가설구조물의 붕괴재해에 관한 연구

A Study on the Collapse Accidents of the Temporary Structures

백 신 원* · 최 순 주**

Shin-Won Paik · Soon-Ju Choi

(1999년 7월 8일 접수, 1999년 11월 5일 채택)

ABSTRACT

Formwork is a temporary structure that supports its own weight and that of the freshly placed concrete as well as construction live loads including materials, equipments, and workmen. In designing and building formwork, the contractor should plan for economical construction without sacrificing quality or safety. But these temporary structures sometimes collapse during the concrete placing. Among the accidents and failures that occur during concrete construction, many are formwork failures, which usually happen at the time concrete is being placed. Generally some unexpected events cause one member to give way, then others become over-loaded or misaligned and the whole formwork structure collapses.

In this study, formwork failure events from 1994 to 1997 are analyzed using the structural analysis program. So the causes of the respective formwork failure are explored. Therefore, the present study provides a firm base to design the temporary structures such as formwork.

1. 서 론

가설구조물공사는 구조물의 품질과 안전에 직접적인 영향을 미치기 때문에 가설구조물에 대한 안전을 고려한 공사관리계획의 수립과 계획에 필요한 설계 역시 구조물의 설계와 마찬가지로 확실한 안전성을 확보할 수 있도록 설계기준에 의한 구조계산이 선행되어야 한다[1].

안전시공과 구조물의 품질 및 안전을 확보하기 위해서는 공사계획수립 시점에서 가설구조에 대한 안전성 검증이 필연적이지만 가설구조물의 중요성을 인식하지 못하여 구조설계를 도외시

* 한경대학교 안전공학과

** 한국산업안전공단 산업안전연구원

하고 그 동안의 경험에 의존하여 공사가 진행될 뿐만 아니라 가설구조물 공사시 현장근로자는 안전성이 검증되지 않은 과소단면의 부재, 결함 재료, 현장 보유 재료 등을 이용하여 적당시공 함으로써 빈번한 붕괴 및 도괴재해가 발생하고 있다[1,3].

특히 도괴재해는 건설재해에서 차지하는 비율은 낮으나 여타 건설재해 형태에 비하여 재해 강도가 크고, 경제적 손실이 매우 큰 것이 특징으로 가설구조물을 구성하는 가설재의 재료결함, 구조결함, 작업방법 불량, 조립불량 등에 기인하여 재해가 발생하는 것으로 추정하고 있으나 정확한 재해발생 원인은 규명되지 못하고 있는 실정이다[1].

일반적으로 건설재해중 도괴재해가 차지하는 비율은 비교적 낮지만 도괴재해는 인명피해가 클 뿐만 아니라 가설구조물과 본구조물의 도괴로 인한 직접손실과 가설구조물의 붕괴로 인한 공기의 연장 등 간접적인 손실까지를 감안한다면 국가적으로도 경제적 손실이 매우 큰 재해이며, 특히 도괴재해는 건설회사의 건설능력의 이미지 실추 뿐만 아니라 세계 건설시장에서 상당한 역할을 하고 있는 우리나라의 건설 이미지에도 상당히 나쁜 영향을 미치는 재해로서 근원적인 재해의 원인을 규명하여 예방대책을 수립하는 것이 무엇보다 중요하다 하겠다[1].

따라서, 본 연구에서는 건설재해중 도괴재해에 대한 광범위한 사례조사와 분석을 통해 1차적으로 재해원인을 규명하고, 도괴재해가 발생한 가설구조물의 구조해석을 통해 구조적인 재해원인을 규명하여 건설재해중 도괴재해에 대한 근원적인 예방대책을 도출하는데 그 목적이 있다. 또한, 본 연구를 수행함으로써 국내 건설안전분야의 연구에서 그간 활발하지 못하였던 도괴재해에 대한 기본자료를 제공하게 될 수 있으며, 건설재해중 도괴재해의 예방기법의 토대를 마련할 수 있게 될 것이다. 또한 도괴재해의 구조상의 문제점이 도출됨으로 해서 가설구조물의 구조설계에 반영할 수 있으며, 유해위험방지 계획서 작성 및 심사에도 활용할 수 있고, 궁극적으로는 가설구조물의 구조기준을 정하는데 있어 토대를 제공할 수 있을 것으로 사료된다.

2. 가설구조물의 구조계산[2)]

2.1 하중계산

거푸집의 설계하중은 고정하중, 충격하중, 작업하중에서 구하는데, 다음 식으로 계산한다.

$$W = \gamma t + 0.5\gamma t + 150\,kg/m^2$$
$$= 1.5\gamma t + 150\,kg/m^2 \quad \cdots\cdots (1)$$

여기서, γ : 철근콘크리트의 단위중량(kg/m^3)
t : 슬래브 두께(cm)

2.2 거푸집널 검토

거푸집널은 장선을 지점으로 연속인 부재이나 등분포하중이 작용하는 단순보로 보고 구조계산을 하기 때문에, 이때 발생되는 최대휨모멘트를 구하는 공식은 $M_{max} = wl^2/8$으로,

$$M_{max} = \frac{1}{8} w l^2 \le \sigma_a Z \quad \cdots\cdots (2)$$

여기서, M_{max} : 거푸집널의 최대휨모멘트(kg·cm)
w : 단위분포하중(kg/cm)
l : 장선의 간격(cm)
δ_a : 거푸집널의 허용응력(kg/cm^2)
Z : 거푸집널의 단면계수(cm^3)

허용응력을 비교하여, 장선의 한계간격 l_1을 다음식으로 구한다.

$$l_1 = \sqrt{\frac{8 \cdot \sigma_a \cdot Z}{w}} \quad \cdots\cdots (3)$$

처짐에 대한 검토도 휨에 대한 검토와 마찬가지로, 등분포하중이 작용하는 보로 볼 때 중앙점의 최대처짐은 허용처짐보다 작아야 되므로, 다음과 같이 장선의 한계간격 l_2를 다음식으로 구할 수 있으며,

$$\delta_{max} = \frac{5wl^4}{384EI} \le \delta_a \quad \cdots\cdots (4)$$

여기서, δ_{max} : 거푸집널의 최대휨모멘트(cm)
w : 단위분포하중(kg/cm)
l : 장선의 간격(cm)
δ_a : 거푸집널의 허용처짐(cm)
E : 거푸집널의 탄성계수(kg/cm^2)
I : 거푸집널의 단면2차모멘트(cm^4)

$$l_2 = \sqrt[4]{\frac{384EI \cdot \delta_a}{5w}} \quad \cdots\cdots (5)$$

이 때 장선의 간격은 l_1과 l_2중 작은 값보다 적어야 한다.

2.3 장선의 검토

장선재를 검토한다는 것은 멍에 간격을 결정하는 일이다. 따라서, 장선도 거푸집널과 마찬가지로 연속인 부재이나 등분포하중이 작용하는 단순보로 보고 거푸집널과 같이 계산한다.

$$M_{max}=\frac{1}{8}wl^2 \leq \sigma_a Z \quad \cdots\cdots(6)$$

여기서, M_{max} : 장선의 최대휨모멘트(kg·cm)
w : 단위분포하중(kg/cm)
l : 멍에의 간격(cm)
σ_a : 장선의 허용응력(kg/cm^2)
Z : 장선의 단면계수(cm^3)

허용응력을 비교하여, 멍에의 한계간격 l_1을 다음식으로 구한다.

$$l_1=\sqrt{\frac{8\cdot\sigma_a\cdot Z}{w}} \quad \cdots\cdots(7)$$

처짐에 대한 검토도 휨에 대한 검토와 마찬가지로, 등분포하중이 작용하는 보로 볼 때 중앙점의 최대처짐은 허용처짐보다 작아야 되므로 다음과 같이 멍에의 한계간격 l_2를 다음식으로 구할 수 있다.

$$\delta_{max}=\frac{5wl^4}{384EI} \leq \delta_a \quad \cdots\cdots(8)$$

여기서, δ_{max} : 장선의 최대휨모멘트(cm)
w : 단위분포하중(kg/cm)
l : 멍에의 간격(cm)
δ_a : 장선의 허용처짐(cm)
E : 장선의 탄성계수(kg/cm^2)
I : 장선의 단면2차모멘트(cm^4)

$$l_2=\sqrt[4]{\frac{384EI\cdot\delta_a}{5w}} \quad \cdots\cdots(9)$$

이 때 멍에의 간격은 l_1과 l_2중 작은 값보다 적어야 한다.

2.4 멍에의 검토

연직하중은 장선재를 통하여 멍에재에 전달되기 때문에, 멍에재는 장선재와의 교점에서 집중하중을 받는 보로서 검토하는 것이 실제에 가깝지만, 일반적으로 등분포하중이 작용하는 단순보로서 검토하며, 내민부분에 대해서는 집중하중이 작용하는 캔틸레버(Cantilever)로 검토한다.

따라서, 앞에서의 너푸집널, 장선재와 마찬가지로 등분포하중이 작용하는 단순보로 보고 거푸집널과 같이 계산한다.

$$M_{max}=\frac{1}{8}wl^2 \leq \sigma_a Z \quad \cdots\cdots(10)$$

여기서, M_{max} : 멍에의 최대휨모멘트(kg·cm)
w : 단위분포하중(kg/cm)
l : 동바리의 간격(cm)
σ_a : 멍에의 허용응력(kg/cm^2)
Z : 멍에의 단면계수(cm^3)

허용응력을 비교하여, 동바리의 한계간격 l_1을 다음식으로 구한다.

$$l_1=\sqrt{\frac{8\cdot\sigma_a\cdot Z}{w}} \quad \cdots\cdots(11)$$

처짐에 대한 검토도 휨에 대한 검토와 마찬가지로, 등분포하중이 작용하는 보로 볼 때 중앙점의 최대처짐은 허용처짐보다 작아야 되므로 다음과 같이 동바리의 한계간격 l_2를 다음식으로 구할 수 있다.

$$\delta_{max}=\frac{5wl^4}{384EI} \leq \delta_a \quad \cdots\cdots(12)$$

여기서, δ_{max} : 장선의 최대휨모멘트(cm)
w : 단위분포하중(kg/cm)
l : 멍에의 간격(cm)
δ_a : 장선의 허용처짐(cm)
E : 장선의 탄성계수(kg/cm^2)
I : 장선의 단면2차모멘트(cm^4)

$$l_2=\sqrt[4]{\frac{384EI\cdot\delta_a}{5w}} \quad \cdots\cdots(13)$$

이 때 동바리의 간격은 l_1과 l_2중 작은 값보다 적어야 한다.

2.5 동바리의 검토

동바리에는 연직하중에 의하여 압축력이 작용하는데, 이 압축력이 동바리의 허용압축하중 이하인가를 검토하는 것이 동바리의 검토이다.

따라서, 위의 멍에의 검토에서 동바리의 간격을 결정하고, 이 동바리 간격에서 하나의 동바

리에 작용하는 최대압축하중을 구하여 이 값이 동바리의 허용압축하중보다 적으면 부재별 검토가 끝나게 된다. 만약 반대의 경우에는 다시 멍에의 검토 조건을 만족하는 동바리 간격을 결정하여 다음식이 만족할 때까지 반복한다.

$$P_{max} \leq P_a \quad \cdots\cdots(14)$$

여기서, P_{max} : 하나의 동바리에 작용하는 최대압축력(kg)

P_a : 동바리의 허용압축하중(kg)

3. 재해분석

3.1 재해분석 배경

거푸집 붕괴로 인한 건설재해는 그 빈도는 그리 많지 않으나 인적손실과 경제적 손실은 전체 건설재해에서 차지하는 비중이 매우 크다. 1972년 버지니아(Virginia)의 베일리스 크로스로드스(Bailey's Crossroads)에 있는 지하4층 지상 27층 아파트 공사에서 24층 슬래브에 콘크리트를 타설중 동바리가 파괴되면서 붕괴재해가 발생하여 14명이 목숨을 잃고, 여러 명이 중상을 입는 매우 큰 재해가 발생한 예가 있는데, 이 경우 동바리 지보에 양방향으로 수평재(Horizontal bracing)를 연결하고, 또한 가새재(Cross bracing)를 연결하였다면 충분히 막을 수 있는 거푸집붕괴의 한 예이다[3].

한편, 본 연구에서는 기 발생된 도괴재해사례에 대한 조사분석과 구조해석을 통해 구조적 결함에 기인한 재해원인을 규명하여 대책을 제시함으로써 동종재해 재발을 방지함을 목적으로 하기 때문에 한국산업안전공단의 중대재해 조사결과보고서중 1994년부터 1997년까지 4년동안의 자료중 총 49건의 자료를 수집하여 재해원인별로 분류하고, 이들 중 도괴재해인 동바리공의 붕괴로 인한 슬래브 붕괴에 해당하는 재해에 대해 사례별로 구조해석을 수행하여 각 가설 구조부재의 안전성 평가를 통해 도괴재해의 근본적인 원인을 도출할 수 있었다.

한편, 본 연구에서는 입수한 자료 총 49건 중 동바리공 붕괴재해 20건, 작업발판 붕괴재해 14건, 엘리베이터 피트 작업발판 붕괴재해 7건, 기타 붕괴재해 8건에 해당하는 것으로 나타났다. 특히, 본 연구에서는 동바리공 붕괴재해중 자료의 불충분으로 인해 구조해석이 불가능한 3건을 제외한 Table 1과 같은 17건의 재해사례를 중심으로 구조해석을 수행하였다.

Table 1 Outline of Failure Events

No. of case	Type of structure	Number of deaths	Number of the injured
1	Living building	2	-
2	Church building	-	5
3	Slab bridge	-	1
4	Apartment house	-	2
5	Industrial building	1	12
6	Drainage building	2	1
7	Box culvert	3	2
8	Industrial building	1	3
9	Drainage building	2	8
10	Multi-service building	1	5
11	Drainage building	2	6
12	Company building	1	-
13	Department store	1	-
14	Auditorium	1	9
15	Slab bridge	1	1
16	Tour Hotel	1	4
17	Living building	1	5

3.2 재해분석 결과

본 연구에서는 1994년부터 1997년까지 일어난 건설재해 가운데 한국산업안전공단에서 직접 조사한 건설중대재해중 구조해석 가능한 17건의 도괴재해에 대한 구조해석을 수행하였다.

이러한 구조해석 결과로부터 가설구조의 각 부재별 응력 및 하중을 허용응력 및 허용하중과 비교하여 각 부재의 안전도를 평가하였다. 다만, 이러한 결과들은 재해조사보고서를 기초하여 가설구조에 대한 모델링을 실시하고, 또한 재해조사 보고서에 나와 있지 않은 것은 가정을 하여 해석을 수행한 결과들로서 가정한 값이 실제와 다른 경우에는 그 결과 값들이 다를 수 있으나, 현장경험과 구조물의 특성을 분석하여 가정을 하였기 때문에 본 연구결과 분석은 추후 유사한 도괴재해를 예방하는데 그 근거를 제공할 수 있을 것이다.

Table 2 Collapse distribution according to shore height

Shore height (H)	H<3.0m	3.0≤H<5.0m	5.0≤H<7.0m	7.0≤H<9.0m	9.0≤H<11.0m	11m≤H
Number of collapse	-	2	3	7	3	2

따라서, 본 연구에서 다루어진 17건의 도괴재해를 동바리높이별로 나누어 보면 Table 2와 같다. Table 2에서 보는 바와 같이 동바리높이가 7.0m이상 9.0m 이하에서 7건의 도괴재해건수로 약 41%의 비율을 보임으로써 많은 자료의 통계 수치는 아니지만, 도괴재해가 가장 많이 발생할 수 있는 동바리높이가 7.0m이상 9.0m이하인 것으로 사료되는데, 이러한 결과를 보이는 것은 동바리높이가 낮은 경우에는 도괴확률이 낮고, 동바리높이가 매우 높은 경우에도 시공시 세심한 주의를 기울이나 중간정도의 높이에서는 동바리에 대한 시공이 정확하게 이루어지지 않고 있다는 것을 의미하는 것이다.

한편, 본 연구의 17건의 사례의 구조해석 안전도평가를 하나의 표로 작성해 보면 Table 3과 같으며, 또한 각 부재별로 불안전율을 작성하면 Table 4와 같다. Table 4에서 보는 바와 같이 가설구조물의 부재중에 거푸집널, 장선재, 멍에재, 동바리 순으로 불안전율이 높음을 알 수 있고, 또한 가장 중요시 여기는 부재인 동바리에서 16건에서 불안전율을 보임으로써 본 사례의 도괴재해는 구조적으로 매우 불안전하여 처음부터 붕괴의 가능성을 지니고 있었음을 알 수 있다.

Table 3 Safety estimation by structural analysis

No. of case	Sheathing	Joist	Stringer	Shore
1	○	○	●	●
2	●	●	○	●
3	○	○	○	●
4	-	○	○	●
5	○	○	●	●
6	○	●	○	○
7	○	○	●	●
8	●	○	●	●
9	○	●	○	●
10	○	○	○	●
11	○	●	○	●
12	○	○	○	●
13	○(Deck plate)	-	-	●
14	○	○	○	●
15	○	○	●	●
16	●	●	●	●
17	○	○	●	●

○ : In case that the stress(force) of the member is less than the allowable stress(strength)

● : In case that the stress(force) of the member is more than the allowable stress(strength)

또한 본 연구에서는 가설구조물의 구성 부재중 가장 중요한 부재인 동바리의 한계간격을 구조해석을 통해 슬래브의 두께와 보의 크기에 따라 구조해석을 통해 Table 5(a)와 Table 5(b)에 제시하였는데, 이 Table 5(a), Table 5(b)를 참고하면 쉽게 동바리의 안전성 여부를 판단할 수 있을 것이다.

Table 4 Unsafety ratio for the respective member of the shoring system

Type of member	Total collapse	Number of unsafety	Unsafety ratio (%)
Sheathing	15	3	20.0
Joist	16	5	31.3
Stringer	16	7	43.8
Shore	17	16	94.1

Table 5(a) Shore space according to slab thickness (Provided that the allowable force of shore is 2,000 kg)

Slab thickness	Shore space
10cm	Less than 1.97×1.97 m
20cm	Less than 1.50×1.50 m
30cm	Less than 1.25×1.25 m
40cm	Less than 1.10×1.10 m
50cm	Less than 1.00×1.00 m
60cm	Less than 0.93×0.93 m
70cm	Less than 0.87×0.87 m
80cm	Less than 0.81×0.81 m

Table 5(b) Shore space according to beam size (Provided that the allowable force of shore is 2,000 kg)

Beam size (B×H)	30×60 cm	40×80 cm	50×100 cm	60×120 cm
Shore space	less than 2.86 m	less than 1.63 m	less than 1.07 m	less than 0.74 m

4. 결 론

가설구조물공사는 구조물의 품질과 안전에 직접적인 영향을 미치므로 안전을 고려한 공사계획이 수립되어야 하며, 가설구조물의 설계 또한 구조물의 설계와 마찬가지로 확실한 안전성을 확보할 수 있도록 구조계산과 설계기준에 의거 정확하게 이루어져야 한다. 그러나 현장에서는 가설구조물의 중요성을 인식하지 못하여 그동안의 경험에 의존하여 가설물공사를 할 뿐만 아니라 안전성이 결여된 가설물 설계와 시공, 안전기준에 맞지 않은 재료의 사용 등으로 붕괴 및 도괴재해가 빈번히 일어나고 있는 실정이다.

본 연구의 구조해석 대상인 17건의 도괴재해를 동바리높이별로 구분해 보면, 동바리높이가 7.0m이상 9.0m이하에서 7건의 재해가 발생하여 약 41%의 비율을 차지했는데, 이러한 결과는 많은 자료의 통계는 아니지만, 7.0m이상 9.0m이하인 동바리높이를 가지는 공사에서 도괴재해가 가장 많이 발생할 확률이 높음을 의미하는 것이며, 이러한 결과는 동바리높이가 낮은 경우에는 붕괴확률 자체가 낮고, 동바리높이가 반대로 매우 높은 경우에는 동바리에 대한 설계와 검사에 세심한 주의를 기울이나 7.0m이상 9.0m이하의 중간정도의 동바리높이에서는 동바리에 대한 정확한 구조계산 및 설계가 잘 이루어지고 있지 않다는 것을 반영해 주는 것이다. 또한 본 연구의 구조해석을 통해 각 부재별 불안전율을 분석해 보면 가설구조물의 부재중 거푸집널, 장선재, 멍에재, 동바리 순으로 불안전율이 높음을 알 수 있었으며, 또한 가설구조물중 가장 중요한 부재인 동바리는 16건에서 불안전을 보임으로써 본 도괴사례들은 구조적으로 불안전한 구조로서 처음부터 붕괴의 가능성을 지니고 있었음을 알 수 있었다.

한편, 각 사례별 구조해석를 통해 재해의 원인을 분석해 보면, 각 사례의 도괴재해는 산업안전기준에 관한 규칙의 거푸집 동바리공등의 안전조치를 철저히 준수하고, 정확한 구조계산이나 구조해석을 통해 안전성을 확보할 수 있는 가설구조물 설계가 이루어졌다면 미연에 방지할 수 있었을 것으로 사료된다. 따라서, 앞으로는 가설물 설계시 경험에 의존한 설계가 아닌 구조계산이나 구조해석을 통해 구조적으로 안전한 가설구조가 될 수 있도록 해야 하며, 특히 도괴재해 예방대책을 철저히 준수하여 다시는 거푸집 붕괴와 같은 원시적인 사고가 발생되지 않도록 건설현장의 모든 관계자가 노력을 아끼지 않아야 할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1) 최순주, "거푸집공사에서의 붕괴재해 원인분석과 예방대책", 콘크리트학회지, 제11권, 3호, pp. 26~36, 1999.
2) 김상곤, 이민우, 가설구조물의 해설, 건설문화사, pp. 40~54, 1996.
3) Hurd, M.K., Formwork for Concrete, 4th Edition, SP-4, American Concrete Institute, Detroit, pp. 2-1~2-13, 1979.
4) Clough, R.H., and Sears, G.A., Construction Project Management, Third Edition, John Wiley and Sons, Inc., p. 295, 1991.
5) ASCE Committee, Structural Standard Division, "Proposed Giude/Standard for Design Loads on Structures during Construction", ASCE, p. 24, 1993.
6) Corotis, R.B., "Probability-Based Design Codes", Concrete International : Design and Construction, Vol. 7, No. 4, pp. 42~49, April 1985.
7) Hadipriono, F.C., "Analysis of Events in Recent Structural Failures", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 111, No. 7, pp. 1468~1481, July, 1985.