

유한요소해석을 이용한 응력적층 바닥판의 구조성능평가*¹

신 유 경*² · 엄 창 득*² · 이 상 준*^{2†}

Structural Performance Evaluation on Stress-Laminated Timber Bridge Deck Using Finite Element Analysis*¹

Yukyung Shin*² · Chang-Deuk Eom*² · Sang-Joon Lee*^{2†}

요 약

본 연구에서는 유한요소해석을 이용하여 응력적층 바닥판의 구조성능을 평가하였다. 바닥판의 구조성능은 처짐과 응력, 압체력의 변화로 평가할 수 있다. 하중 재하 후 바닥판의 처짐 형상을 확인한 결과 하나의 판처럼 거동하는 것을 확인하였다. 이는 압체력에 의해 각 부재 사이에 마찰력이 작용했기 때문이다. 또한 초기 압체력과 산출된 압체력을 비교한 결과 바닥판의 처짐과 함께 압체력이 감소했다. 이는 하중에 의해 바닥판의 변형이 발생하면서 작용하는 힘이 줄어들어 따라 압체력이 감소한 것으로 판단된다. 그러나 재료의 소성 특성이 제대로 반영되지 않았기 때문에 잔류응력과 잔류변형이 고려되지 않았으므로 추후 이에 대한 연구가 필요하다.

ABSTRACT

This paper represented the finite element analysis to estimate structural performance of stress-laminated deck, which is determined by deflection, stress, and aging characteristics of tensioning. After loading, the deflected shape showed plate behavior because pre-stressing make frictional force between each member. Compared between initial post-tension and the results, pre-stressing forces were decreased with deck deflection. This is because deflection occurred in the deck so that pre-stressing decreased due to load reduction. However, material plasticity was not considered so that advanced researches should be performed.

Keywords : finite element analysis, stress-laminated deck, plate behavior, pre-stressing force

*1 접수 2013년 9월 27일, 채택 2013년 12월 23일

*2 국립산림과학원 임산공학부 재료공학과. Division of Wood Engineering, Department of Forest Products, Korea Forest Research Institute, Seoul 130-712, Korea

† 교신저자(corresponding author) : 이상준(e-mail: lsjoon@forest.go.kr)

1. 서 론

본 논문은 응력적층 형식을 적용한 교량의 바닥판에 초점을 두고 연구를 진행하였다. 응력적층 바닥판에 대한 연구는 주로 응력적층보의 휨거동과 압체력 변화에 대한 연구가 진행되었다. 기존 연구에 따르면 응력적층보의 부분 모델을 구성하여 실험적인 연구를 수행하였다(강수창 외, 2009; 엄창득 외, 2011). 본 연구에서는 국내 최초의 차량용 목조교량인 한아름교를 해석예제로 사용했다. 바닥판을 부분모델이 아닌 전모델로 구성하였으며, 이에 대한 거동과 압체력 변화를 산정하기 위해 유한요소해석을 수행하였다. 먼저 구조용 집성재를 이용한 응력적층 바닥판의 거동 매커니즘을 분석하고 유한요소 모델을 구성하였다. 또한 유한요소 해석 결과를 토대로 차량하중에 대한 응력적층 바닥판의 압체력의 변화를 확인하고 압체력이 손실되는 구조적 거동을 분석하였다.

2. 응력적층재를 적용한 교량 바닥판

2.1. 응력적층 바닥판

목조교량은 일반적으로 목재를 연결하여 바닥판을 구성한다. 콘크리트, 강재 등과 합성된 구조로 존재하며, 강봉을 이용하여 프리스트레싱(prestressing)에 의한 압체력을 가해주기도 한다. 본 논문에서는 여러 가지 형식의 목조교량 바닥판 중에서 국내 최초의 차량용 목조교량인 한아름교에 적용된 응력적층 바닥판(stress-laminated deck)에 초점을 맞추었다. 응력적층 바닥판이란 Fig. 1과 같이 목재를 강봉으로 연결한 후 압체력을 가하는 방식이다. 이것은 조립 후 볼트를 조여 압체력을 가하는 포스트텐션(post-tension) 방식으로, 프리스트레스 손실시 재압체를 통해 프리스트레스힘을 복원할 수 있다는 장점이 있다. 강봉에 가하는 프리스트레싱에 의한 압축력과 목재 사이의 마찰력을 통해 여러 개의 조각들이 하나의 상판으로 거동하는 구조이다. 목재를 연결할 때, 프리스트레싱을 주는 방법 이외에도 접착제로 연결하거나 못을 박는 방법이 있지만, 이러한 구조들에 비해



Fig. 1. Stress-laminated deck (Top view).

유지관리에 유리하며 성능이 더 좋은 장점이 있다. 또한 기존 연구에 따르면 응력적층 바닥판은 하중을 받으면 직교이방성 판(orthogonal plate)의 거동을 보인다. 즉, 교축방향의 물성치와 교축직각방향의 물성치가 서로 다른 판의 거동을 보이는 것으로, 실제 설계할 때에는 이러한 특성을 이용해 복잡한 판해석하는 대신 등가의 특성을 갖는 보로 해석하여 설계한다(USDA, 2005).

2.2. 바닥판 압체력

응력적층 바닥판을 설계할 때에는 허용응력을 만족하고 충분한 강성을 유지하여 허용된 처짐 조건을 만족시키는 것이 중요하다. 또한 목재 사이의 마찰력 발생을 위한 최소 압체력을 만족해야 하고, 압체력에 의한 목파를 방지하기 위한 최대 압체력 조건이 있다. 따라서 응력적층 바닥판에서 가장 중요한 설계변수는 강봉의 프리스트레싱에 의한 압체력이라고 할 수 있다. 압체력이 너무 작으면 목재들이 하나의 판으로 거동하는 것이 아니라 각각 따로 거동하게 된다. 충분한 마찰력이 작용하지 못한 것이다. 반면, 압체력이 너무 크면 압축에 의한 파괴가 발생할 수 있다. 따라서 응력적층 바닥판을 이용하기 위해서는 적당한 압체력을 가하는 것이 매우 중요하다.

기존 연구에 따르면 압체력은 온도, 상대습도와 같은 외부 환경조건과 함수율, 수축과 같은 내부 환경조건에 영향을 받는다. 시간이 지남에 따라 감소하게 된다(Kainz 등, 1998). 압체력의 감소로 응력적층 바닥판의 성능이 하락할 수 있기 때문에 재압체하는 것이 매우 중요하다. 압체력 변화에 대한 연구는 Pousette (2002), Dyken (2010) 등에 의해 이루어졌지만 온도

Table 1. KS F 3021 glulam mechanical properties

구분	강도등급	허용응력						
		X-X축에 대한 힘		Y-Y축에 대한 힘		축하중		
		F_{bxx}	E_{xx}	F_{byy}	E_{yy}	F_t	F_c	E
대칭	12S-37B	12.0	11,000	8.0	10,000	8.0	10.0	10,000
	12S-33B	11.0	10,000	7.5	9,000	7.0	8.0	9,000
	10S-30B	10.0	9,000	7.0	8,000	6.5	7.5	8,000
	9S-27B	9.0	8,000	6.0	7,000	6.0	7.0	7,000

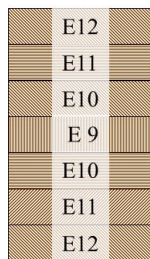


Fig. 2. Glulam 10S-30B.

와 함수율의 단순 변화만 고려했기 때문에 실제 교량 바닥판으로 사용했을 때와 상이한 결과를 보인다. 따라서 유한요소해석을 통해 실제 모델에 가까운 바닥판과 환경을 정의하여 해석을 진행하였다.

2.3. 재료 물성

바닥판의 재료는 국산 리기다소나무를 이용한 10S-30B 구조용 집성재를 사용하였다. 구조용 집성재는 일정한 두께의 판재를 평행하게 접착시켜 만든 구조용 부재로 부재로 KS F 3021 (Table 1)에 규정되어 있다. 10S-30B 집성재는 Fig. 2에서 보듯이 같이 판재 7장을 대칭으로 적층한 구조로 양끝에 강도가 높은 목재를 배치하고 가운데 부분에는 상대적으로 강도가 낮은 목재를 배치하여 휨저항에 유리한 구조를 가지고 있다. 또한 목재의 섬유방향을 일치시켜 배치했기 때문에 길이방향과 다른 단면방향이 각각 다른 성질을 갖는 직교이방성(orthotropic)의 특성을 가지고 있다.

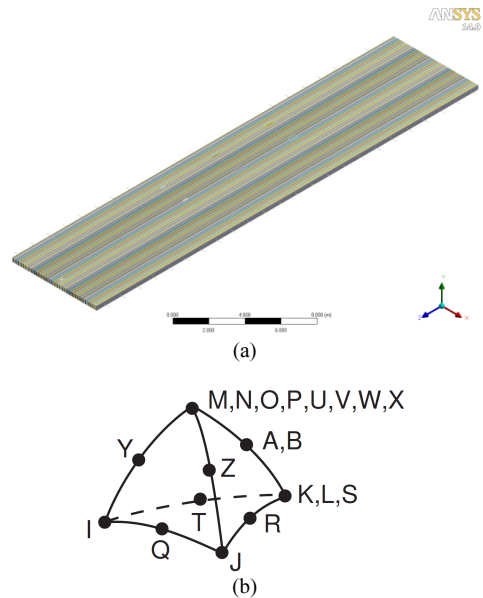


Fig. 3. (a) Stress-Laminated Deck Model, (b) Solid 186 Element.

3. 유한요소법을 사용한 응력적층 바닥판 모델링

3.1. 바닥판 해석 모델

응력적층 바닥판의 압축력 변화를 확인하기 위해 해석 모델을 구성하였다. 유한요소 구조해석 프로그램인 ANSYS Workbench 14.0을 사용했다. 모델링을 위해서 기존 논문을 참고하여 Fig. 3과 같이 슬리트

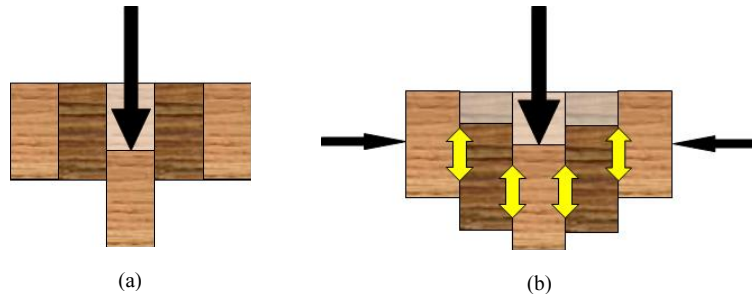


Fig. 4. (a) Behavior of the Laminated Deck, (b) Behavior of the Stress Laminated Deck.

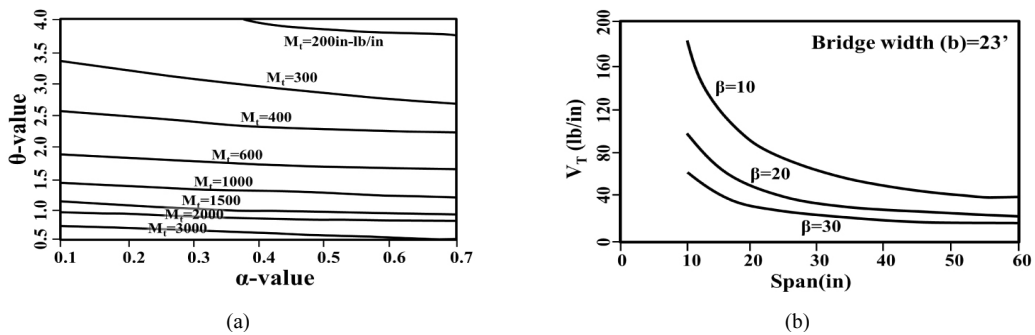


Fig. 5. Graph for Determining (a) the Transverse Moment, (b) the Transverse Shear Force of Deck (USDA).

요소(SOLID 186)를 이용하여 바닥판 모델을 구성하였다. 솔리드 요소를 이용하여 해석함으로써 응력적층 바닥판의 판거동 여부를 확인할 수 있었다. 응력적층 바닥판은 목재 간의 마찰력에 의해 일체거동하므로 목재와 목재 사이의 접촉은 마찰력이 작용하도록 frictional로 정의했고, 마찰계수는 기존 연구결과를 토대로 0.5를 이용했다(Park *et al.*, 2011).

3.2. 압체력 모델

응력적층 바닥판에서 가장 중요한 변수는 강봉의 프리스트레싱에 의한 압체력이다. 압체력의 유무에 따라 다른 거동을 나타낸다(Fig. 4-(a), (b)). 따라서 적당한 프리스트레스 힘을 주는 것이 중요하다. 실험을 통해 적당한 프리스트레스 힘의 정도를 제시한 선행연구가 있다(강수창 외, 2009; 김광모 외, 2010). 또한 USDA (United States Department of Agriculture, 미국 농무부) 기준에 제시되어 있는 설계방법을 이

용할 수도 있다(USDA, 2005). 본 논문에서는 USDA의 설계법을 이용하여 다음과 같이 프리스트레스 힘을 산정했다.

프리스트레스에 의한 바닥판의 거동은 크게 모멘트에 의한 휨거동과 전단력에 의한 미끄러짐 거동으로 나누어진다. 이러한 이유로 USDA에서는 프리스트레스 힘을 결정하기 위해 모멘트와 전단력 조건을 이용한다. 식 (1)과 식 (2)를 이용해 값을 산출한 후 Fig. 5-(a)에 적용해 모멘트를 구한다. 같은 방식으로 식 (3)과 Fig. 5-(b)를 이용해 전단력을 구한다. 그 결과 식 (4)와 같다.

$$\alpha = \frac{2G_{TS}}{\sqrt{E'C_B E_{TS}}} \quad (1)$$

$$\theta = \frac{b}{2L} \left(\frac{E'C_B}{E_{TS}} \right)^{0.25} \quad (2)$$

$$\beta = \pi \left(\frac{b}{L} \right) \sqrt{\frac{E' C_B}{2G_{TS}}} \quad (3)$$

$$M_T = 3,600 N \cdot mm / mm, \quad V_T = 19 N / mm \quad (4)$$

응력적층 바닥판에 작용하는 최소 압축응력은 식 (5)와 식 (6)으로 계산된 값 중 큰 값 이상이어야 하며 최소 0.28 MPa (40 psi) 이상이어야 한다.

$$N_1 = \frac{6M_T}{t^2} = 0.24 MPa \quad (5)$$

$$N_2 = \frac{1.5V_T}{t\mu} = 0.27 MPa \quad (6)$$

여기서 μ 는 마찰계수를 의미한다. 계산된 값들이 모두 0.28 MPa보다 작은 값이므로 최소 압축응력 N 은 0.28 MPa이다. 또한 초기도입 프리스트레스 힘은 손실률을 감안해 계산된 값에 2.5배한 값을 이용한다. 따라서 초기도입 프리스트레스 힘 N_i 은 0.7 MPa이다. USDA에 따르면 긴장재 최대간격은 바닥판 단부로부터 윤축중심까지 거리가 0.6 m일 경우 1,473 mm로 규정하고 있다. 이에 맞추어 프리스트레스용 강봉의 간격은 1,250.0 mm로 정하였다.

프리스트레싱 간격과 바닥판의 두께까지 모두 고려하여 소요 프리스트레스 힘을 산출하면 다음과 같다(식 (7)). 소요 프리스트레스를 해석 초기의 압체력으로 사용했다.

$$F_{PS} = N_i S_p t = 262,500 N \quad (7)$$

4. 해석 예제

4.1. 해석 모델

응력적층 바닥판에 하중이 작용하였을 때의 바닥판의 거동과 압체력 변화를 확인하기 위해 유한요소 해석을 수행하였다. 해석모델은 앞서 3장에서 정의

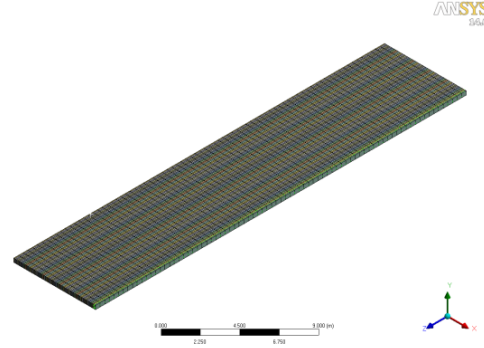


Fig. 6. Finite Element Model.

한 바닥판모델과 압체력 모델을 사용하였다. ANSYS Workbench 14.0을 이용하여 Fig. 6과 같이 해석모델을 구성하였다. 이 모델은 한아름교의 바닥판을 모델링한 것으로 너비 6,600 mm, 길이 29,930 mm, 두께 300 mm로 구성되어있다.

목재에 가해지는 압체력은 강봉의 프리스트레싱에 의한 것이다. 본 논문에서는 해석의 편의성을 위해 프리스트레싱을 구현하는 대신 목재에 직접 압축력을 가하는 방법을 사용했다. 앞서 구한 소요 프리스트레스 힘을 압축력으로 환산해 압체력 모델을 구성하였다.

4.2. 해석 결과

4.2.1. 바닥판의 구조적 거동

구성된 모델을 바탕으로 유한요소해석을 수행하여 응력적층 바닥판의 구조적 거동을 확인했다. 하중에 따라 발생하는 바닥판의 처짐과 응력을 산정함으로써 구조적 거동을 확인할 수 있었다. 사용하중은 도로교 설계기준(2010)에 명시된 1등교 차량하중인 DB-24를 한 차선에 적용했고, 가장 큰 처짐이 발생할 것으로 예상되는 지점인 지간의 중앙에 배치했다.

응력적층 바닥판은 예상대로 판거동을 보였다. 설계식에서 도출한 프리스트레스 힘을 도입했기 때문에 차량하중에 대하여 충분한 마찰력을 받을 수 있었다. 이에 따른 처짐은 8.74 mm가 발생했고, 허용 처짐인 125 mm에 한참 못 미치는 값으로 목재 바닥

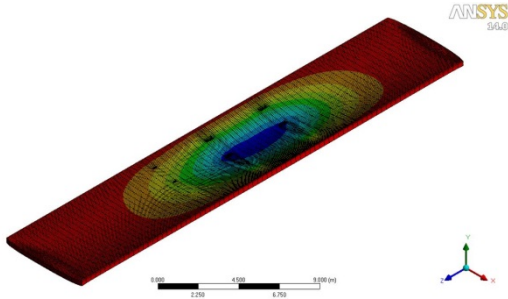


Fig. 7. Deflected Shape.

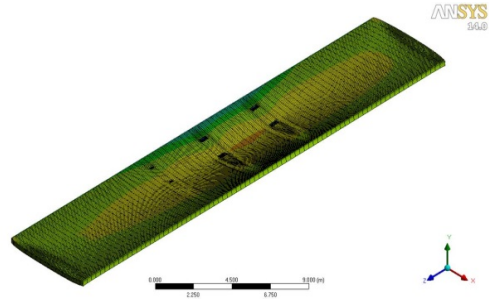


Fig. 8. Stress Distribution.

판이 차량하중에 대하여 충분한 강성을 가짐을 알 수 있다. 이때의 처짐 형상은 Fig. 7과 같다. 또한 차량하중에 대한 응력을 산정한 결과 바닥판의 최대 응력이 3.65 MPa였으며, 이 값은 허용응력의 46%에 해당하는 값이다. 유한요소해석을 통해 그 동안의 실험연구로는 알 수 없었던 세부적인 응력분포까지 확인할 수 있었다(Fig. 8).

4.2.2. 압체력 변화

응력적층 바닥판의 성능 중 가장 중요한 것이 하중에 따른 압체력의 변화이다. 따라서 본 연구에서는 하중을 가했을 때의 압체력을 산정하여 설계 프리스트레스힘과 비교하였다. 압체력은 바닥판이 받는 반력으로부터 산출했다.

해석 결과, 바닥판에 수직방향의 하중을 가하면 압체력이 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이것은 하중의 작용이 바닥판의 변형에너지와 압체력으로 분산되기 때문이라고 할 수 있다. 바닥판 반력의 변화를 통해 압체력의 손실 Δf_{PS} 을 계산하면 식 (8)과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta f_{PS} &= \frac{\Delta \sigma}{\sigma_{PS}} = \frac{\Delta \sigma \times A}{\sigma_{PS} \times A} = \frac{\Delta P}{P_{PS}} \\ &= \frac{\Delta P}{262,500 \times 24} = \frac{6,300,000 - 5,508,500}{6,300,000} \\ &= 0.126 \end{aligned} \quad (8)$$

압체력의 손실은 초기 압체력 대비 감소한 압체력으로 계산된다. 여기서 P_{PS} 는 해석초기 총압체력으로,

해석모델로 이용한 한아름교에서 262,500 N의 프리스트레스를 총 24곳에 가해주었기 때문에 총압체력으로 6,300,000 N을 사용하였다. 또한 ΔP 는 바닥판 반력의 감소량을 나타낸 것이다.

하중을 가한 후 압체력이 초기 값의 약 10%가 줄었으며, 부재의 파괴가 발생하지 않고 여전히 판거동을 보였다. 또한 하중 제거 후에 압체력은 다시 초기 값으로 돌아오기 때문에 하중제거 후에도 재압체 조건인 초기값의 40%를 상회하게 된다. 따라서 차량하중 DB-24에 대한 압체력 기준을 만족해 안전한 거동을 보인다.

5. 결 론

본 연구에서는 실제 규모의 차량용 목조교량 모델을 이용하여 응력적층 바닥판의 응력 변화에 대한 유한요소해석 연구를 수행하였다. 국내 최초의 차량용 목조교량인 한아름교를 해석예제로 사용하였고, 1등급 기준의 차량하중인 DB-24를 적용하였다. 하중에 따른 바닥판의 처짐과 응력분포를 바탕으로 응력적층 바닥판의 구조성능을 평가하고 압체력 변화 산정을 위해 프리스트레스 손실을 계산하였다.

목재가 하나의 판이 아닌 각재로 구성되었지만 응력적층 형식을 통해 마찰력에 의한 판거동을 보였다. 또한 차량하중에 대한 처짐과 응력 기준을 만족함으로써 대형 구조용 부재로서의 목재의 안전성을 확인했다. 압체력의 감소도 재압체 기준인 초기 압체력의 40%를 만족했다. 그러나 재료의 특성과 환경조건을 완벽하게 모사하지 못했기 때문에 실제 한아름교에

발생한 처짐과 압체력 값과는 상이한 결과가 나타났다. 특히 목재의 소성특성을 반영하지 못해 잔류 처짐과 잔류 응력을 무시한 결과이기 때문에 이를 보강한 연구를 수행할 예정이다.

사 사

본 연구는 2013년도 국립산림과학원 리서치 펠로우십의 지원에 의해 이루어진 것입니다.

참 고 문 헌

1. 강수창, 김광모, 심상로, 고현무, 김현중. 2009. 응력적층보 거동에 대한 실험적 연구. 대한토목학회 정기학술대회 요지집. pp. 146-149.
2. 국토해양부. 2010. 도로교 설계기준. 한국도로교통협회.
3. 김광모. 2012. 교량 구조재로 활용하기 위한 목재의 이해. 대한토목학회지. 60(9): 10-20.
4. 김광모, 심국보, 김병남. 2010. 방부처리 리기다 소나무 응력적층재의 휨거동 특성. 목재공학. 38(4): 306-315.
5. 엄창득, 이상준, 김광모. 2011. 응력적층재의 볼트 압체력 경시변화. 목재공학. 39(6): 505-511.
6. 서석구, 오명석, 정준. 2012. 리기다 소나무 방부 집성재를 활용한 차량용 목조교량 실험체 설계. 대한토목학회지. 60(9): 45-55.
7. 이한식, 이경호. 2012. 차량용 목구조 교량에 사용된 구조용 집성재의 재료특성. 대한토목학회지. 60(9): 21-44.
8. AASHTO. 2008. AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 4th edition, 2008 Interim Revisions, Section 9: Decks and Deck System. Washington, D.C. American Association of State Highway and Transportation Official.
9. ANSYS. 2009. ANSYS element reference release 12.1. ANSYS Inc.
10. Chun-Young Park, Chul-Ki Kim, Hyung-Kun Kim, Jun-Jae Lee. 2011. Evaluation of friction properties according to normal force and direction of wood grain in real contact area. Journal of Korean Wood Sci & Tech. 39(5): 437-443.
11. Dyken T. and H. Kepp. 2010. Monitoring the moisture content of timber bridges. Proceeding of international conference on timber bridges: pp. 223-235.
12. Kainz. J. A., J. P. Wacke, and M. A. Ritter. 1998. Insitu performance of stress-laminated timber bridge decks. Proceedings of SEM Spring Conference on Experimental and Applied Mechanics. pp. 265-267.
13. Pousette. A., P. Jacobsson. M. Gustafsson. J. Horttanainen, and K. Dahl. 2002. Stress laminated bridge decks, part II. Nordic timber bridge project report, Nordic wood. ISBN 82-7120-034-8.
14. Ritter. M. A. 1990. Timber bridges: Design, construction, inspection, and maintenance. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Engineering Staff, EM 7700-8.