

모관흡수력 및 함수비에 따른 노상토의 동적변형특성 연구

Dynamic Deformational Characteristics of Subgrade Soils with Variations of Capillary Pressure and Water Content

김 동 수*¹ Kim, Dong-Soo
김 민 종*² Kim, Min-Jong
서 원 석*² Seo, Won-Seok

Abstract

The water content of soil near the ground surface varies seasonally, and dynamic deformational characteristics of soil are affected by the variation of water content. Contrary to previous studies which used various specimens of different compaction moisture contents, the influences of water content and capillary pressure on dynamic deformational characteristics of soil were investigated using the given specimen controlling the matric suction. RC/TS(resonant column and torsional shear) testing equipment was modified so that it can control water content with changing capillary pressure(matric suction). RC/TS tests were performed on subgrade soil collected in the KHC(Korea Highway Corporation) test road. In the field, the cross-hole tests were performed and the water contents were measured at the same site to verify the feasibility and applicability of RC/TS test results. As water content decreased, the tendency of increasing shear moduli in field was well matched with laboratory test results.

요 지

지표부근의 지반의 경우, 함수비가 지반의 동적 물성치에 큰 영향을 주는 요소가 된다. 본 연구에서는 함수비의 변화 때문에 발생하는 최대전단탄성계수, 전단탄성계수 감소곡선, 감쇠비의 전반적인 변화를 공진주/비틀전단 시험을 통해 평가했다. 기존의 동적물성치에 대한 다짐함수비의 영향 연구와는 달리 일정한 다짐함수비로 성형된 시료에 대하여 모관흡수력(capillary pressure)을 조절하는 방법으로 함수비를 변화시키고 이때의 동적물성치의 변화를 평가하였다. 이를 위하여 기존의 공진주/비틀전단시험 시스템을 개량하여 함수비 변화뿐만 아니라 모관흡수력의 변화에 따른 동적물성치의 변화도 함께 평가할 수 있도록 하였다. 또한 실내에서 공진주/비틀전단 시험으로 결정된 함수비에 따른 전단탄성계수의 변화 양상을 동일현장(한국도로공사 시험도로)에서 수행된 크로스홀 시험결과와 비교하여 그 타당성을 검증하였으며, 현장으로의 확장 가능성을 확인하였다. 실내시험과 현장시험으로부터 구한 전단탄성계수는 합리적인 범위에서 일치하였으며, 함수비가 감소함에 따라 증가하는 경향을 나타내었다.

Keywords : Capillary pressure, Cross-hole test, Dynamic deformational characteristics, RC/TS test, Water content

*1 정희원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil & Environmental Engr., Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), dskim@kaist.ac.kr)

*2 정희원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사과정 (Member, Graduate Research Assistant, Dept. of Civil & Environmental Engr., Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST))

1. 서론

동적하중을 받는 토목구조물의 설계를 위해서는 지반-구조물 상호작용에 관한 연구가 필요하며 이를 위해 전단탄성계수로 표현되는 지반의 변형특성의 엄밀한 결정은 매우 중요하다. 일반적으로 지반의 전단탄성계수는 지반의 종류, 구속응력, 교란상태, 입자특성등 다양한 조건에 따라 매우 상이하게 나타난다(Hardin 등, 1972). 특히, 지표부근 지반의 경우, 함수비가 지반의 동적 물성치에 큰 영향을 주는 요소중의 하나가 된다. 강우와 같은 자연현상에 의해 지반의 함수비가 변화하면 모관흡수력의 변화가 발생하고, 그에 따라 흙입자 사이의 유효응력이 변화하여 전단탄성계수에 영향을 주게 된다(Wu, 1984).

대부분의 지반구조물의 내진설계나 진동설계에는 시공전 함수비 상태에서 현장 및 실내실험을 통해 얻은 동적물성치들이 사용된다. 그러나 시공전의 설계단계에서의 함수비와 시공후의 공용상태에서의 함수비는 계절별 강우량의 변화와 같은 외적인 요인에 의해 매우 달라질 수 있다. 또한 포장체에서 동결·융해에 따른 함수비 변화에 의한 노상의 강성변화, 특히 융해시의 함수비 증가에 따른 강성감소는 포장의 사용성에도 크게 영향을 미칠 수 있다. 따라서 이러한 함수비의 변화 때문에 지반의 동적물성치는 시공전과 시공후가 매우 상이해지게 된다. 엄밀한 설계를 위해서는 이와 같은 시공후의 계절적 함수비 변화에 따른 지반의 동적물성치 변화 경향을 설계단계에서 미리 반영하는 것이 타당하다. 그러나 이에 관한 연구는 매우 미비한 실정이다.

본 연구에서는 이와 같이 함수비의 변화 때문에 발생하는 최대전단탄성계수, 전단탄성계수 감소곡선, 감쇠비의 전반적인 변화를 공진주/비틀전단 시험을 통해 평가했다. 기존의 함수비-동적물성치 관계에 관한 연구는 대부분 동적물성치에 대한 다짐함수비의 영향을 조사하였다. 그러나 본 연구에서는 함수비 변화에 의해 발생하는 모관흡수력(capillary pressure)에 주목하여 일정한 다짐함수비로 성형된 시료에 대하여 모관흡수력을 조절하는 방법으로 함수비를 변화시키고, 이때의 동적물성치의 변화를 평가하였다. 이렇게 함으로써 현장에서의 흙의 함수비 변화 거동을 보다 합리적으로 실험실에서 구현하였으며, 함수비 변화뿐만 아니라 모관흡수력의 변화에 따른 동적물성치의 변화도 함께 평가할 수 있도록 하였다. 또한 실내에서 공진주/비틀전단 시험으로 결정

된 함수비에 따른 전단탄성계수의 변화 양상을 현장에서 수행된 크로스홀 시험결과와 비교하여 그 타당성을 검증하였으며, 현장의 특정함수비에서의 변형률에 따른 강성변화 추정으로의 확장 가능성을 확인하였다.

2. 모관흡수력 변화에 따른 지반 동적물성치의 변화

2.1 흙의 모관흡수력 변화에 따른 응력 변화

전통적인 토질역학은 주로 물과 흙의 2가지 상으로 이루어진 포화토의 연구에 집중되어 왔다. 그러나 불포화토는 공기, 물, 흙의 3가지 상으로 구성되어 있기 때문에 전통적인 토질역학에서 주로 다루었던 포화토와는 여러가지 면에서 다른 거동을 나타내게 된다.

불포화토에는 공기가 존재하기 때문에 내부에 물-공기 경계면(meniscus 또는 contractile skin)이 생기게 된다. 물-공기 경계면에 존재하는 물은 표면장력(surface tension)을 받게 된다. 이때 메니스커스(meniscus)에서 발생하는 공기압(대기압)과 음의 수압의 차는 모관흡수력(capillary pressure 또는 matric suction)이라 정의되며, 모관흡수력은 힘의 평형 방정식에 따라 표면장력과 다음과 같은 관계를 갖게 된다.

$$(u_a - u_w) = \frac{2T_s}{R_s} \quad (1)$$

여기서 T_s 는 표면장력을 나타내며, R_s 는 메니스커스의 곡률반경을 나타낸다.

그림 1은 메니스커스에서 발생하는 표면장력과 이것의 반력 성분들을 나타낸다. 반력의 수직성분은 그림에서와 같이 유리관에 압축력으로 작용하게 된다. 이것은 물기둥 높이 만큼의 물의 무게에 해당하는 힘이 메니스커스에 작용하는 표면장력에 의해 유리관으로 전이되게 됨을 의미한다. 즉, 불포화토에서 메니스커스에 작용하는 표면 장력은 흙입자들 사이에 작용하는 압축력을 증가시켜 주게 됨을 알 수 있다.

불포화토에서는 보통 메니스커스의 접촉각을 0이라 가정하는데 이렇게 되면 메니스커스의 곡률반경 R_s 는 간극(pore)의 반경 r 과 동일하게 된다. 흙 내부의 간극(pore)의 크기가 일정하다고 하면, 식 (1)에 의해 모관흡수력이 증가함에 따라 표면장력 역시 증가하게 된다. 따라서 불포화토에서의 모관흡수력의 증가는 흙의 압축력의 증가를 발생시키고 결과적으로 흙의 강도를 증가

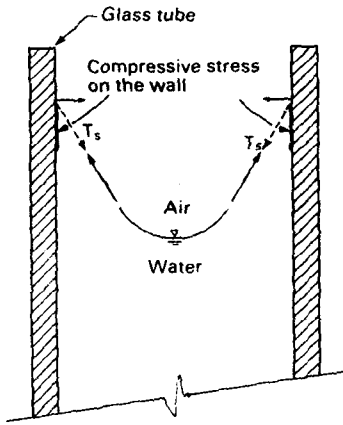


그림 1. 모세관에 작용하는 힘(Fredlund, 1995)

시키게 된다(Fredlund, 1995).

Bishop(1963)은 이와 같이 흡입자들간의 유효응력에 영향을 주는 모관흡수력을 하나의 응력상태변수(stress state variable)로 파악하여 기존 포화토에서의 유효응력의 식을 식 (2)와 같이 확장하였다.

$$\sigma' = \sigma - u_a + \chi(u_a - u_w) \quad (2)$$

여기서 χ 는 흙의 종류 및 포화도에 따라 변하는 경험적 계수이다.

2.2 흙의 모관흡수력 변화에 따른 동적 물성치 변화

흙의 함수비의 변화는 함수특성곡선에 의해서 흙의 모관흡수력의 변화와 연관시킬 수 있다. 몇몇 연구자들에 의해 흙의 함수비 또는 모관흡수력에 따른 흙의 동적 물성치 변화에 관한 연구가 행해졌다.

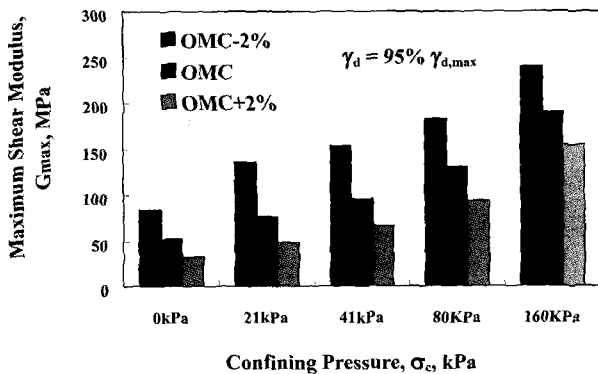
Wu(1984)는 다른 시험조건을 갖게 한 후, 흙의 함수

비만을 달리하여 공진주 시험을 시행하여 함수비변화에 따른 최대 전단탄성계수의 변화를 조사하였다. Wu의 결과에 따르면 최대전단탄성계수는 포화상태로부터 포화도가 떨어짐에 따라 증가하다가 어느 포화도 값에 이르면 최대값을 가지게 되며, 이 값을 지나면 다시 최대전단탄성계수가 감소하는 경향을 보이고 있다. Wu는 최대 전단탄성계수가 최대가 될 때의 포화도 값을 최적 포화도(optimum degree of saturation)라 정의하였다.

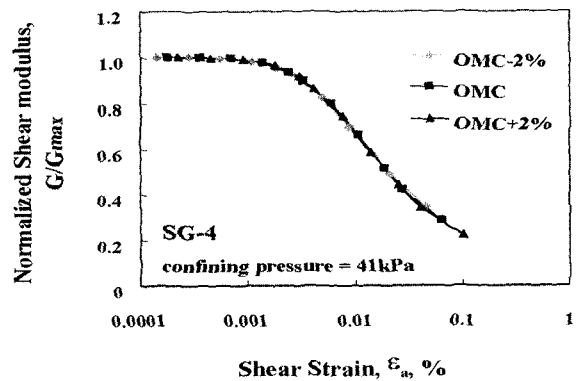
Qian(1990)은 Wu와 같은 방법으로 좀더 엄밀하게 포화도-최대전단탄성계수 관계에 관한 연구를 수행하였다. 그는 간극비, 입자모양, 입도분포가 최적 포화도 및 포화도-최대전단탄성계수 관계에 주는 영향등을 조사하였다.

권기철(1999)은 국내 노상토 시료의 함수비에 따른 동적물성치 변화에 관해 연구하였다. 그는 공진주/비틀전단 시험을 통해 최적함수비와 최적함수비 $\pm 2\%$ 함수비에서의 최대전단탄성계수 및 정규화 전단탄성계수 감소곡선을 구하였으며 그 결과는 그림 2와 같다. 그림에서 알 수 있듯이 최대전단탄성계수는 함수비가 감소함에 따라 증가하는 경향을 보이고 있다. 반면 정규화 전단탄성계수 감소곡선은 함수비에 거의 영향을 받지 않고 일정하게 나타나고 있다.

앞선 연구자들이 함수비를 다르게 하여 성형된 여러 개의 시료들에서 각각 공진주 시험을 수행함으로써 함수비(또는 포화도)에 따른 동적물성치 변화를 조사한 반면, Vinale등(1999)은 일정한 함수비로 성형된 하나의 시료에서 모관흡수력을 직접 조절해가며 공진주/비틀전단 시험을 수행하여 모관흡수력에 따른 흙의 동적물성치 변화를 조사하였으며, 그 결과는 그림 3과 같다.

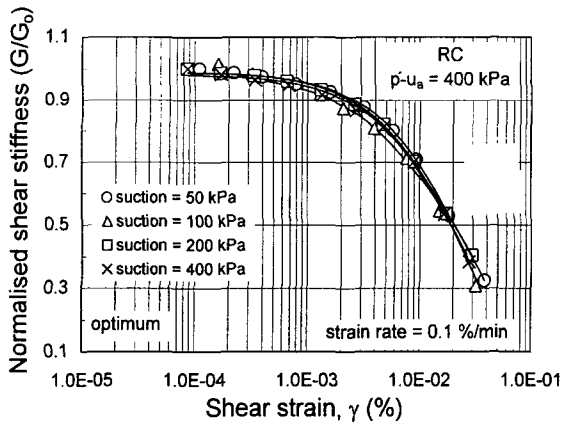


(a) 함수비-최대전단탄성계수

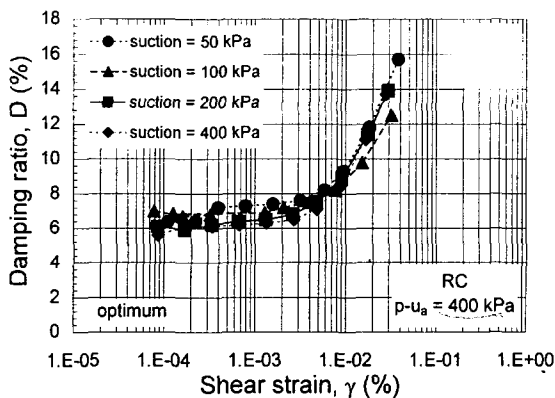


(b) 함수비-정규화 전단탄성계수 감소곡선

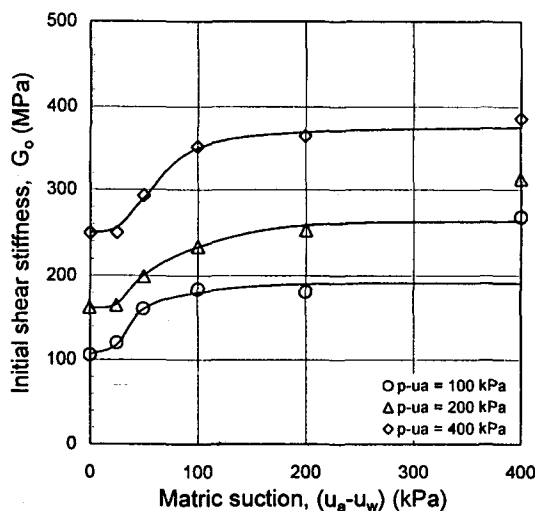
그림 2. 함수비에 따른 노상토의 동적물성치 변화(권기철, 1999)



(a) 모관흡수력-정규화 전단탄성계수 감소곡선



(b) 모관흡수력-감쇠비



(c) 모관흡수력-최대전단탄성계수

그림 3. 모관흡수력에 따른 흙의 동적물성치 변화(Vinale et. al, 1999)

그림 3 (c)는 모관흡수력에 따른 최대전단탄성계수 변화를 나타낸다. 최대전단탄성계수(G_0 , G_{max} 와 동일)는 모관흡수력에 따라 S자 형태로 변하고 있음을 알 수 있다. Vanale 등은 그래프를 3개의 구역으로 나누어 분석하였다. 첫 번째 구역은 낮은 모관흡수력이 작용하는 구

역으로 이 구역에서는 물이 간극을 거의 꽉 채우고 있기 때문에 모세관효과가 미미하여, 모관흡수력의 변화가 마치 평균 유효주응력의 변화처럼 작용하게 된다. 두 번째 구역은 중간정도의 모관흡수력이 작용하는 구역으로, 이 구역에서는 모세관 효과가 어느 정도 두드러지게 나타나게 된다. 세 번째 구역은 높은 모관흡수력이 작용하여 모세관효과가 완전히 발현되는 구간으로, 이 구역에서 최대전단탄성계수는 모관흡수력이 증가함에 따라 일정한 한계값으로 수렴하게 된다. 그림 3 (a)와 그림 3 (b)는 모관흡수력에 따른 정규화전단탄성계수 감소곡선과 감쇠비 곡선을 나타낸다. 일반적으로 정규화전단탄성계수 및 감쇠비 곡선은 유효응력(구속압)에 영향을 받지만 Vinale 등(1999)의 연구결과에서는 모관흡수력에 따라 거의 변하지 않고 일정하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 그러나 Vinale 등(1999)의 연구결과는 시료의 성형조건의 변화가 없었으며 함수특성곡선을 이용한 함수비-전단탄성계수의 관계가 부족한 실정이다.

3. 시험장비

본 연구에서는 전단탄성계수와 감쇠비 등 지반의 동적물성치를 측정하는데 사용되는 대표적인 실험인 공진주/비틀전단 시험장비를 모관흡수력이 조절되도록 개조하여 모관흡수력 및 함수비 변화에 따른 지반의 동적물성치 변화 양상에 관한 조사가 가능하도록 하였다.

본 연구에서는 모관흡수력(matric suction, $u_a - u_w$)을 조절하여 시료의 함수비를 변화시켰다. 이를 위해서는 첫째, 공기압과 수압을 독립적으로 조절할 수 있어야 하고 둘째, 모관흡수력 변화에 의해 시료로부터 나오거나 들어가는 물의 양을 측정할 수 있어야 하며 모관흡수력 변화에 의한 시료의 횡변위와 부피변화를 측정할 수 있어야 한다(Vinale 등, 1999). 본 연구에서는 전자를 구현하기 위하여 새롭게 Top Cap과 시료 거치대를 제작하여 기존의 장비에 추가하였으며, 후자를 구현하기 위하여 뷰렛 시스템을 제작하여 시료 거치대에 연결하였다. 그림 4는 모관흡수력조절 및 함수비 변화 측정장치의 개요도를 나타낸다.

그러나 뷰렛 시스템을 이용해서는 시료에서 나오는 물의 양만이 측정이 가능하며 횡변위와 부피변화의 측정은 불가능하다. 이를 위해서는 LVDT나 간격측정기(proximitor)등으로 이루어진 부피변화 측정시스템이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 횡변위 및 부피변화는 고

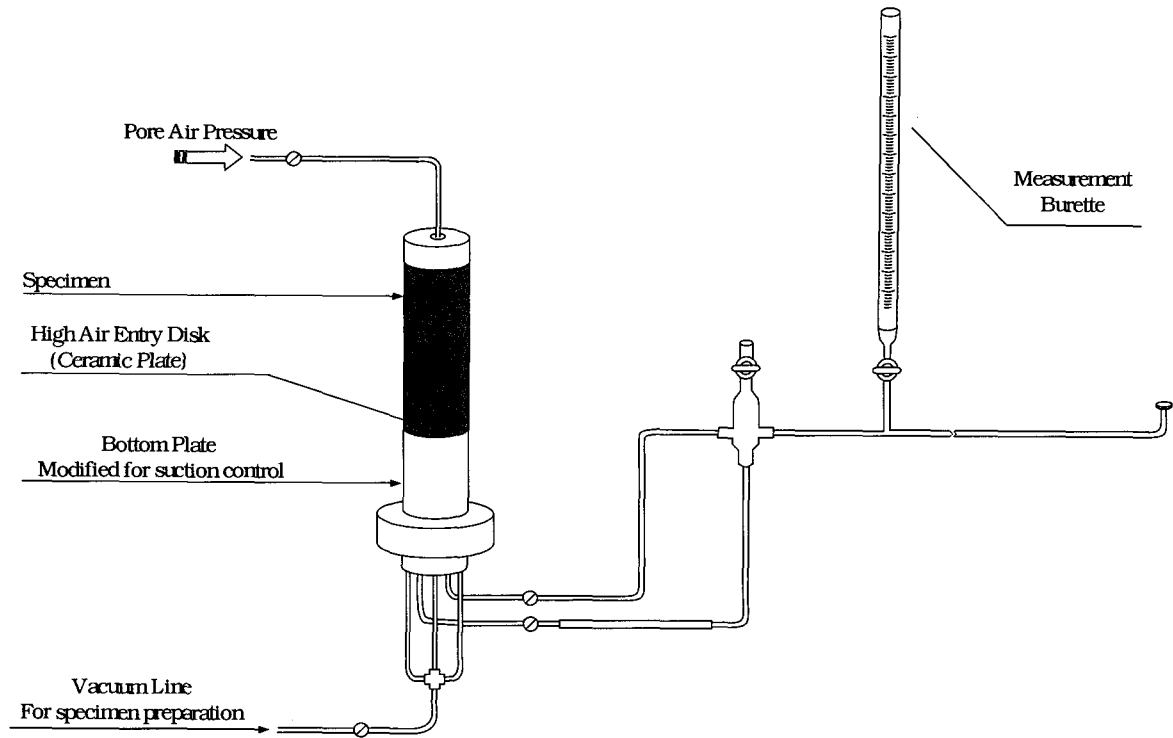


그림 4. 모관흡수력 조절 및 함수비 변화 측정 시스템의 개요도

려하지 못하였으므로, 모관흡수력 조절과정에서 횡변위 및 부피변화는 거의 무시할 정도로 작다는 가정하에 실험을 진행하였다. 본 연구에서는 높은 건조단위중량으로 시료를 다져서 성형하였기 때문에 이러한 가정은 어느 정도의 타당성을 갖는다.

본 연구에서 수압(간극수압)은 대기압을 유지하면서 top cap을 통해 시료에 공기압을 가해 주어 모관흡수력을 조절하였다. 또한 이때 수정된 bottom plate에 부착되어 있는 세라믹판을 통해서 빠져나오는 물의 양을 뷰렛으로 측정하여 시료의 함수비 변화를 측정하였다. 세라믹판은 높은 공기함입치를 가지므로 공기는 통과시키지 않고 물만을 통과시키게 되어 Axis Translation Technique에 의한 모관흡수력의 조절이 가능하도록 해준다. 본 연구에서는 공기함입치(air entry value)가 5Bar이고, 포화시 투수계수는 $1.21 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$ 이며, 간극크기는 $0.5 \mu\text{m}$ 인 세라믹판(Soil Moisture사, 604DO1-B5M1)을 사용하였다.

그림 5는 모관흡수력 조절이 가능하도록 제작된 시료 거치대(bottom plate)와 top cap을 나타낸다. 시료 거치대에는 세라믹판이 놓여질 수 있도록 홈을 만들었으며 이 홈 위에는 물과 세라믹판의 접촉면적을 최대한 넓게 하기 위하여 Z자 모양으로 조그만 수로를 설치하였다. 세라믹판은 이 홈 위에 놓여졌으며, 세라믹판의 옆면은

에폭시 수지를 이용하여 시료거치대와 완전히 밀착되도록 함으로써 이들 사이의 틈으로 공기나 물이 빠져나가지 못하도록 하였다. 또한 시료가 올려지는 부분에서 세라믹판을 제외한 나머지 부분은 3개의 단을 내고 표면은 거칠게 처리하여, 시료 밑면이 확실하게 고정단으로 작용하도록 하면서 시료단부에서 발생하는 오차가 최대한 줄어들도록 하였다. 시료 거치대에는 총 5개의 구멍을 만들었는데 이 중 가운데 2개의 구멍은 Z자 모양의 수로와 연결되어 세라믹판에서 나오는 물을 뷰렛으로 보내주는 역할을 하며, 나머지 3개의 구멍은 시료와 직접 연결되어 시료 거치후 가진시스템을 설치하는 과정에서 시료가 자립하도록 시료에 진공압을 가해주는 역할을 한다.

Top cap에는 가운데에 구멍을 뚫어 시료 상부에 공기압을 줄 수 있도록 하였다. 공기압을 위한 구멍은 top cap의 정가운데 설치하여 공기압관에 의하여 시료가 편심하중을 받지 않도록 하였다. 또한 공기압이 시료 상부에 골고루 퍼지도록 top cap의 저면에는 porous stone을 장치하였으며, 시료거치대의 경우와 마찬가지로 porous stone을 제외한 나머지 부분의 표면을 거칠게 처리하여 단부 오차가 줄어들도록 하였다. 시료 거치대 위에 시료가 올려지고, 그 위에 top cap이 올라간 형상을 그림 5(b)에 나타내었다.

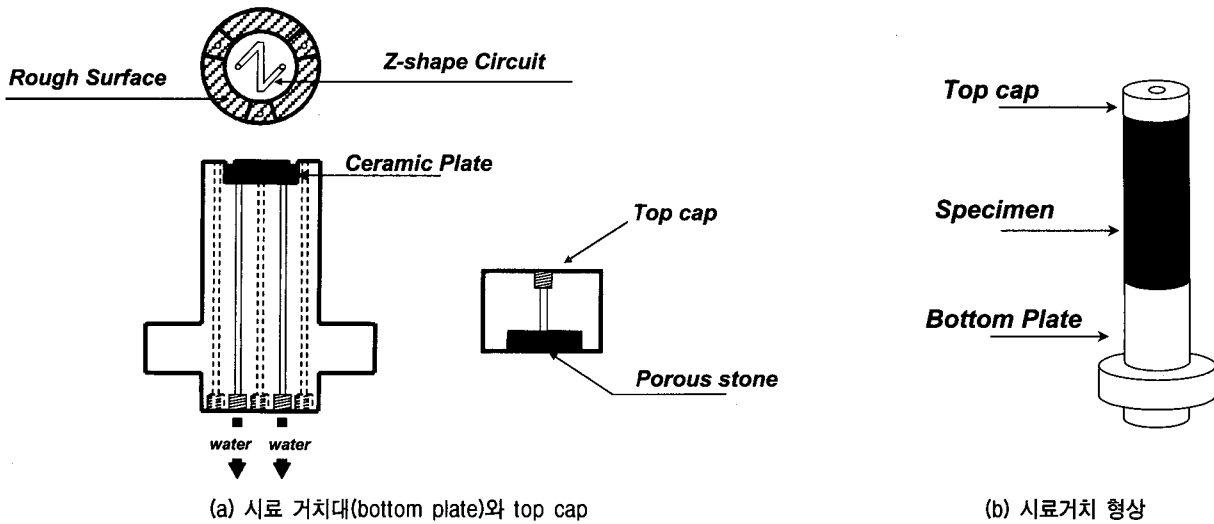


그림 5. 시료 거치대와 top cap

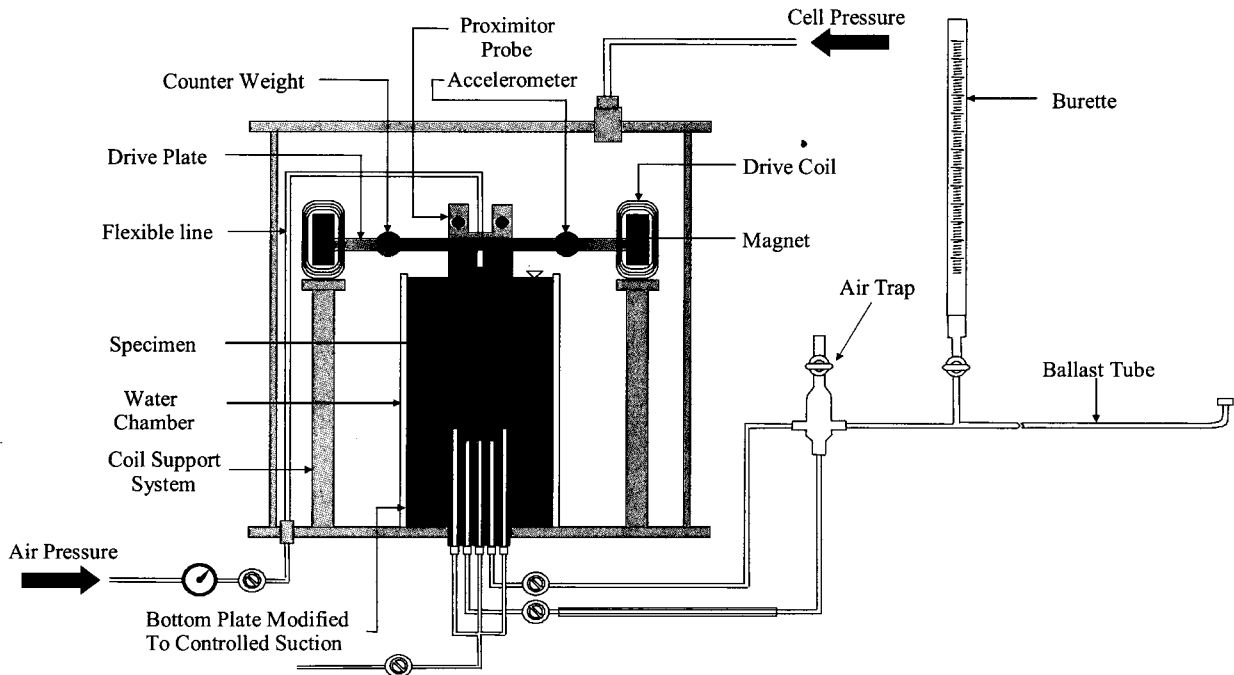


그림 6. 모관흡수력의 조절과 함수비변화측정이 가능한 공진주/비틀전단 시험장치

이와 같이 제작된 모관흡수력 조절 및 함수비 변화 측정 시스템을 공진주/비틀전단 장치와 결합하면 모관 흡수력과 함수비를 변화시켜 가며 공진주/비틀전단 시험을 할 수 있게 된다. 그림 6은 본연구에서 사용된 모관흡수력의 조절과 함수비 변화 측정이 가능한 공진주/비틀전단 시험장치를 나타낸다.

4. 시험시료 및 시험의 구성

본 연구에서는 도로의 노상에서 채취된 화강풍화토를

이용하여 실험을 수행하였다. 시료는 한국도로공사에서 관리하는 중부내륙고속도로 시험도로구간의 노상에서 교란상태로 채취되었다. 또한 시료채취 위치와 동일한 위치에서 현장크로스홀 시험을 수행하여 실내시험 결과로부터 얻어진 함수비-전단탄성계수관계와 현장시험 결과로부터 얻어진 함수비-전단탄성계수관계의 비교가 가능하도록 하였다. 표 1은 채취된 노상토 시료의 주요 물성치를 나타낸다. 시료는 통일 분류법에 의해 SW로 분류되었으며, AASHTO 분류법에 의해 A-1-b로 분류되었다. 시료의 입도분포 분석결과는 그림 7과 같다.

표 1. 화강풍화토 시료의 기본 물성치

구 분		중부내륙 고속도로 시험주로 노상토
입도 시험 결과	D _{max} (mm)	15.1
	D ₉₅	4.7
	D ₅₀	1.1
	C _c	1.2
	C _u	7.5
	#200 통과량	2.5
	#4 통과량	94
비 중		2.66
소성지수 (PI, %)		NP
흙 분류	통일분류	SW
	AASHTO 분류	A-1-b
다짐시험 결과	최적함수비 (%)	9.7
	최대건조단위중량 (t/m ³)	2.01

본 연구에서는 다양한 다짐함수비와 건조단위중량의 시료에 대하여, 모관흡수력을 조절해가며 공진주/비틀전단 시험을 수행하였다.

첫째로 AASHTO에서 제시한 도로 노상토의 M_R시험에 대한 성형 조건 및 유효구속압과 동일하게, 최적함수비에서 최대건조단위중량의 95%로 시료를 재성형 한 후, 유효구속압은 41kPa로 유지하면서, 5kPa, 20kPa, 50kPa, 100kPa, 200kPa의 총 다섯단계로 모관흡수력을 변화시켜가며 공진주/비틀전단 시험을 수행하였다(시험 1).

두번째로 다짐함수비에 의한 영향을 조사하기 위하여 최적함수비보다 3.5% 큰 함수비에서 최대건조단위중량의 95%로 시료를 습윤 다짐하여, 동일한 유효구속압과 모관흡수력 단계에서 시험을 수행하였다(시험 2).

또한 건조단위중량에 의한 영향을 조사하기 위하여 최적함수비에서 최대건조단위중량의 92.5%로 시료를 재성형하여, 역시 동일한 유효구속압과 모관흡수력 단계에서 시험을 수행하였다(시험 3).

모관흡수력을 직접 조절하며 시험을 수행한 시험 1, 2, 3과의 비교를 위하여 추가로 다음과 같은 시험을 수

표 2. 시험의 구성

시험번호	성형 조건			응력 조건	
	다짐함수비 (%)	건조단위중량 (t/m ³)	간극비	유효구속압 (kPa)	모관흡수력 단계 (kPa)
시험1	9.8	1.91	0.39	41	5/20/50/100/200
시험2	13.2	1.91	0.39	41	5/20/50/100/200
시험3	9.7	1.86	0.43	41	5/20/50/100/200
시험4	6.9/8.6/9.96	1.86	0.43	41	-
시험5	9.96	1.86	0.43	41/82/164/328	-

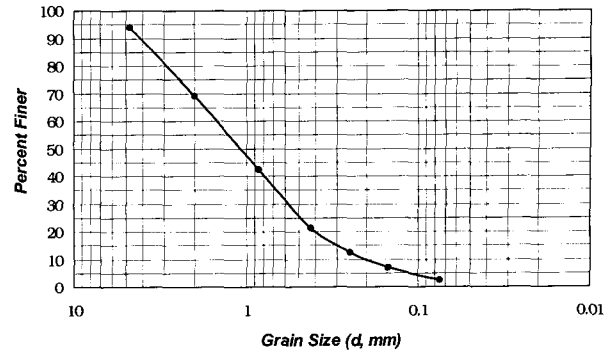


그림 7. 화강풍화토 시료의 입도분석

행하였다.

먼저 모관흡수력에 의한 함수비 변화로 인해 발생하는 시료의 전단탄성계수 변화 경향과 다짐함수비 변화로 인해 발생하는 시료의 전단탄성계수 변화 경향을 비교하기 위하여, 다짐함수비를 다양하게 변화시켜가며 시료를 다진 후 각각의 시료에 대하여 동일한 유효구속압(41kPa)하에서 모관흡수력을 따로 조절하지 않고 시험을 수행하였다. 시료는 최대건조단위중량의 92.5%로 성형하였으며, 시료의 다짐함수비는 시험 3의 결과를 바탕으로 총 3단계로 변화시켰다(시험 4).

또한 모관흡수력에 의한 유효응력 변화로 인해 발생하는 시료의 전단탄성계수 변화 경향과 시료의 평균 주응력 변화로 인해 발생하는 시료의 전단탄성계수 변화 경향을 비교하기 위하여, 최적함수비와 비슷한 상태에서 최대건조단위중량의 92.5%로 시료를 성형한 후, 유효구속압을 41kPa, 82kPa, 164kPa, 328kPa의 총 4단계로 바꾸어 가며 모관흡수력을 따로 조절하지 않고 시험을 수행하였다(시험 5).

시험절차는 크게 시료의 모관흡수력을 조절하는 과정(equalisation 과정)과 공진주/비틀전단 시험과정으로 나뉜다. 모관흡수력의 조절은 공기압 관으로 시료에 공기압을 가하여 실험하고자 하는 값으로 모관흡수력을 맞추는 후, 시료 전체에 균등한 모관흡수력이 발현될 때 까지 기

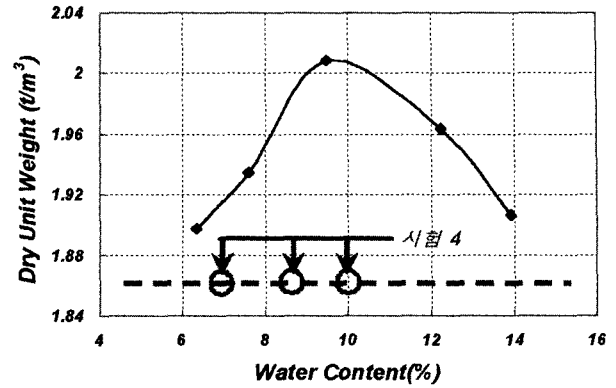
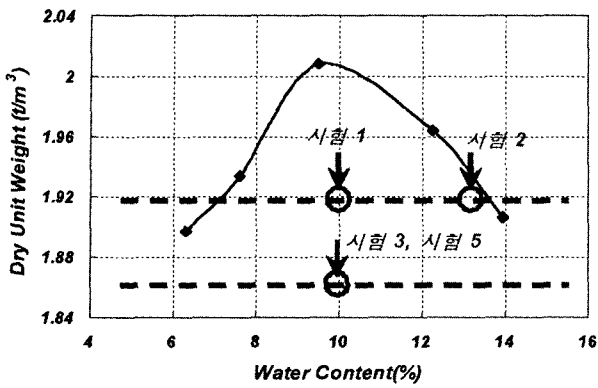
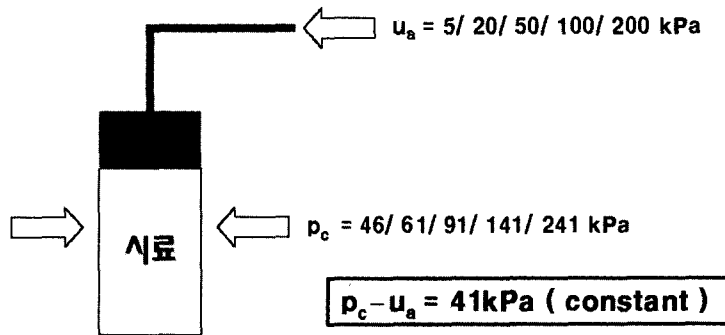
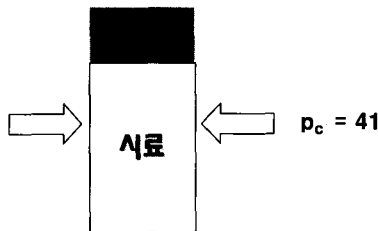


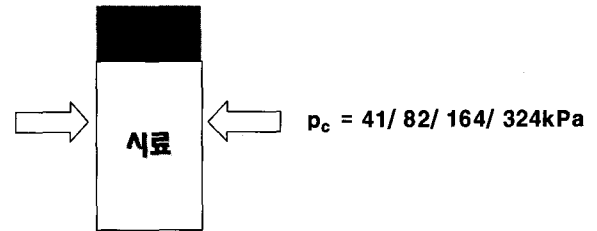
그림 8. 각 시험의 시료성형조건



(a) 시험 1, 시험 2, 시험 3의 모관흡수력 및 응력조건



(b) 시험 4의 응력조건



(c) 시험 5의 응력조건

그림 9. 각 시험의 모관흡수력 및 응력조건

다린다. 이때, 셀의 공기압을 함께 올려주어 시료가 받는 유효구속압($-u_a$)은 일정한 값이 유지되도록 한다. 또한 이 과정에서 나오는 물의 양을 뷰렛시스템으로 측정하여 시료의 함수비 변화를 측정한다. Equalisation의 완료 시점은 Sivakumar(1993)의 연구결과에 따라 함수비 변화량이 0.04%/day 이내가 되는 시간을 기준으로 하였다. 본 연구에서는 하나의 모관흡수력에 대한 equalisation이 완료되기까지 보통 2~3일 정도가 소요되었다. Equalisation이 완료되면, 동일한 시료에 대해서 공진주/비틀 전단 시험을 수행한다. 각 시험의 성형조건을 그림 8과 표 2에, 모관흡수력과 유효구속압 조건을 그림 9에 각각 나타내었다.

5. 시험결과

5.1 실내시험

그림 10은 모관흡수력에 따른 전체변형률영역에서 전단탄성계수의 전형적인 변화를 나타낸다. 모관흡수력 조절에 의해 함수비를 변화시킨 시험 1, 시험 2, 시험 3에서 모관흡수력이 증가함에 따라 전단탄성계수는 그림 10과 같이 전체변형률 범위에서 크게 증가하였다. 이러한 현상은 모관흡수력 조절과정에서 흡입자 사이의 유효응력이 증가하기 때문이다.

그림 11은 모관흡수력 조절을 통해 함수비를 변화시켜가며 시험을 수행한 시험 1, 시험 2, 시험 3에서의 함수

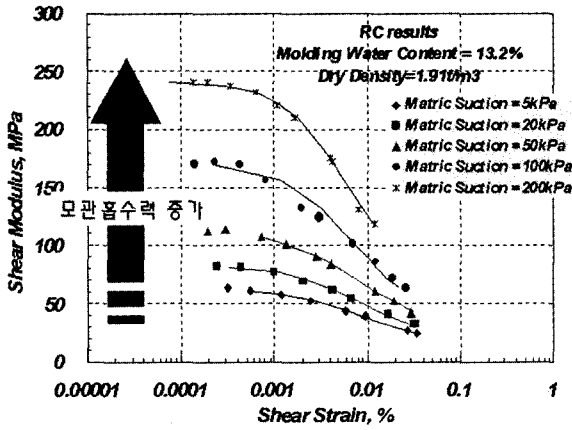


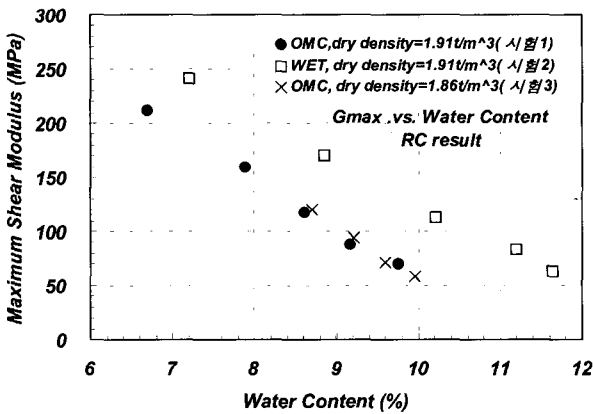
그림 10. 모관흡수력에 따른 전단탄성계수의 변화 일례 (시험2의 공진 주시험)

수비변화 및 모관흡수력에 따른 최대전단탄성계수의 변화를 나타낸다. 그림 11 (a)를 살펴보면, 다짐 함수비는 최적함수비로서 동일하고, 건조단위중량만을 달리하여 시료를 성형한 시험 1과 시험 3의 경우는 서로 거의 비슷한 영역에서 최대전단탄성계수가 증가하고 있는 반면, 습윤다짐으로 성형한 후 시험을 수행한 시험 2의 경우는 이보다 약간 떨어진 영역에서 최대전단탄성계수가 증가하고 있다. 즉, 동일한 다짐함수비를 가지면 건조단위중량에 상관없이, 함수비 감소에 따른 최대전단탄성계수의 증가가 거의 같은 선상에서 일어나고 있다는 것을 알 수 있다.

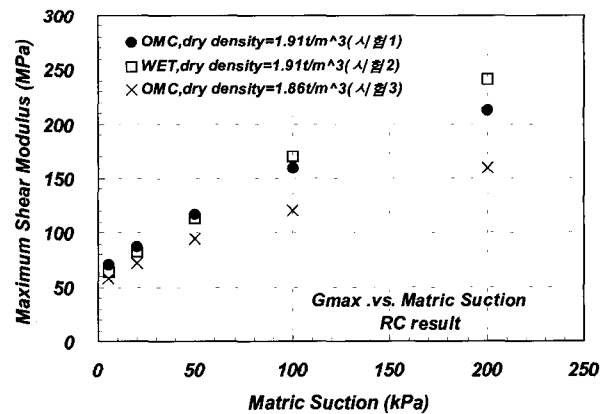
한편, 모관흡수력에 따른 각 시험조건에서의 최대전단탄성계수의 변화(그림 11 (b))를 살펴보면 낮은 모관흡수력 단계에서는 3개의 시료가 거의 비슷한 최대전단탄성계수 값을 가지나 모관흡수력이 커짐에 따라 점차적으로 최대전단탄성계수의 차이가 커지게 된다. 시험 3(OMC,

$\gamma_d=1.86t/m^3$)의 시료는 전체적으로 가장 낮은 값을 나타내고 있는데, 이것은 간극비가 다른 두 시험 결과에 비해 높기 때문이다. 또한 시험 1(OMC, $\gamma_d=1.91t/m^3$)의 시료는 낮은 모관흡수력 단계에서는 시험 2(Wet, $\gamma_d=1.91t/m^3$)의 시료보다 높은 최대전단탄성계수를 가지나 모관흡수력이 증가함에 따라 점차 그 차이가 줄어들어 시험 2의 최대전단탄성계수가 시험 1의 최대전단탄성계수보다 크게 되고 있음을 알 수 있다. 시험 1과 시험 2의 최대전단탄성계수의 차이는 모관흡수력이 커짐에 따라 더 심화되는 경향을 보이고 있다. 이는 동일한 간극비를 가지더라도 다짐함수비에 의해 갖게 되는 초기 입자배열 및 구조의 영향에 의해 습윤다짐으로 성형한 경우가 모관흡수력에 의한 최대전단탄성계수의 변화 범위가 더 크며, 모관흡수력 증가에 대한 최대전단탄성계수의 증가율이 더 크다는 것을 의미한다.

비록 이와 같은 증가율의 차이는 존재하나 성형시의 건조단위중량 조건이 같은 시험 1과 시험 2의 결과는 모관흡수력 5kPa~100kPa의 모관흡수력 범위에서 거의 비슷한 영역에 분포하고 있다. 이는 낮은 영역에서 거동하고 있는 시험 3의 결과와 비교해 보면 뚜렷이 알 수 있다. 이와 같은 경향은 다짐함수비가 같은 시험 1과 시험 3의 결과가 거의 같은 영역에 분포하는 함수비-최대전단탄성계수 관계(그림 11 (a))와 대조적이다. 향후 다양한 조건에서의 보다 많은 실험결과와의 비교가 필요하지만, 그림 11에 나타난 결과로는 함수비-최대전단탄성계수 관계는 간극비의 차이보다 다짐함수비의 차이에 더 큰 영향을 받으며, 모관흡수력-최대전단탄성계수 관계는 다짐함수비의 차이보다 간극비의 차이에 더 큰 영향을 받고 있음을 알 수 있다.



(a) 함수비-최대전단탄성계수 관계



(b) 모관흡수력-최대전단탄성계수 관계

그림 11. 함수비와 모관흡수력에 따른 최대전단탄성계수(MPa) 관계

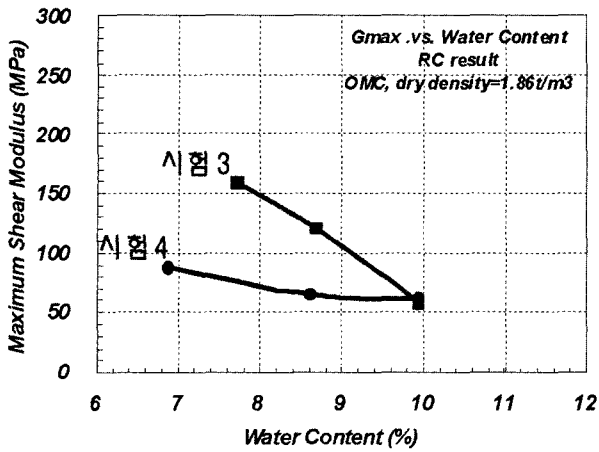


그림 12. 시험 3과 시험 4의 함수비에 따른 최대 전단탄성계수의 비교

모관흡수력에 의해 함수비가 조절된 시험과 다짐함수비 조절에 의해 함수비를 변화시킨 시험에서의 최대 전단탄성계수의 차이를 알아보기 위해, 시험 3이 수행된 함수비 주위의 대표적인 함수비 3개를 선정한 후 시험 3과 동일한 건조단위중량으로 시료를 성형하여 동일한 유효 구속압 조건에서 공진주/비틀전단 시험을 추가로 수행하여 보았다(시험 4). 그림 12에서 알 수 있듯이 모관흡수력에 의해 함수비가 조절된 시료에 대한 시험결과와 다짐함수비에 의해 함수비가 조절된 시료에 대한 시험결과에서 뚜렷한 차이가 발견되었다. 시료 성형시 다짐함수비에 의해 함수비가 조절된 시료의 경우(시험 4) 훨씬 더 완만하게 함수비 감소에 따라 최대전단탄성계수가 증가하고 있음을 알 수 있다. 따라서 높은 함수비에서는 두 시험의 결과가 어느정도 비슷한 값을 가지나, 함수비가 작아짐에 따라 두 시험에서의 최대전단탄성계수의 차이는 상당히 커지게 된다.

그림 13은 모관흡수력에 따른 전형적인 정규화전단탄성계수(G/G_{max}) 감소곡선을 나타낸다. 모관흡수력 조절에 의해 함수비를 변화시켜가며 시험을 수행한 시험 1, 시험 2, 시험 3의 모든 경우에서 정규화전단탄성계수(G/G_{max}) 감소곡선은 그림 13과 같이 모관흡수력에 무관하게 거의 일정하게 나타났다. 이는 Vinale등(1999)의 연구결과와 일치한다.

그림 14는 시료 성형조건이 다른 시험1, 시험2, 시험3의 각 모관흡수력 단계별 정규화전단탄성계수 감소곡선을 동일 그래프 상에 나타낸 것이다.

그림에서 알 수 있듯이 정규화 전단탄성계수 감소곡선은 다짐함수비와 건조단위중량 같은 시료의 성형조

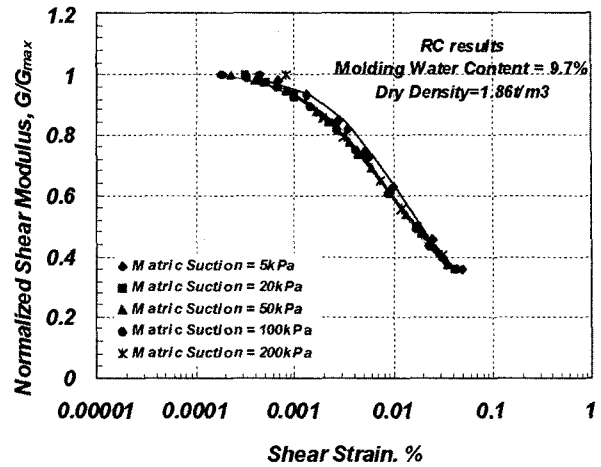


그림 13. 모관흡수력에 따른 정규화전단탄성계수 감소곡선 (시험 3의 공진주시험)

건에 상관없이 공진주 시험결과에서 모두 거의 일정하게 나타나고 있다. 따라서 노상토 시료의 정규화전단탄성계수 감소곡선은 시료 성형시의 다짐함수비 및 건조단위중량과 이후의 실험과정에서의 모관흡수력 변화의 영향을 거의 받지 않는다고 추정할 수 있다.

그러나 이와 같은 결과는 일반적인 경향과 다소 모순되는 점을 포함하고 있다. 일반적인 불포화토에서의 유효응력 관계와 본 논문의 모관흡수력에 따른 최대전단탄성계수관계에 대한 결과로부터 시료의 모관흡수력이 커지면 시료의 유효응력이 증가한다는 사실을 알 수 있었다. 일반적으로 흙의 정규화전단탄성계수는 구속응력이 커지면 선형영역이 증가하면서 값이 증가하는 경향을 나타낸다(권기철, 1999; Kim, 1991; Kramer, 1996). 하지만 본 연구에서 도출된 정규화전단탄성계수 감소곡선은 모관흡수력이 커져서 유효응력이 증가함에도 일정하게 나타나고 있다. 모관흡수력에 따른 정규화전단탄성계수 감소곡선의 그래프(그림 14)를 시험 5를 통해 획득한 구속압 변화에 따른 정규화전단탄성계수 감소곡선과 함께

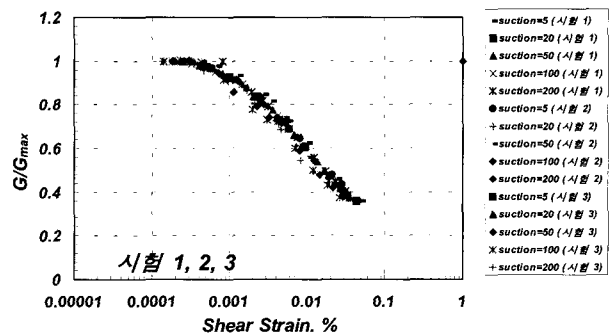


그림 14. 전체 공진주 시험에서의 정규화전단탄성계수 감소곡선

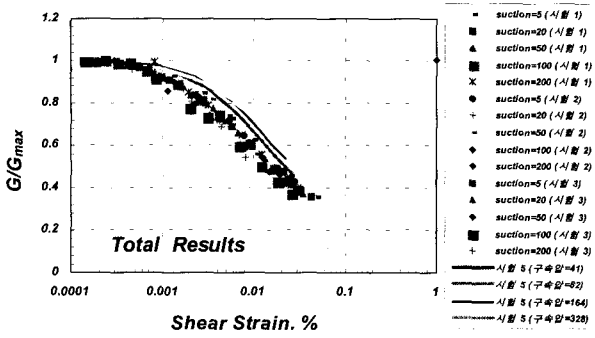


그림 15. 모관흡수력 변화에 따른 정규화전단탄성계수 감소곡선과 구속압 변화에 따른 정규화전단탄성계수 감소곡선의 비교

나타낸 그림 15는 이러한 모순점을 더욱 명확하게 해 준다. 모관흡수력변화에 대해서 정규화전단탄성계수는 일정한 반면 구속압이 증가함에 따라 정규화전단탄성계수는 눈에 띄게 증가하고 있음을 알 수 있다. 이 같은 경향이 발생하는 원인은 아직 명확하게 밝혀내지 못한 상태이며 추후의 이에 대한 연구가 필요하다.

5.2 현장시험과의 비교

공진주/비틀전단시험에 모관흡수력을 조절함으로써 함수비에 따른 노상토의 변형특성을 실내시험으로 규명하였다. 이와 같은 실험결과는 현장 노상토의 계절적 함수비에 따른 강성변화를 알아보기 위함이었으며, 실내시험결과의 타당성과 현장적용성을 검토하기 위해

시료를 채취한 노상현장에서 탄성파시험인 크로스홀 시험(crosshole test)을 수행하였다.

현장시험은 한국도로공사에서 중부내륙고속도로 일부(8km 구간)에 시험시공중인 시험도로현장(station 7+600 지점) 노상에서 실시하였다. 현재 노상 최상층부까지 마무리된 단계에서 전단파속도 측정을 위해 1.5m 깊이의 시추공 2곳을 2.6m 간격으로 설치하였다. 노상 상층부에서 0.1m 간격으로 깊이 1m까지 크로스홀 시험을 수행하였다. 크로스홀 시험은 지반에 두 개 이상의 시추공을 뚫어 한쪽은 발진자(source)로, 나머지 시추공은 감지기(receiver)로 구성하여, 발진자에서 유발되는 진동이 포장 하부구조를 통과하여 감지장치까지 도달되는 파의 전파속도를 깊이별로 측정하여, 깊이별 포장 하부구조의 최대탄성계수를 측정하는 시험기법이다. 그림 16에 시험도로 노상현장에서 실시한 크로스홀 시험의 개요도를 나타내었다.

현장의 노상상태는 동결기간이 끝난 후 상부 20cm를 추가로 포설하여 다짐중이었으며, 실험 전날 강우의 영향으로 상층부는 함수비가 증가된 상태로 깊이에 따라 함수비가 달라 다양한 함수비에 따른 현장시험결과가 필요한 본 연구의 취지에 적합하였다. 현장에서 함수비는 2개의 시추공 중간위치에서 수동식 오거를 이용하여 크로스홀 시험이 수행된 깊이별로 노상토를 채취하여 측정하였고, 현장들밀도 시험을 통하여 건조단위중량을 산정하였다. 산정된 건조단위중량을 기준으로 깊

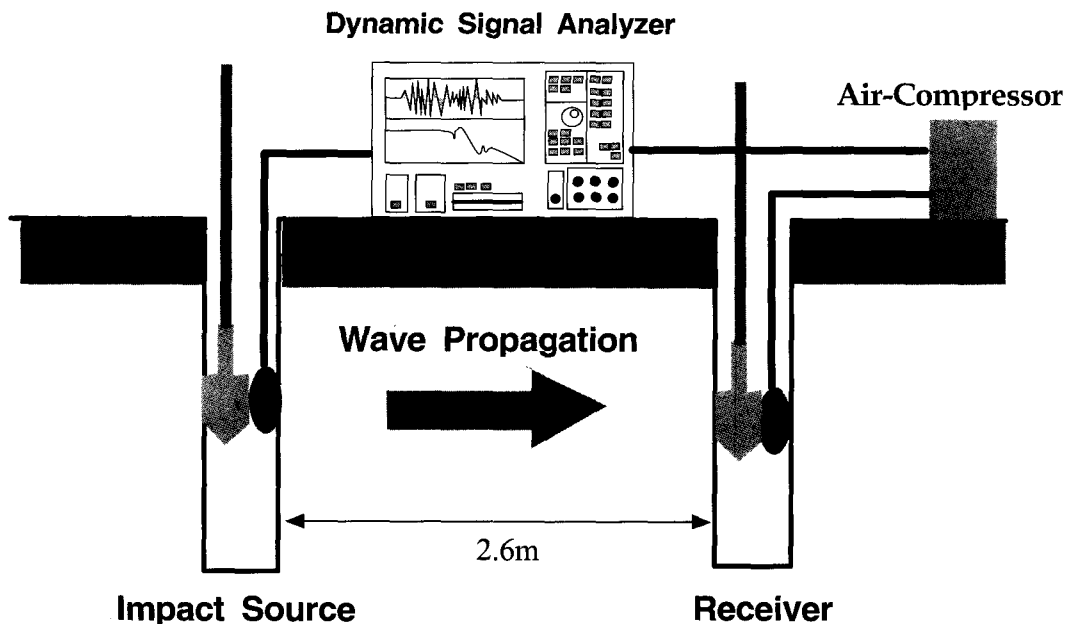


그림 16. 현장 크로스홀 시험의 개요도

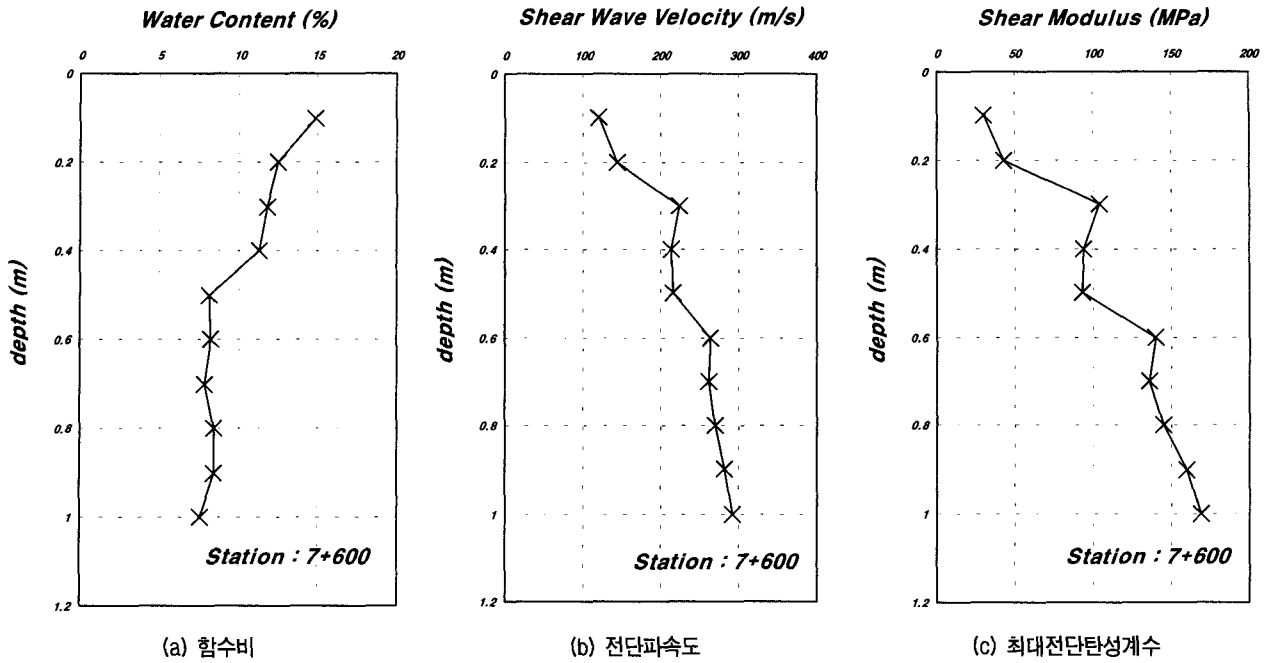


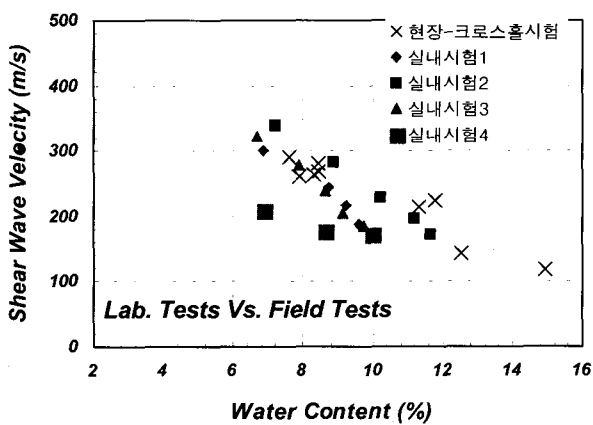
그림 17. 현장 함수비와 현장 크로스홀 시험 결과

이별 함수비를 고려한 깊이별 전체단위중량과 크로스홀 시험을 통해 얻은 깊이별 전단파속도를 이용하여 최대전단탄성계수를 산정하였다. 시험결과 1.85t/m³의 건조단위중량을 얻었고, 깊이에 따른 함수비와 전단파속도 주상도, 최대전단탄성계수 주상도를 그림 17에 나타내었다.

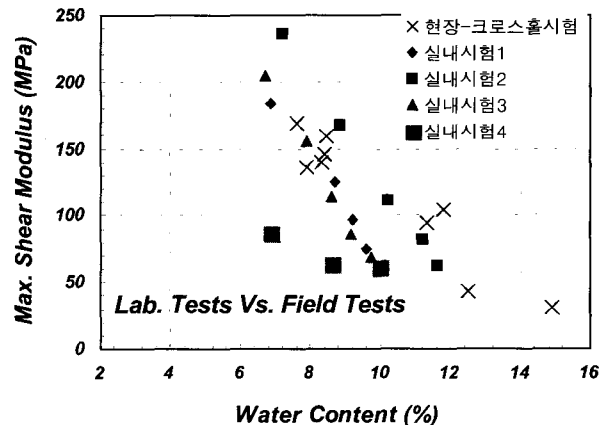
함수비(그림 17 (a))의 결과를 살펴보면 상부 40cm까지는 강우의 영향으로 함수비가 증가하였고, 50cm 이하로는 대략 8% 내외의 함수비로 현장에서의 다짐시 함수비로 추정할 수 있다. 크로스홀 시험의 결과인 전단파속도 주상도와 최대전단탄성계수 주상도(그림 17 (b), (c))를 살펴보면 실내시험에서 나타난 결과와 같이 깊이

에 따라 함수비가 감소함에 따라 전단파속도 및 전단탄성계수가 증가함을 알 수 있다. 상부로부터 60cm 이후의 미소한 강성증가는 구속압의 증가로 인한 현상으로 판단된다. 그러나 함수비의 변화에 따른 현장의 전단파속도 변화 검토는 전기, 우기 등 향후 보다 다양한 함수비 변화에 따른 시험이 필수적이라 판단된다.

그림 17의 현장시험결과를 모관함수력으로 함수비를 조절한 공진주시험(실내시험 1, 2, 3) 결과 및 다짐함수비를 조절한 공진주시험(시험 4) 결과와 비교하여 그림 18에 나타내었다. 현장 다짐 노상의 정지토압계수(K₀)를 정확히 알 수 없고, 비교적 얇은 1m 깊이 이내에서 시험이 수행되었기 때문에 구속압 보정은 무시하였다.



(a) 전단파속도 비교



(b) 최대전단탄성계수 비교

그림 18. 현장 크로스홀 시험결과와 실내 공진주 시험결과와의 비교

그림 18에서 알 수 있듯이 모관흡수력으로 함수비를 조절한 시험 결과(실내시험 1, 2, 3)와 현장시험 결과는 함수비의 변화에 따라 합리적인 범위내에서 비슷한 경향을 보이고 있는 반면, 다짐함수비를 조절한 시험(실내시험 4)결과는 현장시험결과와 차이를 나타내고 있다. 따라서 다짐함수비의 변화에 따른 실내시험으로 현장의 함수비 변화에 따른 강성을 추정하는 방법보다, 현장다짐조건으로 시료를 성형 후 모관흡수력으로 함수비를 변화시켜 현장의 강성을 추정하는 방법이 바람직하다고 판단된다.

현장시험결과와 실내시험결과의 비교를 통해 모관흡수력 조절에 따른 함수비 변화에 의해 노상토의 강성변화를 추정하는 방법이 보다 타당성과 현장적용성이 있음을 확인하였다. 따라서 현장에서 크로스홀 시험과 같은 탄성파시험을 통해 최대전단탄성계수를 구하면 실내시험으로부터 얻은 정규화전단탄성계수 감소곡선과의 결합을 통해 현장의 특정 함수비에서의 변형률에 따른 전단탄성계수 특성 산정으로의 확장이 가능할 것으로 판단된다.

6. 결론

본 연구에서는 기존의 공진주/비틀전단 시험장치를 수정하여 모관흡수력의 조절이 가능한 공진주/비틀전단 시스템을 개발하였다. 또한 이 장비를 이용하여 다양한 성형조건에서 시료를 성형한 후 모관흡수력 조절에 의해 함수비를 변화시켜가며 공진주/비틀전단 시험을 수행하였다. 이를 통해 노상토 시료의 함수비 및 모관흡수력 변화에 따른 전단탄성계수의 변화를 평가하였으며, 현장시험과의 비교를 통해 적용성을 살펴보았다. 본 연구로부터 얻은 결과를 정리하면 아래와 같다.

- (1) 노상토의 전단탄성계수는 모관흡수력 증가에 의해 함수비가 감소함에 따라 전체 변형률 영역에서 뚜렷하게 증가하였다
- (2) 최대전단탄성계수는 함수비가 감소함에 따라 뚜렷하게 증가하였다. 그리고 같은 간극비와 같은 함수비를 갖더라도, 시료 성형과정에서의 다짐함수비 조절에 의하여 함수비를 조절한 시료와 모관흡수력의 조절에 의해 함수비를 조절한 시료에서의 최대전단탄성계수는 뚜렷하게 차이가 났다. 이 경우 모관흡수력 조절에 의해 함수비를 조절한 시료의 최

대전단탄성계수가 훨씬 큰 것으로 나타났으며 이는 다짐함수비 조절에 의하여 함수비를 조절할 경우 다짐에 의해서 입자구조 및 배열에서 차이가 발생하기 때문인 것으로 추정된다.

- (3) 정규화전단탄성계수 감소곡선은 전체 모관흡수력 범위에서 다짐함수비 및 건조단위중량에 상관 없이 일정한 것으로 나타났다. 이는 유효응력 증가에 따른 정규화전단탄성계수 증가라는 일반적인 경향과는 모순되는 결과였다.
- (4) 현장 크로스홀 시험결과로부터 얻어진 함수비에 따른 최대전단탄성계수의 관계와 모관흡수력으로 함수비를 조절한 공진주/비틀전단시험장치에 의해 실내에서 얻어진 함수비에 따른 최대전단탄성계수 관계의 비교 결과, 합리적인 범위에서 비슷한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있었고 이로부터 실내시험과 현장시험의 결합을 통해 특정함수비에서 현장의 변형률에 따른 강성변화를 추정할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 과학재단 목적기초의 연구비 지원으로 수행된 연구(01-2001-000-00482-0)와 한국도로공사 연구비 지원으로 수행된 ‘동결심도를 고려한 포장 하부구조 개선방안 연구’ 결과의 일부로 감사를 표합니다.

참고 문헌

1. 권기철(1999), "변형특성을 고려한 노상토 및 보조기층 재료의 대체 MR 시험법", 한국과학기술원, 박사학위논문.
2. 김동수(1995), "공진주/비틀전단(RC/TS) 시험기를 이용한 건조사질토의 변형특성", 한국지반공학회지, 제11권, 제1호, pp.101-112.
3. 김민중(2002), "공진주/비틀전단 시험을 이용한 모관흡수력 및 함수비에 따른 노상토의 동적변형특성 연구", 한국과학기술원, 석사학위논문.
4. Drumm, E. C., Reeves, J. S., and Madgett, M. R.(1997), "Subgrade Resilient Modulus Correction for Saturation Effect", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol.123, No.7, ASCE, pp.663-671.
5. Fisher, R. A.(1926), "On the capillary force in an ideal soil", Journal Agr.Science, Vol.16, pp.69-82.
6. Fredlund, D. G.(1995), "Soil Mechanics for Unsaturated Soils", Wiley-Interscience Publication, pp.20-70, pp.260-280.
7. Hardin, B. O., and Drenevich, V.O.(1972), "Shear Modulus and Damping in Soils : measurements and parameter effects", Journal of Geotechnical Engineering, Vol.98, No.6, ASCE, pp.603-624.
8. Jin, M. S., Lee, K. Wayne, and Kovacs, W. D.(1995), "Seasonal Variation of Resilient Modulus of Subgrade Soils", Journal of

- Transportation Engineering, Vol.120, No.4, ASCE, pp.603-616.
9. Kramer, L. S.(1996), "Geotechnical Earthquake Engineering", Prentice-Hall, pp.215-250.
 10. Kim, Dong-Soo(1991), "Deformational Characteristics of Soils at Small to Intermediate Strains from Cyclic Test", Ph.D Dissertation, The University of Texas at Austin.
 11. Lee, N. J., Stokoe II, K.H., McNerney, M. T., and McCullough, B. F.(1998), "In Situ Evaluation of Layer Stiffnesses of Airport Pavements by Crosshole Seismic Tests", Transportation Research Record No.1639, 1998 Annual Meeting, Washington. D.C., pp.62-72.
 12. Qian, X.(1990), "Dynamic Behavior of Unsaturated Cohesionless soil", Ph.D Dissertation, The University of Michigan.
 13. Vinale F., dOnofrio A., Mancuso C., Santucci de Magistris, F., and Tatsuoka F.(1999), "The Prefailure Behaviour of Soils as Construction Materials", 2nd International Symposium on Prefailure Deformation Characteristics of Geomaterials, Torino, 26-29, September 1999.
 14. Wu, S., Gray, D. H., and Richart, F. E.(1984), "Capillary Effects on Dynamic Modulus of Sand and Silts", Journal of Geotechnical Engineering, Vol.110, No.9, ASCE, pp.1188-1203.

(접수일자 2002. 6. 14, 심사완료일 2002. 9. 30)