

영구동토 급속안정화를 위한 롤타입강재매트의 모델링과 해석(II) - 변수해석 -

Modelling and Analysis of Roll-Type Steel Mat for Rapid Stabilization of Permafrost (II) - Parametric Analysis -

문도영¹, 강제모^{2*}, 이장근³, 이상윤⁴

Do Young Moon¹, Jae Mo Kang^{2*}, Janggeun Lee³, Sang Yoon Lee⁴

¹Nonmember, Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Kyungsoo Univ., 309, Suyong-Ro, Nam-gu, Pusan, 608-736, Republic of Korea

²Member, Researcher, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 283, Goyangdae-Ro, Ilsanseo-Gu, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, 411-712, Republic of Korea

³Member, Senior Researcher, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 283, Goyangdae-Ro, Ilsanseo-Gu, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, 411-712, Republic of Korea

⁴Nonmember, Senior Researcher, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 283, Goyangdae-Ro, Ilsanseo-Gu, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, 411-712, Republic of Korea

ABSTRACT

Using the finite element analysis model presented in accompanying paper, parametric study was performed in this paper. Various parameters were considered such as the width of wheel loads-induced permanent plastic deformation, backfill, equivalent thickness and orthogonal characteristic of steel mats. The effects of these parameters were analyzed for vertical and rotational displacements, maximum moment and tensile stress. From the parametric studies, it is found that great vertical deflection and tensile stress above allowable flexural tensile strength are developed in steel mats by the wheel loads-induced permanent plastic deformation. Backfill or increasing the thickness of steel mats is a feasible solution on this problem.

요 지

본 논문에서는 본 논문에서 제시된 유한요소해석 모델을 이용하여, 롤타입 강재매트의 폭, 후방충진, 동등 두께, 수직 및 회전 변위, 최대 모멘트 및 인장 응력 등 다양한 매개변수에 대한 파라메트릭 연구를 수행하였다. 연구 결과, 허용 휨강도를 초과하는 수직 변위와 인장 응력이 강재매트에 발생하며, 후방충진 또는 강재매트의 두께를 증가시키는 것이 이 문제를 해결하는 효과적인 방법임을 확인하였다.

Keywords : Permafrost, Steel mat, Parametric analysis, Permanent plastic deformation, backfilling

1. 서 론

AASHTO의 도로포장설계 가이드에 따르면 약 82kN의

등가단일축중(Equivalent Single Axle Load)의 통과횟수는 축하중의 크기 및 특성, 포장의 두께, 지반반력계수의 함수로 구성된다. 즉, 포장의 설계는 하중 및 지반의 특성과 포장의 휨강성 등에 의하여 결정된다(AASHTO, 1993). 이는 극지의 동토에 시공되는 가포장의 설계에서도 고려되어야 할 주요한 인자이다.

도로 또는 활주로 손상의 급속복구, 시공현장 가포장도

Received 29 Aug. 2014, Revised 19 Nov. 2014, Accepted 4 Dec. 2014

*Corresponding author

Tel: +82-31-910-0556; Fax: +82-31-910-0211

E-mail address: jmkang@kict.re.kr (J. M. Kang)

로의 포장 등에 사용되는 가포장재와 공법에 대한 다양한 해석적 연구가 진행되었다. Antognelli et al(2009)은 유리 섬유 복합체인 GFRP 판을 도로의 공동 홀의 덮개로 적용하는 연구를 수행하였으며, 차륜하중에 의한 판의 거동을 실험과 해석을 통해 검증하였다. Gartrell(2007)은 군사적 목적으로 활주로 등에 사용할 수 있는 가포장 시스템에 대한 5년간의 연구를 수행하였으며, 다양한 연결형태(핀 또는 힌지)를 갖는 포장체의 거동에 대한 실험과 해석을 수행하였다. Mak(2012)은 모듈타입의 플레이트 포장 시스템의 설계에 필요한 성능기준과 설계방안을 제시하고, 해석과 실험을 수행하였다. 특히, Mak은 성능검증을 위한 유한요소해석에서 지반의 깊이, 지반의 강성과 차륜하중의 위치 및 수에 따른 플레이트의 응력과 변위를 분석하였다. 이상과 같은 연구문헌들을 분석해보면, 설계에 영향을 미치는 주요한 변수로서, 포장체의 휨강성, 지지 지반의 반력계수와 하중의 위치와 크기 등이 주요한 변수로서 고찰되었음을 알 수 있다. 이와 더불어 동토 등의 연약한 지반에서는 영구변형도 매우 중요한 고려변수이다. 전통형 차량에 의해 러팅과 같은 영구변형이 발생하게 되면 이 부분에서는 지반지지력이 상실되기 때문에 후에 큰 변형이 발생할 수 있으며 과대한 경우 포장의 기능을 상실할 우려가 있기 때문이다.

현재 동토에 시공되는 가포장공법의 성능기준이 명확하게 제시된 바는 없으나, USAF(United States Air Force)에서는 주행성을 무엇보다 중요시하는 공항활주로 손상의 급속복구 공법에 대한 성능기준을 마련하였으며, 이를 참고자료로 활용할 수 있다. USAF에서는 유리섬유, 강재 및 알루미늄등의 매트리를 이용한 손상복구 공법의 적용시 영

구소성변형한계(permanent plastic deformation limit)를 72mm로, 연결핀의 손상갯수를 20%로 규정하고 있다(Mak, 2012).

전편에 이어 본 논문에서는 전편의 논문에 제시된 롤타입 강재매트의 해석모델 즉, 힌지연결부를 고려한 쉘해석 모델을 이용하여 다양한 인자에 대한 변수해석을 수행하였다. 본 연구에서 고려된 주요한 변수는 가포장 전 통과 차량에 의해 발생하는 영구변형의 폭, 영구변형의 되메움 여부, 강재매트의 이방성 강도특성, 강재매트의 두께와 지반반력계수의 크기에 대한 변수해석을 수행하였다. 본 변수해석의 결과는 롤타입강재매트 공법의 설계식 개발을 위한 기초자료로 활용될 수 있다.

2. 해석모델과 고려된 주요변수

2.1 기본 해석모델

동토개발을 위한 중차량의 통행은 지반 표층의 과대한 영구변형을 발생시킨다(Fig. 1 참조). 이때 발생하는 변형의 폭은 Fig. 1(a)와 같이 차륜폭 보다 크며, 차량의 통행에 의한 위치변동을 고려한다면 차륜폭의 두배에 이른다. 본 변수해석의 기본해석 모델은 Fig. 2와 같이 차륜폭의 두배에 해당하는 1m의 영구변형 위에 강재매트를 설치한 경우로 하며, 이를 “2W_nofill”로 명명하였다. 해석모델은 전편의 논문에서 개발된 힌지연결부를 갖는 쉘해석모델(전편 논문 Fig. 9 참조)을 사용하였으며, 강재매트, 연결부, 지반 및 하중과 구속조건은 본 논문의 Table 1에 정리하였다.

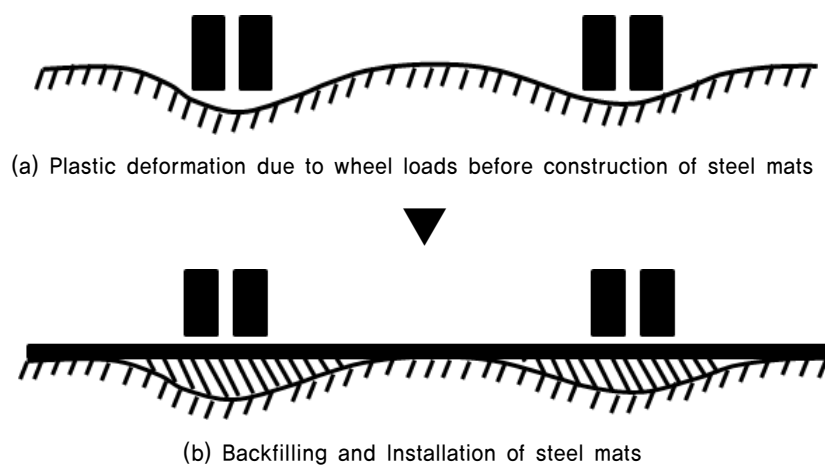


Fig. 1. Conceptual diagram for the construction of steel mats

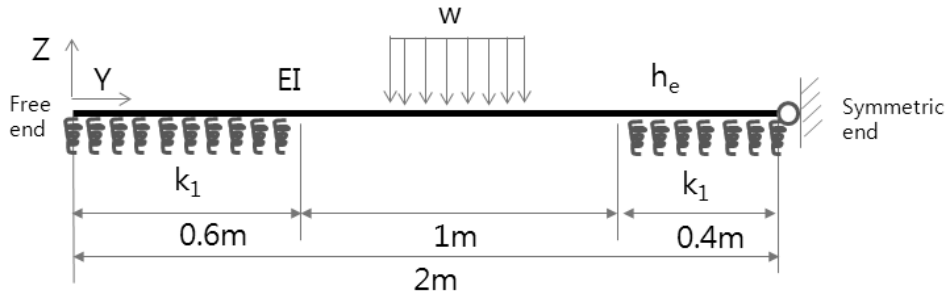


Fig. 2. Control analysis model (2W_nofill model)

Table 1. Input data summary of models for the parametric study

Part	Element		Property				
			2W*_nofill W**_nofill	2W_bf_1/2kf	2W_bf_kf	2W_nofill_10 2W_nofill_20 2W_nofill_30	2W_nofill_ortho
Steel mats	Shell (S4)	E (GPa)	200	200	200	200	$E_1 = 0.968$ $E_2 = 200$
		h_e (mm)	13,6	13,6	13,6	10,0 20,0 30,0	13,6
Foundations	Elastic foundation (kN/m ³)		$k_1 = 68,259$ $k_2 = 0$	$k_1 = 68,259$ $k_2 = 34,130$	$k_1 = 68,259$ $k_2 = 68,259$	$k_1 = 68,259$ $k_2 = 0$	$k = 68,259$ $k_2 = 0$
Link elements	JointC		$D_x = 10^6 \text{ kN/m}, D_y = 10^6 \text{ kN/m}, D_z = 10^6 \text{ kN/m}$ $R_x = 10^6 \text{ kN/rad}, R_z = 10^6 \text{ kN/rad}$ $R_y = 10^6 \text{ kN/rad} (-90^\circ \sim -28^\circ, 28^\circ \sim 90^\circ)$ $R_y = 0 \text{ kN/rad} (-28^\circ \sim 28^\circ)$				
Wheel load	Pressure		96 kN/(0,60×0,24)=667 kN/m ²				

* 비지지구간 : 1 m, ** 비지지구간 0.6 m

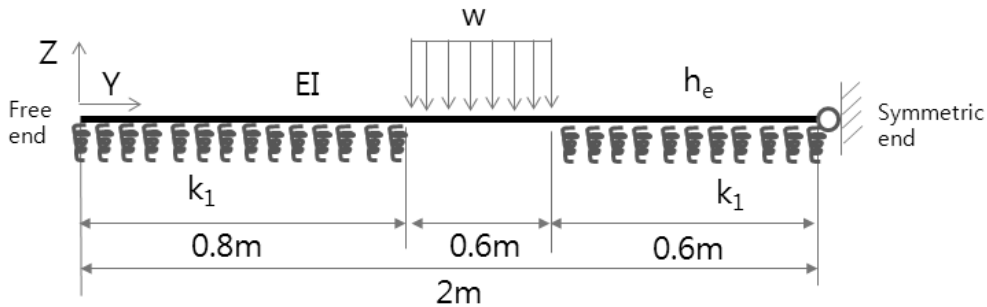


Fig. 3. Model for investigating effect of the permanent deformation width (W_nofill model)

2.2 영구변형 폭의 영향

전 통행 차량에 의해 발생한 영구변형의 폭은 주요한 거동변수이다. 본 논문에서는 되메움되지 않은 영구변형의 폭을 변수로 하였다. 이를 고려하기 위하여 해석모델을 Fig. 3과 같이 구성하였다. 다른 해석 조건은 모두 기본해석모델과 동일하지만 비지지된 구간을 1m(Fig. 2 참조)에서 0.6m(Fig. 3 참조)로 축소함으로써 영구변형의 폭에 의한 영향을 분석하고자 하였다(Table 1참조).

2.3 되메움의 영향

만일 2.2장과 같이 영구변형 위해 강재매트를 포설한 경우 차량의 주행성을 만족하지 못한다면 영구변형을 되메움한 후 강재매트를 포설할 필요가 있다. 이때 되메움 여부와 되메움 지반의 강도특성에 따른 영향을 고찰하고자 하였다. 이를 위하여 Fig. 4와 같이 기본해석모델에서 스프링지지부가 없는 영구변형 1m에 스프링을 도입하고 이때 스프링의 반력계수를 원지반과 달리 k_2 로 모델링하

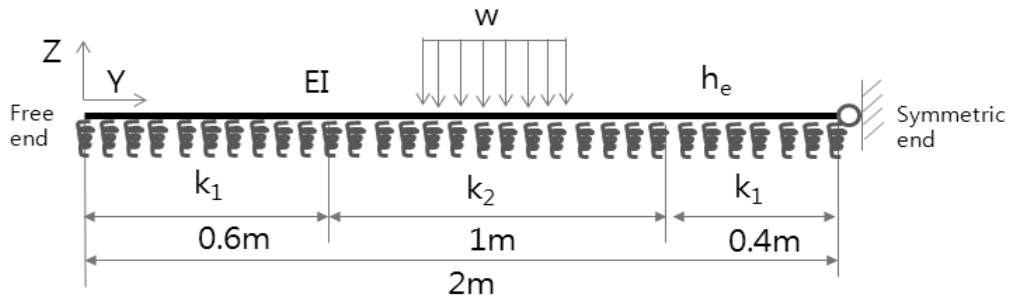


Fig. 4. Model for investigating effect of backfilling (2W_bf_1/2kf, 2W_bf_kf)

였다. k_2 값은 원지반과 동등한 되메움 작업을 가정하여 원지반과 동일한 경우(2W_bf_kf)와, 충분한 다짐이 되지 않은 경우를 가정하여 원지반의 반력계수의 절반인 경우(2W_bf_1/2kf)로 하였다.

2.4 강재매트의 등가두께

되메움되지 않은채로 강재매트가 시공되었을 때, 강재매트의 등가두께의 영향은 매우 크다고 판단된다. 다양한 강재매트의 등가두께 h_e 를 주요한 변수로 고려하였다. 기본해석모델은 2W_nofill 모델에서 Table 1에 제시한 바와 같이 강재매트의 등가두께 h_e 를 10mm, 20mm 및 30mm로 달리하여 해석을 수행하였으며, 각각 “2W_nofill_10mm”, “2W_nofill_20mm”, “2W_nofill_30mm”로 구분하였다. 지반반력계수, 강재의 탄성계수 등 다른 입력치들은 Table 1과 같다.

2.5 매트의 이방성 강도특성

강재매트의 형상이 차량진행방향에 대하여 종방향과 횡방향이 서로 다르다. 그럼에도 불구하고 본 해석에서는 종 및 횡방향의 단면강성을 산정할 때 횡방향 단면의 등가

높이 13.6mm를 사용하여 종 및 횡방향에 대하여 동일한 휨거동을 가정하여 해석을 수행하였다. 그러나, 강재매트의 종방향 단면에 대한 2차모멘트는 위치마다 다르며, 가장 취약한 부분 높이는 2.3mm에 불과하다. 따라서, 강재매트는 휨에 대하여 직교이방성의 거동을 나타낼 수 있다. 본 해석에서는 이에 대한 영향을 살펴보고자 하였다. 본 해석모델에서 종방향과 횡방향 단면의 두께를 달리할 수 없기 때문에 탄성계수를 조정하였다. 탄성계수는 다음 식 (1)에 근거하여 계산되었다. 직교이방성을 갖는 강재매트의 모델은 “2W_nofill_ortho”로 명명하였다. 지반반력계수 및 연결부의 입력치 등 다른 입력치들은 Table 1과 같다.

$$E_1 \frac{b(13.6)^3}{12} = E_2 \frac{b(2.3)^3}{12} = 2.03 \times 10^8 \quad (1)$$

($E_2 = 200 \text{ GPa}$, $b = 1000 \text{ mm}$)

3. 해석결과

변수해석을 통해 획득한 각 모델의 최대수직변위, 최대 회전변위, 최대모멘트와 최대응력은 Table 2에 정리하였다. 또한, 이후의 각장에서는 각 변수의 영향분석을 위하여 횡방향(Transverdal path)의 수직변위, 종방향(Longitudinal

Table 2. Analysis results

Models	Max. deflection (mm)		Max. angle (rad)		Max. moment (kNm/m)		Max. tensile stress (MPa)	
	Result	Ratio (%)	Result	Ratio (%)	Result	Ratio (%)	Result	Ratio (%)
2W_nofill	-57.00	100.0	0.186	100.0	16.78	100.0	544	100.0
W_nofill	-25.80	45.3	0.124	66.7	11.31	67.4	367	67.5
2W_bf_1/2kf	-12.20	21.4	0.087	46.8	4.00	23.8	130	23.9
2W_bf_kf	-7.40	13.0	0.059	31.7	2.68	16.0	87	16.0
2W_nofill_10	-109.2	191.6	0.336	180.6	15.26	90.9	916	168.4
2W_nofill_20	-28.77	50.5	0.112	60.2	20.03	119.4	300	55.1
2W_nofill_30	-16.19	28.4	0.086	46.2	25.48	151.8	167	30.7
2W_nofill_ortho	-114.5	200.9	0.721	387.6	43.07	256.7	1,397	256.8

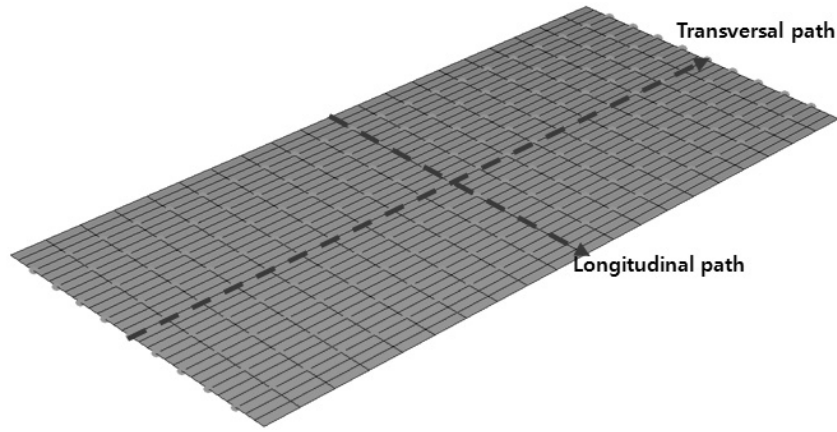
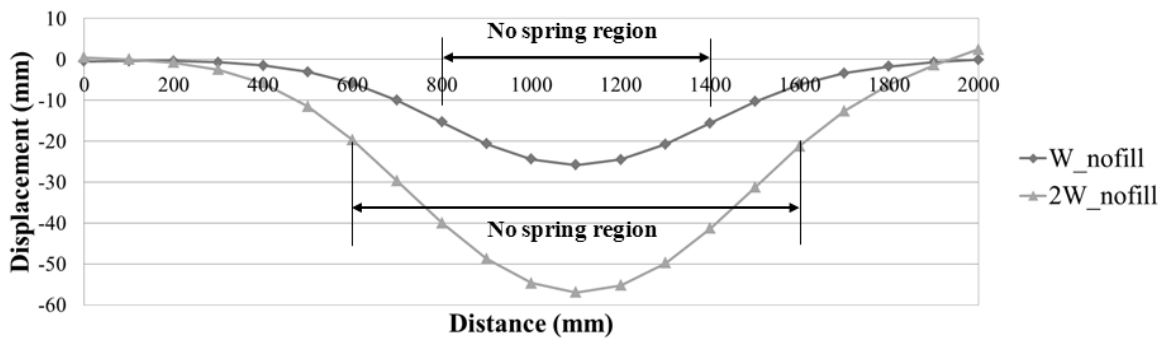
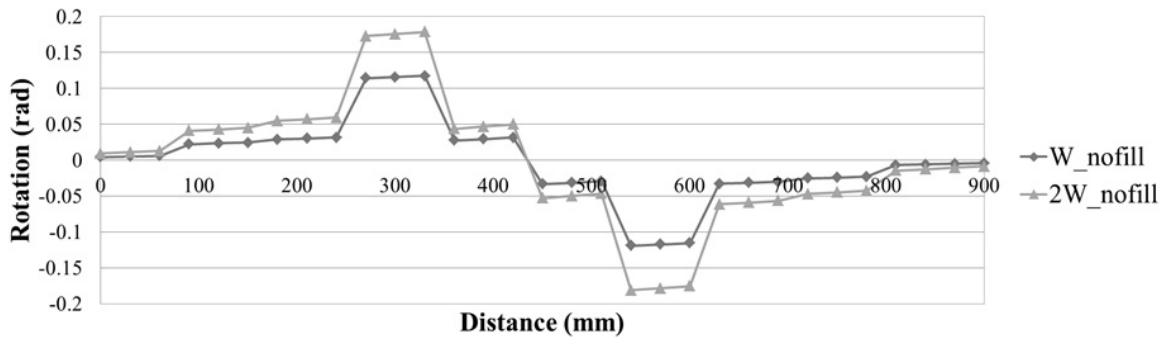


Fig. 5. Path definition for monitoring results



(a) Vertical deflection



(b) Rotation

Fig. 6. Effect of the permanent deformation width

path)의 회전변위 결과를 그래프로 나타내었다(Fig. 5 참조).

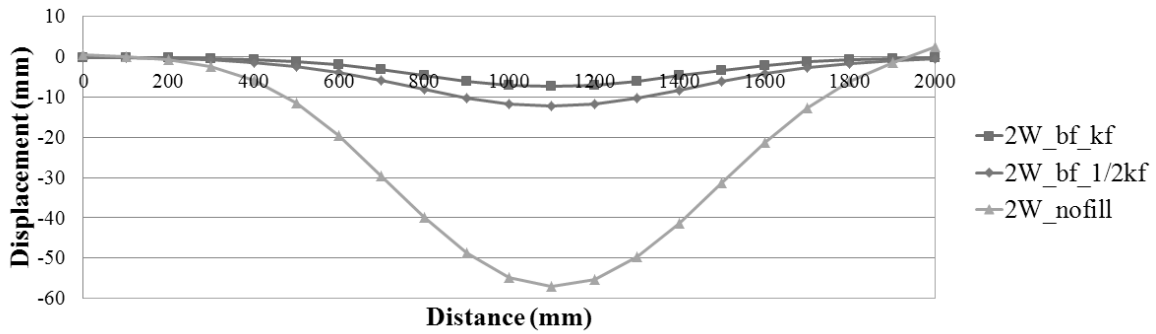
3.1 영구변형 폭의 영향

변수연구의 기본해석모델인 2W_nofill의 해석결과를 보면, 최대처짐은 차륜하중 중심에서 발생하며, -57mm가 발생하며, 최대 회전변위는 약 10.7°(0.186rad), 최대모멘트는 16.78kNm/m, 544MPa의 최대인장응력이 발생하는 것으로 나타났다. 처짐면에서는 USAF에서 제시한 활주로

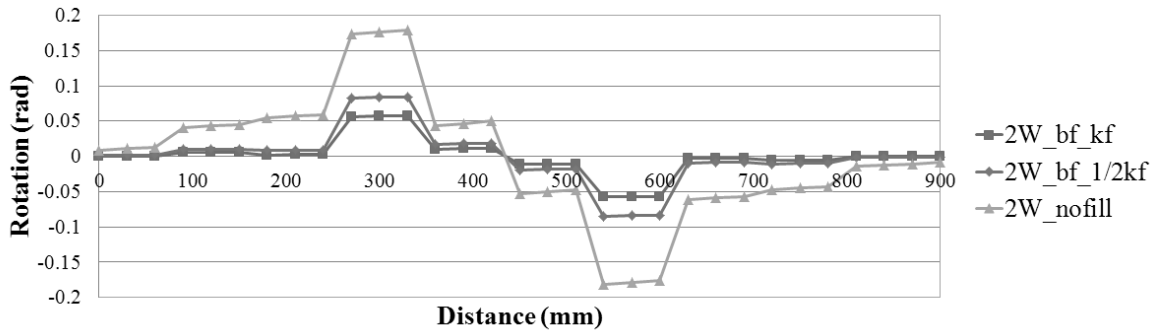
의 성능기준 72mm이하로 만족하고 있는 것을 알 수 있으나, 과도한 응력으로 강제매트의 파괴 또는 과도한 변형이 발생할 수 있기 때문에 차량의 주행성능을 확보할 수 없는 것으로 나타났다.

한편, 영구변형의 폭을 변수로 해석한 W_nofill의 결과를 살펴보면, 영구변형의 폭이 67%로 감소하면 2W_nofill 결과와 비교할 때, 최대처짐은 약 45%, 최대회전변위, 모멘트 및 인장응력은 약 67%에 불과한 것으로 나타났다.

Fig. 6은 Fig. 5에 정의된 종 및 횡방향의 거리에 따른



(a) Vertical deflection



(b) Rotation

Fig. 7. Effect of the backfilling

수직변위 및 회전변위의 결과를 비교하여 나타내고 있다. 회방향 수직변위를 살펴보면, 비지지부(No spring region) 이외의 구간에서부터 상당한 수직변위가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 종방향 회전변위의 변화를 보면, 연결부가 위치한 90mm 마다 회전변위가 집중되어 있는 것을 확인할 수 있다.

3.2 되메움의 영향

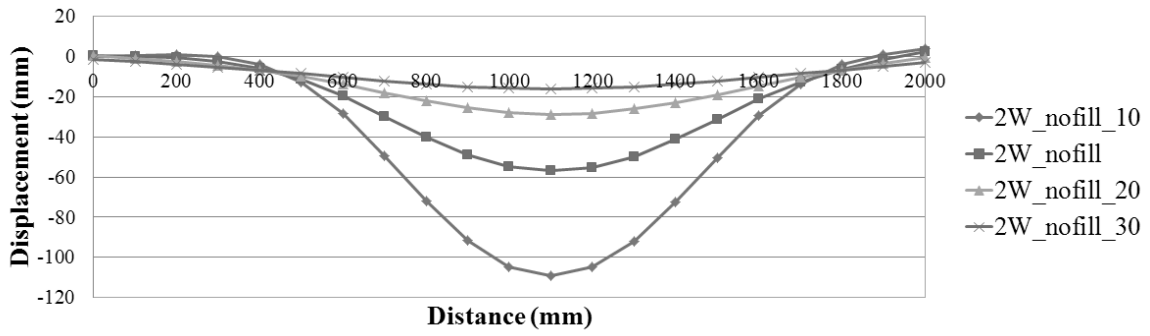
기본해석모델인 2W_nofill 모델과 2W_bf_kf, 2W_bf_1/2kf, 모델의 해석결과를 비교함으로써 되메움과 되메움 지반의 지반반력계수에 대한 영향을 분석할 수 있다. 일단, 지반 반력계수가 절반에 불과하지만 되메움을 하게 되면 최대 수직치짐, 최대모멘트와 최대인장응력은 거의 1/5로 감소하며, 힌지연결부의 회전변형은 절반으로 감소하는 것으로 확인되었다. 또한, 되메움 지반의 반력계수가 원지반과 동일한 경우 최대수직치짐, 최대모멘트와 최대인장응력은 2W_nofill의 해석결과에 13%~16%, 회전변형은 31.7%에 불과한 것으로 나타났다. 특히 2W_bf_1/2kf의 인장응력은 130MPa로 SS400강재의 허용 휨인장강도인 140MPa 이하로 감소하는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과로 미루

어 볼 때, 다른 인자 보다 되메움에 의한 영향이 지배적임으로 확인할 수 있다. 또한 원지반에 비하여 강도특성이 다소 떨어지더라도 되메움을 함으로서 차량의 주행성을 확보할 수 있다고 판단된다.

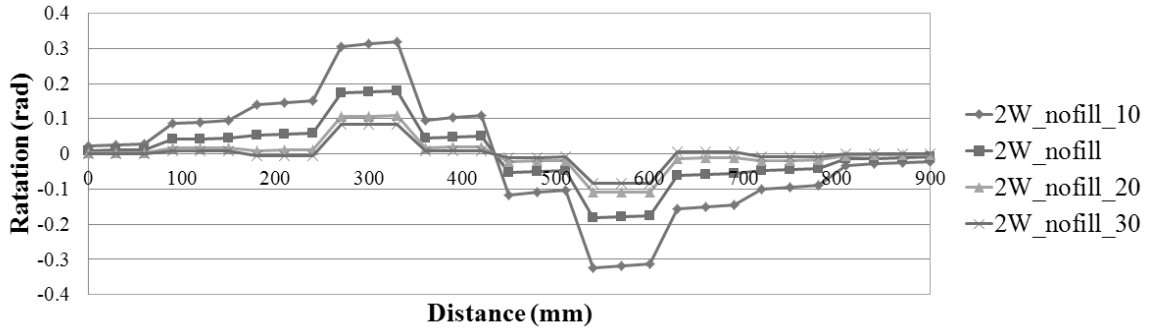
Fig. 7은 Fig. 5에 정의된 종 및 횡방향의 거리에 따른 수직변위 및 회전변위의 결과를 비교하여 나타내고 있다. 횡방향 수직치짐변화는 연속적인 반면, 종방향 회전변위는 연결부로 인하여 불연속적인 거동을 보인다. 특히 차륜 하중 재하위치의 전과 후에서 최대회전변위가 발생하는 것을 볼 수 있다. 그림에 나타난 바와 같이 되메움으로 인해 전반적으로 수직치짐과 회전변위가 상당히 감소하는 것을 확인할 수 있다.

3.3 강판 두께의 영향

예상과 같이 강판의 등가두께가 증가할 때, 최대수직치짐, 최대회전변형 및 최대모멘트와 최대응력은 큰 폭으로 감소하는 것으로 나타났다. 강재매트의 등가두께가 20mm인 경우 2W_nofill의 치짐이 절반으로 감소하는 것으로 나타났으며, 인장응력도 300MPa로 상당히 감소하지만 아직 허용 휨인장강도를 초과한다. 30mm의 강재매트를 사

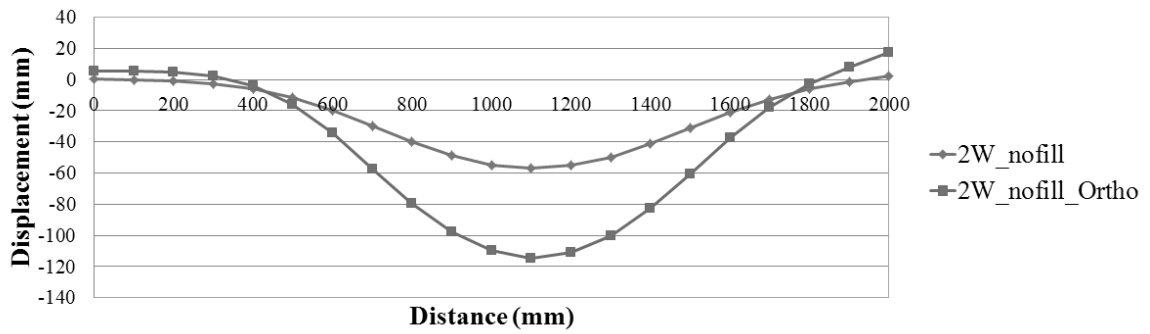


(a) Vertical deflection

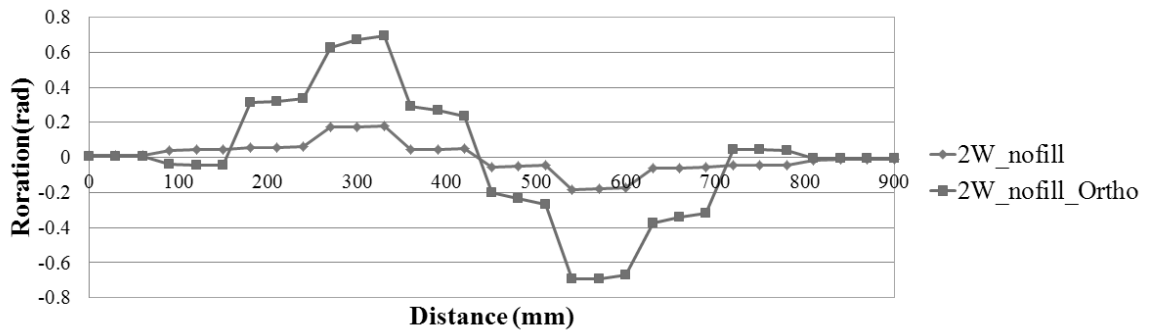


(b) Rotation

Fig. 8. Effect of steel mat thickness



(a) Vertical deflection



(b) Rotation

Fig. 9. Effect of orthogonal characteristic of steel mat

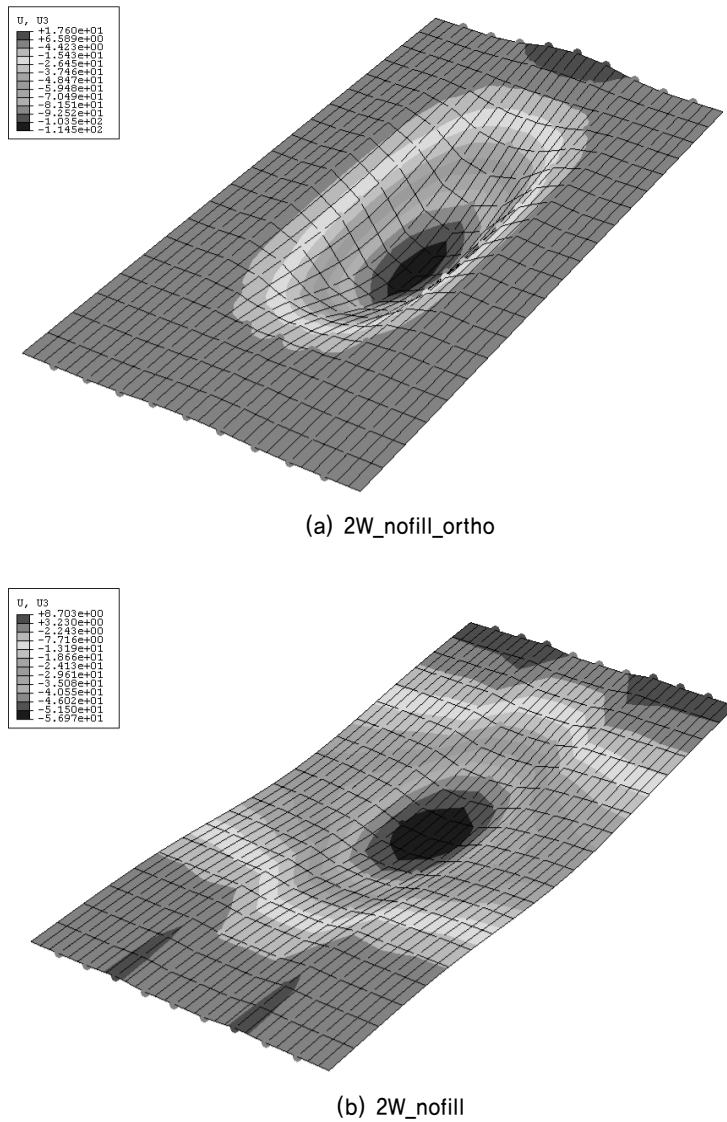


Fig. 10. Deformation shape (deformation scale factor 2)

용할 경우에는 되메움을 하지 않더라도 모든 항목에서 차량의 주행성능을 만족하는 것으로 예상된다. 반면, 강재매트의 등가 두께가 10mm인 경우 수직처짐은 약 100%나 증가하는 것으로 나타났으며, 20°의 회전변위와 1,000MPa의 인장응력이 발생하는 것으로 나타났다.

Fig. 8은 Fig. 5에 정의된 종 및 횡방향의 거리에 따른 수직변위 및 회전변위의 결과를 비교하여 나타내고 있다. 강재매트의 등가두께가 증가할수록 횡방향 수직처짐곡선이 완만한 변화를 나타내고 있다. 즉, 자유단 및 대칭끝단의 처짐과 최대처짐과의 차이가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 종방향 회전변위는 처음부터 끝까지 전구간에서 등가두께의 증가에 따라 회전변형이 감소하는 것을 확인할 수 있다.

3.4 강재매트의 이방성 영향

강재매트의 이방성의 특성은 수직 및 회전변형과 모멘트 및 인장응력에 매우 지배적인 영향을 미치는 것으로 예상된다. 최대수직처짐은 2W_nofill 해석결과의 두배에 해당하는 -114mm가 발생한다. 회전변형은 28°도의 한계치를 초과하여 41°가 발생된다. Fig. 9는 종 및 횡방향의 수직처짐과 회전변형을 나타내고 있다. 이방성의 영향은 수직처짐 보다는 회전변형에 더 큰 영향을 미치는 것으로 보인다. Fig. 10은 수직처짐의 형상을 나타내고 있다. 상대비교를 위하여 스케일 계수를 2로 동일하게 하였다. 그림과 같이 수직하중에 의한 변형이 2W_nofill의 경우 종 및 횡방향에 대하여 고르게 분포된 것을 확인할 수 있지만, 2W_nofill_ortho의 경우 차륜하중 재하부에 집중적으로

발생하는 것을 확인할 수 있다. 이는 강재매트 약측의 두께를 2.3mm로 고려함으로써, 하한계의 강성으로 고려하였기 때문이다. 따라서, 실제 차륜하중 재하시 이와같이 극단적인 국부거동을 나타낼 수는 없다고 판단되지만 최악치로서 고려할 필요가 있다.

4. 결론

본 논문에서는 전편의 논문에서 제안된 롤타입강재매트의 유한요소해석 모델을 적용하여 표준트럭 차륜하중의 재하시 주행성능에 영향을 미칠 수 있는 다양한 변수를 선정하고 각 변수에 대한 강재매트의 수직 및 회전변형과 모멘트 및 인장응력에 대한 변화를 고찰하였다. 본 변수해석 연구를 통하여 획득한 결론은 다음과 같다.

- (1) 통행 중차량에 의하여 표준트럭차륜폭의 두배에 해당하는 영구변형이 발생한 동토에 롤타입강재매트를 시공할 때, 영구변형을 되메우지 않은 상태로 시공한다면 차량의 주행성을 확보할 수 없는 것으로 판단된다. 표준트럭차륜하중 재하시 수직변형량은 활주로 급속 복구 공법에 적용하는 임계치인 72mm 이하이지만 강재매트에 발생하는 응력이 허용휨강도 140MPa을 초과하기 때문에 영구변형과 강재매트의 파괴가 우려되기 때문이다.
- (2) 롤타입강재매트의 시공후 차량의 주행성을 확보하기 위한 가장 적절한 방법은 되메움을 하는 것이며, 되메움을 하는 지반의 강도특성이 원지반 보다 다소 떨어지더라도 충분한 효과를 기대할 수 있다고 판단된다. 또한, 되메움을 하지 않더라도 강재매트의 두께를 증가시킴으로서 주행성의 확보도 가능한 것으로 해석되었는데, 이때 강재매트의 등가두께가 최소한 30mm 이상이어야 한다.
- (3) 강재매트의 거동에 가장 영향을 크게 미치는 인자는 되메움의 여부와 강재매트의 이방성의 강도특성으로 나타났다. 특히 강재매트의 이방성의 강도특성은 수

직처짐 보다는 매트의 한지연결부의 회전변형에 큰 영향을 주어 한계회전량인 28°를 초과하는 40° 이상의 회전이 발생하는 것으로 해석되었다. 이는 요철모양을 갖는 강재매트의 단면형상을 고려할 때 가장 얇은 2.3mm의 판재두께만을 휨강성으로 고려한 하한치에 해당하기 때문에 실제 이러한 극단적인 변형이 발생하지는 않을 것으로 판단되지만 설계적인 목적에서 최악치로 참고할 필요는 있다고 판단된다.

- (4) 향후 연구에서 실제 시제품을 동토와 거의 유사한 강도특성을 갖는 연약한 지반위에 포설한 후 차량재하 실험을 실시할 계획이며, 이를 해석함으로써 해석모델의 검증 및 보정을 수행할 계획이다.

Acknowledgement

This research was supported by a grant from a Strategic Research Project “Development of Extreme Cold Region Ground Stabilization Technology” funded by the Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology.

References

1. AASHTO (1993), *AASHTO Guide for design of pavement structures*, Number V. 2.
2. Robinson, T., Armstrong, C. and Fairey, R. (2011), “Automated mixed dimensional modelling from 2d and 3d cad models”, *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol.47, No.2, pp.151-165.
3. Antognelli, L. (2009), “Design and Fabrication of a GFRP Road Plate”, *Proceedings of ICCM17-Advanced Composite Materials in Construction*, Edinburgh, UK, (A1:2).
4. Gartrell, C. A. (2007), “Performance measurements of pavement matting systems by full-scale testing over differing soil strengths”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol.21, No.10, pp.561-568.
5. Mak, T. L. A. (2012), *Modular Road Plate System*, Master’s Thesis, Waterloo Univ, pp.1-108.