

빗물저장 및 활용을 위한 보도블럭구조의 최적화

조태준¹, 손병직^{2*}

An Optimization of a Walkway Block Structure for Rainwater Harvesting

Taejun Cho¹, Byung-Jik Son^{2*}

Abstract: Porous walkway blocks are constructed for the purpose already, but reserved water is easily consumed due to the bigger permeability than necessary. Furthermore, porous structure reduces the strength of blocks, which resulting cracking and settlements in walkways. In this study, we suggested a solution for given problems by determination for the location of minimum principal stress in walkway blocks against moving foot loads in order to design and verifying the determined location of minimum principal stress. An optimum design with a verification example for determined location of minimum principal stress have been presented in a two dimensional Block member on elastic foundation for pedestrian walkway for reserving water inside. The minimum value for sum of shear forces is found when x_1 is 58.58 mm(30% of total span, 200mm), while the minimum deformation is located at $x_2=80$ mm(70% of total span, 200 mm). In a modified model, When moving boundary condition(walkway foot loads) is located at $x_1(=0$ mm), the location of minimum principal stresses is found at 168 mm(84% of span, 200 mm), in which the stress concentration due to the foot load is modeled as two layers of distributed loads(reactions of foundation modeled as springs). Consequently, zero deformed reservoirs for rainwater on the neutral axis ($x_2=167$ mm) has been determined in the modified model with three dimensional FEM analysis verifications.

Keywords: Rainwater harvesting, Walkway block, Optimization, Finite element analysis

1. 서 론

경제발전과 함께 산업화와 도시화가 진행되면서 콘크리트 및 아스팔트 포장 등 불투수성 포장 구조물이 증가하고 있다.

특히, 도시에서의 자연적인 우수(雨水) 순환시스템이 파괴됨에 따라 지반에 침투되는 빗물의 양이 감소하면서 지하수가 고갈되고, 자연 및 생태적 기능이 훼손되어 도시홍수 등 자연재해로 인한 피해가 발생되고 있다.

특히, 연강수량의 대부분이 여름에 집중되는 우리나라는 집중 호우시 대부분의 빗물이 지반에 침투되지 못하고 하수도로 일시에 유입되면서 빗물의 유입 허용량을 초과하게 되어 우수에 의해 도로의 침수나 가옥 및 건물의 침수로 이어지는 도시형 침수가 빈번하게 발생된다. 반면에, 갈수기에는 연강수량의 1/5 수준에 불과하여 하천의 건천화, 악취, 지하수 보존량 저하, 용수 고갈 등 많은 문제가 발생하고 있다.

위와 같은 문제를 해결하기 위하여 근래에는 다공성 공극

이 형성된 투수성 블록을 바닥포장재로 사용하여 빗물이 지반으로 용이하게 유입되도록 하고 있다(Cho et al., 2016; Choi et al., 2013; Soe et al., 2013). 투수성 블록에 빗물이 저장될 수 있는 저류 공간을 마련하여 장마철이나 가뭄 시에 지반으로 유입되는 빗물의 유출량을 제어하도록 하였으나, 저류 공간이 형성됨에 따라 투수성 블록의 지지력이 저하되어 결국 보도 표면이 침하되거나 깨지는 문제점이 발생하였다(Cho et al., 2016).

또한 Fig. 1과 같이 최근 국내에서는 시공 또는 운영 중인 빗물저류시설의 투자에 막대한 예산이 사용되고 있으나(Seoul City, 2014), 도심지 홍수방지를 위한 목적으로는 과도한 투자로 판단되며, 저류된 빗물을 다시 전력을 소모하며 하천으로 방류하는 경우가 대부분이다. 대도시의 게릴라성 호우에 대한 대안으로 빗물저류를 위한 다공성 보도블럭이 사용되고 있으나, 투수계수가 커서 저류된 빗물이 빠른 속도로 없어지거나 탄성계수의 저하와 균열의 발생에 의한 내구성 저하문제가 있으며, 저류된 빗물의 수자원화에 대한 방향이 부재하다.

그러므로 보도하중에 대한 저항 강성을 확보하고, 내구성이 있는 저류블럭의 설계가 필요하며, 저류된 빗물의 처리 및 사용방법의 문제 또한 해결되어야 한다.

¹정회원, 대전대학교 건설시스템공학과, 부교수

²정회원, 건양대학교 해외건설플랜트학과, 부교수, 교신저자

*Corresponding author: strustar@konyang.ac.kr

Konyang University International Civil & Plant Engineering

•본 논문에 대한 토의를 2018년 2월 1일까지 학회로 보내주시면 2018년 3월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

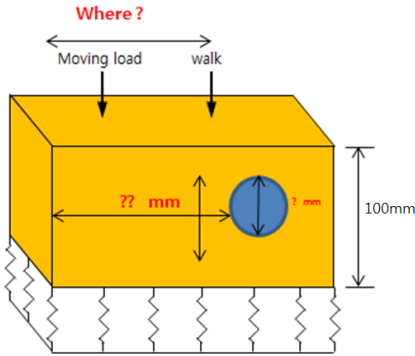


Fig. 1 Found location and distribution of reactions for CASE II. Brick on elastic foundation in pedestrian walkway for rainwater harvesting inside

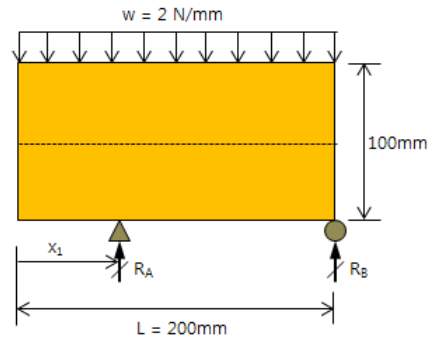


Fig. 2 Reversed brick model on elastic foundation in pedestrian walkway for reserving water inside

2. 본 론

본 논문에서 제안하는 빗물저류 블록은 상기에 논의된 문제를 해결하기 위하여 다음과 같은 해결방안을 제안하였다.

2.1 연구의 목적과 범위

Fig. 1에 보이는 대상 빗물저류를 위한 보도블럭이 탄성지반 또는 탄성매트 상에 있을 때, 이동하는 보행인의 하중에 의하여 블록구조는 지반 및 측면 다른 블록과의 접촉과 변형을 보이게 될 것이다. 블록내부에 빗물저류를 위한 공간을 설계하기 위해서 다음과 같은 연구목적을 가지게 된다.

- 1) 이동하는 외부하중에 대하여 저류블럭내에 발생하는 최대 주응력의 평가와 최소변형 발생위치의 결정
 - 2) 결정된 변형 최소위치에 빗물저류공간의 설계 및 검증.
- 위와 같은 연구목표를 위한 가정과 제약조건은 다음과 같다.

- 1) 파일럿 테스트연구로써, 허용응력설계방법을 적용,
- 2) 재료는 선형 탄성거동하는 것으로 가정,
- 3) 최소 주응력의 위치 탐색을 위한 설계는 단위폭을 가지는 2차원 평면구조에 대한 최적설계로 근사화,
- 4) 설계결과에 대한 검증은 3차원 유한요소해석방법을 사용한다.

2.2 이동랜덤하중의 근사화

빗물저류용 보도블럭은 Fig. 1에 보이는 바와 같이 탄성지반위에 위치하며, 주변 블록과의 접촉은 연직방향 자유도를 가지는 롤러(힌지)경계조건을 가정하였다. 탄성지반에 의한 반력을 모두 구하기 위한 정확한 해석은 고차 부정정 문제가 된다.

그러므로 2차원 근사구조해석을 위하여 전체좌표계를 수

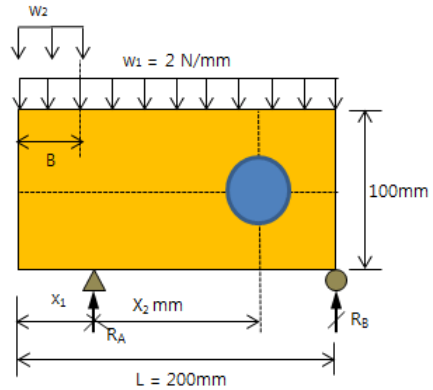


Fig. 3 Reversed brick model on elastic foundation considering uneven reactions in springs

평축에 대하여 180도 회전시켜서, Fig. 2와 같이 지반반력을 등분포하중으로 가정하고, 이동하중의 위치에서의 하중을 이동 경계조건에서의 반력으로 모델링하였다. 또한, 이동하중에 의한 응력집중에 의한 지반반력의 부등분포의 경우를 고려하는 경우에 대하여는 Fig. 3과 같이 임의의 추가적인 하중 폭과 등분포하중의 크기를 변수(x3)로 한 모델을 고려하였다.

이 두가지 경우에 대한, 이동하중에 의한 x1구간과 x2구간에서의 전단력은 각각 다음 식 (1), (2), (3), (4)와 같다.

CASE I(Fig. 2) :

$$V_x = -\omega_1 \cdot x_1 \quad (1)$$

$$V_{x2} = -\omega_1 \cdot x_1 + R_x \cdot x_2 \quad (2)$$

CASE II(Fig. 3) :

$$V_x = -\omega_1 \cdot x_1 - B \cdot \omega_2 \quad (1)$$

$$V_{x2} = -\omega_1 \cdot x_1 + R_x \cdot x_2 - \omega_2 \cdot B \quad (2)$$

여기서 반력은 Fig. 2, Fig. 3의 자유물체도로부터 다음과 같이 구한다.

CASE I(Fig. 2) :

$$\frac{w \cdot L^2}{2} - (L-x) \cdot R_x = 0, R_x = \frac{w_1 \cdot L^2}{L-x} \quad (3)$$

CASE II(Fig. 3) :

$$\frac{w \cdot L^2}{2} - (L-x) \cdot B \cdot w_2 - (L-x) \cdot R_x = 0,$$

$$R_x = \frac{w_1 \cdot L^2}{L-x} + B \cdot w_2 \quad (4)$$

이동하중에 의한 x1구간과 x2구간에서의 휨모멘트는 각각 다음 식 (5)~(8)와 같다.

CASE I(Fig. 2) :

$$M_{x1} = -\frac{w_1 \cdot x^2}{2} \quad (5)$$

$$M_{x2} = R \cdot x_2 - \frac{w_1 \cdot (x_1 + x_2)^2}{2} \quad (6)$$

CASE II(Fig. 3) :

$$M_{x1} = -\frac{w_1 \cdot x^2}{2} - \frac{w_2 \cdot 25^2}{2} \quad (7)$$

$$M_{x2} = R \cdot x_2 - \frac{w_1 \cdot (x_1 + x_2)^2}{2} - w_2 \cdot 50 \cdot x_2 \quad (8)$$

Fig. 2 및 Fig. 3과 같이 등분포하중이 작용하는 단순보로 가정된 CASE I의 빗물저류블럭에서 이동하는 좌측 경계조건이 x1위치에 반력(실제는 이동 보도활하중)으로 작용하여, Fig. 4(a)에서 보이는 바와 같이 하중위치의 좌측 및 우측에 최대크기의 전단력을 발생시킬 수 있으며, 또 다른 최대전단력은 우측 끝단의 경계조건에 작용할 수 있다. 그러므로 X1위치에서의 전단력의 크기와 우측끝단 전단력 크기의 비교가 필요하다. Fig. 4(b)의 CASE II에서는 추가적인 등분포하중 w2에 의한 추가적인 반력을 고려하며, Fig. 4(c)의 휨모멘트 선도에서는, CASE I, II 각각의 경우에 대한 이동경계조건에 의한 반력의 영향으로 반력하부의 부모멘트와 우측 경계조건사이의 어느 지점 (x2지점)에서 최대정모멘트가 발생할 것이다.

x1이 정해지면, x2가 결정되지만, 이동경계조건까지의 거

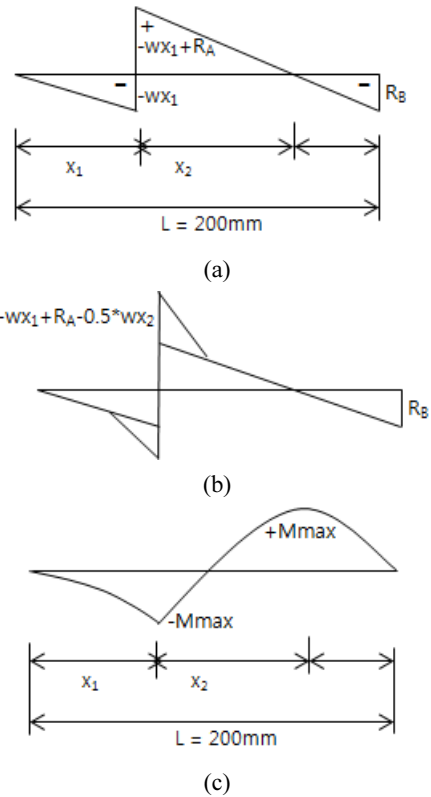


Fig. 4 (a) Shear force diagram for CASE I, (b) for CASE II, and (c) Bending moment diagram due to a walking load on rainwater harvesting block located on an elastic foundation

리 x1은 임의의 지점이 될 수 있으므로, 설계방안은

- 1) x1위치에 대한 확률분포모델의 적용
- 2) $0 \leq x_1 \leq L$ 인 모든 경우에 대한 최대 주응력의 위치별 검토 등이 가능하다. 그러나 1)안의 경우는 많은 경우수를 고려하고, 정확한 확률분포모델의 결정이 어려운 단점이 있고, 2)안의 경우 최대 및 최소응력의 차이가 거의 없을 수 있고, 무한대의 경우수를 고려하여야 한다.

그러므로 본 연구에서는 Fig. 3(a), (b)의 기하조건으로부터 x1지점의 좌우 최대전단력(식 (1)~(4))의 차이가 최소화 되도록 목적함수를 구성하고, 최대 정모멘트와 부모멘트(식 (5)~(8))가 각각 같은 값에 가까워지도록 제약조건을 설정하는 최적설계를 하고, 결정된 위치의 표면을 돌출시키거나 또는 경사를 주어 보도블럭상의 이동하중이 결정된 위치에 주로 작용하도록 다음절과 같이 유도하고자 한다.

2.3 이동랜덤하중의 최적위치

본 연구에서는 보행자의 랜덤한 하중 작용위치를 결정하는 문제를 해결하기 위하여 적용한 방법은 주응력의 최소화를 위한 최적화 문제의 해결과, 정해진 결과를 위한 하중작용위치의 고정을 위한 돌출된 보도블럭의 제작을 제안하였다.

최적화 기법은 Microsoft 사의 Excel Spread sheet 프로그램에서 제공하는 GRG(Generalized Reduced Gradient Method, Waren et al., 1987) 방법을 적용하였다. 설계 최적화는 GRG 방법에 의해 일반화 된 감소된 차원 구배 방법이 적용된다. GRG 설계 방법은 종속 변수를 지운 후에 남아있는 변수에 대한 현재의 제약 조건을 최소화하기 위한 문제를 개선하기 위해서 개선된 후에도 활성 상태로 유지되는 방법으로, 등가 제약 조건을 이용한다(Vanderplaats, 1988).

Convex simplex 방법과 GRG 알고리즘은 LP의 Simplex 방법과 비슷한 근사방법이다. 감소된 GRG 방법과 CSM은 비음수의 결정변수로 설정된 선형제약 조건에서 작동하는 반면, GRG 방법은 의사결정 변수에서 상한 및 하한 경계를 갖는 비선형 제약 조건으로 절차를 일반화한다.

따라서 GRG 방법은 본질적으로 기초의 체적을 최소화하기 위한 convex simplex 방법의 일반화이다.

$$\text{최소화 목적함수: } f(x) = \text{최대전단력 좌우의 합력} \quad (9)$$

$$\text{제약조건: } g_i(x) \leq 0 \quad (i = 1, \dots, m) \quad (10)$$

$$a_i \leq x_i \leq b_i \quad (i = 1, \dots, n) \quad (11)$$

SIMPLEX 방법과 비교할 때 GRG 방법은 비용 절감 대신 감소된 GRG 방법을 사용한다. 독립변수는 GRG 방법의 경계에 있을 필요가 없으며, 반복되는 각 평가에서 값을 변경할 수 있다.

목적 함수는 독립 변수를 조정하기 위해 감소되며, 가용성은 선형제약 문제를 목표로 하는 개발된 방법을 조정하기 위해서 종속 변수를 포함하도록 유지되었다. 비선형 제약 조건은 Newton-Raphson 방법을 사용하여 일반화 될 수 있으며, 기본 변수의 변경과 변수 제거 공식을 사용하여 감소된 차원 차감 벡터를 연속적으로 얻을 수 있다.

전단응력과 휨응력의 계산 비교를 통하여 대부분의 구간에 서 각각 발생하는 최대 모멘트의 크기를 같게 함으로써, 경계 조건의 위치에 의하여 발생하는 응력을 최소화하였다. 이동 하중에 의한 전단력과 전단응력의 최소화를 위해서는 하중 작용점 좌우의 전단력의 절대값의 크기가 같거나 최소화 되도록 식 (12)와 같이 목적함수를 정하였다.

$$\begin{aligned} & \text{Minimize sum of shear force at } x=x1 \\ & \text{subject to} \\ & M^{+max} - M^{-max} \leq 0 \end{aligned} \quad (12)$$

Fig. 5(a) Case I와 (b) Case II의 제약조건은 각각 최소부모

x1=	58.58	Vleft=	-117.16	M=-	-3431.62
x2=	82.843	Vright=	165.6854	M+=	3431.299
L=	200	R=	282.8454	V x2=	2.62E-08
objective=	68.63458			; Vmin	
g1=	-0.31779			; M- = M+	

(a) Optimum locations of x1 and x2 for CASE I

B=	118.4524	mm			
w2=	3.104543	N/mm			
x1=	1E-04	Vleft=	-183.871	M=-	-5444.97
x2=	167.4908	Vright=	383.8702	M+=	5444.97
L=	200	R=	567.7407	Vx2=	1.90E-08
objective=	-200			; Vmin	
g1=	7.2E-07			; M- = M+	

(b) Optimum locations of x1 and x2 for CASE II

Fig. 5 Converged optimum locations for minimizing principal stresses in the block structure

멘트 M-와 M+의 절대값이 같아지도록 설정하였다.

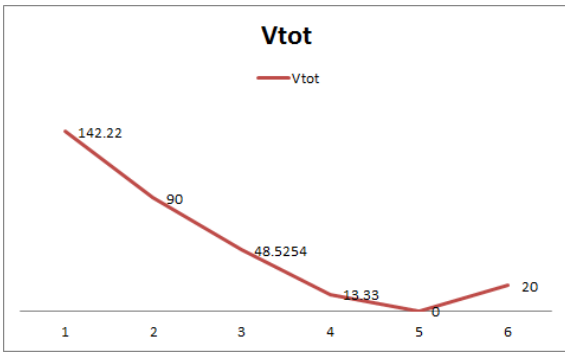
CASE I에서 결정된 최적해에 대한 간단한 검증을 위하여, Appendix I와 같은 Visual Basic Application을 작성하여 x1을 0부터 140 mm까지 증가시키면서 하중(이동경계조건) 작용점에 근접된 좌우측 전단력의 합력과 x1지점의 부모멘트와 x2지점의 정모멘트의 합력을 Fig. 6과 같이 나타내고, 각 위치에서의 전단응력, 휨응력 및 주응력을 Fig. 7과 같이 구하였다.

빋돌저류블럭에서의 최소 주응력 발생을 위한 최적 위치(x1)는 Fig. 5와 같이 CASE I에서는 x1=58.58 mm(폭 200 mm의 29.29% 위치)로, CASE II에서는 x1=54.68 mm로 결정되었으며, 이동위치별 전단응력과 휨응력 및 주응력(식 (13))을 구하였다.

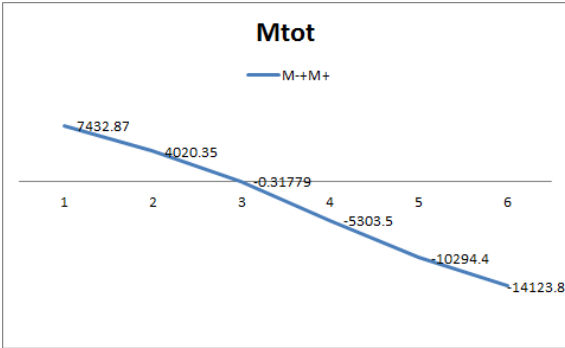
$$\sigma_{max} = \frac{\sigma_x}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x}{2}\right)^2 + (\tau_{xy})^2} \quad (13)$$

여기서, 휨응력 $\sigma_x = \frac{M \cdot y}{I}$; M은 지반반력(w=2 N/mm, w2=3.105 N/mm)에 의한 모멘트, y는 중립축으로부터의 거리, I는 단면2차모멘트, 전단응력 $\tau = \frac{V \cdot Q}{I \cdot b}$; V는 지반반력에 의한 전단력, Q는 중립축으로부터의 단면에 대한 단면1차모멘트, b는 블록단면의 z축방향 폭의 길이이다.

응력의 연산과 최소주응력을 찾고, 연산후처리를 위하여 Visual Basic(Excel-VBA)를 이용하여 3.1절의 내용을 부록 1과 같이 프로그래밍하였으며, Fig. 6에 보이는 바와 같이 x1지점의 전단력과 전단응력을 최소화 시키는 위치는 100 mm (200 mm 길이의 50% 지점)이지만 휨응력의 최소화는 x1의



(a) Vtotal from 0 to 140 mm



(b) Mttotal from 0 to 140 mm

Fig. 6 Variation of total shear forces and total bending moments (a) at $x=x_1$, and (b) $x=x_2$

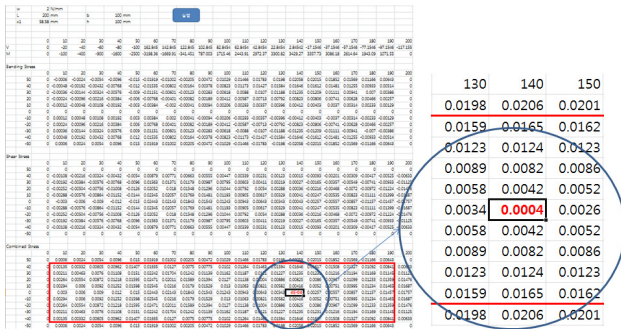


Fig. 7 Found minimum principal stress on neutral axis and location x_2 in CASE I via developed program

위치가 약 60 mm(200 mm 길이의 30% 지점)에서 발견된다. 전단력과 휨응력의 크기차이에 의하여 전단응력의 변화보다 휨응력의 변화가 중요함을 알 수 있으며, 전단응력과 휨응력을 합성한 주응력의 최소값을 최적위치에서 계산하면, x_1 이 58.58 mm일 경우, Fig. 7과 같이 $x_2=80$ mm일 때, 중립축에서 $\sigma_{max} = 0.004$ MPa 이 확인된다.

2.4 CASE I에 대한 최적설계 결과 및 고찰

CASE I에서는 지반반력의 Saint-Venant 효과가 없는 것으로 가정하여 균일한 반력이 동일한 스프링계수를 사용하여

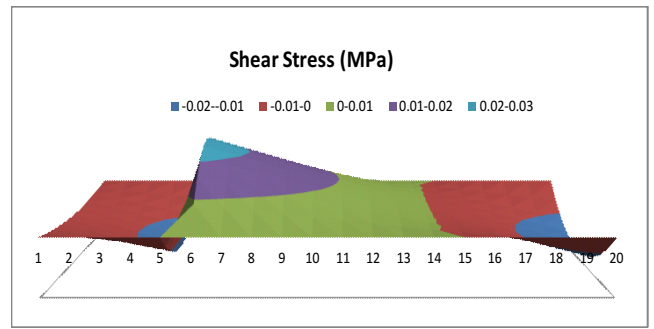


Fig. 8 Variation of shear stresses in sections(x axis varies from 0 to 100 mm)

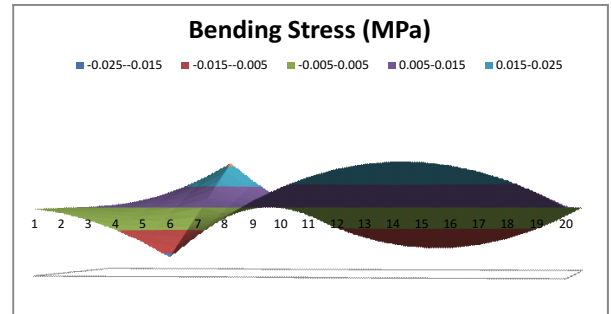


Fig. 9 Variation of bending stresses in sections(x axis varies from 0 to 100 mm)

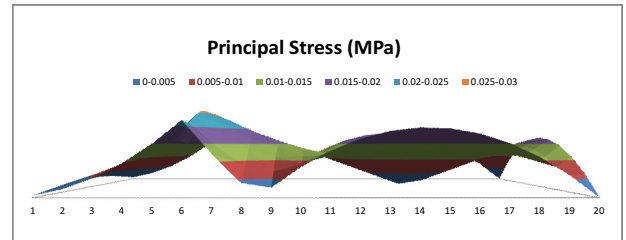


Fig. 10 Variation of principal stresses in sections(x axis varies from 0 to 100 mm)

나타난 것으로 근사화한 모델이었다. 빗물저류를 위한 빈 공간의 확보설계가 연구목적이므로 단면내에서의 전단응력, 휨응력과 주응력에 대한 계산을 통하여 단면내부에서의 정확한 공간 위치의 결정이 필요해진다.

그러므로 개발된 x 축상 하중 이동에 의한 단면내 응력평가 프로그램(Appendix I)을 이용하여 Fig. 8~10과 같이 응력을 계산하고 단면내에서의 최소응력지점을 파악하였다. 그 결과 Fig. 10의 단면내 주응력도에서 최적하중위치(x_1)에 의한 최소응력발생지점(x_2)는 140 mm 지점으로 결정되었고, 중립축 위치로 결정되었다.

x_2 지점(80 mm, $x_1+x_2=140$ mm)은 최대정모멘트 발생지점으로 단면내 상하단에서는 최대응력이 발생하지만, 중립축에서는 휨응력이 0이 되므로, 전단력보다 상대적으로 크게 발생

하는 휨응력의 최소위치의 주변에서 주응력의 최소위치가 발견된다.

2.5 CASE II 최적설계결과와 검증

하중과 반력의 응력집중을 고려하는 경우에, 블록의 위치별 주응력평가에 의한 최소주응력의 발생위치는 Fig. 11과 같

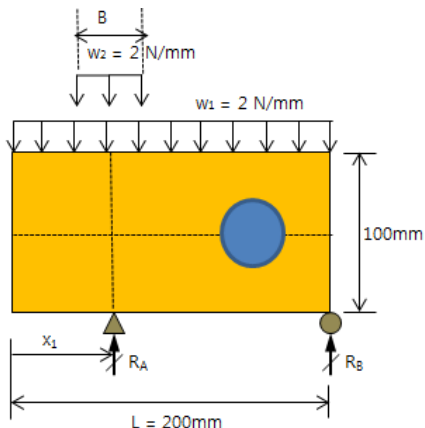


Fig. 11 Found location and distribution of reactions for CASE II

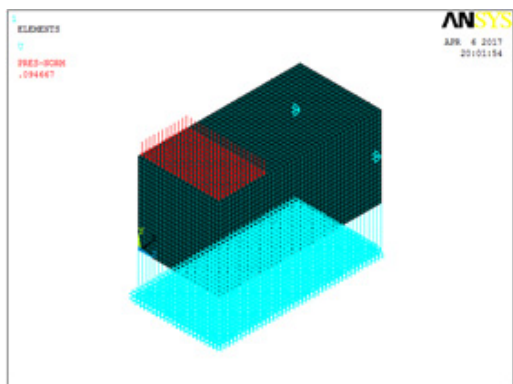


Fig. 12 Load, boundary conditions and reactions for the target structure

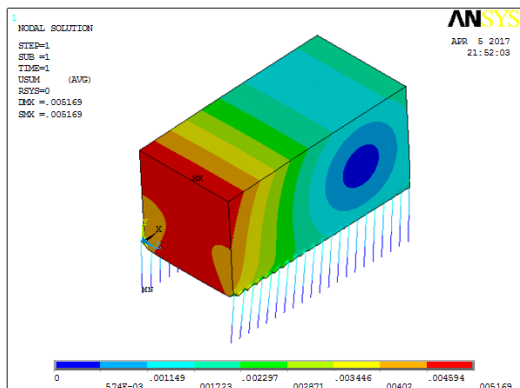


Fig. 13 Principal stresses of the walkway block

이 CASE II에서 좌측끝단에서 137.63 mm(폭 200 mm의 69% 위치)로 결정되었다.

앞 절에서 논의된 이동하중에 의한 주응력의 최소값 위치 결정은 임의의 강성과 스프링상수를 입력하여 재료 및 지반 경계조건에서 독립된 위치결정방법이었다. 실제 지반 또는 탄성매트 상의 빗물저류 보도블럭의 거동과 최소변형 발생위치의 검증을 위하여 3차원 유한요소해석방법에 의한 설계결과와의 검증을 수행하였다.

100 mm×100 mm×200 mm의 크기를 가지는 가정된 보도블럭을 5 mm의 정방향 솔리드 20×20×40=16,000개의 요소로 분할하고, 설계시 사용한 하중과 물성값을 입력하였다. 스프링과 측면 롤러경계조건은 폭(두께)방향의 양단 끝에 Fig. 12와 같이 2열로 배열하였으며, 변형결과는 Fig. 13과 같다.

Fig. 13에서 보이는 바와 같이, CASE II에서 제시한 단면 중립축상의 $x_2=137.63$ mm와 매우 근접한 140 mm위치에서 전체구조응답에서 최소변형이 발생하는 것이 확인되었다.

설계결과에서 제시한 $x_1=54.68$ 위치까지 압력하중을 재하하였고, 2차원모델에서 가정된 한지경계조건과 3차원모델에서의 측면블럭과의 접촉면을 하부높이 1/2지점까지로 가정하여 롤러경계조건의 차이로 인하여 3.7%의 오차가 발생하였으며, 선형탄성해석에 의한 결과이므로 취성재료인 보도블럭의 소성변형과 균열발생시의 거동은 예측이 어렵지만, 균열의 발생과 더불어 손상영역에서는 탄성계수가 급격한 감소를 하므로, 빗물저류공간의 확보를 위한 본 연구의 최적설계 결과는 실제의 보도블럭에서도 적용이 가능할 것으로 판단된다.

3. 결론

본 연구에서는 빗물의 저장과 활용을 위한 투수성 블록에 빗물이 저장될 수 있는 저류 공간을 최적 설계하여, 기존의 투수성 블럭과 비교하여 저류 공간이 형성됨에 따라 투수성 블록의 강성저하와 균열발생 등의 문제점을 해결하고자 한다. 지반경계조건과 이동하중을 서로 바꾸어 근사모델링하고, 위치 탐색을 위한 설계는 단위폭을 가지는 2차원 평면구조에 대한 최적설계를 3차원 유한요소해석방법을 사용하여 검증하였다.

균일한 지반반력을 모델링한 등분포하중 CASE I 모델해석에서는 휨응력의 최소화는 이동하중의 위치가 200 mm 길이의 30% 지점일 경우에 발생하여서, 최소의 주응력 발생을 위한 최적설계결과에서는 폭 200 mm의 29.29% 위치로 결정되었다. 이동위치별 전단응력과 휨응력 및 주응력에 대한 포스트 프로세싱을 통하여 정확한 최소주응력에 연직방향은 휨모멘트가 최소값인 중립축과 일치하였다.

응력집중에 의한 불균일한 지반반력을 모델링한 등분포하중 CASE II모델의 해석에서는 휨응력의 최소화는 이동하중의 위치가 폭 200 mm의 27.34% 위치일 경우에 x2는 69% 위치에서 최소 주응력이 발생하였으며, 3차원 유한요소해석결과와 매우 근접한 결과를 보였다. 추가적인 실험검증과 형상최적화를 통하여 결정된 최소주응력 위치에 빗물저류공간을 설계하여, 도심지 환경문제의 해결에 적용하고자 한다.

감사의 글

이 논문은 2017년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No.2017R1D1A1A-02017700).

References

- Cho, T. J. (2016), Rain water harvesting walkway block(Submitted patent: 10-2016-0108893), 2016, Korean Intellectual Property Office.
- Choi, K.-J., *Pavings specially adapted for footpaths, sidewalks or cycle tracks*, 1012311770000, Korean Intellectual Property Office.
- Polak, E. (1971), *Computational Methods in Optimization, A Unified Approach*, Academic Press.
- Seoul City (2014), *The status and plan for rainwater harvesting facilities*, 2014.07.
- Soe, Y.-S. (2013), *Development of manufacture technology of lightweight pavement block using incineration ash*, Final Report 1500000712, Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement, 2013.
- Tu, J. and Choi, K. K. (1999), A new study on reliability-based design optimization, *J. Mech Des, ASME*,121(4), 57-64.
- Vanderplaats, G. N. (1988), AUTOMATED DESIGN SYNTHESIS, Engineering Design Optimization Inc.
- Waren, A. D., Hung, M. S., and Lasdon, L. S. (1987), The Status of NLP Software: An Update, *Operations Research*, 35, 489-503.

Received : 06/02/2017

Revised : 10/23/2017

Accepted : 11/01/2017

요 지 : 다공성 보도 블록은 이미 많이 사용되지만, 큰 침투성으로 인해 블록의 강도를 감소시키고, 균열 및 침전의 문제를 만든다. 본 연구에서는 최소 주응력의 결정된 위치를 설계하고 검증하기 위하여, 이동하는 체중하중에 대한 보행로 블록에서의 최소 주응력의 위치를 결정함으로써, 주어진 문제에 대한 최적해를 제시하였다. 최소 주응력의 결정된 위치에 대한 검증 예를, 내부에 빗물을 저장하기 위한 통행보도의 탄성 기초상의 2 차원 블록 부재에 대하여 제시하였다. 전단력의 합력에 대한 최소값은 x1이 58.58 mm(전체 스패의 30%, 200 mm)일 때, 최소 변형은 x2 = 80 mm(전체 스패의 70%, 200 mm)에 있다. 수정 된 모델에서, 이동하는 경계 조건(보도 보행 하중)이 x1(= 0 mm)에 있을 때, 168 mm(스패의 84%, 200 mm)에서 최소 주응력의 위치가 발견되었으며, 스프링으로 모델링 된 기초의 응답에 대하여 모델링하였다. 결과적으로, 중립 축(x2 = 167 mm)에서의 빗물저장을 위한 보도블록의 “0”변형 위치가 3 차원 FEM 분석 검증을 통하여 결정되었다.

핵심용어 : 빗물 저장, 보도 블록, 최적화, 유한 요소 해석

Appendix I Evaluation of stresses for parametric verifications

```
Sub stressevaluation_Click()
  Range(Cells(7, 2), Cells(100, 100)).Clear

  w = Range("C2").Value: L = Range("C3").Value: x1 = Range("C4").Value
  b = Range("G3").Value: h = Range("G4").Value

  Ra = w * L ^ 2 / (L - x1) / 2
  Ix = b * h ^ 3 / 12

  For i = 1 To L / 10 + 1
    x = 10 * (i - 1): Cells(7, i + 2) = x

    If x1 > x Then
      Cells(8, i + 2) = -w * x
      Cells(9, i + 2) = -w * x ^ 2 / 2
    Else
      Cells(8, i + 2) = -w * x + Ra
      Cells(9, i + 2) = -w * x ^ 2 / 2 + Ra * (x - x1)
    End If
  Next i

  For i = 1 To L / 10 + 1
    x = 10 * (i - 1): Cells(12, i + 2) = x

    For j = 1 To h / 10 + 1
      y = -10 * (j - 1) + h / 2: Cells(12 + j, 2) = y
      M = Cells(9, 2 + i): Cells(12 + j, 2 + i) = M * y / Ix
    Next j

    kk = h / 10 + 4
    x = 10 * (i - 1): Cells(12 + kk, i + 2) = x
    For j = 1 To h / 10 + 1
      y = -10 * (j - 1) + h / 2: Cells(12 + kk + j, 2) = y
      V = Cells(8, 2 + i): Q = b / 2 * (h ^ 2 / 4 - y ^ 2): Cells(12 + kk + j, 2 + i) = V * Q / (Ix * b)
    Next j

    kk3 = kk: kk = 2 * (h / 10 + 4)
    x = 10 * (i - 1): Cells(12 + kk, i + 2) = x
    For j = 1 To h / 10 + 1
      y = -10 * (j - 1) + h / 2: Cells(12 + kk + j, 2) = y
      sigma = Cells(12 + j, 2 + i): tau = Cells(12 + kk3 + j, 2 + i)
      Cells(12 + kk + j, 2 + i) = Abs(sigma / 2) + Sqr((sigma / 2) ^ 2 + tau ^ 2)
    Next j
  Next i

  mn = 10000000000#
  For i = 2 To L / 10
    For j = 2 To h / 10
      If mn >= Cells(12 + kk + j, 2 + i) Then
        mi = 12 + kk + j: mj = 2 + i
        mn = Cells(mi, mj)
      End If
    Next j
  Next i
  Cells(mi, mj).Font.Bold = True
  Cells(mi, mj).Font.Color = vbRed
  Range(Cells(12 + kk + 2, 2 + 2), Cells(12 + kk + 2 + h / 10 - 2, 2 + 2 + L / 10 - 2)).BorderAround ColorIndex:=3, Weight:=xlThick
  Range("B53").Value = mn
  'Range("B53").Value = Application.WorksheetFunction.Min(Range(Cells(12 + kk + 2, 2 + 2), Cells(12 + kk + 2 + h / 10 - 2, 2 + 2 + L / 10 - 2)))

End Sub
```
