

토목섬유로 보강된 아스팔트 포장의 RBSN 해석 모델

한상훈[†] · 광소신 · 권용길^{*} · 홍기남

충북대학교 토목공학과 · *K-water 연구소
(2010. 2. 10. 접수 / 2010. 4. 7. 채택)

RBSN Analysis Model of Asphalt Pavement Retrofitted with Civil Fiber

Sang Hoon Han[†] · So Shin Kwak · Yong Kil Kwon^{*} · Ki Nam Hong

Department of Civil Engineering, Chungbuk National University

*Korea Institute of Water and Environment

(Received February 10, 2010 / Accepted April 7, 2010)

Abstract : This paper presents a simple and efficient two-dimensional rigid-body-spring network model able to accurately estimate the fractural behavior of civil fiber reinforced pavements. The proposed rigid-body-spring network model, denoted as RBSN model, considers civil fiber reinforcing materials using the beam elements and link spring elements. The RBSN method is able to model collapse due to asphalt crushing and civil fiber slip. The RBSN model is used to predict the applied load-midspan deflection response of civil fiber retrofitted asphalt specimen subjected to the three-point bending. Numerical simulations and experimental measurements are compared to based on tests available in the literature. The numerically simulated responses agree significantly with the corresponding experimental results until the maximum load. However, It should be mentioned that, in order to more accurately predict the post-peak flexural behavior of the civil fiber retrofitted asphalt pavement, development of the advanced model to simulate the slip relationship between civil fiber and asphalt is required.

Key Words : rigid-body-spring network model, civil fiber, asphalt pavement, flexural behavior, reinforcement

1. 서론

포장체의 파손은 설계 수명 이전에 주로 발생하고 이로 인한 도로포장의 유지관리에 막대한 비용이 소요되고 있는 실정이다. 포장체의 파손형태는 주변 환경조건 및 반복 교통하중조건에 의한 소성 변형, 피로균열, 반사균열, 온도균열 등에 의해 나타난다. 이를 개선하기 위한 방법으로 사용재료인 아스팔트와 골재를 개선하여 사용하는 방법과 기존 포장체에 포장섬유와 같은 보강재료 등으로 보강하여 내구성 및 균열 저항성을 증진시키는 방법이 있다.

균열 저항성을 증진시킬 목적으로 사용되는 와이어 메쉬(wire mesh)나 망상 금속판(expanded metal) 등의 금속 보강재로 보강한 아스팔트 포장체의 경우, 균열을 감소시킬 수 있는 것으로 평가되나, 시간경과에 따라 아스팔트와의 계면 접착력의 저하,

재활용성 등에 있어 문제점을 나타내고 있다¹⁾.

최근 사용빈도가 높은 토목섬유(civil fiber)의 경우, 수직 압축응력의 감소 및 변형 억제 효과를 나타내고 있으며 피로수명의 연장이 가능하다. 토목섬유 보강 시 비보강에 비하여 약 8배 정도의 피로수명 증가를 나타내며, 토목섬유 그리드 망의 크기가 작을수록 균열 저항성이 증가하는 경향을 보이는 것으로 보고되고 있다^{2,4)}. 양성철 등³⁾은 파괴역학에 기초한 유한요소해석을 이용하고 포장섬유의 탄성계수 및 하중조건 등을 변화시켜 균열저항특성을 분석하였다. 이러한 토목섬유를 대상으로 한 균열 저항성과 내구성 등을 해석할 수 있는 해석 기법으로는 연속체 역학 및 파괴역학에 기초한 유한요소법이 많이 사용되고 있다. 또한, 최근에는 포장체에 나타나는 다양한 물리적 현상들을 시뮬레이션하고 이를 바탕으로 설계에 반영하기 위해, 유한요소법의 단점들 즉, 균열이후의 요소의존성 및 응력경화(stress locking)로 인한 부적절한 파괴응답을 제거할 수 있는 이산균열모델에 기초한 개별 요

[†] To whom correspondence should be addressed.
shhan@chungbuk.ac.kr

소법들이 다양하게 연구되고 있다⁶⁻⁸⁾.

본 논문에서는 포장체에 대한 토목섬유의 균열 저항성 및 토목섬유의 보강효과를 해석적으로 분석, 평가하기 위한 기초연구를 수행하였다. 개별요소법의 일종인 강체-스프링 모델(Rigid-Body-Spring Network, 이하 RBSN)⁹⁾을 기반으로 토목섬유와 포장체의 계면특성을 묘사할 수 있는 해석모델을 제안하고 보강된 포장 실험체에 대한 균열진전 특성을 분석하여 토목섬유의 보강효과를 평가하였다. 또한, 포장체 해석에 대한 RBSN 모델의 적용성과 해석결과에 대한 신뢰성을 검토하는 것을 목적으로 한다.

2. 강체-스프링 모델

2.1. 개요

일반적으로 불균질의 (준)취성재료에 대한 균열 및 파괴위치 등 그 파괴기구를 명확히 규명하기 위해서는 많은 어려움이 따른다. 유한요소법을 비롯한 많은 수치적 해석방법들이 (준)취성재료의 파괴 거동해석에 사용되었으나 부적절한 모델형성 및 요소의존성 등 많은 한계성이 있는 것이 사실이다⁹⁾. RBSN 모델은 개별요소법의 일종으로 체능형성이 비교적 자유롭고 계산과정이 단순하며 파괴형상을 실제와 가깝게 묘사할 수 있는 장점이 있다. RBSN 모델은 Kawai¹⁰⁾에 의해 제안된 강체-스프링모델에 기초한다. 해석대상을 유한개의 강체로 분할하고 각 요소의 경계면을 길이가 0인 스프링들로 연결하여 스프링의 변형에 의해 내력을 전달하게 된다. 그러나 이들 강체들은 해석대상이 변형하여도 여전히 강체로 남아 있게 된다. 해석대상의 변형은 각 셀들에 결합된 스프링에 의해서만 발생하며 외부하중

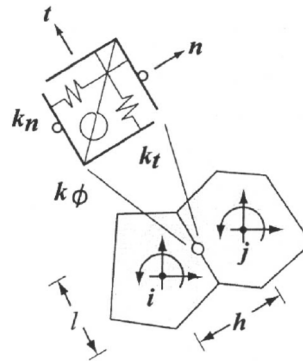


Fig. 2. Rigid-Body-Spring Network(RBSN).

의 증가에 따라 강체들은 분리되거나 겹쳐질 수 있다. 일반적으로 강체 형상은 Fig. 1에 나타난 Voronoi diagram에 의해 묘사되며 강체 자유도는 강체의 중심에서 정의된다. Delaunay 삼각형 요소의 무게중심을 연결하여 하나의 Voronoi 강체 요소가 형성된다. 따라서 각 강체를 구성하는 절점은 임의의 개수를 가지는 강체요소를 구성할 수 있다. Fig. 2에 Voronoi영역을 구성하는 구성인자들을 나타내었다. 수직, 접선, 회전스프링들로 구성된 하나의 스프링 집합은 수직강성(k_n), 접선강성(k_t), 회전강성(k_ϕ) 등을 가지며 식 (1) 및 (2)와 같이 셀 중심간 거리(h)와 셀 경계의 길이(l)로 간단히 표현된다.

$$k_n = k_t = Etl / h \tag{1}$$

$$k_\phi = El^2 / h \tag{2}$$

여기서, E 는 재료의 탄성계수, t 는 강체의 두께를 나타낸다.

2.2. 재료구성모델

2.2.1. 인장응력-변형률 모델

강체 경계면상의 수직 및 전단 스프링에 대한 인장, 압축, 전단-슬립거동 등을 적절히 묘사하기 위해 다양한 재료모델들이 제안되고 있다. 본 연구에서는 먼저, 압축응력-변형률 관계는 선형적인 것으로 가정하였다. 인장응력-변형률 모델은 Fig. 3에 도시한 것과 같은 (준)취성재료에서 주로 채용하고 있는 bi-linear모델을 사용하였다. 균열발생 직후의 인장응력-변형률 관계는 식 (3)~(5)에 의해 결정된다. 여기서, f_t 는 재료의 인장강도, G_f 는 인장파괴에너지, ϵ_{tu} 는 극한파괴변형률 그리고 h 는 재료의 특성 길이를 나타내며 α , β , κ 는 균열발생 이후의 거동

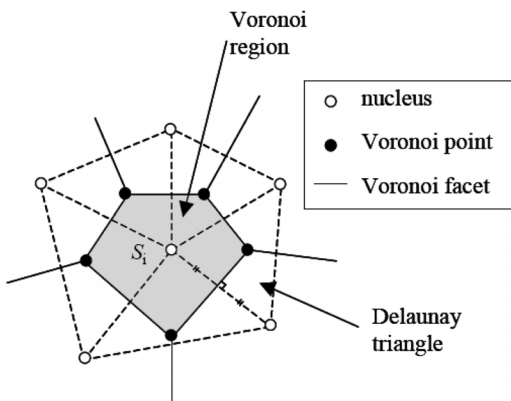


Fig. 1. Voronoi region.

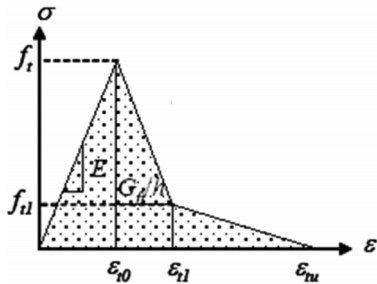


Fig. 3. Tension Properties for quasi-brittle materials.

을 지배하는 재료인자이다.

$$f_{t1} = \alpha f_t \quad (3)$$

$$\varepsilon_{t1} = \beta \frac{G_t}{f_t h} \quad (4)$$

$$\varepsilon_{tu} = \kappa \frac{G_t}{f_t h} \quad (5)$$

2.2.2. 전단응력-변형률 관계

접선방향의 전단스프링에 대해서는 Saito¹¹⁾가 제안한 Mohr-coulomb 파괴기준을 적용하여 전단전달기구를 모델링하였다(Fig. 4(a)). 전단 균열면에서의 전단응력-변형률관계는 Fig. 4(b)에 도시한 것과 같이 식 (6)에 의해 계산하였으며, 전단항복강도 이후의 전단응력감소는 식 (7)과 (8)에 의해 모델링하였다.

여기서, G 는 전단강성, λ 는 손상정도를 나타내는 재료인자 그리고 τ_f 는 재료의 전단강도를 나타낸다.

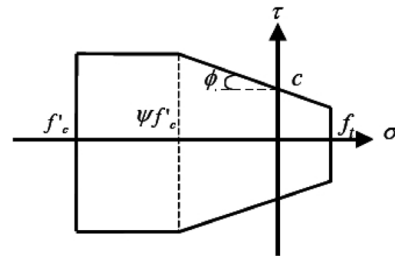
$$\tau = (1 - \lambda) G\gamma \quad (6)$$

$$\lambda = \begin{cases} 0 & \gamma \leq \gamma_0 \\ 1 - \frac{\gamma_0}{\gamma} \exp\left[-\frac{\eta}{\lambda_u}(\lambda - \lambda_0)\right] & \gamma > \lambda_0 \end{cases} \quad (7)$$

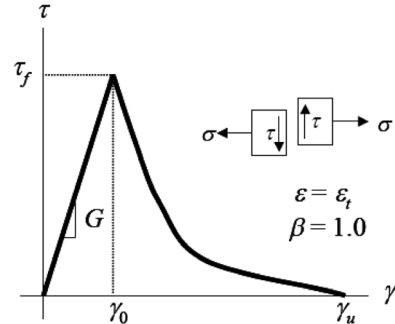
$$\gamma_0 = \tau_f / G \quad (8)$$

2.3. 모드 I 파괴 모델

RBSN 모델에서의 모드 I 파괴는 내부 스프링의 강도와 강성 저하에 의해 시뮬레이션될 수 있다. RBSN 모델에서는 균열띠 이론¹²⁾에 기초하여 모드 I 파괴를 묘사한다. 이 때 강체요소면의 국소좌표에 대한 균열수직방향 θ_R 을 이용하여 Fig. 5에 도시한 것과 같이 균열띠의 폭을 계산한다.



(a) Mohr-Coulomb criterion



(b) Quasi-brittle material

Fig. 4. Material model.

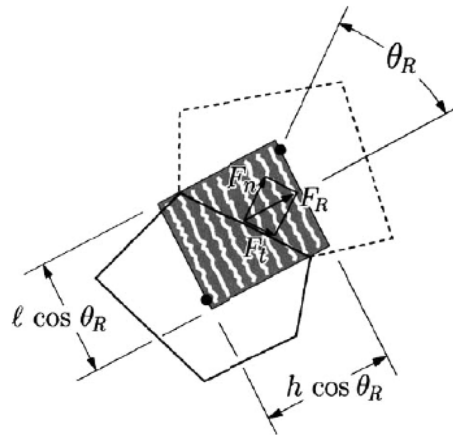


Fig. 5. Crack band model.

그리고 평균 인장응력은 식 (9)에 의해 계산된다. 여기서, F_R 는 스프링에 발생한 합력이다. 또한, 균열변형률 ε_{cr} 는 식 (10)에 의해 계산될 수 있다. 여기서 w 는 스프링 변형량의 θ_R 방향으로의 변형량, 즉, 모드 I 균열폭을 나타낸다.

$$\sigma_R = \frac{F_R}{t l \cos \theta_R} \quad (9)$$

$$\varepsilon_{cr} = \frac{w}{h \cos \theta_R} \quad (10)$$

2.4. 토목섬유 보강재의 모델화

일반적으로 포장체와 보강재의 부착성능은 균열 진전에 큰 영향을 미친다. 경계면을 따라 발생하는 반사균열은 보강재의 성능을 감소시키며 내구성을 감소시키는 주된 원인이 된다. RBSN 모델에서 토목섬유 보강재는 강체의 기하학적 형상 및 위치와 무관하게 배치하는 것이 가능하다. 보강재는 요소로 모델링하는 것이 가능하며, 이동 및 회전 자유도를 갖는다. 토목섬유 보강재와 포장체의 경계면 거동은 토목섬유를 따라 위치한 비선형 연결요소(linkage element)의 거동에 의해 결정된다(Fig. 6 참조). 본 연구에서는 포장체와 토목섬유 사이의 경계면 부착-슬립(slip) 거동을 Fig. 7 및 식 (11)~(13)을 이용하여 모델링 하였다. 각각의 토목섬유 보강재는 고유의 계면특성들을 나타낸다. 따라서 본 연구에서는 보강재의 슬립폭을 달리하기 위해 슬립과 관련한 재료인자 A 와 B 를 도입하였다. (준)취성 재료의 경우, A 는 0.2, B 는 0.4를 사용한다. 여기서, s 는 경계면의 슬립량, T 는 보강재의 두께를 나타낸다. 또한, ρ 는 재료상수, F_r 는 재료의 강도를 나타낸다¹³⁾.

$$\tau = \rho \cdot 0.09 F_r^{0.67} \left\{ 1 - \exp\left(-40\left(\frac{s}{T}\right)^{1/2}\right) \right\} \quad 0 \leq s \leq A \quad (11)$$

$$\tau = \tau_{max} - \tau_{max} \left(\frac{s-A}{B-A} \right) \quad A \leq s \leq B \quad (12)$$

$$\tau = 0.1 \tau_{max} \quad B \leq s \quad (13)$$

3. 해석모델

3.1. 3점 휨실험 해석 모델

본 연구에서는 RBSN 모델의 적용성을 평가하고 해석결과와 신뢰성을 검증하기 위해 토목섬유 보강 포장체에 대해 비선형 수치해석을 수행하였다.

참고문헌 14)는 토목섬유 보강 아스팔트 포장에 대한 휨 저항성을 평가하기 위하여 -10°C의 온도에서 포장 실험체에 대해 3점 휨 실험을 수행하고, 그 결과를 보고하였다. 이 때 토목섬유는 탄소섬유 그리드와 유리섬유 그리드가 사용되었다. 보강 아스팔트 포장 실험체는 표층 40mm, 기층 20mm의 단면으로 구성되며, 표층과 기층 사이에 보강섬유 그리드가 매설되었다. 실험체의 크기는 길이 350mm, 두께 50mm이며, 실험 전에 실험체 중앙 밑면에 깊이 20mm, 폭 2mm의 노치를 형성하였다. 실험

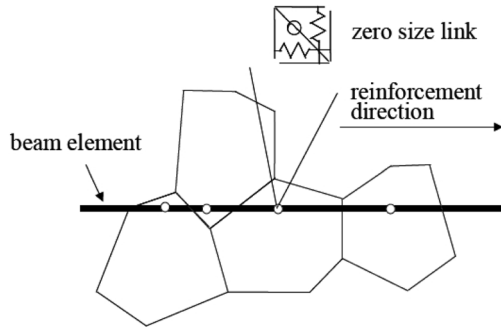


Fig. 6. Continuous fiber reinforcement with zero-size link elements.

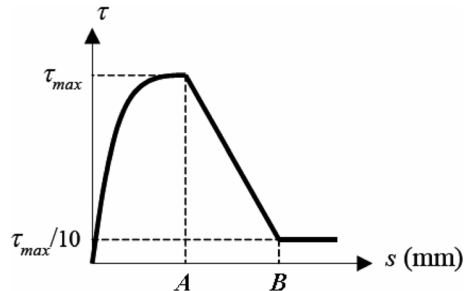


Fig. 7. Bond stress – slip relationship for zero size link.

힘진행은 50mm/min의 속도로 일정한 변위를 재하하여 실험체가 파괴될 때까지 하중 및 수직변위를 측정하고 보강섬유별 휨 저항 성능을 평가하였다.

본 연구에서는 이 두 종류의 토목섬유로 보강한 실험체를 대상으로 해석을 수행하였다. Fig. 8에 실험체의 제원과 경계조건을 도시하였다. Fig. 9에는 Voronoi diagram를 이용하여 생성한 강체요소의 체눈형상을 나타내었다. 총 2,129개의 강체요소와 6,078개의 스프링을 이용하여 체눈을 생성하였다.

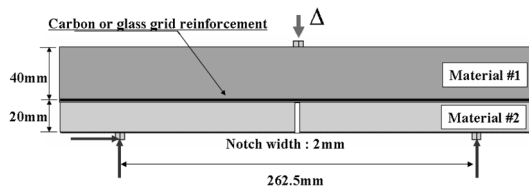


Fig. 8. Experimental set up and geometry of specimen.

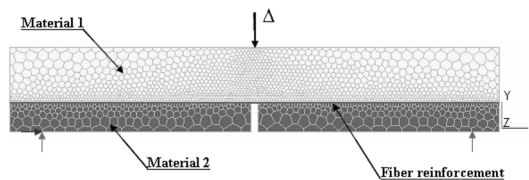


Fig. 9. Computational mesh for 3-point bending test.

Table 1. Material properties

재료	탄성계수 (GPa)	포아송비	인장강도 (MPa)	파괴에너지 (N/mm)
# 1	24.1	0.35	3.9	0.55
# 2	34.5	0.40	5.5	0.64
Glass grid	17.0	0.35	-	-
Carbon grid	39.0	0.35	-	-

3.2. 재료 특성

참고문헌 14)에는 표층과 기층의 인장강도와 파괴에너지에 대한 실험결과가 명확하게 제시되어 있지 않아 일반적인 포장체의 인장강도와 파괴에너지를 사용하여 해석을 수행하였다. Table 1에 해석에 사용된 재료특성 값들을 나타내었다. 유리섬유와 탄소섬유는 선형탄성 거동을 하는 것으로 가정하였으며, 표층과 기층의 압축거동 또한 선형탄성 거동을 하는 것으로 가정하였다.

4. 해석결과

4.1. 하중-변위 관계

4.1.1. 무보강 실험체

본 연구에서는 섬유보강 아스팔트 포장체에 대한 RBSN모델의 적용성을 검토하기 위해 우선적으로 무보강 아스팔트 포장 실험체에 대한 해석을 수행하였다. 비선형 해석기법으로는 변위제어에 기초한 Newton-Raphson법을 사용하였다. 해석을 통해 얻은 무보강 아스팔트 포장 수직하중-수직변위 관계를 참고문헌 14)에 제시된 실험결과와 함께 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 10은 RBSN 모델이 무보강 포장 실험체의 거동을 적절히 평가하고 있음을 보이고 있다. 특히, RBSN 모델은 FEM 모델에서 예측하기 어려운 최대하중 이후의 파괴거동을 매우 적절하게 예측할 수 있음을 Fig. 10을 통해서 확인할 수 있다. 또한 RBSN 모델을 통한 해석에서 균열은 초기균열 위치에서 하중가력 방향으로 하나의 주균열만이 발생하여 해석종료 시까지 성장하여 실험결과와 유사한 파괴거동을 보였다.

4.1.2. 유리섬유 및 탄소섬유 보강 실험체

토목섬유 보강 아스팔트 포장체는 모드 I 파괴가 지배적으로 발생하므로 식 (3)~(5)의 재료 인자만을 $\alpha=0.001$, $\beta=0.55$, $\kappa=1.0$ 로 변경하여 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 유리섬유와 탄소섬유의 계면특성을 결정하는 재료인자는 Table 2에 나타나

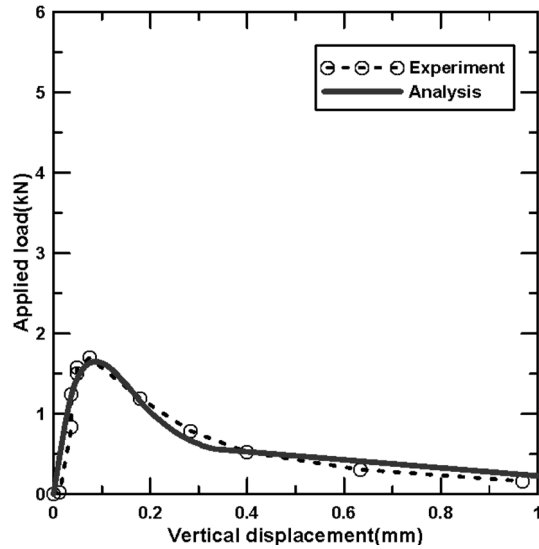


Fig. 10. Load-displacement relationship for non-retrofitted specimen.

Table 2. Material parameters for bond-slip of grid

	유리섬유	탄소섬유
A	0.2	0.2
B	0.8	0.4
ρ	0.4	0.6

었다. RBSN 모델을 통한 해석으로부터 도출된 유리섬유와 탄소섬유로 보강한 아스팔트 포장 실험체에 대한 하중-변위 관계를 실험결과와 함께 Fig. 11과 Fig. 13에 각각 나타내었다. 또한, 최종 균열 양상을 Fig. 12와 Fig. 14에 나타내었다.

Fig. 11은 RBSN 모델이 유리섬유 보강 아스팔트 포장체의 최대하중과 최대하중 시의 변위를 적절하게 예측하고 있음을 보이고 있다. 그러나 최대하중 이후의 거동에 있어서 실험결과와 많은 차이를 보이고 있다. 즉, RBSN 모델은 최대하중 이후 하중이 감소하지 않고 3.3kN 부근에서 일정하중으로 수렴하는 거동을 나타낸 반면, 실험결과는 급격하게 하중이 감소하는 취성적인 파괴거동을 보이고 있다. 이는 본 연구에서 사용된 아스팔트 모체와 유리섬유 그리드 사이의 부착-슬립 모델의 오차로 인한 결과로 판단된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 실제 실험을 통해 보강섬유와 아스팔트 모체 사이의 부착거동을 적절하게 예측할 수 있는 새로운 모델의 개발이 필요하다.

Fig. 13은 RBSN 모델이 탄소섬유 보강 아스팔트 포장체의 초기 강성을 다소 과대평가 하고 있음을

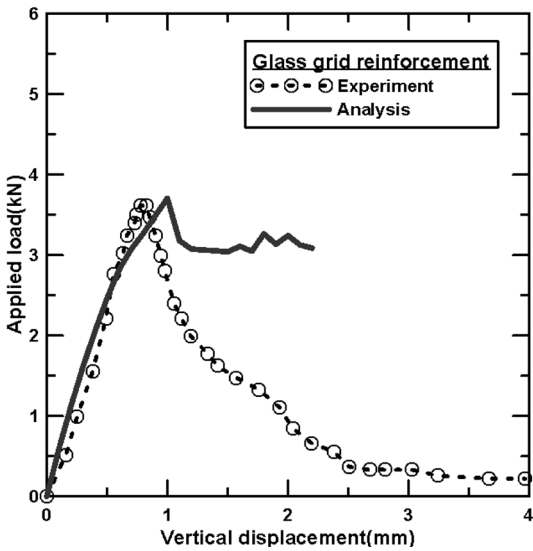


Fig. 11. Load-displacement relationship for glass-grid.

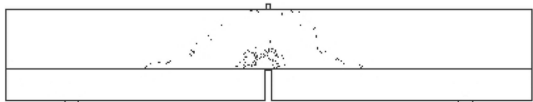


Fig. 12. Crack pattern for glass-grid.

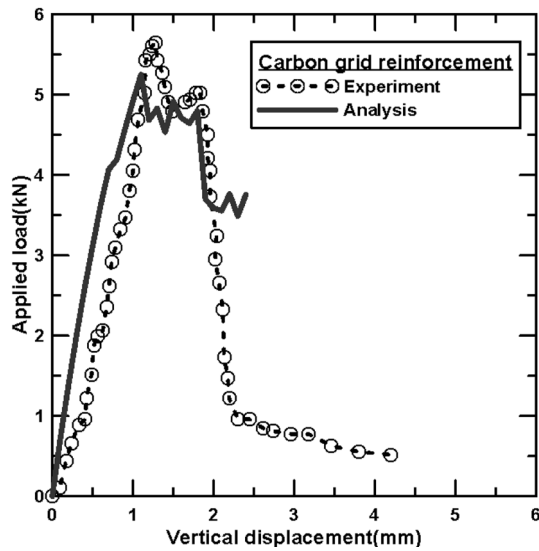


Fig. 13. Load-displacement relationship for carbon-grid.

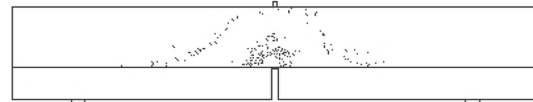


Fig. 14. Crack pattern for carbon-grid.

보이고 있다. 그러나, RBSN 모델은 유리섬유 보강 실험체와 같이 최대하중까지의 아스팔트 포장체의 휨거동을 비교적 적절하게 예측하고 있음을 Fig. 13을 통해서 확인할 수 있다.

최대하중 이후 거동에 있어서 탄소섬유 보강 아스팔트 포장 실험체의 경우도 유리섬유 보강 아스팔트 포장 실험체와 유사하게 RBSN 모델은 하중이 3.5kN까지 급격하게 감소하다 수렴하는 거동을 나타낸 반면, 실험결과는 1.1kN까지 급격하게 하중이 감소하다가 수렴하는 거동을 나타내었다. 이는 앞에서 언급한 바와 같이 RBSN 모델에 적용된 부착-슬립 모델이 실제 섬유 보강 아스팔트 포장체의 부착성능을 과대평가함으로써 발생한 문제로 판단된다.

즉, 아스팔트와 보강섬유 부착면의 부착력 증가는 섬유보강 아스팔트 포장의 균열분산효과를 증대시키는 결과를 초래하게 된다. 이로 인해 압축력을 받는 아스팔트 포장체의 단면적이 증가하여 부재 전체의 터프니스가 향상되는 것으로 판단된다. 따라서, 유리섬유 보강재뿐만 아니라 탄소섬유 보강재의 경우에도 적절한 실험을 통해 보강재와 아스팔트 계면에서의 부착-슬립 거동을 적절하게 예측할 수 있는 모델의 개발이 필요하다.

RBSN 모델을 통해서 도출된 유리섬유와 탄소섬유로 보강된 아스팔트 포장 실험체의 최종균열 양상을 Fig. 12와 Fig. 14에 각각 나타내었다. 유리섬유와 탄소섬유 모두 초기균열 대비 균열진전에 따른 균열분산효과가 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

4.2. 토목섬유 보강재의 길이방향 변형률

Fig. 15에 RBSN 모델을 통해서 도출된 보강 아스팔트 포장체의 유리섬유 및 탄소섬유 보강재의 인장변형률을 나타내었다. 이 그림은 최대하중 발생 시 각 보강섬유에 발생한 변형률을 길이방향 위치별로 나타낸 것이다. 유리섬유 보강재의 경우에는 탄소섬유 보강재와 비교하여 상대적으로 높은 변형률 집중현상이 나타나는 것을 알 수 있다. 또한, 유리섬유 보강재의 변형률은 초기균열이 발생한 위치에서 국부적으로 크게 증가하지만, 탄소섬유 보강재의 변형률은 상대적으로 넓은 범위에 분포하는 것을 확인할 수 있다.

따라서, 토목섬유 자체의 강성이 상대적으로 큰 탄소섬유를 사용하는 것이 아스팔트 포장체의 변형을 감소시키며, 변형률 국소화 현상을 저감시키는데 효과적인 것으로 판단된다.

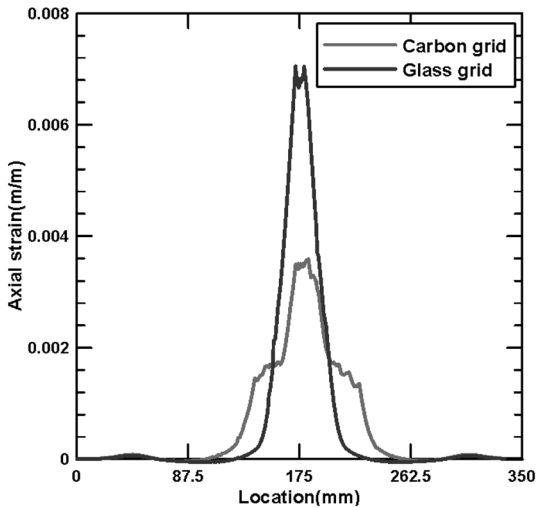


Fig. 15. Axial strain distribution for carbon & glass fiber.

5. 결론

본 연구에서는 RBSN 모델을 이용하여 토목섬유 보강 아스팔트 포장 실험체에 대한 수치해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) RBSN 모델은 무보강 아스팔트 포장실험체의 휨거동을 매우 적절하게 예측할 수 있는 것으로 나타났다.
- 2) RBSN 모델은 최대하중까지는 토목섬유로 보강된 아스팔트 포장체의 휨거동을 매우 적절하게 예측하였다.
- 3) RBSN 모델은 토목섬유로 보강된 아스팔트 포장체의 post-peak 영역에서의 수렴하중을 실험결과보다 매우 크게 예측하였다. 이는 RBSN 모델에 사용된 부착-슬립모델의 오차로 인해 발생한 결과로 판단된다. RBSN 모델을 이용하여 토목섬유 보강 아스팔트 포장체의 보다 정확한 post-peak 영역의 휨거동을 예측하기 위해서는 개선된 부착-슬립 모델의 개발이 요구된다.
- 4) 포장섬유 자체의 강성이 상대적으로 큰 탄소섬유를 사용하는 것이 아스팔트 포장체의 변형을 감소시키며, 변형을 국소화 현상을 저감시키는데 효과적인 것으로 나타났다.

감사의 글 : 이 논문은 2008년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음(This work was supported by the research grant of the Chungbuk University in 2008).

참고문헌

- 1) Predoehl, N.H. 1988 Report of Construction Evaluated Research Project Featuring Pavement Fabric Reinforcing Interlayers in AC Overlays of Distressed Flexible Pavements, California Department of Transportation, Office of Transportation Laboratory, 1989, May.
- 2) 김진환, “유리섬유 보강재를 이용한 아스팔트 포장의 균열 저항에 관한 연구”, 경희대학교 석사학위 논문, 2002.
- 3) Komatsu, T., Kikuta, H., Tuji Y. and Muramatsu, E., “Durability assessment of geogrid-reinforced asphalt concrete”, Geotextiles and Geomembranes, Vol. 16, pp. 257~271, 1998.
- 4) Lytton, R.L., “Use of Geotextiles for Reinforced and Strain Relief in Asphalt Concrete”, Geotextile and Geomembranes, Vol. 8, pp. 217~237, 1989.
- 5) 양승철, 안태봉, 조삼덕, “섬유보강 아스팔트 포장층의 균열거동 분석”, 대한토목학회 논문집, Vol. 22, No. 2-D, pp. 237~248, 2002.
- 6) Bolander JE, Saito S. “Fracture analysis using spring networks with random geometry”, Engng Fract Mech Vol. 61, pp. 569~591, 1998.
- 7) Bolander JE, Moriizumi K, Kunieda M, Yip M., “Rigid-bodyspring network modeling of cement based composites”, In: de Borst R, Mazars J, Pijaudier-Cabot G, van Mier JGM, editors. Fracture Mechanics of Concrete Structures. Lisse, The Netherlands: AA Balkema Publishers, pp. 773~780, 2001.
- 8) Bolander JE, “Simulation of shrinkage induced cracking in cement composite overlays”, Cement Concrete Res, Vol. 26, pp. 861~871, 2004.
- 9) Bolander JE, Hong GS, “Rigid-body-spring network modeling of prestressed concrete members”, ACI Struct J., Vol. 99, No. 5, pp. 595~604, 2002.
- 10) Kawai T., “New discrete models and their application to seismic response analysis of structures”, Nucl Engng Des, Vol. 48, pp. 207~229, 1978.
- 11) Saito, S., Fracture Analyses of Structural Concrete using Spring Network with Random Geometry, Doctoral Thesis, Department of Civil Engineering, Kyushu University, 1999.
- 12) Bazant ZP, Oh BH., “Crack band theory for fracture of concrete”, Mater Struct, Vol. 16, pp. 155~176, 1983.
- 13) Shima, H. and Okamura, H., “Bond-Slip-Strain Rela-

tion ship of Deformed Bars Embedded in Massive Concrete,” Proceeding of the Japan Society of Civil Engineers, JSCE, No. 378, Vol. 6, pp. 165~174, 1987.

- 14) (주)에스엔건설, 김남호, 한상훈, “카보팔트 또는 글래스팔트를 이용한 포장 균열저항성 증진용 가열압착식 아스팔트 포장 보강공법”, 건설신기술 제 501호 보고서, 2006.