

비정형 건축물을 위한 가설구조시스템의 설계 인자 분석

Study on Design Factors of System Support for Irregular Shaped Structures

채 성 민*
Chae, Seong-Meen

이 창 환**
Lee, Chang-Hwan

정 광 량***
Chung, Kwang-Ryang

Abstract

Construction techniques and materials are developing and structures are designed to be irregular shaped, and therefore more detailed structural analysis is required. The purpose of this study is to analyze the cause of accidents related to falsework systems during construction and discuss prevention methods in order to prevent accidents relate to prefabricated shoring system during construction. In this paper structural analysis was conducted to study the influence of slab irregularity on system supports and analysis to investigate the participation of the bracing in the system support.

Keywords : System support, Lateral load, Irregular shaped structure, Shoring

1. 서론

가설구조시스템은 콘크리트 구조물의 시공 중 하중을 지지하는 역할을 하며, 작업자들과 구조물의 안전에 중요한 요소이다. 그럼에도 불구하고, 가설 구조물의 설계와 시공에 대해서는 영구 구조물에 비해 관심이 적으며, 미흡한 부분도 있는 것이 일반적인 실정이다. 시공 시 구조물을 임시 지지하는 가설구조물시스템에 대한 면밀한 검토가 이루어지지 않아, 사전에 고려하지 못한 인자로 인하여 발생하는 붕괴 사고들도 꾸준히 발생하고 있기 때문에, 이에 대한 안전대책이 요구되고 있다.

특히 비정형 건축물의 경우, 슬래브의 경사도 및 비정형성이 커질수록 가설구조시스템의 설계에 미치는 영향이 커질 수 있기 때문에, 상세한 검토가 수행될 필요가 있다. 이러한 배경으로, 이 연구에서는 가설구조시스템과 관련하여 발생한 사고 사례에

대해 사고의 원인과 예방대책을 분석하며, 현행 구조검토 절차에서 고려하지 않고 있는 영향 인자들에 대한 검토를 수행한다. 이를 바탕으로 안전하고 효율적인 가설구조시스템의 설계를 위해 구조검토에 필요한 해석 인자를 제시하고자 한다.

2. 시스템 동바리

2.1 시스템 동바리 설계 기준

2.1.1 시스템 동바리 구조설계

건설기술진흥법¹⁾ 제48조에 따르면, 가설구조물 설계도서는 기술사의 구조검토를 의무적으로 받도록 되어 있다. 다만, 높이가 6m 미만인 경우에 대해서는 별도의 규정을 두지 않고 있다. 가설공사표준시방서²⁾에서도 5m 이하의 가설구조시스템에 대해서는 2차원 또는 3차원 구조해석의 생략을 허용하고 있다. 그러나 비정형 건축물의 경우, 높이 낮다 하더라도 구조물의 비정형성에 의한 편심하중이 수평력으로 크게 작용할 수 있기 때문에, 높이에 따른 구분 없이 구조검토가 반드시 필요하다.

* 정회원, 동양구조안전기술 연구소 사원, 공학석사
DongYang Structural Engineers

** 교신저자, 정회원, 부경대학교 건축공학과 조교수, 공학박사
Pukyong National University
Tel: 051-629-6087 Fax: 051-629-7084
E-mail: chlee@pknu.ac.kr

*** 정회원, 동양구조안전기술 대표이사, 공학박사
DongYang Structural Engineers

〈Table 1〉 Construction loads of Standard Specification for Temporary Works (가설공사표준시방서)²⁾

Slab thickness	Load(kN/m ²)
Less than 0.5m	2.5
Above 0.5m to less than 1.0m	3.5
Above 1.0m	5.0

2.1.2 구조검토 하중

가설공사표준시방서²⁾ 4장에서는 가설구조물에 대한 작업하중과 수평하중을 각각 <Table 1>과 <Table 2>로 규정하고 있다. 수직하중에서 고정하중은 철근콘크리트와 거푸집 무게의 합으로 구성되며, 작업하중은 슬래브의 두께에 따라 달리 적용한다<Table 1>. 또한 전동식 카트 장비를 이용하여 콘크리트를 타설하거나 특수장비를 이용할 경우 작업하중에 이를 고려해야 한다. 수평하중에 대해서는 고정하중의 2% 또는 수평 길이당 1.5kN/m에 대하여 검토하도록 되어 있다.

2.1.3 시스템 동바리 재료

시공재료에 대해서도 방호장치 의무안전인증기준 또는 KS F 8021에 적합해야 한다고 제시하고, 각 부재의 허용인장성능의 허용인장응력을 따르고, 안전인증기준도 <Table 3>과 같이 제시하고 있다²⁾.

〈Table 3〉 Vertical member safety standard

Nominal length(mm)	Safety standard(kN)	
	Class 1	Class 2
Less than 900	Above 160	Above 90
Above 900 and less than 1,200	Above 140	Above 70
Above 1,200 and less than 1,500	Above 120	Above 55
Above 1,500 and less than 1,800	Above 90	Above 40
Above 1,800 and less than 2,100	Above 70	Above 30
Above 2,100 and less than 2,400	Above 60	Above 25
Above 2,400 and less than 2,700	Above 50	Above 20
Above 2,700 and less than 3,000	Above 40	Above 17
Above 3,000 and less than 3,300	Above 35	Above 14
Above 3,300 and less than 3,600	Above 30	Above 12
Above 3,600	Above 25	Above 10

Note 1) Class 1 : Vertical member with outer diameter larger than 60.2mm

2) Class 2 : Vertical member with outer diameter larger than 48.3mm and less than 60.2mm

〈Table 2〉 Horizontal loads of Standard Specification for Temporary Works (가설공사표준시방서)²⁾

Horizontal loads
Greater load applied at the top of the structure
- 2% of dead load
- More than 1.5kN/m per horizontal length

2.1.4 시스템 동바리 시공 및 배치

수평재 배치에 관하여, 시공자는 동바리 시공 시 작성된 조립도에 제시된 설치 및 해체 방법과 안전 수칙을 따라야 한다. 만약 계획과 다르게 동바리가 설치된 경우에는, 이에 대한 구조해석을 수행하여 안전성을 검토하여야 한다²⁾.

수직 및 수평하중에 의해 시스템 동바리의 변위가 크게 발생하지 않도록, 개별 단위 수직재 및 수평재 사이에는 가새재를 설치하여 고정해야 한다. 구조검토를 통해 안전성을 확인한 경우에는, 모든 위치에 가새재가 배치될 필요는 없다. 그러나 가새는 수평하중을 지반 또는 구조물에 안전하게 전달할 수 있는 형태로 배치되어야 한다. 한편 강성이 큰 구조물에 수평 연결재로 직접 연결되어 수평력에 대하여 충분히 저항할 수 있는 경우에는 가새를 설치하지 않을 수 있다.

2.2 시스템 동바리 구조검토

2.2.1 시스템 동바리 설계

구조계산에 의한 조립도가 작성되어야 하며, 수평재 및 가새재를 반드시 설치하여 예상되는 수평하중을 이들 부재가 지지할 수 있도록 설계되어야 한다²⁾. 동바리의 전체 좌굴을 방지하기 위해 시스템 동바리의 설치 높이는 조립되는 동바리 단면 폭의 3배를 넘지 않아야 하며, 초과하는 경우에는 주변 구조물에 지지하는 등 전체 좌굴을 방지할 수 있는 조치가 마련되어야 한다.

2.2.2 구조부재의 연결

가설공사표준시방서²⁾에서는 시스템 동바리의 구조해석 시 각 부재의 연결 조건에 대해, 수직재와 수직재의 연결부는 연속 부재, 수직재와 수평재, 수직재와 경사재 및 수평재와 경사재의 연결부는 핀으로 반영하라고 제시하고 있다.

2.2.3 안전율

거푸집 지지를 위해 사용되는 동바리의 허용압축하중에 대한 안전율은 지지형식에 따라 정의된다. 시스템 동바리는 지주형식 동바리 중 조립형 동바리에 해당되며, <Table 4>에 제시된 것처럼 2.5의 안전율이 적용된다.

2.3 시스템 동바리 사고사례 및 문제점

2.3.1 ○○종합체육관 신축공사³⁾

<Fig. 1>과 같이 지붕 슬래브 콘크리트 타설작업 중 시스템 동바리가 무너지는 사고가 발생하여 인명 피해로까지 이어졌다. 재해조사의견서에 따르면, 시스템 동바리 가새재 미설치<Fig. 2>, 수직재 연결핀 미설치, 그리고 미흡한 구조검토가 사고의 원인으로 조사되었다.

타설 중 수직 및 수평하중에 의해 동바리 본체의 변위가 크게 발생하지 않도록 가새재가 견고하게 연결되었어야 하나, 현장에서는 시스템 동바리 설치 시 가새재를 미설치하였다. 수직재는 연결철물(연결핀)을 사용하여 수직재를 견고하게 연결하고, 연결부위가 탈락 또는 꺾여지지 않도록 했어야 하나, 수

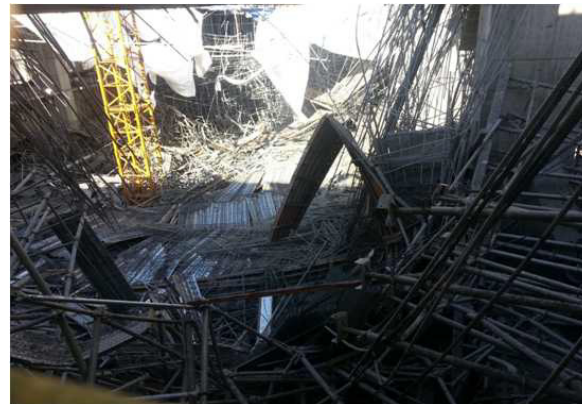
<Table 4> Safety factors for shoring systems

Type	Safety factor
Single-post shores	3
Shoring frames	2.5

직재의 연결철물(연결핀)을 설치하지 않아 좌굴 발생 시 연결 부분이 먼저 이탈되며 붕괴의 원인이 되었다. 또한 좌굴 길이를 전체가 아닌 단위 길이로 검토하였고, 수평변위의 발생으로 타설 시 수직하중에 의한 편심이 작용하며 붕괴로 이어졌다.

2.3.2 공원 조성 공사 기념관 신축 공사 현장⁴⁾

2층 중정부 콘크리트 타설 중 가설구조물시스템이 붕괴되어 인명 피해가 발생한 사고이다<Fig. 3>. 가설구조물 수직재의 간격이 기준 이상으로 설치되었으며, 상하 수직재의 축선이 일치 불량한 상태였



<Fig. 1> Gymnasium roof collapse accident



<Fig. 2> Cause of collapse (bracing not installed)

다. 축선 불일치로 콘크리트 타설에 따른 편심하중이 작용하여 붕괴로 이어졌다. 연결 부품이 임의로 교체되었고<Fig. 4>, 수평 연결재의 설치 간격이 과다하게 컸으며<Fig. 5>, 수평 연결재의 고정 상태가 불량하여 콘크리트 타설로 인한 하중을 저항하지 못하였다.



<Fig. 3> Collapse of system support during concrete pouring



<Fig. 4> Misuse of vertical member connection



<Fig. 5> Violated horizontal member spacing criteria

이와 같은 사고 방지를 위해서는 가설구조물에 대하여 세심한 구조검토가 필요하고 표준조립도를 작성하여 시공을 철저히 해야 한다. 또한 수직재 축선을 일치시키고 설치 간격을 적절하게 두어 좌굴 및 수평력에 대하여 구조적인 안전성을 확보할 수 있어야 한다.

2.3.3 ○○ 물류센터 신축 공사⁵⁾

지붕층 콘크리트 타설 작업 및 지상 4층 바닥 자재인양 개구부 철근 배근 작업 중, 시스템 동바리가 콘크리트의 하중을 이기지 못하고 붕괴된 사고이다 <Fig. 6>.



<Fig. 6> Storage construction accident

지붕층 자재인양 개구부 측면 슬래브는 캔틸레버 구조임에도 불구하고 지지구조에 대한 구조검토를 실시하지 않았고, 시스템 동바리의 U-Head에 편심이 발생하여 붕괴로 이어졌다. 구조검토서상 보 하부 시스템 동바리 수직재를 1.2m 간격으로 설치하도록 검토되었으나, 실제로는 1.5m 간격으로 설치되어 멩에재가 휨, 처짐, 전단에 취약하였고, 붕괴 인접 구간에 수평재 설치가 누락되어 사고의 원인이 되었다.

캔틸레버 구조형식은 하중을 충분히 안전하게 지지할 수 있도록 철저히 설계되어야 하며, 시스템 동바리의 수평재는 조립도대로 누락 없이 설치해야 한다. 또한 계획이 변경된 경우에는 변경에 따른 구조검토가 반드시 수행되어야 한다.

2.4 시스템 동바리 문제점

가설공사표준시방서²⁾에서는 시스템 동바리에 대한 구조검토를 진행하고 조립도를 작성하게 되어 있다. 그러나 설치 시 현장 편의성을 위하여 조립도에 따라 시스템 동바리를 설치하지 않거나, 수직재와 수평재의 연결 등 부재의 연결이 미흡하여 사고로 이어진 사례들이 많이 있었다. 따라서 현장 상황에 따라 수직재의 간격을 변경하거나, 수평재 설치 위치 변경, 자재 변경 등 조립도 계획에서 변경되는 경우에는 반드시 구조검토를 통해 조립도가 수정되어야 할 것이다.

시공 절차에 따른 하중 편심을 고려하지 못하여 시스템 동바리의 붕괴 사고로 이어지는 경우도 있었으며, 구조검토 시 이러한 편심을 고려하여 시스템 동바리를 설계해야 할 것이다. 특히 비정형 건축물은 정형 건물에 비해 편심이 크게 작용할 수 있기 때문에, 기준에서 명시하는 구조검토 대상이 아니더라도 반드시 면밀한 구조검토가 이루어져야 할 것이다.

3. 구조해석 및 결과

2장에서 살펴본 바와 같이, 시공 미흡 또는 조립도를 따르지 않는 경우 사고가 발생할 가능성이 높지만, 시스템 동바리에 예상하지 못한 하중이 작용하여 사고로 이어지는 경우도 있다. Chung et al.(2015)에 의해 수행된 선행 연구⁹⁾는 슬래브 두께를 변수로 하여 최소 수평하중이 시스템 동바리의 안전성에 미치는 영향을 분석하였다. 그러나 비정형 슬래브를 지지하는 시스템 동바리에서는, 형상의 영향으로 자중에 의한 수평력 효과가 증가할 수 있기 때문에, 슬래브 두께뿐만 아니라 다른 인자의 영향에 대해서도 검토되어야 한다.

이러한 배경으로, 이 연구에서는 슬래브 경사도가 시스템 동바리 설계에 미치는 영향을 검토하기 위해 해석적인 연구를 수행하였다. 슬래브 경사도를 20% 이내의 범위에서 변화시켰으며, 시스템 동바리의 안전성이 확보되지 않는 경우 수직재의 간격을 줄여 재설계를 수행하였다. 또한 가새 배치에 따른

영향도 함께 검토되었다.

3.1 시스템 동바리 모듈

시스템 동바리는 부재들이 규격화되어 생산된다. 수직재와 수평재는 길이와 강관의 두께로 구분되며, 가새재는 길이로 구분된다. 수직재의 설치 간격은 수평재의 길이에 의해 정해지며, 수평재는 0.4m, 0.6m, 0.9m, 1.2m, 1.5m 및 1.8m 규격으로 생산된다.

3.2 구조물 개요

구조해석을 위한 시스템 동바리는 수직재의 간격을 1.8m로 하여, 5개의 경간으로 구성하였다. 시스템 동바리의 안전성이 만족되지 않는 경우에는, 수직재 간격을 1.5m로 감소시키되, 6개의 경간으로 하여 시스템 동바리의 총 길이를 9m로 유지하였다.

3.3 해석 모델

표준 해석 모델은 9m 길이와 4m 높이의 가설구조시스템이다. 수평재와 가새는 가설공사표준시방서²⁾를 참조하여 배치하였으며, 제조사에서 생산하는 사양에 맞는 부재를 사용하였다<Table 5>.

수직하중과 수평하중은 가설공사표준시방서²⁾를 참조하여 설정하였으며, <Table 6>에 요약되어 있다. 장비를 고려하여 3.75kN/m²의 작업하중을 고려하였고, 수평하중은 수직하중의 2%로 적용하여 구조검토를 수행하였다. 또한 안정적 시스템 동바리를 구성한 후, 수평하중 저항에 대한 구조적 기여가 적

<Table 5> System support analysis

Component	Content
Size(m)	9 × 9 × 4
Structure type	Prefabricated shoring system
Applied design code	Standard Specification for Temporary Works (MOLIT 2016)
	KSSC-ASD03
	Allowable stress design

〈Table 6〉 Load for structural analysis

Load	Value
Concrete load	24kN/m ³
Mold load	0.4kN/m ³
Construction load	3.75kN/m ²
Horizontal Load	2% of dead load

은 가새를 제거하여 효율적인 가설구조시스템으로 재설계를 수행하였다.

슬래브가 평평한 경우와 10%, 15% 및 20%의 슬래브 경사도를 갖는 가설구조시스템에 대하여 개별적으로 검토하였다. 〈Table 7〉에 제시된 강관 재료의 항복강도 및 인장강도는 KS D 3566⁷⁾을 따랐다. 지점 및 절점 조건에 대해서는, 가설공사표준시방서²⁾에 따라 받침 부는 힌지단으로 설정하였고, 수직재와 수직재는 연속, 수직재와 수평재는 핀, 수직재와 가새는 핀 연결하였다. 허용응력설계법에 대한 설계기준⁸⁾을 적용하여 구조검토를 수행하였다.

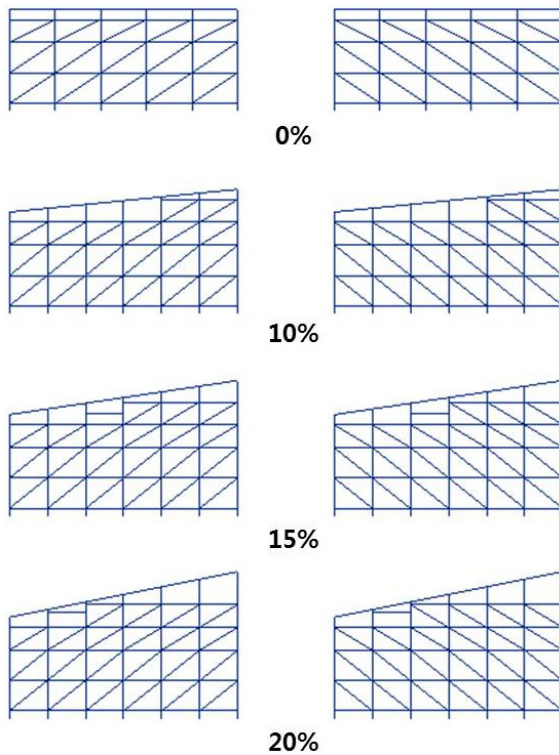
〈Table 7〉 Member information

Member	Size	Material	Young's modulus(GPa)
Vertical member	φ 60.5 × 2.9t	SGT355	205
Horizontal member	φ 60.5 × 2.9t	SGT275	205
Bracing	φ 60.5 × 2.9t	SGT275	205
Mold	12t	Plywood	11

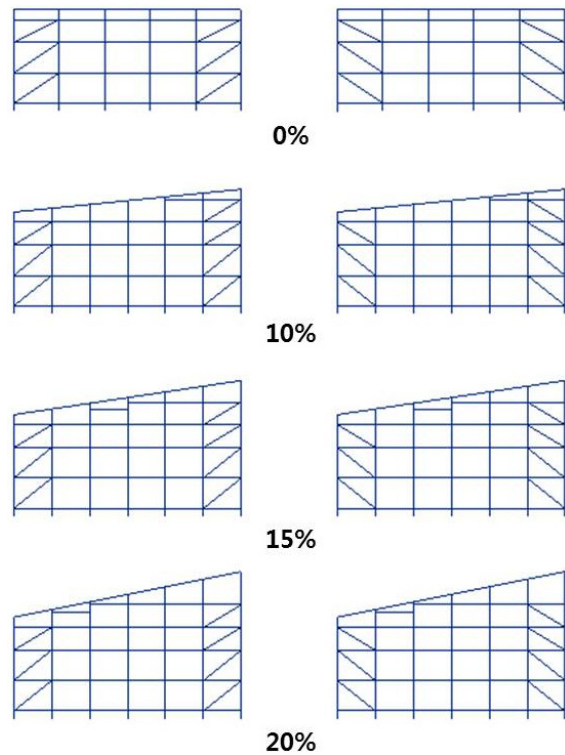
3.4 영향 인자

3.4.1 슬래브 경사

슬래브의 비정형성을 단순화하기 위해 경사도를 변수로 설정하였고, 〈Fig. 8〉과 같이 슬래브 경사 0%, 10%, 15% 및 20%에 대하여 구조검토를 수행하였다. 실제 비정형 건물은 20%를 넘는 경사도 및 비선형적 경사 특성을 가질 수 있는데, 이러한 경우에 대해서는 별도의 상세 검토가 필요하다.



〈Fig. 7〉 Sloped slab system supports with bracing in every section



〈Fig. 8〉 Sloped slab system supports with partial bracing removed

3.4.2 수직재 간격

수직재의 간격이 좁을수록 시스템 동바리의 성능과 안전성은 높아지지만, 부재 개수가 늘어나기 때문에 설치 및 관리가 어려워지고 작업성이 낮아지게 된다. 이 검토에서는 수직재의 초기 간격을 1.8m로 하였고, 구조성능을 만족하지 못하는 경우 기성 제품 모듈에 맞추어 간격을 감소시키는 방향으로 진행하였다.

3.4.3 가새 유무

초기 검토 모델에서는 수평재가 설치되는 모든 구간에 가새재를 설치하였다<Fig. 7>. 그러나 시스템 동바리가 작용하중에 대한 안전성이 확인된 후에는, 가설공사표준시방서²⁾에 근거하여 일부 가새를 제거하여 최소한의 가새가 배치되도록 수정하여 재검토를 수행하였다<Fig. 8>. 그러나 수평력을 지지할 수 있는 별도의 시스템이 마련되지 않는 경우, 가새를 완전히 제거할 수 없음을 유의해야 한다.

3.5 결과 분석

각 변수에 따른 해석 결과, 즉 수직재, 수평재 및 가새재의 응력비가 <Table 8>에 요약되어 있다. 슬래브 경사가 없는 경우 수직재 간격이 1.8m일 때 수직재의 응력비는 0.98이었고, 수평재와 가새재 또한 안전성이 확보되었다. 그러나 같은 간격에서 슬래브 경사가 10%, 15%, 20%로 증가하면서 경사로 인한 하중효과가 추가되었다. 이로 인해 수직재의 응력비는 1.25~1.32로 안전성이 확보되지 않았지만, 수평재와 가새재의 경우 응력비에 여유가 있었다. 수직재 간격을 1.5m로 감소시킨 모델에서는, 수직재를 비롯한 모든 부재의 응력비가 1 이하로 만족되었다.

초기 검토 모델에 대해서는 가새재의 응력비가 0.1~0.2 수준으로, 충분한 구조적 안전성을 보유하고 있었다. 따라서 최적 설계를 위해 <Fig. 8>과 같은 형태로 일부의 가새를 제거하여 재검토를 수행하였고, 이때 가새재의 응력비는 0.23~0.39 수준으

<Table 8> Summary of analysis results

Design factor			Stress ratio								
			Axial stress			Bending stress			Combined stress		
Slope (%)	Spacing (m)	Brace placement (All/Partially)	Vertical member	Horizontal member	Brace member	Vertical member	Horizontal member	Brace member	Vertical member	Horizontal member	Brace member
0	1.8	All	0.684	0.166	0.180	0.314	0.045	0.050	0.980	0.216	0.238
		Partially	0.678	0.215	0.324	0.314	0.045	0.050	0.974	0.267	0.391
10	1.8	All	0.390	0.213	0.251	0.949	0.045	0.050	1.306	0.265	0.314
		1.5	All	0.469	0.163	0.168	0.312	0.031	0.036	0.754	0.197
	1.5	Partially	0.472	0.134	0.188	0.158	0.031	0.036	0.616	0.166	0.229
		1.8	All	0.691	0.185	0.267	0.595	0.045	0.050	1.253	0.236
15	1.5	All	0.474	0.112	0.132	0.260	0.031	0.036	0.717	0.153	0.168
		Partially	0.444	0.138	0.188	0.202	0.031	0.036	0.635	0.169	0.229
	1.8	All	0.730	0.181	0.216	0.624	0.045	0.050	1.322	0.232	0.277
		20	1.5	All	0.469	0.122	0.108	0.180	0.031	0.040	0.639
	Partially	0.253		0.136	0.186	0.089	0.031	0.036	0.610	0.167	0.227

로 증가하였지만 수직재와 수평재의 안전성에는 영향을 주지 않았다.

4. 결론

이 연구에서는 시스템 동바리의 사고 사례에 대한 분석을 수행하였고, 이에 기반하여 비정형 건물에 대한 시스템 동바리 설계 시 검토되어야 하는 인자에 대한 영향성을 검토하였다. 주요 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

1) 시스템 동바리 설계에 대한 구조검토가 충분히 이루어지지 않거나, 시스템 동바리의 구조계획 및 조립도를 준수하지 않는 경우 사고로 이어질 수 있다.

2) 슬래브 경사가 없을 때 동바리의 구조성능이 만족되더라도, 경사도가 증가하면 하중효과가 추가되어 시스템 동바리, 특히 수직재의 안전성이 우려될 수 있으므로, 이를 고려하여 수직재 간격이 검토되어야 한다.

3) 구조검토를 통해 가새의 영향이 크지 않은 구간에 대해서는 일부 가새를 제거할 수 있으나, 전체 구조물의 안정성을 위해서 양쪽 끝에 위치한 가새는 반드시 배치되어야 한다.

비정형 건축물에 대해서는 그 형상적 특성으로 인해, 가설구조시스템 설계 시 비정형성에 의해 발생할 수 있는 구조적 문제를 반드시 고려해야 한다. 이 연구에서는 하중이 보수적으로 고려되었고, 구조물의 비정형성 또한 슬래브의 경사도를 통해 단순하게 반영되었다. 그러나 구조물의 형상에 따라 이 연구에서 고려되지 않은 다양한 인자들이 시스템 동바리의 거동에 영향을 미칠 수 있으며, 이에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 도시건축연구사업 연구비 지원(17AUDP-B121595-02)에 의해 수행되었습니다.

References

1. Construction Technology Promotion Act, Law No. 15112, 2017
2. Ministry of Land, Infrastructure and Transportation, Standard Specification for Temporary Works, 2016
3. Korea Occupational Safety and Health Agency, "Accident Investigation Report: Gymnasium Construction Site", 2015
4. Korea Occupational Safety and Health Agency, "Accident Investigation Report: Park Facility Construction", 2006
5. Korea Occupational Safety and Health Agency, "Accident Investigation Report: Warehouse Construction", 2011
6. Chung, D. H., Kim, G. Y., & Won, J. H., "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
7. Korean Standards Association, "KS D 3566 Carbon steel tubes for general structural purposes", 2017
8. Korean Society of Steel Construction, Korean steel structure design code, 2003

■ Received : December 11, 2017

■ Revised : December 28, 2017

■ Accepted : December 28, 2017