

시스템 동바리의 수직재와 수평재 연결부 경계조건에 따른 거동 분석

김경운 · 원정훈** · 김상호**

한국생명공학연구원 · *충북대학교 안전공학과 · **연세대학교 사회환경시스템공학부
(2017. 4. 17. 접수/ 2017. 4. 21. 수정 / 2017. 4. 25. 채택)

Structural Behavior Analysis of System Supports according to Boundary Condition of Joints between Vertical and Horizontal Members

Gyeong Yun Kim · Jeong-Hun Won** · Sang-Hyo Kim**

Korea Research Institute of Bioscience&Biotechnology

*Department of Safety Engineering, Chungbuk National University

**School of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University

(Received April 17, 2017 / Revised April 21, 2017 / Accepted April 25, 2017)

Abstract : This study examined the effect of rotational stiffness of joints between vertical and horizontal members in system supports. In order to prevent repeated disasters of system supports, it is important to examine the accurate behavior of system supports. Among various factors affecting the complex behavior of system supports, this study focused on the stiffness of joints between vertical and horizontal members. The considered joint was modelled by a rotational spring, but the translational displacements were fixed. The stiffness of rotational spring was calculated by utilizing the usable experimental data. In addition, the hinge connection condition, which is generally considered in design and only restrict the translational displacements, was modelled to compare the results. The case with the rotational stiffness in joints showed 3.5 times buckling loads compared to the case without the rotational stiffness. Thus, the structural behavior of the vertical member in system supports was similar to the vertical member with the fixed condition. For the combined stresses of vertical members, the combined stress ratios were reduced 5~6% by considering the rotational stiffness of connecting parts. However, for the horizontal member where showed relatively small stress range, the stresses were increased 2.3~7.6 times by considering the rotational stiffness in connecting parts.

Key Words : rotational stiffness, joint, system support, hinge, combined stress ratio

1. 서론

콘크리트 타설 하중을 지지하는 가설 구조물인 시스템 동바리는 설치 및 해체의 시공 편이성과 구조적인 안전성 확보가 일반 동바리보다 우수하여 아파트, 주상복합건물, 교량 등 다양한 콘크리트 구조물의 시공에 널리 사용되고 있다. 시스템 동바리는 일반 동바리보다 구조적인 안전성이 우수하나, 용인 교량 사고 등과 같이 설계 및 시공 부주의로 인해 콘크리트 타설 중 붕괴사고가 꾸준히 발생되고 있다.

다수의 수직재, 수평재, 경사재 등의 조합으로 이루어진 가설 구조물은 영구 강구조물에 비해 다양한 불확실성을 갖고 있다¹⁻³⁾. 연결부의 강성, 하중의 편심 조

건, 초기형상의 기하학적 결함 등 다양한 불확실성은 가설 구조물인 시스템 동바리의 정확한 거동 분석을 어렵게 하는 중요한 요소이며, 시스템 동바리 붕괴사고를 방지하기 위해서는 불확실성을 반영한 시스템 동바리의 정확한 거동 예측이 우선적으로 필요하다. 해외의 경우, 다수 부재들의 조립으로 이루어진 시스템 동바리의 거동을 분석함에 있어 시스템 측면의 다양한 실험 및 해석에 대한 연구가 꾸준히 이루어지고 있으나^{4,5)}, 국내는 단일 부재에 대한 개별 실험에 근거해서 현장에 적용되고 있는 실정이다.

본 연구에서는 시스템 동바리의 거동을 예측함에 있어 중요한 요소 중의 하나인 수직재와 수평재의 연결부 강성에 초점을 두고 있다. 현재 국내에서는 설계 효

* Corresponding Author : Jeong-Hun Won, Tel : +82-43-261-3694, E-mail : jhwon@chungbuk.ac.kr
Department of Safety Engineering, Chungbuk National University, 1 Chungdae-ro, Seowon-gu, Chungju 28644, Korea

울성을 위해 수평재와 수직재의 연결 경계조건을 단순 힌지로 가정하고 있으며, 허용응력 내에서의 탄성거동에 초점을 두고 있으므로 실제 시스템 동바리가 견딜 수 있는 극한하중과 파괴시의 거동 상태를 분석하는데에는 한계가 있다. 정확한 거동을 예측하기 위한 전체 조건인 다양한 부재간 연결 강성 추정과 강성 변화에 따른 전체 거동에 대한 연구가 해외에서 활발히 진행되었으나⁵⁻⁷⁾ 국내에서는 이에 대한 기초적인 연구가 거의 없는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 시스템 동바리의 수직재와 수평재의 연결부 경계조건 강성 변화에 따른 전체 거동을 유한요소해석을 통해 분석하였으며, 수직재와 수평재의 연결부 경계조건으로는 설계에 적용되는 힌지 연결방법과 실제 연결조건에 해당하는 강성값을 적용한 방법이 고려되었다.

2. 대상 시스템 동바리와 분석 모델

2.1 연결부 회전 강성

수직재와 수평재의 연결부 3방향 회전 강성 중 수직재-수평재 평면의 수직축을 중심으로 회전하는 회전강성 외에는 회전 강성이 약한 편인 상태로 가정할 수 있으므로⁷⁾, 본 연구에서는 수직재-수평재 평면의 수직축을 중심으로 회전하는 회전강성만 고려한다(Fig. 1의 R_y).

시스템 동바리의 수직재와 수평재 연결부는 Cuplock 형태와 Wedge 형태가 있으며, Cuplock의 연결부 강성이 Wedge 형태 연결부 강성보다 크다⁸⁾. 국내에서 사용되는 연결부는 Wedge 형태이므로 본 연구에서는 Wedge 형태를 대상으로 연결부 휨강성을 추정하였다.

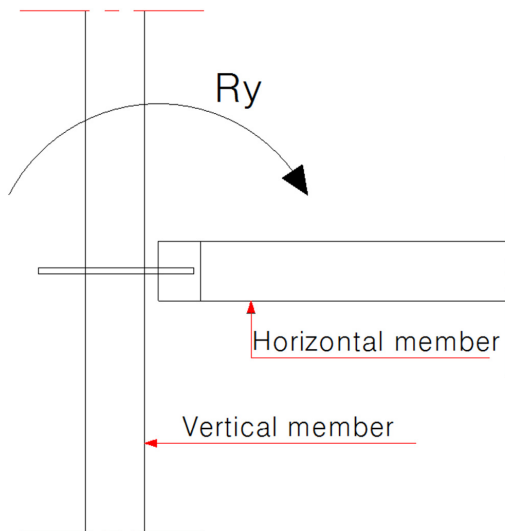


Fig. 1. Considered rotational stiffness of joint.

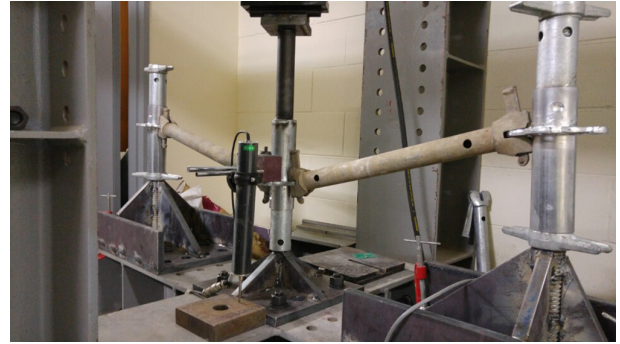


Fig. 2. Configuration of experimental tests.

Table 1. Dimensions and materials of members in experiments

Member	Specification	Steel grade
Vertical member	∅60.5 mm × 2.6 mm	SS 400
Horizontal member	∅42.7 mm × 2.3 mm	SS 400

시스템 동바리의 수직재와 수평재 연결부의 회전강성을 추정하기 위해 실시된 실험은 Fig. 2와 같다. 양측에 고정된 수직재와 중앙에 수직방향으로 가동되는 수직재가 배치되었으며, 3개의 수직재 사이를 수평재로 연결한 후 하중을 재하하면서 중앙 수직재에서의 처짐을 측정하였다. 수직재 높이는 360 mm, 수직재 중심 간격은 670.5 mm이며, 부재별 규격은 Table 1과 같다.

3회 실시된 실험 결과를 활용하여 연결부 회전강성을 추정하기 위해 실험체에 대한 유한요소해석을 실시하였다. 일반적으로 회전강성을 추정하기 위해 비선형성을 갖는 하중-회전각 곡선으로부터 회귀분석 등의 방법으로 비선형 회전 강성을 결정하여야 하나, 본 연구에서는 실무적용의 목적으로 연결부의 전체 비선형 거동을 대표할 수 있는 선형 회전강성을 해석을 통해 결정하였다.

해석에 적용된 프로그램은 Midas Civil이 활용되었으며, 활용 프로그램의 특징을 이용하여 연결부를 두 가지 방법으로 모형화하였다. 첫 번째 방법은 설계단계 해석에서 널리 사용되는 Beam-end release 기능을 활용하여 3방향 변위를 구속하고, 회전하는 한 방향으로만 회전강성을 적용하는 방법으로 부여된 회전강성은 수평재의 수평축 휨 강성에 대한 비율이다. 두 번째 방법은 6방향 스프링을 적용하여 병진강성과 회전강성 값을 직접 입력하는 방법으로 병진 강성은 무한 강성으로, 수직재-수평재 평면의 수직축을 중심으로 회전하는 회전강성만 부여하고 나머지 회전 강성은 0으로 고려하는 방법이다. 양측에 고정된 수직재 하단의 경계조건은 힌지로 가정하였고, 중앙에 수직방향으로 가동되는 수직재 하단부분은 자유단 상태로 가정하였다.

첫 번째 방법을 대상으로 회전강성을 변화시켜 해석으로 얻은 중앙 수직재의 처짐을 실험값과 비교하여 Fig. 3에 나타내었다. 실험결과는 하중-변위 곡선이 bi-linear의 비선형성을 나타내므로 회전강성도 비선형을 가짐을 확인할 수 있다. 회전강성을 수평재 휨 강성의 10%, 17%, 18%, 20%를 적용한 결과와 실험의 결과를 비교한 결과, 적용한 회전강성이 실험의 초기 강성과는 차이가 발생하나 수평재 휨 강성의 17~18%에서는 전반적인 경향과 비교적 일치하는 결과가 나타남을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 연결부 강성을 수평재 휨 강성의 18%를 활용하여 시스템 동바리의 거동을 분석하였다.

수직재와 수평재 연결부를 모형화하는 두 번째 방법을 적용하여 실험결과와 결과를 비교하였다(Fig. 4). 회전강성을 변화시켜서 실험결과와 유사한 결과가 나타나는 값을 추정한 결과, 연결부의 회전강성은 12 kNm/rad ~ 13 kNm/rad 수준인 것으로 평가되었다.

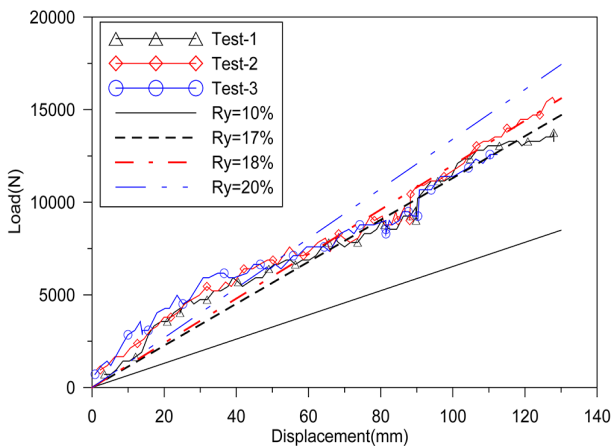


Fig. 3. Comparison of load-displacement curve between experiment and analysis (Method 1).

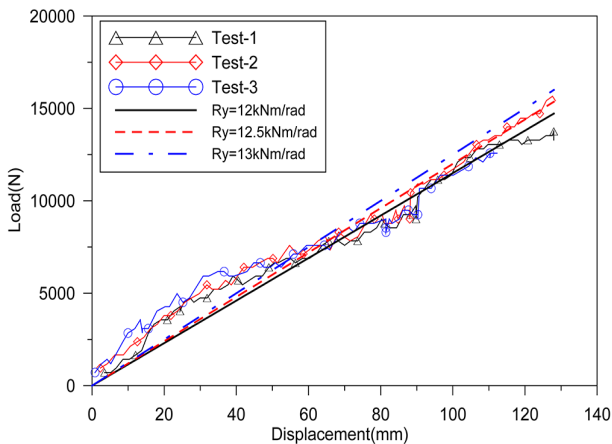


Fig. 4. Comparison of load-displacement curve between experiment and analysis (Method 2-elastic link)

연결부의 회전 강성에 대한 기존의 연구결과에 따르면, 연결부 회전강성은 연결부 형태, 제조사, 연결방향에 따라 차이가 클 수 있으며, 연결부 회전강성에 대한 조사된 기존 연구 결과의 초기 회전 강성 범위가 16 kNm/rad ~ 34 kNm/rad를 나타내고 있다⁵⁻⁷⁾. 본 연구에서는 보수적으로 초기 강성보다 전체적인 응답에 맞는 강성을 추정하여 다소 작게 평가된 것이며, 초기 강성을 기준으로 한다면 기존의 연구와 유사한 범위라고 판단된다.

2.2 대상 시스템 동바리

연결부 경계조건에 따른 시스템 동바리의 거동특성을 해석적으로 분석하기 위해 선정한 대상 시스템 동바리의 높이는 6.2 m이고, 종방향으로 수직재 간격은 0.9 m, 횡방향 수직재 간격은 1.2 m이다. 수직재, 수평재, 경사재의 강종은 STK400(탄성계수 200,000 MPa, 푸아송 비 0.3)이며, 부재별 규격은 Table 2와 같다.

해석에 적용된 경계조건은 table 3과 같으며, 수직재와 수평재 연결부 경계조건 변화에 따른 응답을 비교하기 위해 설계에서 일반적으로 적용하는 힌지인 경우와 회전강성을 부여하는 경우(방법 1, 수평재 휨 강성의 18% 적용)로 대상 시스템 동바리를 모형화하여 결과를 비교하였다.

수직재와 수평재의 연결부 강성, 슬래브 두께, 콘크리트 타설 위치, 그리고 지반침하를 고려한 경우를 변수로 고려하였으며, 고려된 해석 대상은 Table 4와 같다.

Table 2. Dimensions and material type of system support

Member	Specification	Steel grade
Vertical member 1	∅60.5 mm × 3.2 mm	STK 400
Vertical member 2	∅48.6 mm × 6.0 mm	STK 400
Horizontal member	∅42.7 mm × 2.3 mm	STK 400
Diagonal member	∅42.7 mm × 2.3 mm	STK 400

Table 3. Boundary condition of connecting part

Connecting part	Boundary condition
Bottom of vertical member	Hinge
Between vertical members	Continuous
Between vertical and diagonal members	Hinge
Between horizontal and diagonal members	Hinge
Between vertical and horizontal members	Case 1 - Hinge
	Case 2 - Ry= 18% of horizontal members (Using method 1)

Table 4. Considered cases of system supports

No.	Case	Slab thickness	Joint rotational stiffness	Concrete loading width	Considering settlement
1	F9-0	0.9 m	hinge	10.8 m	NO
2	F9-0.18	0.9 m	18%a	10.8 m	NO
3	S9-0	0.9 m	hinge	10.8 m	YES
4	S9-0.18	0.9 m	18%	10.8 m	YES
5	F3-0	0.3 m	hinge	10.8 m	NO
6	F3-0.18	0.3 m	18%	10.8 m	NO
7	H3-0	0.3 m	hinge	5.4 m	NO
8	H3-0.18	0.3 m	18%	5.4 m	NO

a. Ratio to bending stiffness of horizontal members

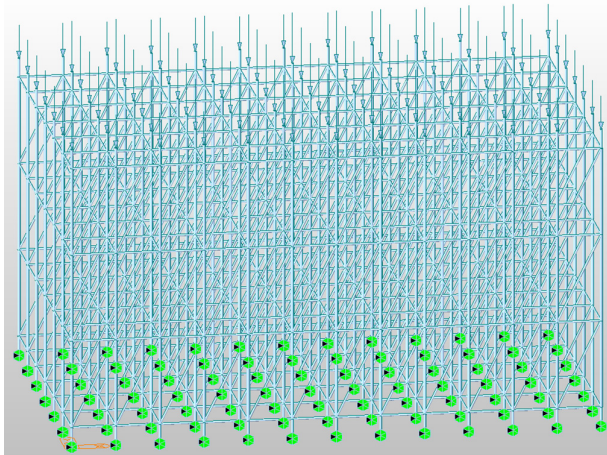


Fig. 5. Modelling of system supports concerned(Case F9-0).

Fig. 5는 전체 슬래브에 콘크리트가 0.9m 타설된 경우인 Case F9-0의 모델링 형상을 나타낸다.

2.3 적용하중

고정하중으로 슬래브 자중(단위 중량 24 kN/m^3)과 거푸집의 무게(0.4 kN/m^2)를 적용하였으며, 활하중은 3.75 kN/m^2 를 적용하였다. 타설 시의 충격, 또는 시공 오차 등을 반영한 최소 수평하중으로 고정하중의 2% 이상, 또는 수평길이 당 1.5 kN/m 이상 중에서 큰 쪽의 하중이 층 상단에 작용하도록 적용하였다.

3. 결과분석

3.1 연결부 회전 강성 고려에 따른 임계좌굴하중

수직재와 수평재 연결부의 회전강성 변화에 따른 1차 모드 고유치와 임계좌굴하중 변화를 검토하였다. 좌굴모드 형상과 임계좌굴하중 산출을 위해 수평하중을 제외한 고정하중과 활하중의 하중조합을 수직재 상단에 적용하였다.

Table 5. Result of eigen value and critical load calculation (Case F9-0 and Case F9-0.18)

Case	F9-0	F9-0.18	F9-0.18/F9-0
Eigen value	0.131	0.466	3.531
Critical load(kN/m)	4.077	14.395	3.531

Table 6. Result of eigen value and critical load calculation (Case H3-0 and Case H3-0.18)

Case	H3-0	H3-0.18	H3-0.18/H3-0
Eigen value	0.345	-0.739	-2.143
Critical load(kN/m)	4.697	-10.067	-2.143

슬래브 두께 0.9m를 대상으로 연결부를 힌지로 한 경우(F9-0)와 강성을 고려한 경우(F9-0.18)의 1차모드 고유치와 임계좌굴하중을 Table 5에 나타내었다. 본 대상 시스템 동바리에서는 한 방향으로만 경사재를 설치하였으므로 좌굴형상은 모두 경사재가 설치되지 않은 방향으로 발생하였으며, 회전 강성을 고려한 경우의 임계좌굴하중이 힌지로 고려한 경우보다 3.531배 크게 산출되었다.

오일러 좌굴하중의 이론적인 값을 보면 유효좌굴길이는 양단 고정단인 경우가 양단 힌지의 0.5배가 되므로 양단 고정단의 오일러 좌굴하중은 힌지인 경우보다 4배 커야 된다. 회전강성을 고려함으로써 연결부는 힌지 경계조건보다는 고정단에 가까운 거동을 하여 힌지인 조건보다 임계좌굴하중이 3.531배 큰 것으로 나타났다.

콘크리트 슬래브 두께 0.3 m, 폭원 5.4 m 그리고 연결부 힌지 조건(H3-0)과 연결부 회전 강성이 수평재 휨강성의 18%인 경우(H3-0.18)에 대한 임계하중의 산정 결과 분석하여 Table 6에 나타내었다. 수직재와 수평재의 연결부를 회전강성을 고려한 경우와 힌지로만 고려한 경우의 임계좌굴하중비(H3-0.18/H3-0)는 2.143을 나타내므로 실제 거동은 힌지를 고려한 경우보다 2배 이상 하중을 지탱할 수 있음을 알 수 있다. 따라서 실제 연결부 거동을 반영할 경우 시스템 동바리의 좌굴 특성이 크게 변화됨을 알 수 있다.

3.2 연결부 회전 강성 고려에 따른 응력 변화

주요 위치별로 축력과 휨에 의해 발생하는 조합 응력비를 분석하여 각각 Table 7~Table 9에 나타내었다. 표에 나타난 부재요소는 모두 수직재로 조합 응력비가 큰 곳을 나타낸다. 슬래브 두께 0.9 m, 콘크리트 타설 폭 10.8 m인 경우의 연결부 회전강성 고려한 경우와 힌지로 고려한 경우(F9-0.18/F9-0)의 조합 응력비의 비율은 0.934~0.968로 나타났다. 또한, 슬래브 두께 0.3 m, 콘크리트 타설 폭 10.8 m인 경우에는 회전강성 고려와

Table 7. The maximum combined stress ratio according to vertical member location(F9-0 and F9-0.18)

Case \ Element	424	573	722	729
F9-0	0.764	0.765	0.764	0.699
F9-0.18	0.714	0.714	0.714	0.677
F9-0.18/F9-0	0.968	0.934	0.934	0.968

Table 8. The maximum combined stress ratio according to vertical member location(F3-0 and F3-0.18)

Case \ Element	376	424	525	722
F3-0	0.330	0.298	0.330	0.298
F3-0.18	0.315	0.282	0.315	0.283
F3-0.18/F3-0	0.954	0.950	0.954	0.950

Table 9. The maximum combined stress ratio according to vertical member location(H3-0 and H3-0.18)

Case \ Element	299	383	448	729
H3-0	0.048	0.254	0.048	0.296
H3-0.18	0.039	0.248	0.039	0.288
H3-0.18/H3-0	0.810	0.977	0.811	0.974

힌지 고려의 조합응력비(F3-0.18/F3-0) 비율이 0.950~0.954로 분석되었다. 그러므로 수직재와 수평재 연결부의 회전 강성을 고려할 경우 발생 조합 응력이 힌지로 고려한 경우보다 5~6% 작게 평가되므로 힌지로만 고려한 설계가 보수적인 결과를 주고 있다고 판단된다.

슬래브 두께 0.3 m, 콘크리트 슬래브를 절반만 타설한 경우의 회전강성 고려에 따른 조합응력비의 비율(H3-0.18/H3-0)은 0.811~0.977을 분석되었다. 시공 중인 경우를 가정한 콘크리트 슬래브가 절반만 타설된 경우에는 연결부의 회전 강성을 고려함으로써 조합 응력비가 약 3~19% 작게 발생됨을 알 수 있다.

3.3 지반침하시 연결부 회전강성 변화에 따른 응력 변화
지반침하가 발생한 경우와 지반침하를 고려하지 않

는 일반적인 설계의 경우를 대상으로 시스템 동바리의 수직재와 수평재 연결부를 힌지로 고려한 경우와 회전 강성을 고려한 경우의 조합응력을 비교하였다.

시스템 동바리의 경우 지점침하가 발생하면 지점침하가 발생한 수직부재를 인접 수직부재들이 지지하는 구조이므로 지반의 침하로 지점침하가 발생하여도 수직재의 하단부분이 떠 있는 현상이 발생할 가능성이 크다. F9-0 모형을 대상으로 중앙부 수직재의 지점부분(절점 273)이 침하되었다고 가정하고 자유단으로 변경하여 해석을 수행한 결과, 침하된 절점의 변위는 연직 방향으로 0.07 mm로 분석되어 침하량이 작은 것으로 나타났다. 그러므로 지점침하는 인위적인 침하량(예를 들어, 교량 해석 시 지점침하 10 mm)을 적용하지 않고 지반침하가 발생된 수직재 하단부의 경계조건을 자유단으로 적용하여 해석을 수행하였다.

Table 10은 지반침하를 가정한 경우(S9-0, S9-0.18)와 가정하지 않은 경우(F9-0, F9-0.18)의 주요 위치별 축력과 휨에 의한 조합 응력을 나타낸다. 지반침하를 고려함으로써 조합응력이 모든 부재에서 상당히 증가되었음을 알 수 있다. 연결부 회전강성을 고려함에 따라, 수직재에서 발생한 조합응력은 지반침하 발생한 경우와 발생하지 않은 경우 6%, 6.9% 감소하지만, 일부 부재에서는 1.1%, 0.5 증가되기도 한 것으로 나타났다. 경사재의 경우는 지반침하 발생으로 발생 최대 조합응력 수준이 증가하였으며, 회전강성 고려유무의 결과의 차이가 크지 않은 것으로 나타났다.

수평재는 지점침하로 하중의 분배로 인해 발생 최대응력수준의 증가와 함께, 회전 강성 고려로 발생 최대 응력이 증가됨을 알 수 있다. 지반침하를 고려한 경우, 회전강성 고려로 발생 조합응력이 1.268~1.663배 증가하였으며, 지반침하를 고려하지 않은 경우도 회전강성 고려로 최대 조합응력이 2.294~7.583배 증가되는 것으로 나타났다. 따라서 연결부의 회전 강성을 고려할 경우, 수평재의 발생응력은 증가되는 것으로 판단된다.

Table 10. Combined stress at major points in system support(Case S9-0, Case S9-0.18, Case F9-0 and Case F9-0.18)

Member	Element	Combined stress (MPa)					
		With settlement			Without settlement		
		S9-0	S9-0.18	S9-0.18/S9-0	F9-0	F9-0.18	F9-0.18/F9-0
Vertical member	525	-92.616	-87.099	0.940	-72.646	-67.661	0.931
	526	-74.319	-75.132	1.011	-57.826	-58.086	1.005
Horizontal member	533	-11.692	-19.448	1.663	-5.921	-13.582	2.294
	516	16.577	21.024	1.268	1.091	8.270	7.583
Diagonal member	534	42.379	42.079	0.993	3.594	3.375	0.939
	522	-24.706	-24.834	1.005	3.577	3.357	0.939

4. 결론 및 고찰

본 논문에서는 시스템 동바리를 대상으로 수직재와 수평재 연결부의 회전강성을 고려한 경우와 힌지로 고려한 경우의 시스템 동바리의 거동을 분석하였다. 대상 시스템 동바리의 유한요소해석을 통한 좌굴임계하중, 조합응력비, 조합응력 등을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 실험을 통해 추정된 시스템 동바리의 수직재와 수평재 연결부 회전강성을 활용하여 좌굴해석을 실시한 결과, 연결부 회전강성 고려에 따라 임계좌굴하중은 증가하는 것으로 나타났다. 대상 시스템 동바리에 콘크리트 하중이 전 슬래브에 타설된 경우, 연결부 회전강성을 고려한 방법은 힌지로 고려한 방법보다 임계좌굴하중이 약 3.5배 큰 것으로 나타났으므로 실제 거동은 힌지보다는 고정단에 가까운 거동을 한다고 판단된다.

2) 대상시스템 동바리의 경우, 수직재와 수평재 연결부 회전강성을 고려함에 따라 수직재의 최대 조합응력비는 힌지로만 고려한 경우보다 5~6% 정도 작게 평가되었다. 또한, 시공 중인 경우를 가정한 콘크리트 슬래브가 절반만 타설된 경우에도 연결부 회전강성을 고려함으로써 조합응력비가 약 3~19% 작게 발생되었다. 따라서 수직재와 수평재 연결부를 힌지로 고려한 현재 설계 방법은 발생응력을 실제 응력보다 약간 크게 평가하는 보수적인 결과를 나타낸다고 판단된다.

3) 수평재의 경우, 회전강성을 고려함으로써 수직재에서 수평재로 휨 응력이 전달되므로 회전강성을 고려한 경우가 고려하지 않은 경우보다 발생응력이 2.294~7.583 배 증가하는 것으로 분석되었다. 그러므로 연결부의 회전강성을 고려하지 않고 힌지로 연결부를 고려하는 방법은 수평재의 발생 응력을 과소평가한다고 판단된다.

연결부의 회전 강성에 대한 기존의 연구결과에 따르면, 연결부 회전강성은 연결부 형태, 제조사, 연결방향에 따라 변화될 수 있다. 본 연구에서 사용한 연결부 회전 강성은 실험에 사용된 연결부 형태와 1방향 연결에 제한되며, 향후 제조사별, 연결부 형태별, 다양한 연결방향에 대한 연구가 추가적으로 실시되어야 한다.

감사의 글: 본 논문은 연구재단의 이공분야기초연구사업(과제번호 : 2016R1A2B4016327)의 연구비 지원에 의하여 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- 1) D. H. Chung, G. Y. Kim and J. H. Won, "Effects of Minimum Horizontal Load on Structural Safety of System Supports", Journal of the Korean Society of Safety, Vol. 30, No. 5, pp. 37-43, 2015.
- 2) J. L. Peng, S. L. Chan and C. L. Wu, "Effects of Geometrical Shape and Incremental Loads on Scaffold Systems", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 63, pp. 448-459, 2007.
- 3) T. Chandrangu and K. J. R. Rasmussen, "Investigation of Geometric Imperfections and Joint Stiffness of Support Scaffold Systems", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 67, pp. 576-584, 2011.
- 4) H. Zhang, T. Chandrangu and K. J. R. Rasmussen, "Probabilistic Study of the Strength of Steel Scaffold System", Structural Safety, Vol. 32, pp. 393-401, 2010.
- 5) J. L. Peng, C. W. Wu, S. L. Chan and C. H. Huang, "Experimental and Numerical Studies of Practical System Scaffolds", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 91, pp. 64-75, 2013.
- 6) H. Liu, Q. Zhao, X. Wang, T. Zhou, D. Wang, J. Liu and Z. Chen, "Experimental and Analytical Studies on the Stability of Structural Steel Tube and Coupler Scaffolds without X-bracing", Engineering Structures, Vol. 32, pp. 1003-1015, 2010.
- 7) U. Prabhakaran, R. G. Beale and M. H. R. Godley, "Analysis of Scaffolds with Connections Containing Looseness", Computer and Structures, Vol. 89, pp. 1994-1955, 2011.
- 8) T. Chandrangu and K. J. R. Rasmussen, "Review of Past Research on Scaffold Systems", School of Civil Engineering, The University of Sydney, pp. 12-13, 2009.