

삼축압축시험을 이용한 아스팔트 혼합물의 파괴기준 개발

김성겸* · 이관호**

Kim, Seong Kyum* , Lee, Kwan Ho**

Development of Failure Criterion of Hot Mix Asphalt Using Triaxial Shear Strength Test

ABSTRACT

In general, Fracture of the material is not occurring of the maximum normal stress or the maximum shear stress failure in the state. Maximum normal stress and maximum shear stress in the state of Critical coupling from being destroyed based on the Mohr-Coulomb theory. Couple of different mixtures, including permeable asphalt pavement, SMA and dense-graded asphalt mixture, were used for compression triaxial test at 45°C and 60°C. Mohr-Coulomb theory to the analysis of compression triaxial test result of the internal friction angle 38.9°~46.9° measured somewhat irregularly, but in the case of cohesion, depending on whether the temperature and immersion of the specimen appeared differently. In addition, Indirect tensile test and compression triaxial test of the asphalt mixture to determine the correlation between compression triaxial test results assessed as cohesion and internal friction angle calculated using the theoretical Indirect tensile strength and measured indirectly tensile strength were analyzed. The Measured & Predicted IDT St values tended to be proportional.

Key words : Triaxial compression, HMA, Indirect tensile strength test (IDT), Mohr-Coulomb, Internal friction angle, Cohesion

초 록

일반적으로 Mohr-Coulomb 파괴 이론을 바탕으로 한 재료 파괴는 최대수직응력이나 최대전단응력 상태에서 파괴가 일어나는 것이 아니라 수직응력과 전단응력의 임계결합상태에서 파괴된다. 이에 본 연구에서는 배수성 아스팔트 혼합물 2종과 SMA 10mm혼합물 및 일반 밀입도 아스팔트 19mm를 이용한 45°C와 60°C에서 삼축압축시험을 실시하였다. Mohr-Coulomb의 파괴 이론을 바탕으로 삼축압축시험 결과를 정리한 결과 내부마찰각은 38.9°~46.9°로 다소 불규칙하게 측정되었으나 점착력의 경우 온도와 시편의 수침여부에 따라 다르게 나타났다. 또한, 아스팔트 혼합물의 간접인장강도시험과 삼축압축시험 상관관계를 알아보기 위해 삼축압축시험 결과로 평가된 점착력과 내부마찰각을 이용하여 계산된 이론적인 간접인장강도와 시험을 통해 직접 측정된 간접인장강도를 분석하였다. 두 간접인장강도 값은 비례하는 경향을 보였다.

검색어 : 삼축압축, 아스팔트 혼합물, 간접인장강도, 모어쿨롱, 내부마찰각, 점착력

1. 서론

일반적으로 반복적인 차량하중으로 인하여 아스팔트 포장층 및 하부구조체가 구조적 손상으로 영구변형 혹은 러팅이 발생한다. 영구변형이 진행됨에 따라 운전자의 안전 및 주행성이 심각하게 저해되므로 사전에 이를 예측하여 억제할 수 있는 대책마련이 필요하다. 아스팔트 혼합물의 영구변형 거동을 예측하기 위해서 실내시험 및 포장가속시험등의 연구가 많이 진행되어져 왔다. 이러한 방법들

* 정회원 · 교신저자 · 공주대학교 대학원 건설환경공학과 박사과정 (Corresponding Author · KongJu National University · tjdrua0614@kongju.ac.kr)

** 정회원 · 공주대학교 공과대학 건설환경공학과 교수 (kholee@kongju.ac.kr)

Received July 22, 2013/ revised September 5, 2013/ accepted April 9, 2014

중 현장 하중 조건을 실내시험에서 유사하게 구현할 수 있는 반복재하실험이 널리 사용되고 있으며, Li et al. (2010)은 반복삼축압축시험과 삼축압축시험을 통해 전단강도의 비를 이용하여 아스팔트 혼합물의 영구변형 모델을 제안하였다. 하지만 공극률이 4~6.5%로 제한이 된 시험이었으며 배수성 포장 같은 공극률이 높은 혼합물에 대해서는 적용하기 사례가 없었다. 본 연구에서는 선회다짐기를 이용해 제작한 공극률이 높고 낮은 혼합물의 시편을 각각 구속압을 다르게 하여 삼축압축시험을 실시하였다. 또한, 시험을 통해 측정된 C (점착력), θ (내부 마찰각)을 이용하여 Mohr-Coulomb 파괴 이론을 기초로 분석을 실시하였다. 본 연구는 배수성아스팔트 혼합물 PA-13, PA-20, 미국 AASHTO SMA포장의 삼축압축강도시험과 간접인장강도 실험의 상관관계를 규명하는 것이 목적이다.

2. 아스팔트 혼합물 파괴기준

영구변형 혹은 러팅은 아스팔트 포장에 주로 발생하는 파손형태로 반복적인 차량 하중으로 인하여 아스팔트 콘크리트 층 및 하부구조체가 구조적으로 손상되어 발생한다. Majidzaden (1967)는 아스팔트에서 일어나는 취성과파괴를 Griffith이론으로 설명하고 그 파괴현상을 규명하기 위한 이론적 및 실험적 연구를 수행하였다. 일반적으로 균열은 부착력으로 결합된 원자를 분리시킴으로서 새로운 면의 형성하기 때문에 균열진전에 영향을 미치는 역학적 인자는 재료에 부합되는 인장응력인 것으로 알려져 있다. 따라서 많은 연구자들은 아스팔트의 파괴현상을 아스팔트와 아스팔트 혼합물의 인장 특성을 이용하여 규명하고자 하였으며, 그 결과 아스팔트와 아스팔트 혼합물의 파괴모드 및 인장 강도는 온도, 하중재하비, 막의 두께 그리고 혼합물의 강성 등 여러 변수들의 영향을 받고 있는 것으로 밝혀졌다. 일반적으로 아스팔트 파괴는 온도가 낮고 하중재하비가 높을수록 취성과파괴에 가깝고 온도가 높거나 하중재하비가 감소됨에 따라 연성과파괴에 가까워진다. 또한 아스팔트의 영구변형은 복잡한 치밀화 과정과 전단 흐름의 결과이며, 그중에서 전단 흐름이 보다 지배적인 요소이다(Monismith et al., 1994). 따라서 아스팔트 혼합물의 영구변형을 보다 정확하게 예측하기 위해서는 아스팔트 혼합물의 전단 특성을 고려하는 것이 바람직하다. Fwa et al. (2004)은 아스팔트 혼합물의 대표적인 전단물성인 점착력과 내부마찰각을 이용하여 영구변형 모델을 개발하였다. 이 모델에서는 전단응력비, 온도, 하중 속도가 고려되었고, 휠 트래킹 시험 결과를 이용하여 모델계수를 결정하였다. 또한 Li et al. (2010)은 반복삼축압축시험과 삼축압축시험으로 부터 구한 전단응력 대 전단 강도의 비(τ/τ_f)를 이용하여 아스팔트혼합물의 영구변형 모델을 제안하였다. 이 모델의 회귀분석 계수는 재료의 종류와 하중 크기와 상관없이 적용할 수 있었고, 이러한 모델을 이용하여

변형률 구간에서 발생한 아스팔트 콘크리트의 영구변형률(ϵ_p)를 정확하게 예측할 수 있었다. 그 후에도 제한한 영구변형 모델은 다양한 온도와 하중조건에서 아스팔트 혼합물의 영구변형 예측모형을 추측할 수 있었다. 제안된 영구변형 모델은 아스팔트 혼합물의 영구변형 특성을 근본적으로 나타낼 수 있는 전단 특성을 고려하였기 때문에 다른 종류의 아스팔트 혼합물에 대하여 모델계수는 변하지 않고 다양한 온도 및 하중 조건에서 영구 변형률을 예측할 수 있었다. 이러한 실험은 대부분 반복삼축압축시험을 바탕으로 하고 있으며 시험이 실행되면 시편 한 개당 시험 시간이 오래 걸리는 단점이 있다.

3. 실험재료 기본물성

3.1 아스팔트 바인더

아스팔트 혼합물 시편 제작에 사용한 바인더는 고분자 개질 아스팔트(SBS PMA)를 사용하였다. 현재 미국, 일본, 유럽 등 선진국에서 가장 많이 사용하는 고무계통의 열가소성 탄성중합체인 SBS (Styrene-Butadiene-Styrene Block Co-polymer)를 개질 재료 사용하고 있는 바인더로 이는 일반 아스팔트 바인더에 비해 소성변형 및 균열에 대한 저항성을 높은 제품이다. 사용된 아스팔트 바인더의 물성은 Table 1에 나타내었다.

3.2 골재

본 연구에서 사용된 골재는 비중, 흡수율, 마모감량에서 기준치에 만족함을 실험을 통해 알 수 있었고, 골재의 실험 결과 값과

Table 1. Properties of Asphalt Binder

Type Test	Spec.	Testing Method	Testing Result
Penetration (25°C), (1/10 mm)	> 40	ASTM D 5	55.3
Softing Point (°C)	> 80	ASTM D 36	99.0
Ductility (15°C) (cm)	> 50	ASTM D 113	75
Mass of RTFO (%)	> 0.6	JIS K 2207	0.13
Penetration after RTFO (%)	> 65	"	94
Toughness (25°C), (kg·cm)	> 200	Japanese Pavement Testing Manual	373.6
Viscosity (60°C), (poise)	> 200,000	ASTM D 2171	> 500,000
Density (15°C) (g/cm ³)	-	ASTM D 70	1.03
Flash Point (°C) (g/cm ³)	-	ASTM D 92	>300

품질 기준 및 시험방법을 Table 2에 나타내었다.

3.3 아스팔트 혼합물

본 연구에서는 국내에서 사용되는 배수성 아스팔트 혼합물 PA-13 및 PA-20, 미국 AASHTO SMA 10mm, 밀입도 아스팔트 혼합물 19mm의 표층용 아스팔트 혼합물을 이용하였다. 표층용 아스팔트 혼합물의 입도, 최적아스팔트 함량, 이론최대밀도값 등은

Table 2. Properties of Aggregate

Test Items	Spec.	Test Method	Test Result	
			Fine Agg.	Coarse Agg.
Apparent S.G.	> 2.45	KS F 2503	2.66	2.68
Bulk S.G.			2.56	2.65
Effective S.G.			2.59	2.66
Absorption (%)	< 3.0	KS F 2504	1.5	0.475
Abrasion (%)	< 30	KS F 2508	-	27.24

Table 3. Properties of Hot Mix Asphalts

Type of HMA	Permeable HMA PA-13	Permeable HMA PA-20	SMA 10 mm	Dense Graded 19 mm
25.0	-	100	-	100
19.0	-	75~100	100	95~100
12.5	100	-	92~100	53~78
9.5	93~100	45~70	62~81	35~62
4.75	25~45	30~50	10~31	10~31
2.36	15~30	20~35	10~21	10~21
1.18	-	-	-	-
0.60	11~20	5~20	4~17	4~17
0.30	10~16	3~12	3~12	3~12
0.15	9~15	2~8	3~8	3~8
0.075	8~13	0~4	2~7	2~7
Optimum Asphalt Content (%)	6.0%	4.3%	5.0%	5.5%
Theoretical Max. Density(g/cm ³)	2.410	2.468	2.450	2.460

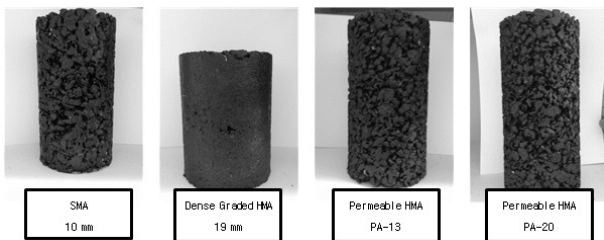


Fig. 1. Asphalt Specimen by Gyrotory Compactor

Table 3과 같다. 실험용 시편은 마샬다짐기와 선회다짐기 두 가지 방법을 이용하여 제작하였다. 제작된 선회 다짐 시편은 다짐압력 600kPa, 선회다짐각 1.25° 다짐횟수50회, 다짐속도 30회/min의 조건으로 제작되었으며, 사이즈는 지름 100mm 높이 150mm 제작한 후 지름 68mm 높이 100mm로 코어링 및 커팅을 실시하여 삼축압축시험을 실시하였다. 마샬다짐시편의 경우 50회 양면다짐을 실시하여 지름 101.6mm, 높이 60~80mm로 제작하여 간접인장 시험을 실시하였다.

3.4 투수계수시험 및 결과

아스팔트 혼합물의 투수계수를 평가하기 위하여 KS F 2494의 정수위투수시험을 이용하였다. Fig. 2는 정수위투수시험 방법과 투수계수 방정식, 시험장비를 나타내고 있다. 다짐된 시편의 다짐 에너지에 따라 투수계수가 변하는 것을 알 수 있으며, 중간 정도 교통량 조건(마샬다짐 50타/면) 과중하중교통량 조건(마샬다짐 75 타/면)의 경우 투수계수의 차이가 거의 없는 것으로 나타났다. Table 4는 각 시편 별 다짐에너지를 다르게 하여 실험한 투수계수 값 결과를 나타낸 표이며 다짐방법은 마샬다짐기를 이용하여 양면

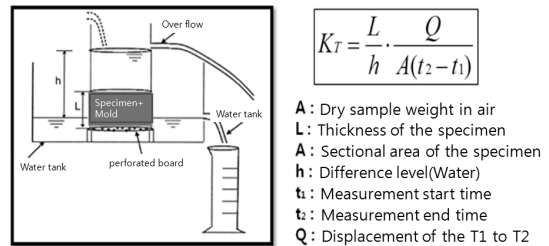


Fig. 2. Laboratory Permeability Testing Setup

Table 4. Measured Permeability (cm/s)

HMA	Compaction (blows/side)	Measured Permeability (cm/s)	Standard Div.	Permeability at 15°C (cm/s)
PA-13	35	0.444	0.115	0.41
	50	0.195	0.017	0.18
	75	0.190	0.058	0.18
PA-20	35	0.446	0.059	0.41
	50	0.440	0.059	0.40
	75	0.374	0.054	0.33
SMA 10mm	35	0.407	0.131	0.38
	50	0.332	0.020	0.30
	75	0.308	0.018	0.28
Dense Graded 19mm	35	0.002	0.0015	0.002
	50	0.0022	0.0003	0.002
	75	0.0022	0.0003	0.002

다짐을 실시하였다.

각 시편의 투수계수를 비교하였을 때 다짐에너지가 증가할수록 투수계수가 감소하는 결과가 나타났다. 다짐에너지에 영향을 가장 많이 받는 시편은 PA-13으로 나타났다. PA-13과 비교했을 때 PA-20과 SMA 10mm의 경우 다짐에너지에 따른 투수계수 변화가 적게 나타났으며 투수계수 또한 PA-20보다 크게 나타났다. 이는 중간정도 교통량 조건(마살다짐 50타/면)을 기준으로 했을 때 약 1.8에서 2.4배에 가까운 투수계수 차이를 보였다. 또한, 밀입도 19mm와 배수성 포장의 경우 약 200배에 가까운 투수계수 차이를 보였으며 이는 투수가 거의 일어나지 않으며, 중하중 교통량 조건의 경우 불투수층에 가까운 상태를 보였다.

4. 아스팔트 혼합물 실내시험

4.1 간접인장강도 시험

4.1.1 시험규격 및 해석법

간접인장강도시험(Indirect Tensile Strength Test, 이하 IDT)은 원통형 시편을 수평면으로 하중을 가하여 최대전단강도 S_t 를 산정하는 실험이며 간접인장강도(IDT) 시험 시 수직수평면에 작용하는 응력분포는 Fig. 3같은 형태로 작용한다.

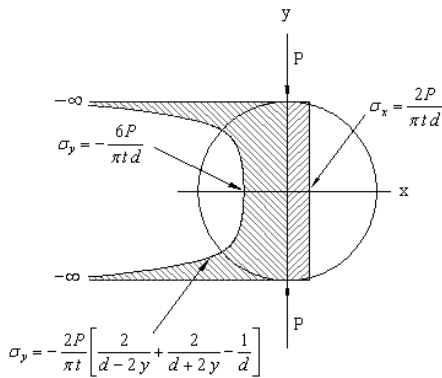


Fig. 3. Theoretical Stress Distribution on Vertical Diametral Plane for Indirect Tensile Test

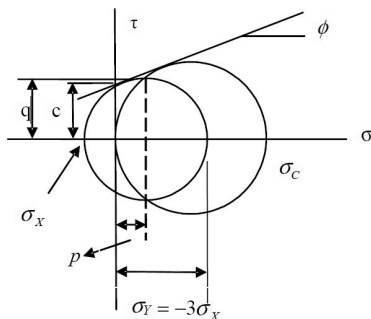


Fig. 4. Mohr's Circles from IDT Strength and Triaxial Test

수평응력(압축)과 수직응력(인장)의 최대값은 다음 Eq. (1)과 Eq. (2)와 같이 나타난다. 여기에서 P는 가해진 하중을 나타내며 d는 시편의 지름, t는 시편의 두께를 나타낸다.

$$\sigma_x = S_t = -\frac{2P}{\pi t d} \quad (1)$$

$$\sigma_y = \frac{6P}{\pi t d} \quad (2)$$

앞서 나타낸 식과 이론을 종합하여 간접인장과 삼축압축시험의 모어원을 그리면 Fig. 4와 같이 나타낼 수 있으며 Fig. 4에 상응하는 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_3 = \sigma_x = -\frac{2P}{\pi t d} \quad (3)$$

$$\sigma_1 = \sigma_y = \frac{6P}{\pi t d} = 3\sigma_x \quad (4)$$

$$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} = -\sigma_x \quad (5)$$

$$q = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = -2\sigma_x \quad (6)$$

4.1.2 시험 결과

시험은 마살다짐기로 제작된 시편을 이용하여 KS F 2382를 바탕으로 실험을 실시하였다. 시편은 일반적인 마살 다짐기를 이용하여 지름 101.6mm, 높이(t) 60~80mm으로 제작하였다. 이 시험은 수침 여부와 온도에 따른 아스팔트 혼합물의 재료물성을 측정하기 위해 실시하였으며, 시험온도는 45°C, 60°C를 선정하여 실시하였으며 하중재하속도는 20mm/min로 실시하였다. 아스팔트 혼합물의 인장강도(S_t)는 파괴 순간에서의 하중과 응력으로 계산할 수 있다. 본 시험은 공시체가 파괴될 때까지 지속적인 변위를 적용하는 변위조절모드에 의해 실시하였다. Table 5는 온도와 수침여부에 따른 각시편의 간접인장강도를 나타낸 표이다.

Table 5. Measured Indirect Tensile Strength

Condition/ Temperature (°C)	PA-13 (kPa)	PA-20 (kPa)	SMA 10mm (kPa)	Dense Graded 19 mm (kPa)
Dry/60	99.4	98.3	109.4	164.1
Dry/45	241.3	277.2	365.4	432.2
Wet/60	91.7	94.9	98.4	125.8
Wet/45	157.4	220.1	325.4	398.2

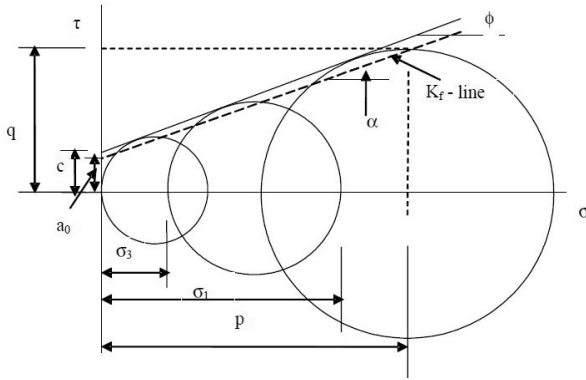


Fig. 5. Mohr-Coulomb Failure Theory

4.2 삼축압축시험

4.2.1 시험규격 및 해석법

일반적으로 재료의 파괴가 최대수직응력과 최대전단응력 상태에서 파괴가 일어나는 것이 아니라 수직응력과 전단응력의 임계결합상태에서 파괴된다는 이론을 바탕으로 있다. 그리하여 Mohr-Coulomb 파괴 이론을 바탕으로 하여 아스팔트 혼합물의 삼축압축 시험 결과를 분석하였다.

수학적으로, Mohr-Coulomb 파괴 이론은 다음과 같은 Eq. (7)으로 나타낸다. 여기에서 σ₁는 최대 주응력, σ₃는 최소 주응력, c는 점착력 φ는 내부마찰각을 나타낸다.

$$\sigma_1 = \sigma_3 \tan^2(45^\circ + \frac{\phi}{2}) + 2c \tan(45^\circ + \frac{\phi}{2}) \quad (7)$$

Fig. 1에서 나타난 K_f-line은 최대주응력과 최소주응력을 이용한 Mohr's circle의 최대 전단응력을 선형을 나타낸 선이며 이때의 최대 전단응력을 q라하고 최대 최소 주응력의 평균값을 p로 정의한다. 삼축압축시험을 통해 점착력 c와 내부마찰각 φ를 구하기 위해서는 앞서 서술한 K_f-line의 절편 a₀와 기울기 α의 값을 Eqs. (10) and (11)를 이용하여 산정이 가능하다.

$$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \quad (8)$$

$$q = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad (9)$$

$$\phi = \sin^{-1}(\tan \alpha) \quad (10)$$

$$c = \frac{a_0}{\cos \phi} \quad (11)$$

Table 6. Parameter of Triaxial Compression Test

Condition	Temperature (°C)	Confinement σ ₃ (kPa)
Dry	45°C	34.5
	60°C	
Wet	45°C	69
	60°C	138

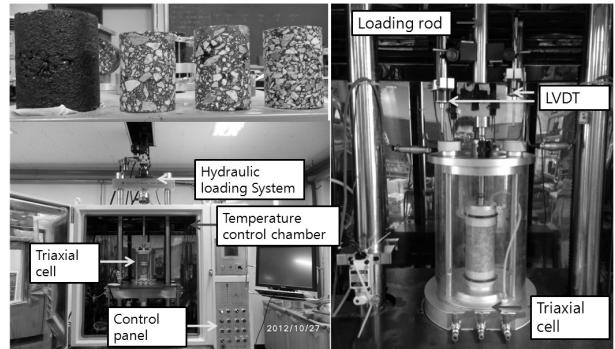


Fig. 6. Triaxial Testing Set up

4.2.2 시험방법

선화다짐기를 이용하여 제작된 아스팔트 시편을 지름 75mm로 습윤 코어링을 실시하였다. 시험 시 가해지는 구속압과 축압은 각각 Air Compressor와 로드셀이 설치된 하중판을 이용하여 가해 지도록 하였다. 시험은 공시체가 파괴 될 때까지 일정한 재하속도 (20mm/min)를 적용하는 변위조절방식으로 수행되었다. 이 때, 구속압(σ₃)을 34.5, 69, 138kPa으로 달리하여 Morh-Coulomb 파괴포락선 분석에 이용하였으며, 아스팔트바인더가 온도변화에 따른 물성변화 차이가 많은 것을 고려하여 실험 온도를 45, 60°C 두 종류로 실시하여 온도에 따른 분석도 실시하였다. 또한 수분에 따른 아스팔트 혼합물의 영향을 알아보기 위하여 아스팔트 혼합물 공시체를 시험온도까지 가열할 때 물에 수침하여 가열시키는 것과 수침하지 않고 공기 중에 가열 시키는 방법으로 실험을 살하였다. 그리하여 Table 6과 같이 각각 변수를 다르게 하여 총 8종류의 조건으로 시험을 실시였다.

4.2.3 시험결과

Table 7의 삼축압축시험결과 모든 시편이 구속압(σ₃)의 증가함에 따라 축차응력(Deviatoric Stress) 또한 기울기는 다르나 증가하는 값을 나타내었다. 축차응력(σ_{df})가 최대값을 나타낼 때의 변형률 값을 나타낸 Peak Strain은 다소 불규칙적인 값을 보였다. 수침 여부에 따라 밀입도 19mm를 제외하고 PA-13, PA-20, SMA 10mm의 시편 대부분 미수침 시 1.1~2.0배의 σ_{df}값을 보였으며 이는 온도가 낮은 45°C에서 더 높은 값을 나타냈으며 온도가

Table 7. Measured Triaxial Compression Test (1)

Condition/ Temp. (°C)	Confinement σ_3 (kPa)	PA-13		PA-20	
		Deviatoric Stress, σ_{df} (kPa)	Peak Strain (%)	Deviatoric Stress, σ_{df} (kPa)	Peak Strain (%)
Dry/60	34.5	2006.7	5.1	2527.5	6.3
	69	2803.3	3.5	2984.9	4.1
	138	3046.1	3.6	3826.3	4.2
Dry/45	34.5	3987.1	3.0	5600.5	6.0
	69	4560.5	3.3	6759.0	6.0
	138	5098.0	4.8	6982.8	6.3
Wet/60	34.5	1804.1	13.9	2111.0	4.4
	69	2213.5	15.1	2381.7	4.9
	138	3213.3	14.4	3629.2	5.9
Wet/45	34.5	2700.0	3.9	2750.2	5.9
	69	3368.8	4.9	3000.7	6.2
	138	3747.4	4.0	3660.7	5.7

Measured Triaxial Compression Test (2)

Condition/ Temp. (°C)	Confinement σ_3 (kPa)	SMA 10mm		Dense Graded 19mm	
		Deviatoric Stress, σ_{df} (kPa)	Peak Strain (%)	Deviatoric Stress, σ_{df} (kPa)	Peak Strain (%)
Dry/60	34.5	1917.0	5.2	1984.4	7.6
	69	2624.3	5.4	2284.4	7.6
	138	2807.6	4.2	2484.3	7.6
Dry/45	34.5	4622.0	5.2	3189.0	8.9
	69	4894.5	5.8	3341.6	8.9
	138	5929.0	3.8	3734.2	15.3
Wet/60	34.5	2003.3	4.8	1824.6	6.3
	69	2363.0	5.2	2100.1	6.3
	138	3450.7	7.8	2732.7	7.4
Wet/45	34.5	3501.8	5.4	3181.9	7.4
	69	4036.5	4.1	3420.1	7.5
	138	4622.9	5.4	3882.4	7.6

높을수록 수침한 시편과 미수침한 시편의 σ_{df} 값의 차이가 적어지는 것을 알 수 있었다. 밀입도 19mm 시편의 경우 수침여부와 온도변화에 관계없이 구속압에 대해서만 σ_{df} 의 변화의 폭이 큰 것으로 나타났다.

Table 8의 c는 점착력(cohesion), ϕ 는 내부 마찰각(internal friction angle)을 표로 나타내고 있다. 또한, $p = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$ 와 $q = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$ 를 이용하여 Fig. 7과 같이 p-q stress 그래프를 작성하여 파괴 포락선을 작성하였다. 작성된 파괴포락선의 절편을 (a_0)

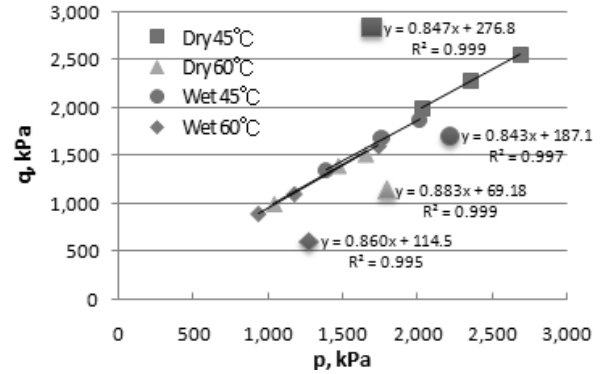


Fig. 7. p-q Plots for Triaxial Testing at PA-13

Table 8. Shear Strength Parameters (1)

Condition/ Temp. (°C)	PA-13		PA-20	
	ϕ (deg.)	C (kPa)	ϕ (deg.)	C (kPa)
Dry/60	45.3	162.7	45.9	181.5
Dry/45	44.7	389.1	46.8	395.7
Wet/60	46.3	100.2	46.9	103.8
Wet/45	44.5	262.1	44.1	265.3

Shear Strength Parameters (2)

Condition/ Temp. (°C)	SMA 10mm		Dense Graded 19 mm	
	ϕ (deg.)	C (kPa)	ϕ (deg.)	C (kPa)
Dry/60	44.6	171.5	38.9	321.9
Dry/45	45.7	372	39.8	490.2
Wet/60	46.5	111.6	44.7	146.9
Wet/45	45.2	310.2	42.0	407.3

그 직선각을 (a_1)으로 정의하여 Eqs. (10) and (11)을 이용하여 내부마찰각과 점착력을 산정하였다. 내부마찰각의 경우 온도와 수침여부와 관계없이 38.9°~46.9°로 다소 불규칙하게 측정되었으나 점착력의 경우 온도가 높은 60°C의 경우에 낮게 나타났으며, 수침 시에도 낮은 값을 보였다. 이러한 차이는 수침여부 보다 온도에 따라 점착력 값이 더 큰 폭으로 변하는 것으로 분석되었다.

4.3 투수계수와 점착력 내부마찰각의 상관관계

각 공시체의 종류를 무시하고 투수계수 값에 따른 점착력(c)와 내부마찰각(ϕ)의 변화를 그래프로 나타내었다. Fig. 8은 투수계수가 증가 할수록 점착력 값은 감소하는 추세를 보였다. 그 중 감소 경향은 60°C 미수침시 가장 큰 감소량을 보였고 60°C 수침시 가장 적은 감소량을 보였다. 또한 이 때에 $R^2=0.79\sim0.867$ 정도 이었다. Fig. 9는 투수계수 값에 따라 내부마찰각은 증가하는 추세를 보였으며, 이는 온도가 증가할수록 증가의 폭이 작고 미수침

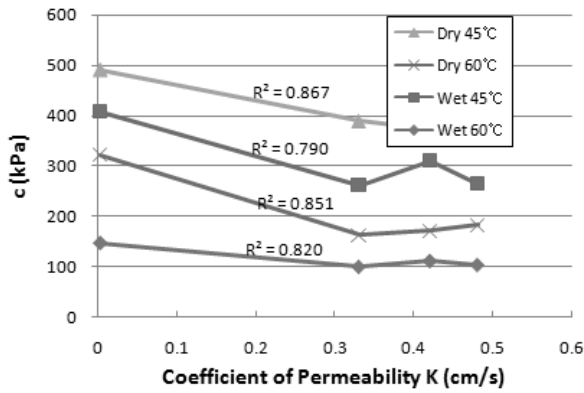


Fig. 8. Relationship of Measured Permeability K and Cohesion

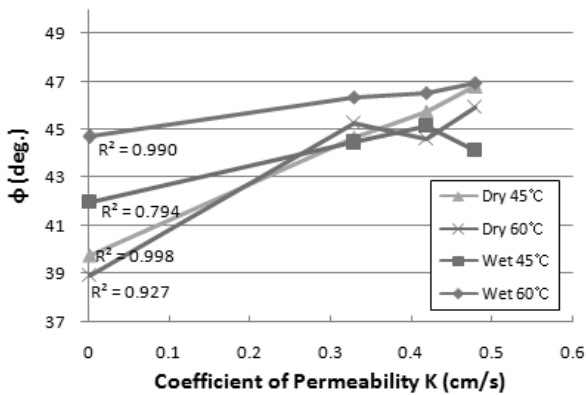


Fig. 9. Relationship of Measured Permeability K and Internal Friction Angle

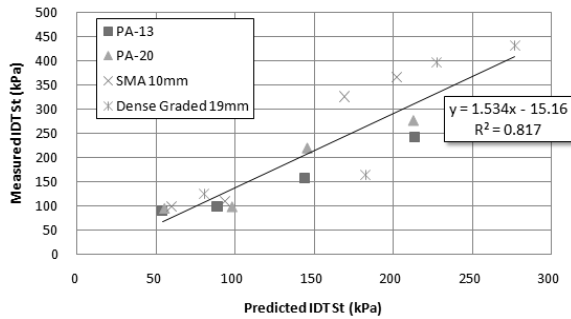


Fig. 10. Comparison of Measured IDT St and Predicted IDT St

시가 수침 보다 증가의 폭이 큰 것으로 나타났다. 이 때에 수침 45°C 제외 한 나머지의 $R^2=0.9$ 이상을 나타냈다.

4.4 삼축압축시험과 간접인장시험의 상관관계

Eq. (12)은 Eqs. (1), (3), (4) and (7)을 바탕으로 하여 α (점착력)과 ρ (내부마찰각), St(전단강도)의 상관관계를 나타낸 식이다.

Table 9. Summary of Measured IDT St and Predicted IDT St (1)

Condition/ Temperature (°C)	PA-13		PA-20	
	Measured IDT St	Predicted IDT St	Measured IDT St	Predicted IDT St
Dry/60	99.4	88.8	98.3	98.5
Dry/45	241.3	213.4	277.2	213.1
Wet/60	91.7	54.2	94.9	55.8
Wet/45	157.4	144.0	220.1	146

Summary of Measured IDT St and Predicted IDT St (2)

Condition/ Temperature (°C)	SMA 10mm		Dense Graded 19mm	
	Measured IDT St	Predicted IDT St	Measured IDT St	Predicted IDT St
Dry/60	109.4	94.1	164.1	182.6
Dry/45	365.4	202.3	432.2	277
Wet/60	98.4	60.3	125.8	80.5
Wet/45	325.4	169.4	398.2	227.5

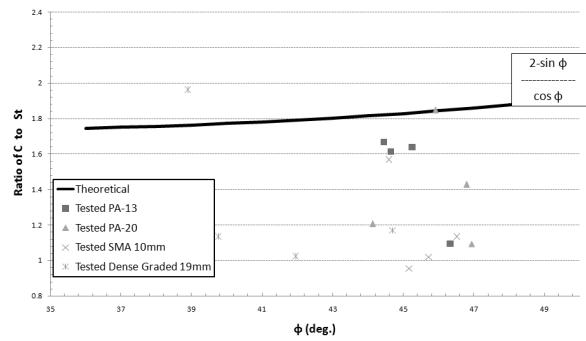


Fig. 11. Measured Versus Theoretical (c) to St Ratio

Table 10. Summary of Average c-St Ratios

Mixture Type	c-St ratio		DIFF. (%)
	THEOR.	MEAS'D	
PA-13	1.50	1.84	-18.2
PA-20	1.39	1.84	-24.1
SMA 10mm	1.17	1.84	-36.4
Dense Graded 19mm	1.32	1.79	-26.3

$$\sigma_1 = \sigma_Y = \frac{6P}{\pi t d} = 3\sigma_X = 3S_t, \quad \sigma_3 = \sigma_X = -\frac{2P}{\pi t d} = -S_t$$

$$3S_t = -S_t \tan^2\left(45^\circ + \frac{\phi}{2}\right) + 2c \tan\left(45^\circ + \frac{\phi}{2}\right)$$

$$c = \frac{\left(\tan^2\left(45^\circ + \frac{\phi}{2}\right) + 3\right)S_t}{2 \tan\left(45^\circ + \frac{\phi}{2}\right)}, \quad c = \frac{2 - \sin\phi}{\cos\phi} S_t \quad (12)$$

Table 9는 삼축압축시험결과의 ϕ , c 를 Eq. (12)에 대입하여 산정한 전단강도(S_t)값과 실제 간접인장강도를 통해 측정된 값과 비교한 표이다. Fig. 10은 이러한 표를 그래프로 나타낸 것이다. 각 배합 별로 비례하는 상관관계를 나타내고 있었으며 R제곱 값도 1에 가까운 높은 값을 나타냈으나 각 배합비 별로 기울기와 절편은 비교하였을 때에는 불규칙적인 경향을 나타내고 있었다.

Fig. 11의 Theoretical 그래프는 Eq. (12)을 점착력/전단응력의 비(ratio)로 정리한 C/St 비의 이론 그래프를 나타낸 것이다.

그밖에 그래프에 나타난 나머지 점은 삼축압축시험 결과를 바탕으로 한 결과 값을 표시한 것이다. C/St 비의 이론 그래프는 내부마찰각이 $39^\circ\sim 47^\circ$ 일 때 c/St 의 비는 1.76~1.86인데 비해 시험에선 0.95~1.96으로 이론식보다 광범위한 값을 보였다. Fig. 11과 같이 각각 혼합비의 평균 c/St 비 값과 이때 적용되었던 내부마찰각의 이론적 평균값을 나타낸 표이다. 이론값에 비해 실측값은 최대 36.4%까지 낮은 값을 나타내었다.

5. 결론

본 연구에서는 삼축압축시험과 간접인장시험 결과를 이용한 아스팔트 혼합물의 Mohr-Coulomb 파괴 기준을 개발하기 위한 연구를 수행하였으며, 제한된 실내시험으로부터 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 아스팔트 혼합물의 삼축압축시험 결과 밀입도 19mm를 제외하고 공극률이 기존 포장보다 높은 혼합물은 미수침 시 1.1~2.0배의 σ_{df} 값을 보였으며, 온도가 높을수록 수침여부에 따른 σ_{df} 값의 차이가 적어지는 것으로 나타났다. 밀입도 19mm 시편의 경우 수침여부와 온도변화에 관계없이 구속 압에 대해서만 σ_{df} 의 변화의 폭이 큰 것으로 나타났다. 내부마찰각의 경우 온도와 수침여부와 관계없이 $38.9^\circ\sim 46.9^\circ$ 로 다소 불규칙하게 측정되었으나 점착력의 경우 온도가 높은 $60^\circ C$ 의 경우에 낮게 나타났으며, 수침 시에도 낮은 값을 보였다. 이러한 차이는 수침여부 보다 온도에 따른 점착력 값이 더 변화를 보이는 것을 나타내었다.
- (2) 투수계수가 증가 할수록 점착력 값은 감소하는 추세를 보였으며 내부마찰각은 증가하는 추세를 보였다. 내부마찰각은 온도가 증가할수록 증가의 폭이 작고 미수침 시 수침 보다 투수계수의 증가 폭이 큰 것으로 나타났다.
- (3) 삼축압축시험결과를 이용하여 S_t 를 산정한 값보다 실제 간접인

장시험을 통해 얻어진 S_t 값이 전체적으로 더 낮은 값을 나타내었다. 이론식에서는 내부마찰각이 $39^\circ\sim 47^\circ$ 일 때 c/St 의 비는 1.76~1.86인데 비해 시험에선 0.95~1.96으로 이론식보다 광범위한 값을 보였다. 이론값에 비해 실측값은 최대 36.4%까지 낮은 값을 나타내었다. 이는 동일한 내부마찰각과 점착력을 가지는 혼합물을 가정했을 때 이론값과 삼축압축강도를 이용한 값을 차이를 나타내는 것을 알 수 있다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단 지역대학우수과학자 “2011-0008035” 연구과제지원으로 수행되었습니다.

References

- Buttlar, W. and Roque, R. (1994). “Development and evaluation of the SHRP measurement and analysis system for indirect tensile testing at low temperatures.” Transportation Research Board, 73rd Annual Meeting, Washington, D.C.
- Fwa, T. F., Tan, S. A. and Zhu, L. Y. (2004). “Rutting prediction of asphalt pavement layer using c-f model.” *Journal of Transportation Engineering*, ASCE, Vol. 130, No. 5, pp. 675-683.
- Hondros, G. (1959). “The evaluation of poisson’s ratio and modulus of materials of a low tensile resistance the brazilian (Indirect Tensile) test with particular reference to concrete.” *Australian Journal of Applied Science*, Vol. 10, pp. 243-268.
- Li, Q., Lee, H. J. and Hwang, E. Y. (2010). “Characterization of permanent deformation of asphalt mixtures based on shear properties.” *Transportation Research Record*, TRB of the National Academies, No. 2181, pp. 1-10 (in Korean).
- Majidzadeh, K. (1967). “Asphalt fractures.” *AAPT*, Vol. 36, pp. 51-79.
- Monismith, C. L., Hicks, R. G., Finn, F. N., Sousa, J., Harvey, J., Weissman, S., Deacon, J., Coplantz, J. and Paulsen, G. (1994). *Permanent deformation response of asphalt aggregate mixes*, Report No. SHRP-A-415, SHRP, National Research Council, Washington, D.C.
- Shin, K. H., Kim, S. K. and Lee, K. H. (2012). “Evaluation of void distribution of hot mix asphalt using micro CT scanner.” *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 12, No. 3, pp. 169-175 (in Korean).
- Terhi K. P. and Shangzhi, X. (2005). “Relationship between triaxial shear strength and indirect tensile strength of hot mix asphalt.” *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*.