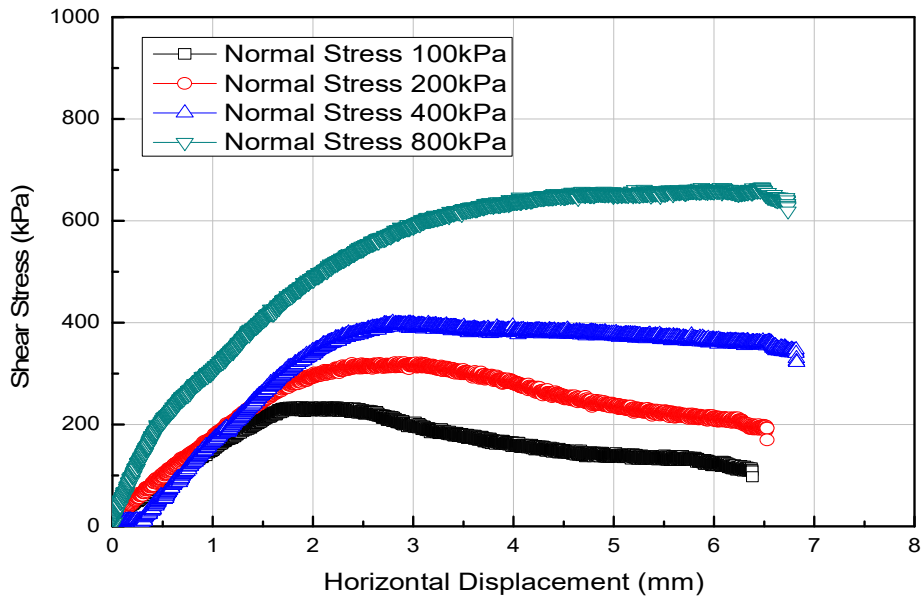


그림 4.6 본 연구에서 사용된 직접전단시험 장비

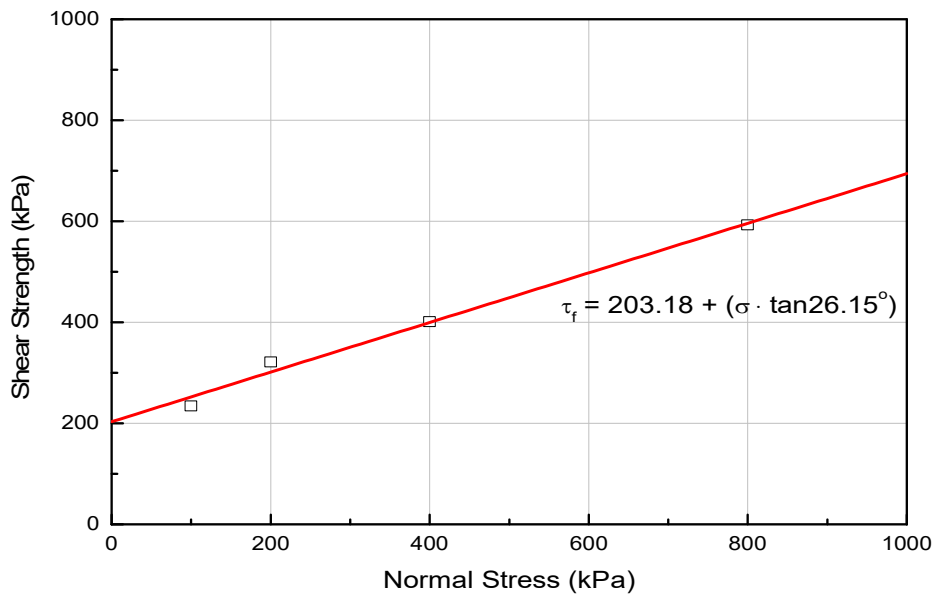
현장에서 모래치환법을 통해 다짐도가 변화한 것을 토대로 강도정수의 변화를 분석하기 위해 본 연구에서는 다짐도(D_c) 80, 85, 90, 95, 100 %에 해당하는 건조단위중량으로 시편(Specimen)을 제작하였고, 수직응력(Normal Stress)은 100, 200, 400, 800 kPa을 재하>Loading)하여 실내시험을 실시하였다. 표 4.4에는 실내시험 조건을 정리하여 나타내었고, 그림 4.7~4.11에는 각 다짐도(D_c)에 대한 직접전단시험 결과를 나타내었다.

표 4.4 직접전단시험에서의 시험조건

다짐도(D_c)	수직응력(σ)
- 100 %	- 100 kPa
- 95 %	- 200 kPa
- 90 %	- 400 kPa
- 85 %	- 800 kPa
- 80 %	- 800 kPa

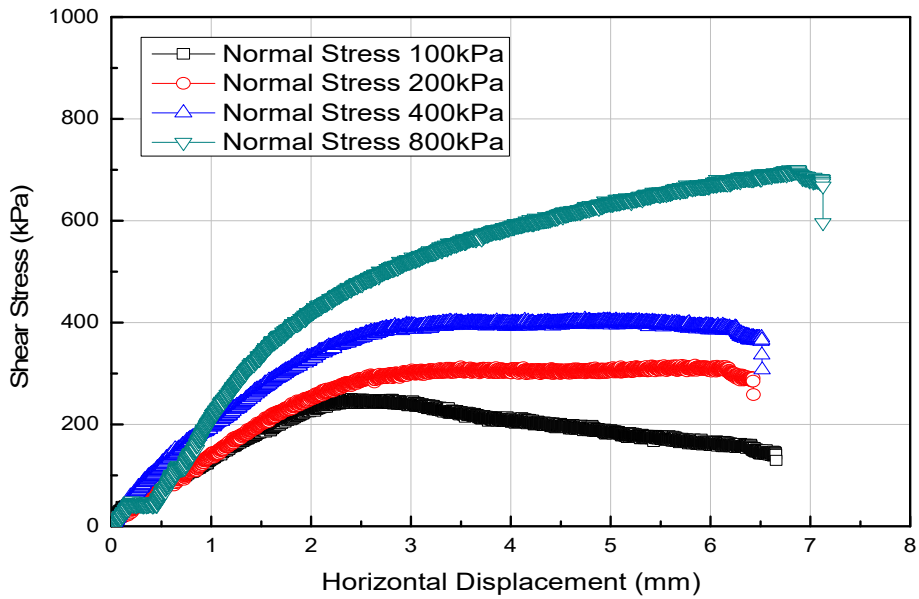


① 응력-변형률 곡선(Stress-Strain Curve)

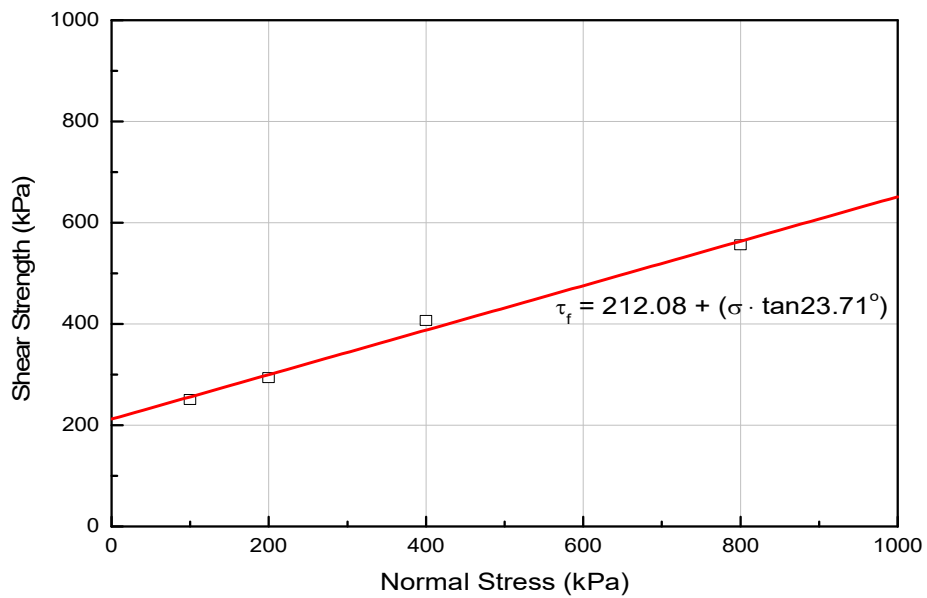


② Mohr-Coulomb의 파괴기준에 따른 강도정수 산정 결과

그림 4.7 직접전단시험 결과($D_r=100\%$)

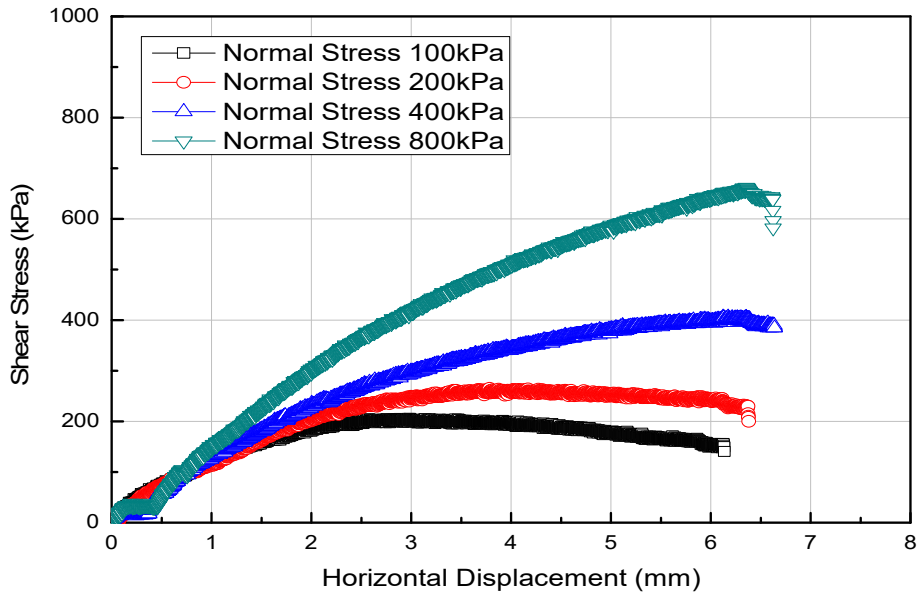


① 응력-변형률 곡선(Stress-Strain Curve)

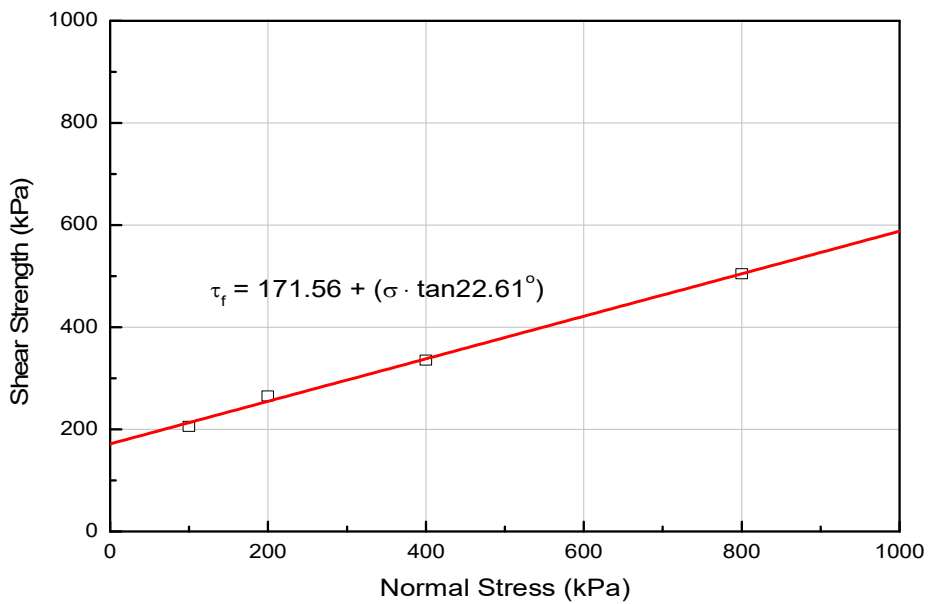


② Mohr-Coulomb의 파괴기준에 따른 강도정수 산정 결과

그림 4.8 직접전단시험 결과($D_r=95\%$)

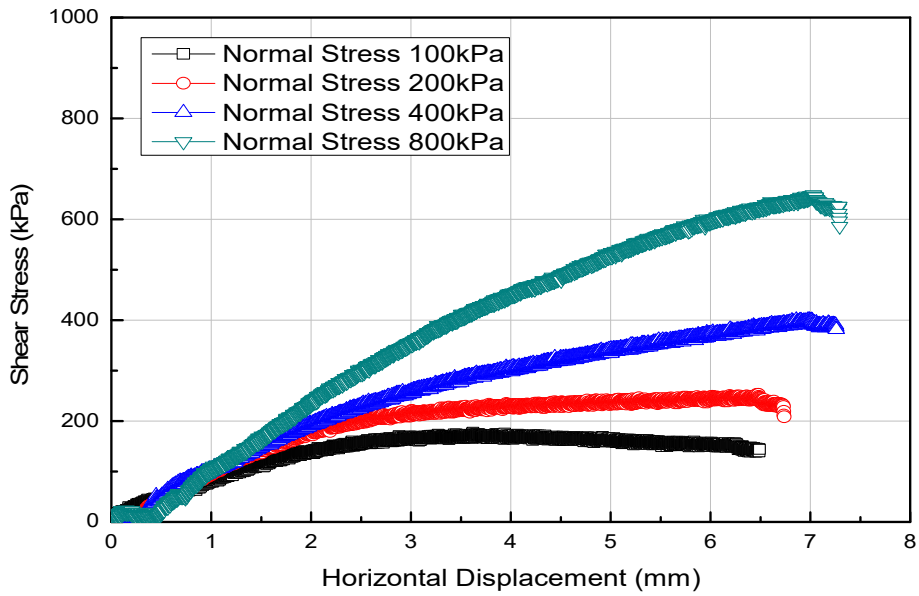


① 응력-변형률 곡선(Stress-Strain Curve)

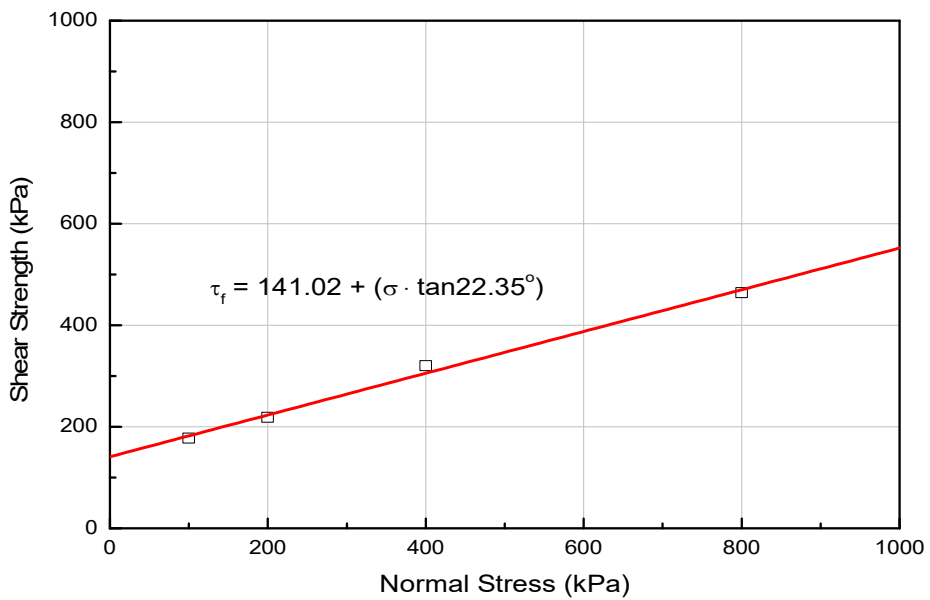


② Mohr-Coulomb의 파괴기준에 따른 강도정수 산정 결과

그림 4.9 직접전단시험 결과($D_r=90\%$)

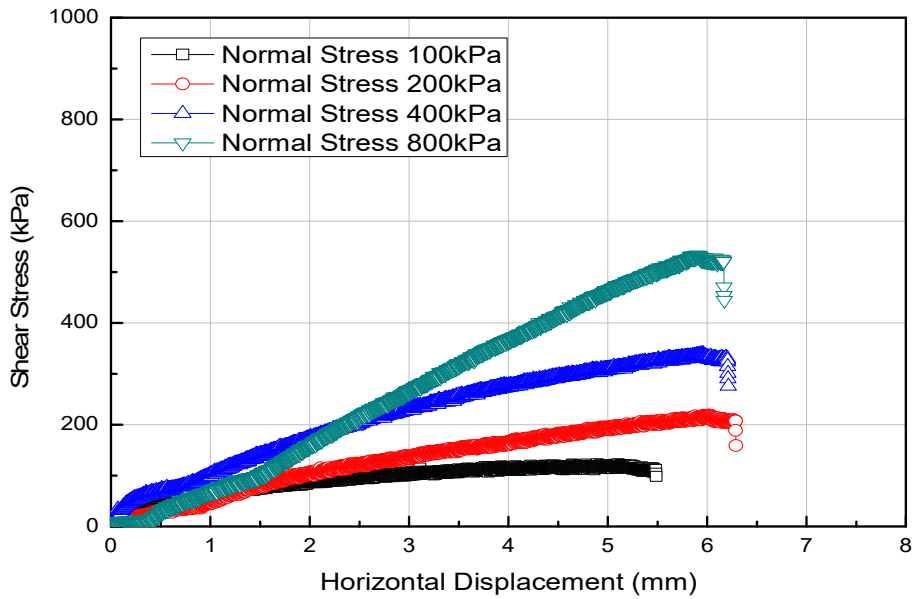


① 응력-변형률 곡선(Stress-Strain Curve)

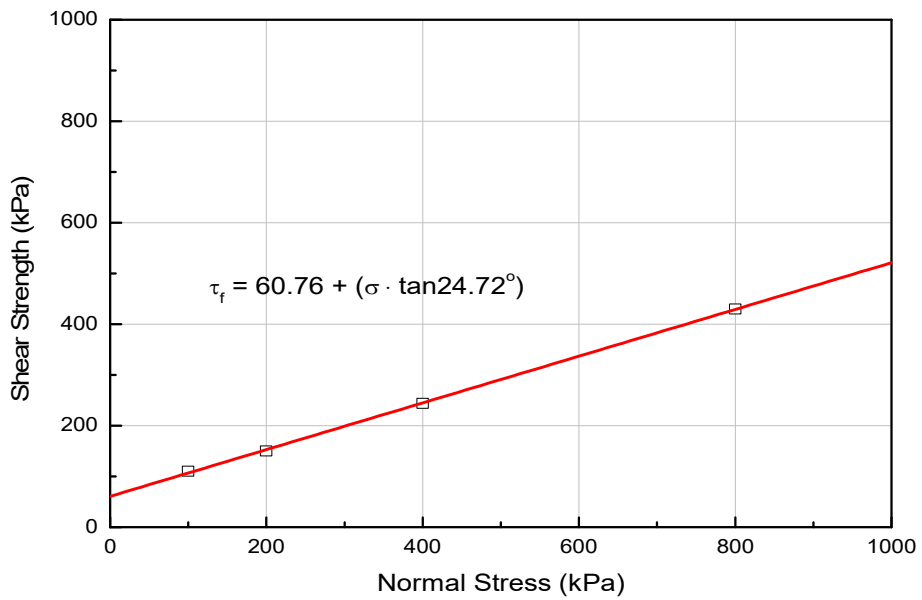


② Mohr-Coulomb의 파괴기준에 따른 강도정수 산정 결과

그림 4.10 직접전단시험 결과($D_r=85\%$)



① 응력-변형률 곡선(Stress-Strain Curve)



② Mohr-Coulomb의 파괴기준에 따른 강도정수 산정 결과

그림 4.11 직접전단시험 결과($D_r=80\%$)

시험결과를 토대로 각 강도정수의 변화를 판단하기 위해 다짐도(D_c)에 따른 점착력(c , Cohesion)과 내부마찰각(ϕ , Friction Angle)의 변화를 그림 4.12에 나타내었다.

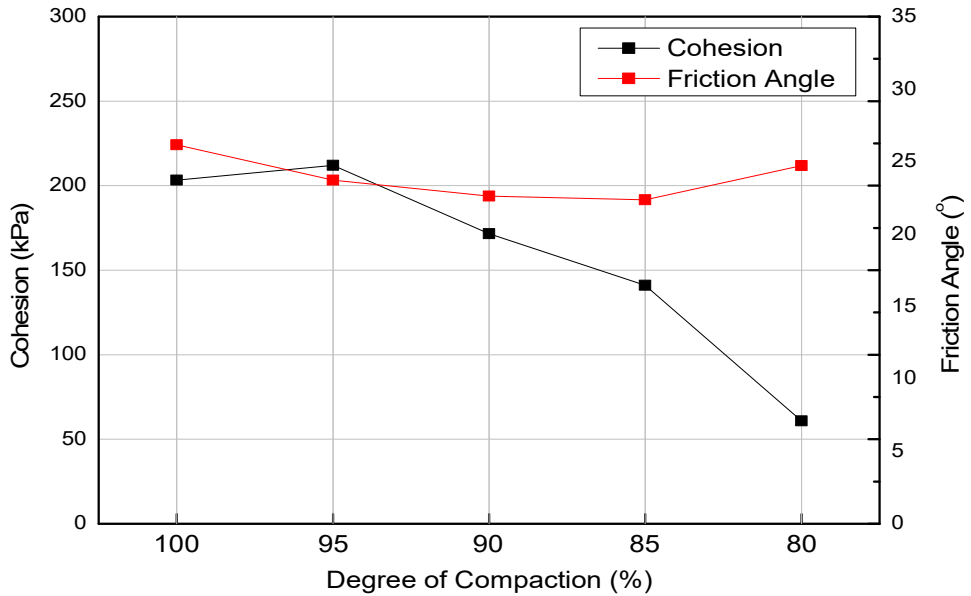


그림 4.12 다짐도에 따른 강도정수의 변화

그림에서 점착력(c)은 다짐도 95 %까지는 다짐도 100 %와 동등한 수준을 나타내었으나, 다짐도가 감소함에 따라 다짐도 90 %에서는 단계적으로 감소하는 것으로 나타났다. 특히 다짐도 90 %에서는 다짐도 100 %에서의 점착력(c)인 203.18 kPa의 84.4 %에 해당하는 값을 나타내었고, 다짐도 80 %에서는 60.76 kPa로 29.9 %에 해당하는 매우 작은 값을 나타내어 강도측면에서 불리한 것으로 분석되었다. 내부마찰각의 경우, 전체적으로 차이는 있으나 22~25° 사이의 값을 나타나 유의미한 변화는 없는 것으로 나타났다.

4.3 현장에서의 안정성 변화 분석

현장에서의 다짐조건에 따라 흙의 강도정수가 변화하는 경우, 안정성에 미치는 영향을 검토하기 위해 본 연구에서 사용된 흙을 채취한 OO도로 건설공사의 표준단면을 그림 4.13에 나타낸 것과 같이 단순화하여 비탈면 안정해석을 실시하였다. 비탈면 안정해석에 사용된 강도정수인 점착력(c, Cohesion)과 내부마찰각(ϕ , Friction Angle)은 성토층의 경우 실내시험 결과를 사용하였고, 기초지반은 시추조사를 토대로 산정하였으며, 산정된 각 지층의 강도정수는 표 4.5에 정리하여 나타내었다.

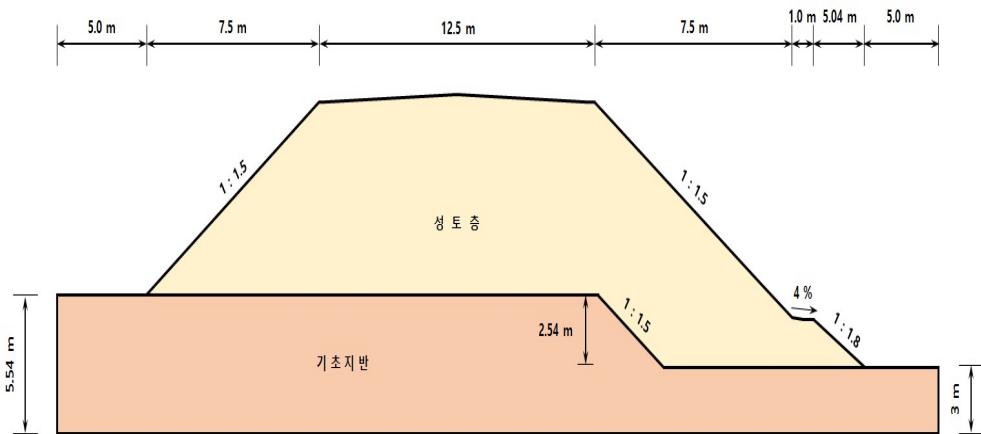
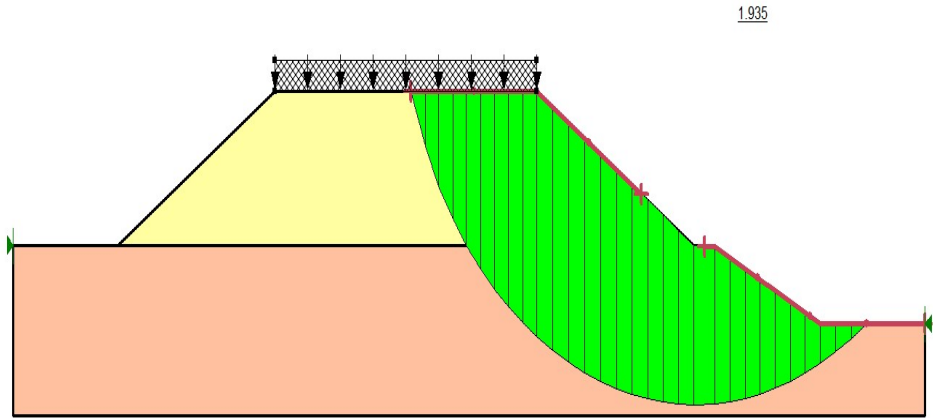


그림 4.13 안정해석에 사용된 검토 단면

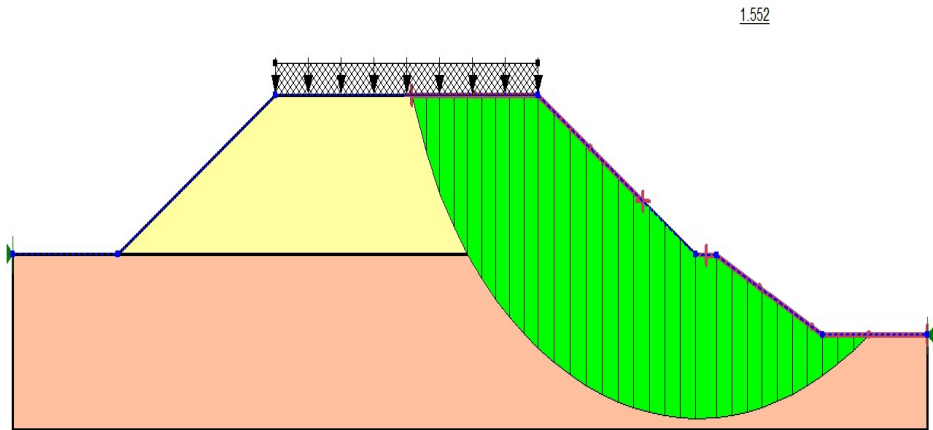
표 4.5 안정해석에 사용된 강도정수

지 층	점착력 (c)	내부마찰각 (ϕ)	비고	
성 토 층	다짐도 100%	205 kPa	26.0 °	실내시험 결과 적용
	다짐도 95%	210 kPa	23.5 °	
	다짐도 90%	170 kPa	22.5 °	
	다짐도 85%	140 kPa	22.0 °	
	다짐도 80%	60 kPa	25.0 °	
기 초 지 반	30 kPa	30.0 °	SPT 추정	

비탈면 안정해석에는 한계평형해석(LEM)이 가능한 GEOSLOPE Ltd.의 해석 프로그램인 Geostudio 2012를 사용하였고, 해석결과를 그림 4.14~4.18에 나타내었다.

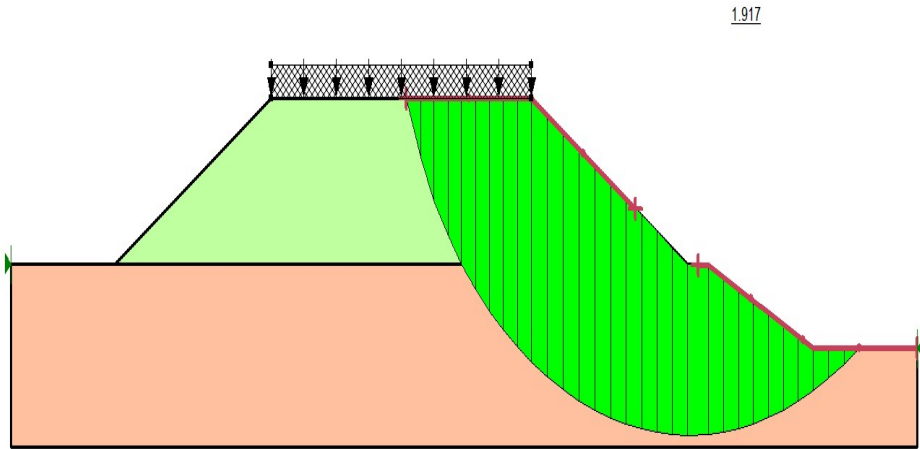


① 건기시 해석 결과(F.S=1.935)

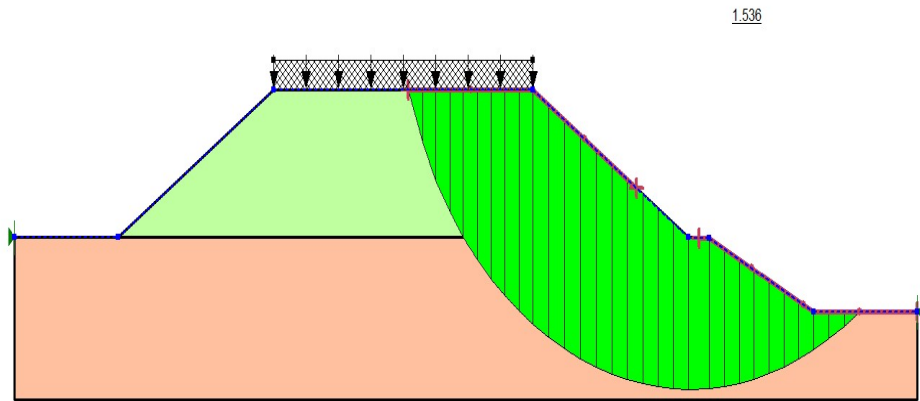


② 우기시 해석 결과(F.S=1.552)

그림 4.14 다짐도 100 %에 대한 비탈면 안정 검토결과



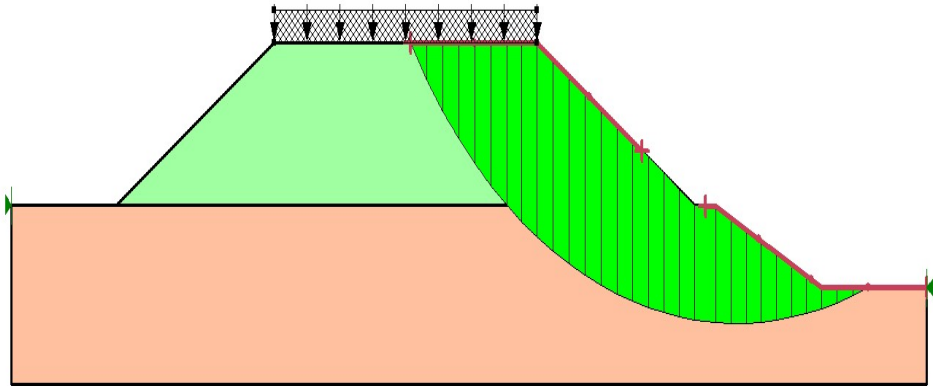
① 건기시 해석 결과(F.S=1.917)



② 우기시 해석 결과(F.S=1.536)

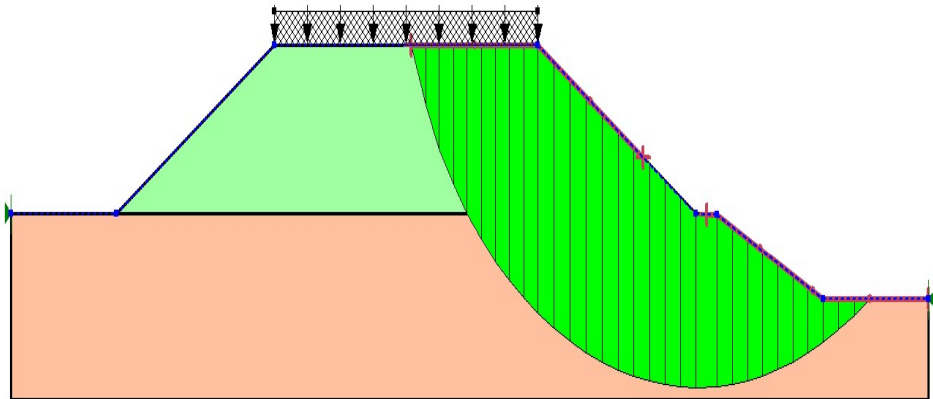
그림 4.15 다짐도 95 %에 대한 비탈면 안정 검토결과

1.844



① 건기시 해석 결과(F.S=1.844)

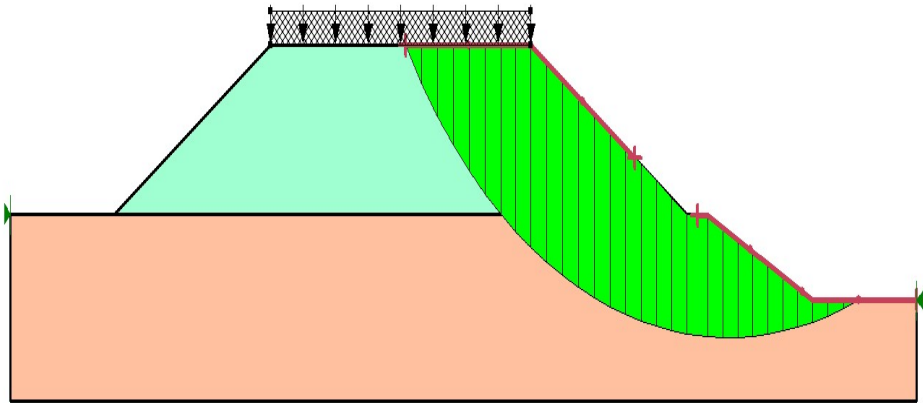
1.466



② 우기시 해석 결과(F.S=1.466)

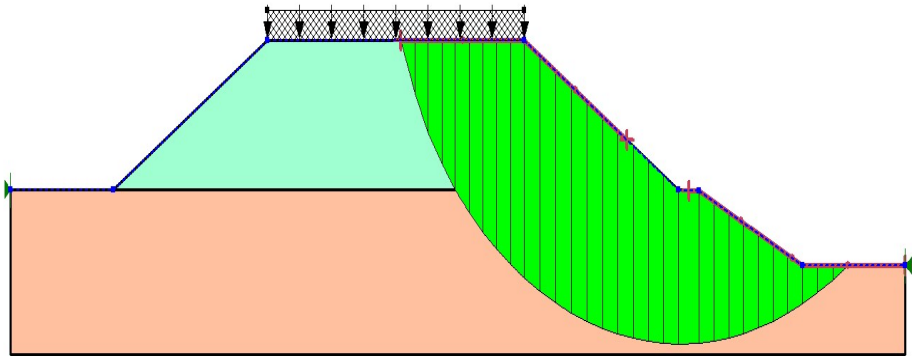
그림 4.16 다짐도 90 %에 대한 비탈면 안정 검토결과

1.733



① 건기시 해석 결과(F.S=1.733)

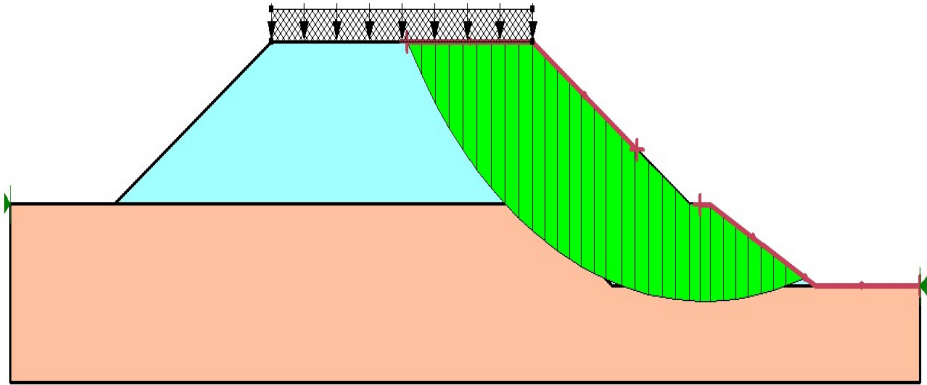
1.396



② 우기시 해석 결과(F.S=1.396)

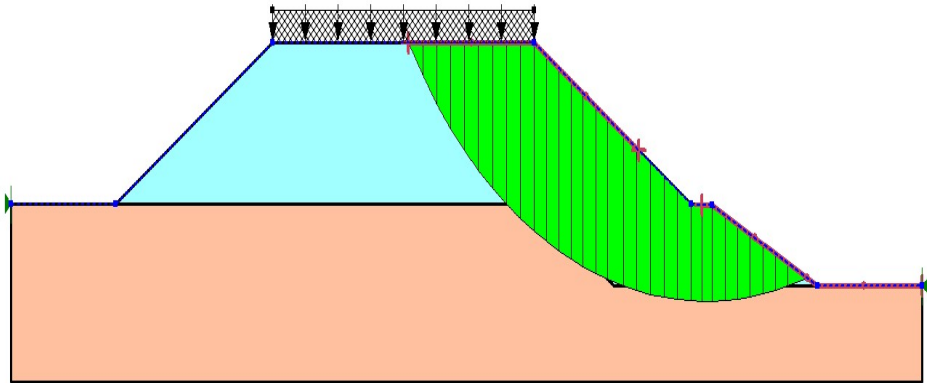
그림 4.17 다짐도 85 %에 대한 비탈면 안정 검토결과

1.467



① 건기시 해석 결과(F.S=1.467)

1.203



② 우기시 해석 결과(F.S=1.203)

그림 4.18 다짐도 80 %에 대한 비탈면 안정 검토결과

각 다짐도(D_c)에서의 강도정수를 반영하여 비탈면 안정 해석을 실시한 결과를 정리하여 표 4.6과 그림 4.19에 나타내었다.

표 4.6 비탈면 안정해석 결과

다짐도	안전율(Factor of Safety)	
	건 기 시 (Dry Condition)	우 기 시 (Saturated Condition)
100 %	1.935	1.522
95 %	1.917	1.536
90 %	1.844	1.466
85 %	1.733	1.396
80 %	1.467	1.203

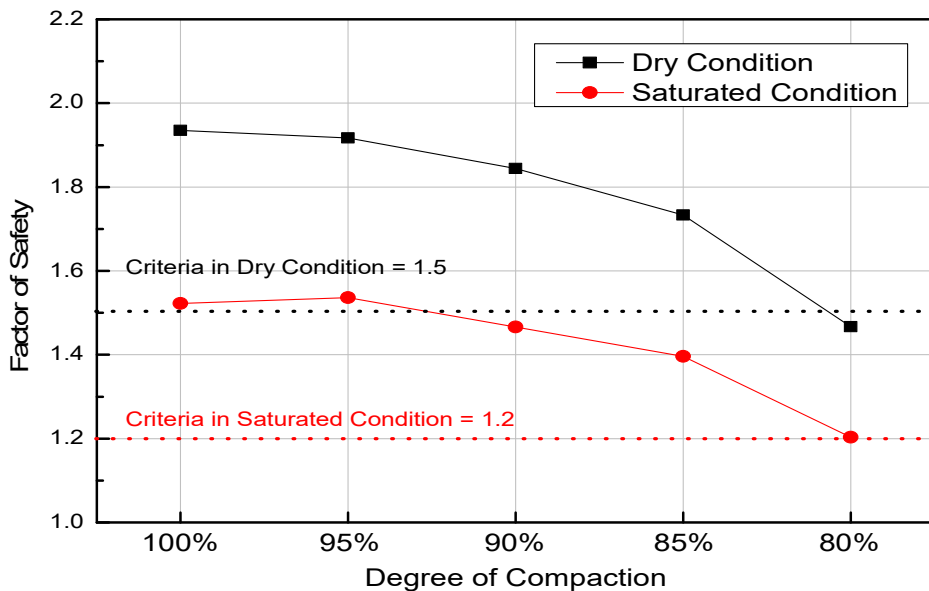


그림 4.19 다짐도에 따른 비탈면 안전율의 변화

그림에서 비탈면의 안전율은 다짐도(D_c) 95 %까지 동등한 수준의 강도 정수를 나타낸 것과 동일하게 유사한 수준의 안전율을 나타내었다. 그러나 다짐도(D_c) 85 % 이하부터는 점착력(c , Cohesion)이 큰 폭으로 감소하였던 것과는 다르게 약 75~80 %에 해당하는 안전율을 나타내어 안전율의 감소폭은 비교적 작은 것으로 나타났다. 이러한 이유로는 다짐도가 감소함에 따라 점착력(c)이 감소하였으나, 흙의 단위중량(γ_t)도 감소하여 비탈면에서의 파괴를 유발하는 모멘트(Moment)에 의한 활동력도 감소하였기 때문인 것으로 판단된다.

안정성 검토결과를 토대로 현장에서의 다짐조건인 다짐두께와 다짐횟수에 따른 다짐도(D_c)의 변화를 분석한 결과, 다짐두께가 60 cm인 경우 진동롤러(Vibratory Roller)를 사용하여 왕복 8회 이하의 다짐이 이루어진다면 다짐도(D_c) 80 % 이하를 나타내어 비탈면의 기준안전율(건기시 1.5, 우기시 1.2)을 만족하지 못할 가능성이 있고, 비탈면의 안정성의 확보가 어려울 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 현장에서 안정성을 확보하기 위해 많은 횟수의 다짐이 이루어진다면 시공성과 경제성이 불리해질 수 있으므로 다짐두께는 30 cm, 다짐횟수는 왕복 6회 이상 실시하는 것이 합리적일 것으로 판단된다.

제 5 장 결 론

본 연구에서는 현장에서 다짐조건에 따른 흙의 강도정수의 변화를 검토함으로써 합리적인 토공사의 수행과 품질관리에 필요한 연구결과를 도출하기 위해 장비의 주행횟수와 다짐두께와 같은 다짐조건이 변화된 경우에 대해 현장에서 모래치환법을 실시하여 흙의 단위중량의 변화와 다짐도의 만족여부를 검토하였다. 또한 다짐도 80, 85, 90, 95, 100 %로 제작된 시편에 대해 직접전단시험을 수행하였으며, 안정성 해석을 실시한 결과를 분석하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

1. 현장에서 다짐조건(다짐두께 및 다짐횟수)에 따라 진동롤러를 사용하여 다짐 후 다짐도를 분석한 결과, 다짐두께 20 cm의 경우에는 4회, 다짐두께 30 cm의 경우에는 6회 이상 왕복하는 조건에서 현장 다짐기준을 만족하는 것으로 나타나고 있어, 현장의 다짐기준을 만족하는 다짐두께와 다짐횟수의 상관관계는 거의 비례하는 것으로 판단된다.
2. 직접전단시험을 실시하여 각 다짐도에 따른 흙의 점착력 변화를 분석한 결과, 다짐도 95 % 이상에서는 점착력의 변화가 거의 없으나, 다짐도가 95 % 미만이면 큰 폭으로 감소하기 시작하고, 다짐도 80 %에서는 점착력이 1/4 수준으로 감소하여 다짐도가 점착력에 미치는 영향이 매우 큰 것으로 나타났다.
3. 직접전단시험을 통해 산정된 강도정수를 반영하여 도로의 비탈면 안정성 검토를 실시한 결과, 다짐도 85 % 이상에서는 비탈면의 기준안전율(건기시 1.5, 우기시 1.2)을 만족하는 것으로 나타났으나, 다짐도 80 % 이하에서는 기준안전율을 만족하지 못하는 것으로 분석되었다.

4. 현재 일률적으로 정해진 다짐기준을 준용하고 있으나, 흙의 종류와 장비 등의 다짐조건을 고려하여 공학적 안정성을 확보할 수 있는 경우, 시공성 및 경제성을 고려하여 다짐기준을 설정하고, 그에 따른 다짐두께 및 다짐횟수를 산정하는 것이 합리적일 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 국토교통부(2016), “도로공사 표준시방서”, Accessed Dec 10, 2019, 건설기술정보시스템, <http://codil.or.kr>.
2. 국토교통부(2016), “도로 설계기준”, Accessed Dec 10, 2019, 건설기술정보시스템, <http://codil.or.kr>.
3. 국토교통부(2019), “도로현황조서”, Accessed Dec 10, 2019, 건설기술정보시스템, <http://codil.or.kr>.
4. 강대익(1999), “도로성토체의 합리적인 다짐도 평가방안에 관한 연구”, 한양대학교 산업대학원, 석사학위논문.
5. 강성곤(2006), “다짐 횡수에 따른 성토재료의 다짐 특성에 관한 연구”, 전북대학교 산업기술대학원, 석사학위논문.
6. 류재학(2000), “고압성토에서 흙의 함유율이 현장다짐의 정도에 미치는 효과에 관한 연구”, 부경대학교 산업대학원, 석사학위논문.
7. 문장식(2005), “불포화 다짐토의 수분특성과 역학적 특성의 상관 관계에 관한 연구”, 전북대학교 산업기술대학원, 석사학위논문.
8. 민경준(2008), “암성토 현장다짐 적정방안”, 충북대학교 대학원, 석사학위논문.
9. 박근현, 양안승(2019), “자유낙하 콘관입시험법을 활용한 휴대용 다짐도 측정기의 실내시험을 통한 검증 연구”, 한국지반환경공학회논문집, Vol. 20, No. 2, pp. 41~48.
10. 박철수(2013), “삼축압축시험에 의한 국내 모래의 공학적 특성 연구”, 창원대학교 대학원, 박사학위논문.
11. 서효식(2010), “점성토의 일축압축강도와 탄성계수의 상관관계식에 관한 연구”, 창원대학교 대학원, 석사학위논문.
12. 심한수(2002), “GPS를 장착한 다짐장비의 궤적추적을 이용한 성토다짐 시공관리 기술”, 한국방재학회지, Vol. 2, No. 4, pp. 30~32.

13. 안신환(2017), “탬퍼형태에 따른 동다짐 효율 및 진동특성 연구”, 고려대학교 대학원, 박사학위논문.
14. 유완규, 임남규, 김병일, 김주형(2008), “여러가지 다짐 평가장비의 적용성을 위한 실내시험”, 한국지반공학회 춘계학술대회 논문집, Vol. 2008, pp. 1178~1187.
15. 이관호, 차민경, 임유진(2009), “선회다짐곡선특성을 이용한 노상토의 다짐도 평가”, 한국방재학회논문집, Vol. 9, No. 1, pp. 33~40.
16. 이승택(2011), “준설토를 활용한 제방축조 시 현장다짐방법에 대한 연구”, 인천대학교 대학원, 석사학위논문.
17. 이재민(2010), “다짐기준(KS 및 ASTM)에 따른 보조기층재료의 실내 다짐 특성에 관한 연구”, 전북대학교 산업기술대학원, 석사학위논문.
18. 이희용(2009), “평판재하시험에 의한 암질 성토 재료의 적정 다짐 통과 횡수에 관한 연구”, 전북대학교 산업기술대학원, 석사학위논문.
19. 황성춘(2011), “다짐도 측정을 위한 휴대용 콘 관입시험기에 대한 연구”, 한국방재학회논문집, Vol. 11, No. 5, pp. 231~239.
20. ASTM D 698(2015), “Standard Test Method for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort, American Society for Testing and Materials.
21. Braja, M. Das and Khaled S.(2016), “Principples of Geotechnical Engineering”, Cengage Learning.
22. KS F 2302(2017), “Standard Test Method for Particle Size Distribution of Soil”, Korea Standard.
23. KS F 2303(2015), “Standard Test Method for Liquid Limit and Plastic Limit of Soil”, Korea Standard.
24. KS F 2306(2015), “Standard Test Method for Water Content of Soil”, Korea Standard.

25. KS F 2312(2016), "Standard Test Method for Soil Compaction", Korea Standard.
26. Lambe, T. W.(1958a), "The Structure of Compacted Clay", Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 84, No. SM2, pp. 1654-1~35.
27. Lambe, T. W.(1958b), "The Engineering Behavior of Compacted Clay", Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 84, No. SM2, pp. 1655-1~35.
28. Mohr, O.(1900), "Welche Umstände Bedingen die Elastizitätsgrenze und den Bruch eines Materiales?", Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure, Vol. 44, pp. 1524~1530 and 1572~1577.
29. Proctor, R. R.(1933), "Fundamental Principles of Soil Compaction", Engineering News-Record, Vol. 111, No. 9, 10, 12 and 13.
30. Turnbull, W. J.(1950), "Compaction and Strength Tests on Soil", Presented at Annual Meeting, ASCE, Jan. 1950.