

Kim test에 의한 변형강도의 역학적 고찰

A Mechanistic Consideration of Deformation Strength by Kim test

김광우* · 도영수** · 이기호*** · 조문진**** · 권승준*****

Kim Kwang Woo · Doh Young Soo · Lee Gi Ho · Cho Mun Jin · Kweon Seung Joon

1. 서론

현재 개발이 진행중인 Kim test에 의한 변형강도(變形強度; Deformation strength; S_D)는 기존 장비 등을 최대한 활용하기 위하여 마찰시험법과 유사하게 개발하였으나 하중 재하 메커니즘을 달리한 소성변형과의 상관성을 높인 특성치이다.

변형강도에 의한 공시체의 파괴 형상은 평 슬래브, 평판 슬래브, 기초에 집중하중을 가했을 때 발생하는 편칭전단파괴에 의한 형상과 유사하다. 즉, 슬래브나 기초에 원형 집중하중을 가했을 때, 콘크리트는 편칭전단파괴에 의한 원뿔형 형태의 파괴면이 야기되어진다. 편칭파괴는 그 주된 응력이 전단응력이며 엄격히 말하면 전단응력으로 야기된 사인장 응력이 주 원인이다. 따라서 본 연구에서 사용된 변형강도는 혼합물이 초기 수직 압축 및 전단변형에 저항하다가 파괴시에는 수직편칭에 의한 파괴에 이르는 특성을 가진다. 따라서 이에 대한 보다 깊이있는 역학적 고찰이 필요하므로 본 연구의 목적은 소성변형과의 상관성이 높은 변형강도의 역학적 특성을 고찰하는데 있다.

2. Kim test

마찰안정도는 공시체를 축방향으로 다지고 하중은 측면 방향에서 쥐어짜듯 가하므로 현장 포장에서 골재가 배열되어있는 방향과 다르게 하중이 작용할 뿐만 아니라 파괴시 변형의 형태도 포장의 어떤 파손형태와도 다른 시험방법이다. 그러나 개발된 Kim test 시험에서는 하중을 혼합물이 다져진 방향과 같은 방향으로 가하고 가해진 하중에 의해 혼합물은 소성변형과 유사하게 전단·압밀에 의한 변형이 유발되도록 하중봉을 사용한다(Figure 1). 이에 의한 변형강도(Deformation Strength : S_D)의 계산은 반경 r 만큼 원형절삭 한 직경 D 의 하중봉이 바닥으로부터 y 만큼 아스팔트 콘크리트로 눌러 들어갈 경우의 최대하중(P)과 그때의 변형값 (y)을 구하여 식 (1)로 계산한다 (김광우 등 2002a,b).

$$S_D = \frac{4P}{\pi(D - 2(r - \sqrt{2ry - y^2}))^2} \text{-----(1)}$$

여기서 P = 최대하중 (N), D = 하중봉 직경 (mm), r = 원형 절삭 반경 (mm), y = 수직변형 (mm) 이고

* 정회원 · 강원대학교 지역기반공학과 교수 · 033-2506467
** 정회원 · 강원대학교 석재복합신소재연구센터 전임연구원 · 033-250-7284
*** 정회원 · 강원대학교 지역기반공학과 박사과정 · 033-250-7284
**** 정회원 · 강원대학교 지역기반공학과 석사과정 · 033-250-7284
***** 정회원 · 삼척대학교 토목공학과 교수 · 033-570-6506

얻어지는 S_D 의 단위는 MPa이다.

이 식은 응력 계산식 $\sigma=P/A$ 의 σ 를 S_D 로 대체하고 고정된 단면적 A 를 침하깊이의 변수로 만든 식이다. 즉, 아스팔트 혼합물이 고온에서 하중이 가해지면서 붕이 수직으로 눌러 들어감에 따라 접지면적이 변하는 것을 고려하여 파괴시 A 를 구하여 변형강도를 계산하도록 만든 식이다. 따라서 여기서의 A 는 Figure 1의 직경 H 로부터 계산되는 원의 단면적이다. 이는 하중 P 에 의해 눌러 들어간 하중붕이 공시체 상단면과 이루는 직경으로 계산된 단면적으로 실제 붕이 혼합물과 접하여 생기는 우묵한 형태를 평면에 투영한 것이다. 혼합물 경도에 따라 같은 하중 하에서도 하중붕의 침하 깊이가 다르게 되므로 단면적에 차이가 생겨 S_D 가 다르게 계산되게 되는 특징을 가진다.

Figure 2는 마샬안정도 시험기에 공시체를 거치하고 Kim test를 시험하는 모습을 보여준다. 이로부터 얻어지는 하중-변형곡선은 안정도나 간접인장강도 측정시와 유사한 곡선이 얻어진다.

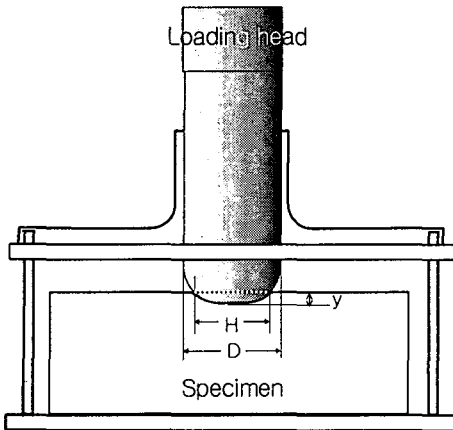


Figure 1. Schematic of Kim tester

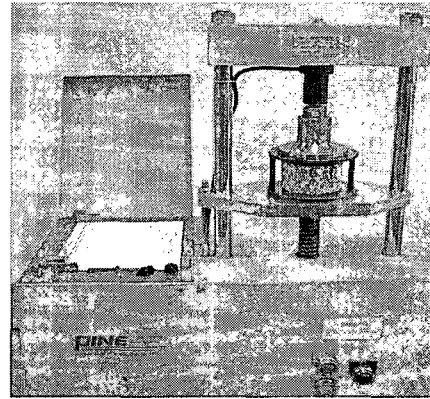


Figure 2. Kim tester setting on Marshall press.

Kim test의 변형강도에 사용되는 공시체는 슬래브 공시체를 제조하여 슬래브를 18cm로 잘라서 코어를 3개를 채취하여 사용하고, 나머지 12cm 크기는 반복주행시험을 실시한다.(Figure 3). 이 방법은 Kim test와 반복주행시험 두 가지 시험에 사용될 공시체를 하나의 슬래브에서 얻음으로서 두 시험결과의 상관성 계산에 혼합물 제조에 따른 오차를 배제할 수다.

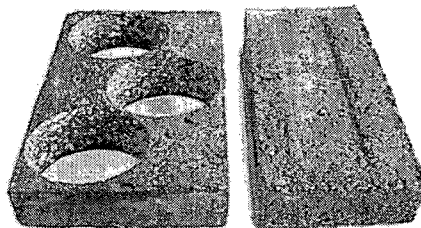


Figure 3. A slab after 3 coring and wheel tracking test.



3. Kim test에 의한 혼합물의 파괴형상 및 역학적 고찰

벽돌, 콘크리트, 유리와 같은 취성재료에 커다란 압축하중을 작용시키면, 재료는 최종적으로 파괴된다. 그 파괴 상황은 종래부터 “압축파괴”라고 불리어 왔다. 그러나 그 파괴는 엄밀한 의미에서 압축에 의한 것이 아니다. 실제의 파괴는 대부분의 경우 “전단”에 의해 일어난다. 인장응력과 압축응력은 모두 반드시 45° 방향으로 전단을 발생시킨다(구조의 세계, 1994).

아스팔트 콘크리트는 고온(60℃)에서는 대부분 연성이 큰 준 소성거동을 하여 탄성이론에 의한 해석이 불가능하다. 연성이 큰 금속이나 버터, 플라스틱 점토 등의 압축파괴도 같은 상태에서 발생한다. 금속은 전단응력에 의해 내부에서 미끄럼이 발생한다. 이 미끄럼은 압축하중에 대해 대략 45°를 이루는 면에 따라 발생한다(구조의 세계, 1994).

이제까지의 실험결과, 변형강도는 밀입도 아스팔트 콘크리트뿐만 아니라 잦입도에서도 소성변형계수와 매우 높은 상관관계($R^2 > 0.95$)를 보여주고 있어 향후 소성변형 추정용 역학적 특성으로 활용성이 매우 높다. 따라서 파괴된 공시체의 형상(Figure 5)을 근거로 파괴 메커니즘을 역학적으로 고찰하였다.

Figure 4는 30분간 코어 공시체를 60℃ 수조에 넣었다가 꺼낸 후 Kim test가 끝난 후 파괴된 코어 공시체를 보여주고, Figure 5는 파괴된 공시체를 분리시켰을 때 가운데 부분이 원뿔 형태로 남아 있는 형상을 보여준다. Figure 4와 5는 Kim test의 변형강도에 의한 공시체의 파괴가 원형 집중하중에 의한 실질적으로 전단·압밀에 의하여 파괴가 일어남을 보여준다.

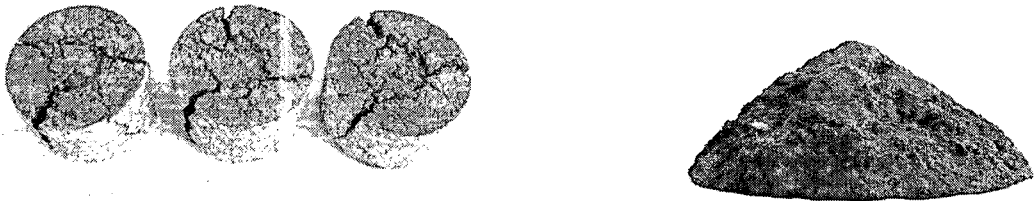


Figure 4. Core of a failed specimen by Kim test. Figure 5. Mode of failure by Kim test using loading head.

변형강도: 공시체의 파괴 형상은 Figure 6과 같이 도식적으로 구분하여 나타낼 수 있는데, 이는 평 슬래브, 평판 슬래브, 기초에 원형 집중하중을 가할 경우 편칭전단파괴에 의해 45°의 대각선 균열이 야기되어 원뿔형 파괴면이 발생하는 점과 유사하기 때문이다. 이때 경사 파괴면은 Figure 7에서와 같이 기둥부근의 기초(변형강도에서는 하중봉 부근)에서 전단응력에 의해 생성된 사인장 응력에 의하여 발생된다. Figure 8은 평 슬래브, 평판 슬래브, 기초가 원형 집중하중을 받을 때 편칭전단응력에 의한 사인장 파괴를 보여준다.

기둥 아래의 기초(하중봉 아래의 공시체)의 응력 상태는 재하하중으로 인한 수직 압축응력, 모멘트로 인한 기초(슬래브, 공시체)의 인장 축의 콘크리트 균열, 2방향에서 휨으로 인한 2축 압축의 결과로서 아주 복잡하다. 하지만 편칭전단파괴는 실제로 사인장 파괴이므로, 전단강도는 시멘트 콘크리트의 경우 재료의 압축강도의 제곱근($\sqrt{f'_c}$)과 높은 상관성이 있다. 슬래브의 중앙에 하나의 집중하중을 받는 편칭전단강도는 시멘트 콘크리트의 경우 식(2)로 제안된다(Kenneth Leet 1989).

$$V_c = \frac{1}{3} \sqrt{f'_c} b_o d \text{ ----- (2)}$$

여기서 전단강도 V_c 는 편칭 파괴를 위해 가해진 하중이고 단위는 MN, f'_c 는 재료의 파괴응력(압축강도)이며 단위는 MPa이다. b_o 는 공시체 파괴면 하단의 윌둘레이고 d 는 공시체의 높이 (두께)로 단위는 모두 mm이다.

파괴는 Figure 8에 보였듯이 기둥으로부터 슬래브 유효높이(d)의 $1/2$ 을 떨어진 곳, 즉 $d/2$ 만큼 떨어진 위치의 수직면에서 발생한다. 파괴면의 주변은 제한된 면적의 형태 또는 기둥의 면적에 대하여 같은 형상을 갖는다. 이러한 파괴형상은 Kim test의 변형강도에 의한 공시체의 파괴면이 일치함을 알 수 있다.

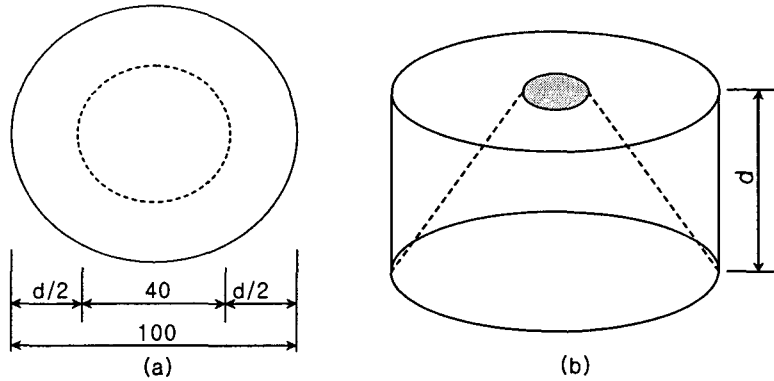
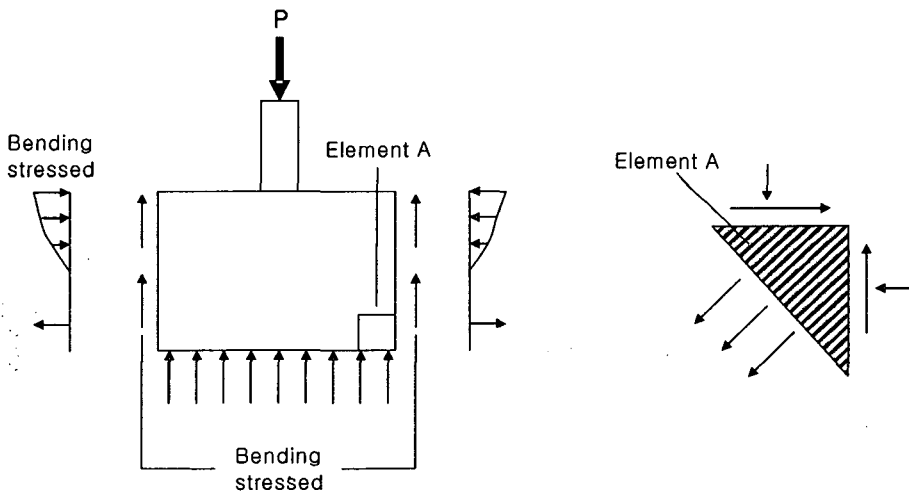


Figure 6. Failure pattern of a Kim test specimen; (a) plan view and (b) bird's eye view.



(a) Free-body diagram of loading bar and slab (b) Orientation of diagonal tension plane

Figure 7. State of stress in slab below circular loading bar.

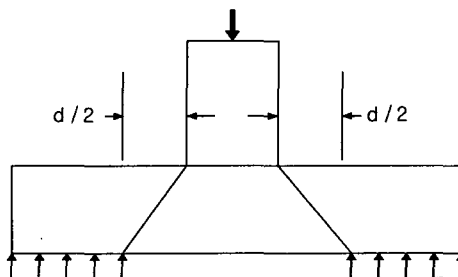


Figure 8. Diagonal tension failure by punching shear stress in slab



따라서 식(2)의 계수 1/3은 시멘트 콘크리트의 경우이고 온도에 민감한 아스팔트 콘크리트의 경우 60°C의 고온에서의 계수는 다를 것이다. 이를 본 연구에서 얻어진 실험데이터에 의해 분석하기 위해 V_c 를 P 로 f_c 를 S_D 로 대치하고 각각의 b_o , d 를 넣어 계산할 수 있다. 따라서 실제로 기존의 실험 data를 가지고 계수를 구해본 결과 식 (3)과 같은 계수를 얻을 수 있었다. 여기 사용된 b_o 는 Figure 6(b)의 파괴단면도(원뿔) 하단의 원둘레이며 d 는 공시체의 높이이고, 이때 사용된 단위는 MPa과 mm이며 얻어진 P 의 단위는 N이다.

$$P = \frac{1}{11} \sqrt{S_D} b_o d \text{-----(3)}$$

한편 두 입도(밀입도, 겹입도)간의 차이는 미세하였으나 밀입도의 경우 약 1/11.2, 겹입도의 경우 1/10.8로 겹입도가 약간 큰 값을 나타냈다. 하지만 이는 콘크리트의 1/3에 비해 훨씬 작은 값으로 아스팔트 콘크리트는 재료 자체가 약한데다 온도가 높아(60°C) 그만큼 낮은 전단력에서도 아스팔트 콘크리트가 파괴됨을 의미한다.

하중봉 4(1.0) data로 식 (3)을 이용해 추정된 P 값의 그림을 Figure 9에서 보여 준다. 밀입도, 겹입도 모두를 상기 식으로 추정했으며 이때 R^2 이 0.93이상으로 양호하게 나타났다.

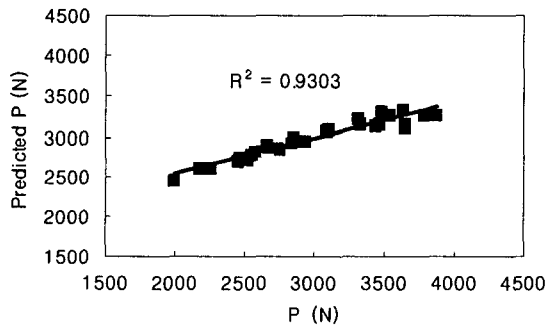


Figure 9. Predicted P vs. measured P using Equation (3).

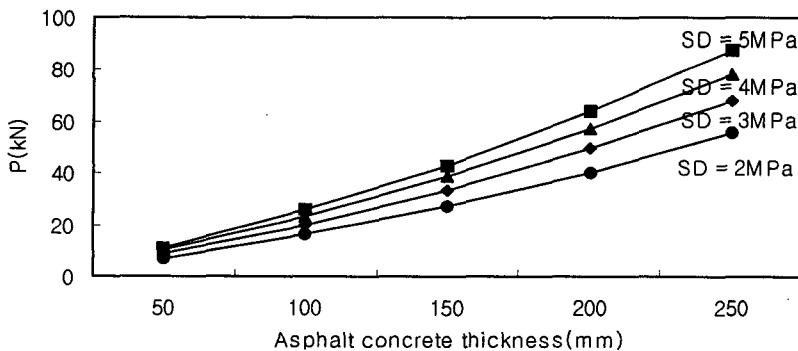


Figure 10. Changes of critical Load by changing asphalt concrete thickness and S_D

따라서 식(1)을 통해 변형강도를 알고, 차륜의 접지면(원형으로 가정시) 반경과 아스팔트 층 두께를 알 경우 임계하중을 계산할 수 있다. 예를 들어 $S_D=3.0$ MPa, 접지면반경 150mm, 포장 층 두께를 100mm라 가정 할 경우 임계하중은 $P = \sqrt{3} \times 1,256 \times 100 / 11 = 19,777N$ 이다. 즉, 포장체온도가 60°C일때 접지면반경이 15cm인 하나의 타이어에 걸리는 하중이 19.8kN(약 2.02톤) 이상이 작용하면 10cm 두께에 변형강도가 3.0MPa인 아스팔트 포장



체는 파괴에 이르게 된다고 추정할 수 있다. 포장두께가 얇은 포장의 경우의 예를 들면 $S_D=3.0$ MPa, 접지반경 150mm, 포장 층 두께를 50mm라 가정 할 경우 임계하중은 $P=\sqrt{3} \times 1,100 \times 50/11=8,660N$ 이다. 즉, 포장체온도가 60℃일때 접지반경이 15cm인 하나의 타이어에 걸리는 하중이 8.660kN (약 0.884톤) 이상이 작용하면 5cm 두께에 변형강도가 3.0MPa인 아스팔트 포장체는 파괴에 이르게 된다고 추정할 수 있다. 여기에서 포장두께의 차이 외에 모든 조건이 같다면 두께가 두꺼울 수록 임계하중이 커짐을 알 수 있다(Figure 10).

4. 결론

본 연구는 아스팔트 콘크리트 소성변형 저항 특성을 측정할 수 있는 시험방법으로 개발된 Kim test의 변형강도(S_D)의 역학적 특성을 고찰하였다. 본 연구의 고찰을 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 변형강도에 의한 공시체의 파괴는 전단·압밀에 의한 소성변형과 같은 형태의 파괴가 발생함을 알 수 있었다.
2. 변형강도의 파괴메커니즘은 콘크리트의 편칭전단파괴와 유사하여 콘크리트의 전단강도 추정식을 근거로 아스팔트 콘크리트의 재료특성에 적합한 추정식 계수를 얻을 수 있었다.
3. 추정된 전단강도 식을 이용한 P의 추정치와 측정치가 R^2 이 0.93이상으로 양호하였다. 따라서 이식을 이용한다면, 아스팔트 콘크리트가 견딜 수 있는 임계하중을 변형강도에 근거하여 추정할 수 있을 것이다.
4. 개발된 실험 방법은 기존의 마찰 시험기를 그대로 사용하고 또한 공시체도 기존의 방법대로 제조 및 수행이 가능하므로 향후 지속적인 연구를 통해 시험법을 표준화한다면 적용이 빠르고 실용화 가능성이 매우 클 것으로 보인다.
5. 국내에서 이용되는 마살배합설계시 소성변형을 예측하기 위한 특성치인 변형강도를 이용하기 위해서는 소성변형 저항성이 어떤 수준 이상이 되도록 기준 변형강도치를 설정한다면 마살안정도를 대체할 수 있을 것으로 보인다.

참 고 문 헌

1. 김광우, 이문섭, 김중열, 이순제 (2002a), “아스팔트 콘크리트의 고온변형저항 특성 측정방법 개발”, 석재연 논문집, 제 7 집, 강원대학교 석재복합 신소재제품 연구센터. pp.73-90.
2. 김광우, 이문섭, 최선주, 김준은 (2002b), “소성변형과의 상관성에 근거한 아스팔트 콘크리트의 강도특성 개발에 관한 기초연구”, 한국도로포장공학회 논문집, 제 4권 4호, pp.23-40.
3. 김광우, 이문섭, 김성태, 이순제 (2002c), “소성변형과의 상관성 및 추정모델을 통한 변형강도 장치변수 분석”, 한국도로포장공학회 논문집, 제 4권 4호, pp.41-52.
4. 김광우, 최선주, 권오선, 이순제 (2003a), “실험오차를 최소화한 아스팔트 콘크리트의 변형강도와 소성변형의 상관성 연구”, 한국도로포장공학회 학술발표회 논문집, pp.29-34.
5. 김광우, 최선주, 이문섭, 홍상기, 안경애, 이순제 (2003b), “개질아스팔트 콘크리트의 변형강도와 소성변형 특성 연구”, 석재연 논문집, 제 8 집, 강원대학교 석재복합 신소재제품 연구센터. pp.71-88.
6. 에드워드 고든 저, 주경재 역 1994 “구조의 세계” 기문당
7. Chu-Kia Wang, Charles G. Salmon (1997), “Reinforced concrete design”, 6th edtion, University of Wisconsin-Madison.
8. James M. Gere, Stephen P. Timoshenko (1991), “Mechanics of materials”, 3rd edtion.
9. Kenneth Leet (1989), “Reinforced concrete design”, 2nd edtion, Mc-Graw-Hill Inc, pp. 195.