

콘크리트 공사현장의 건설안전

콘크리트 공사중의 붕괴진단 사례 Collapse Cases of RC Structures under Construction



이찬식*



안흥섭**



권영웅***

1. 사고개요

1998년 7월 7일 오전 11시 30분 경, 인천광역시 ○○구청사 신축공사장의 의회동 주차장 진출입 램프(ramp) 상단 슬래브(지상 1층 바닥) 부위에 대한 콘크리트 타설 작업 중에 거푸집이 붕괴하여 작업자 1명이 사망하고 6명이 중경상을 입는 사고가 발생하였다.

- 건축규모 : 지하 2층, 지상 7층
- 구조 : 철근콘크리트조, 일부 철골조
- 지하외벽 : 슬러리 월(Slurry Wall)
- 구조형식 : 지하 : 철근콘크리트
- 지정 : PHC Pile(고강도 말뚝) $\phi 500$ (B종)

2. 공사개요

- 대지면적 : 21,792.2m²(6,592평)
- 공사기간 : 1997. 4. 7 - 1999. 7. 25
- 공사금액 : ₩ 39,800,000,000
- 건축면적 : 5,462.46m²(1,652.39평)
- 연 면 적 : 39,774.36m²(12,031.74평)

3. 사고원인 분석

3.1 사고상황

연구진이 조사차 사고현장을 방문하였을 때에는 이미 제반 사고흔적이 정리되고, 붕괴된 자재들도 대부분 현장 밖으로 반출된 상태였기 때문에, 경찰서의 사고조사보고서, 관련자 진술서, 사고 사진 및 비디오 테이프 등을 참조하여

* 정회원, 인천대학교 건축공학과 조교수

** 정회원, 군산대학교 건축공학과 조교수

*** 정회원, 인천대학교 건축공학과 교수

연구를 수행하였다. 또한, 현장에서 콘크리트 타설 작업을 지휘하였던 콘크리트반장, 목수반장, 슬래브 하부에서 거푸집의 보강작업을 한 목수망, 공사감독·감리자 등과 면담을 통하여 연구를 보완하였다. 이러한 내용을 근거로 붕괴 사고가 발생하기까지의 상황을 요약하면 다음과 같다(사고발생 위치 그림 1 및 그림 2 참조).

사고 당일 작업인원은 콘크리트 반장과 지원 나온 반장 1명을 포함하여 총 10명으로, 오전 9시 30분 경 타설 예정 구역인 의회동 1층의 기둥과 옹벽(X3)부터 콘크리트 타설을 시작하였다. 기둥과 옹벽의 타설을 마치고 X2/Y4-Y5부분의 경사로(Ramp) 상부 구간의 보

(G52)부터 타설을 시작하였으나, 첫 번째 보의 측면거푸집이 터지자(보 밑판과 옆 판 사이) 이 보의 타설을 중단하고 동 구간의 다음 보들을 순차적으로 타설해 나가던 중 Y1-Y2사이에 확인 불명의 보 거푸집이 다시 터지는 사고가 발생하였다.

타설 작업을 10분 정도 중단한 후 처음 보를 타설하던 Y4-Y5구간으로 이동하여 다시 슬래브 콘크리트 타설을 시작하여, 타설 위치가 의회동의 부 출입구인 Y3 위치에 이르자 높이가 낮은 외측부터 콘크리트를 타설하여 내측 방향으로 슬래브의 중간쯤까지 타설하던 중, 입구 측의 낮은 슬래브 부위부터 붕괴가 시작되어 붕

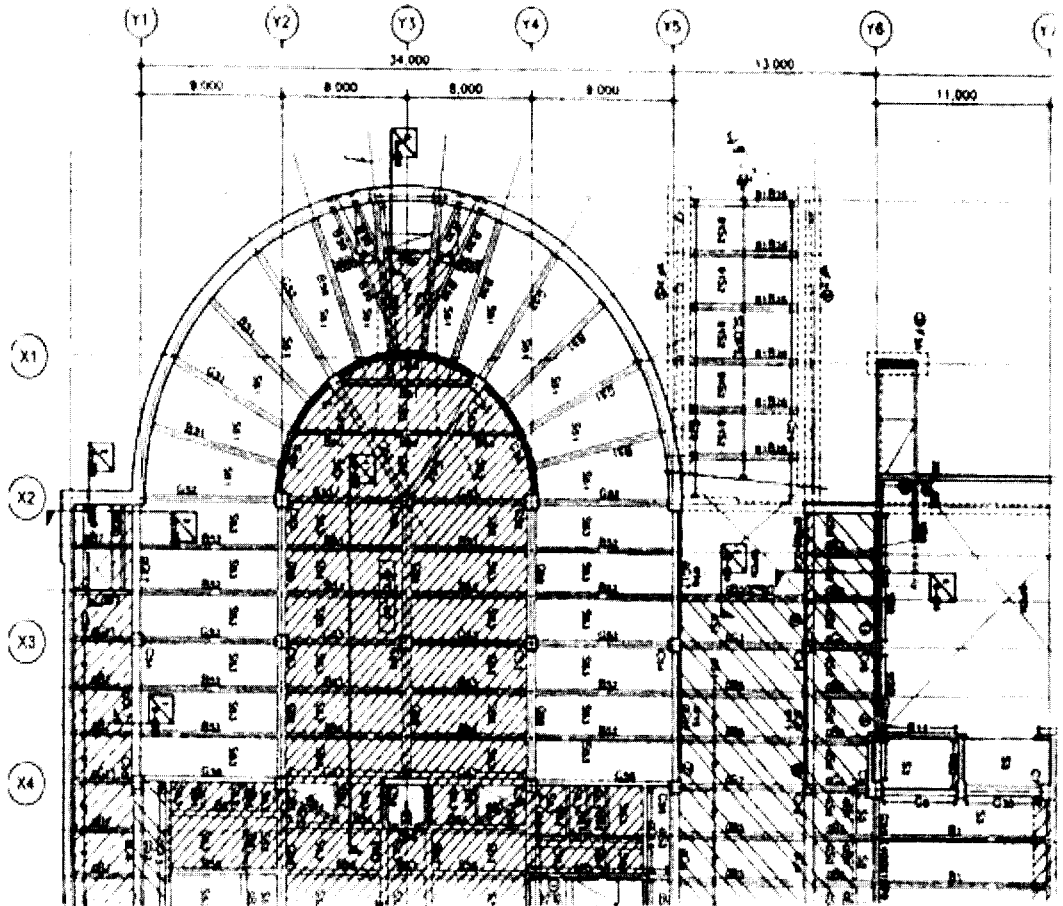


그림 1 붕괴사고 발생부위의 구조도면 (의회동 경사로부터의 슬래브 및 보)

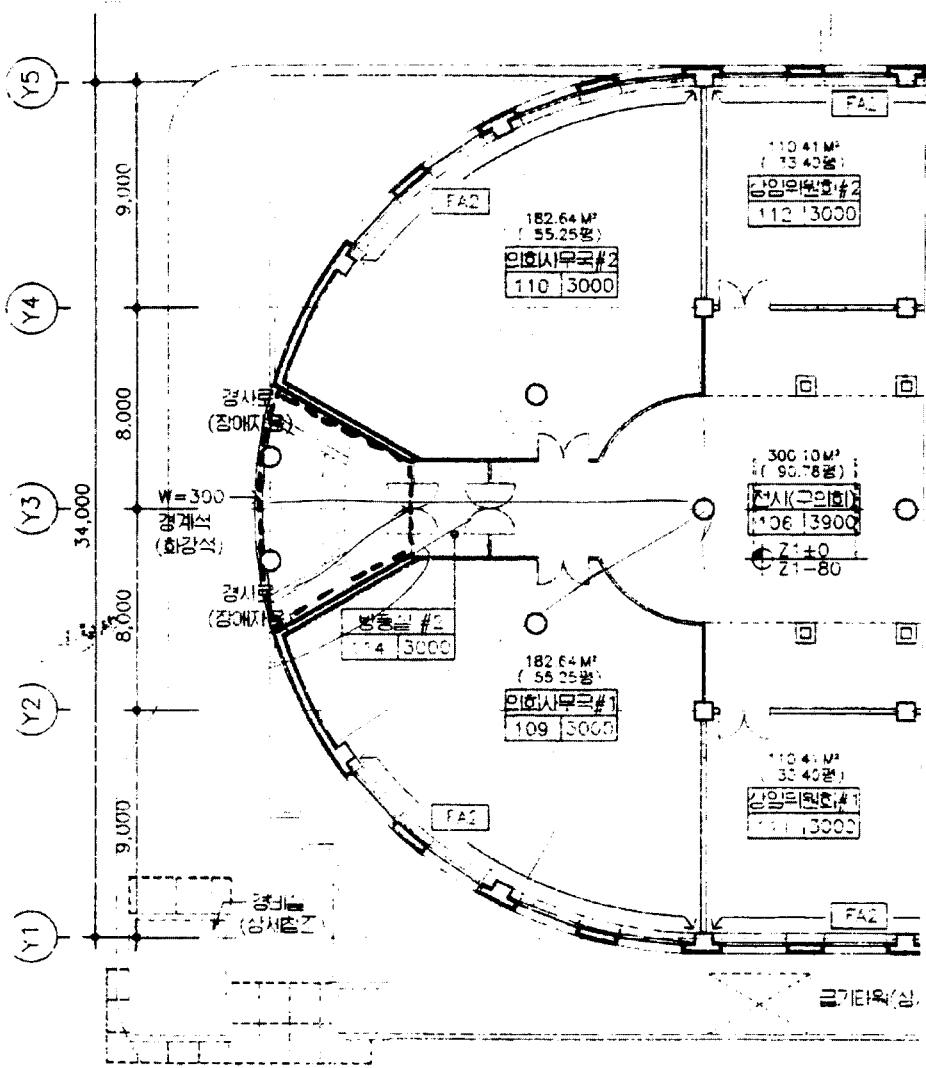


그림 2 붕괴사고 발생부위(의회동 1층)의 경사로 및 계단도면

괴가 내측 및 좌우방향으로 진행되어 경사로 구간의 대부분이 집중적으로 붕괴됨에 따라 슬래브 상부의 콘크리트 작업자들이 함께 추락하였다.

최초로 붕괴가 시작된 의회동의 지상출입구 부분(X1외측/Y2-Y4 구역)은 두개의 큰 보 (Girder: G54)와 높이가 낮은 작은 보 (Beam: B20)들이 경사지어 걸쳐지고, 계단과 장애자용 경사로가 있어서 거푸집의 조립 구조

(형태)가 복잡하고, 바닥 높이가 다른 슬래브 보다 낮아서 콘크리트를 타설할 때 한쪽으로 쏠리기 쉬어 편심 하중이 작용할 수 있는 위치이다.

콘크리트 타설중 콘크리트망을 보기 위해 재해자를 포함한 4명 정도의 목공들이 슬래브 하부에서 거푸집과 거푸집 동바리의 보강 작업을 하고 있었으며, 붕괴시점에 다른 목공들은 붕괴 지점으로부터 일정 거리를 유지하고 있어서 다

른 부분의 슬래브 아래로 대피하였으나, 사망한 재해자는 붕괴가 시작된 바로 하부 2단 동바리의 강관 동바리 사이를 이동하면서, 콘크리트가 타설되는 곳인 위를 올려다 보며 거푸집과 동바리의 보강작업을 하고 있었던 것으로 추정된다. 현장소장의 증언과 사고상황 사진에 의하면, 재해자를 발견하고 구급마스크를 씌우려고 할 때 안면이 콘크리트로 덮여서 코가 막힌 상태로, 콘크리트가 쏟아지자 재해자는 쏟아져 내린 콘크리트를 안면에 맞으며 조립 동바리(3S System)의 상면에 전도된 채 구조물과 함께 매몰되었던 것으로 추정된다.

최초의 붕괴위치나 거푸집이 터진 위치에 대한 공사 관계자들의 증언이 엇갈리고 있으나, 다음과 같은 2가지의 붕괴상황을 가정할 수 있다. 첫째로는 지지 방식이 다른 2단 동바리 시스템을 채용함으로써 상단 동바리를 지지하고 있는 수평 연결재인 명에가 휨 파괴를 일으켜 붕괴를 야기시켰다고 예상할 수 있다. 둘째로는 붕괴 사고가 발생하기 전까지 보 거푸집이 두 군데 이상 터지고 기둥거푸집의 배가 부르는 등 거푸집과 동바리의 불안정한 상태가 계속 발견되었던 점으로 미루어, 붕괴가 시작된 지점의 거푸집과 동바리의 조립상태가 불량하고 콘크리트를 한꺼번에 타설함으로써 콘크리트 무게와 작업하중을 견디지 못한 보 거푸집의 측면이 먼저 터지고, 터진 틈으로 콘크리트가 쏟아지면서 안정성이 부족한 거푸집 시스템에 변위를 유발시켜, 동바리가 무너지면서 경사로 구간 슬래브 전체가 점증적으로 붕괴된 것으로 추정할 수 있다.

3.2 사고원인 분석

이 붕괴사고의 원인을 규명하기 위하여 일차적으로 전술한 사고발생 상황을 분석하고 기술적 측면의 사고발생 원인을 찾기 위하여 거푸집과 거푸집 동바리의 재료 및 조립상의 문제점, 콘크리트 타설방법의 적정성 등에 대하여 검토하였다. 그 다음으로는 사고의 간접적 원인인 콘크리트 타설작업의 관리감독과 감리 측면의 요인들에 대

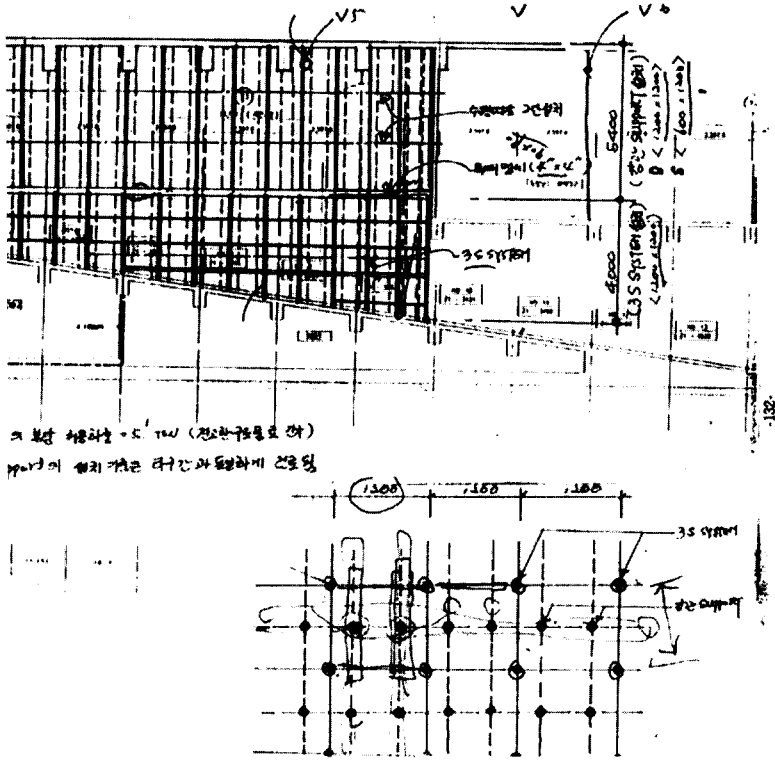
하여 조사·분석하였다. 우리 나라 법령상의 안전기준 및 기술지침과 유사한 붕괴사고의 원인들에 대하여 조사하고, 안전기준 및 사고원인과 관련된 사고현장의 제반조건을 비교·검토하여 붕괴사고의 직·간접적인 원인을 도출하고자 하였다.

과거의 붕괴사고를 보면 층고가 높아서 동바리를 2단으로 사용하고, 평면과 입면의 형상이 불규칙하며 슬래브나 바탕 지지면이 경사진 경우에 사고가 자주 발생하였으며, 이 사고의 경우도 기존의 붕괴사고가 가진 요인들을 모두 갖춘 전형적인 사고이다.

붕괴사고의 원인은 직접적인 요인으로서 기술적 측면의 불안정한 상태와 불안정한 상태를 야기시킨 간접적인 요인으로서 공사참여자의 관리감독상의 문제로 구분할 수 있다. 사고의 직접적 원인은 수평 명에의 강도 부족과 거푸집 및 동바리의 불안정한 조립상태에 있으며, 거푸집의 불안정한 상태를 방치시킨 간접 원인으로 거푸집 조립작업에 대한 공사관계자의 관리상의 결함 즉, 안전점검 및 관리 소홀을 들 수 있다.

기술적인 측면에서 수평 명에의 강도부족 외에 거푸집 조립상의 사고원인을 살펴보면, 붕괴가 시작된 곳은 의회동 부출입구인 계단과 경사로 부위로서 슬래브에 경사와 단차(段差)가 있으며 경계 면에는 작은 보들이 조밀하게 걸쳐 있는 상대적으로 낮은 부위로서 거푸집 구조가 복잡한 데다가 하중이 집중되기 쉬운 조건이었다. 의회동의 사고발생부위는 거푸집공사 하도급업체가 작성한 거푸집조립도(그림 3참조) 및 주변 거푸집과 동바리의 조립상태로 미루어 거푸집과 동바리의 조립 상태가 매우 불량하였다. 특히 보의 바닥 및 측면 거푸집 사이가 느슨하게 떨어져 콘크리트가 흘러내리면서 고정상태가 상실한 상단의 파이프 씨포트를 가격하여 전도되면서 슬래브와 동바리가 연속적으로 붕괴한 것으로 추정된다.

부분적으로 콘크리트의 과도한 타설 속도나 콘크리트의 과도한 적재가 슬래브의 붕괴를 촉진시켰을 가능성도 있지만, 일차적인 붕괴원인은 수평



의 보강 차용과를 - 5' 7" (전사한구용도로 하)
 44.2%의 형리 개은 더구간과 될라게 건을 일

그림 3 거푸집공사자가 작성한 거푸집조립도

명의 휨강도 부족과 보 및 슬래브 거푸집과 동바리의 부실한 조립에 있다. 거푸집 및 동바리의 허용 지지력 부족은 조립작업을 소홀히 해서 라기 보다는 주차장 램프바닥 경사면 위의 높은 층고 등 붕괴구간의 여러 가지 불리한 공사여건을 충분히 고려하지 않고 관습적으로 거푸집 조립작업을 한 결과로 판단된다.

붕괴지점의 슬래브는 보통의 동바리로는 지지가 불가능한 높은 층고, 지지조건이 까다로운 경사면 바닥, 부분적으로 높낮이가 일정치 않은 슬래브구조, 램프 바닥 면의 곡률 등 동바리의 허용내력을 감소시키는 여러 가지 요인이 있었음에도 불구하고, 동바리 상하단의 고정, 수평연결, 가새 등에 대한 보강을 소홀히 한 것으로 보인다.

붕괴사고의 간접적 원인으로 거푸집 및 콘크리트 타설작업에 대한 관리 미흡을 들 수 있는데, 거푸집공사 하도급업체 현장소장 및 작업원들의 거푸집 조립작업에 대한 감독과 조립상태에 대한

확인 소홀을 지적할 수 있다.

다음으로 원도급자의 현장기사는 거푸집 및 동바리 조립 작업의 안전담당자로서 하도급업자가 작성한 거푸집 조립도와 거푸집 작업내용에 대한 사전 검토와 확인·점검이 부족하였고, 콘크리트 타설작업 중에 거푸집이 터지는 사고가 발생하였음에도 작업 중지 등 비상조치를 소홀히 하였으며, 원도급자의 상위 관리책임자인 공사과장 및 현장소장은 하도급업자와 부하(현장 담당기사)에 대한 지휘가 제대로 이루어지지 않았다.

사고현장은 책임감리 대상공사로서, 감리단은 원도급자 및 하도급자의 작업과정을 감독하고 공사부실 가능성을 억제해야 한다. 그러나 사고현장의 감리단은 거푸집 조립과 콘크리트 타설공사에 대한 점검과 확인을 소홀히 하여 거푸집 조립도에 대한 검토를 충분히 하지 않았으며, 동바리 조립상태의 점검, 사고발생 요인에 대한 안전관리 업무를 소홀히 하여 사고발생요인을 사전에 제거

하지 못하였다

4. 구조해석 및 검토

붕괴된 거푸집과 거푸집 동바리의 강도와 변형을, 거푸집공사 하도급업자가 작성한 거푸집조립도로부터 추정하여 거푸집과 동바리의 구조적 적정성을 검토·분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 거푸집 패널, 장선, 멩에 등의 가설재는 대체로 허용강도와 변형을 유지하고 있었다.

(2) 동바리를 지지하는 멩에의 강도가 부족한 것으로 나타났다.

(3) 슬래브와 보를 지지하고 있는 동바리는 소정의 허용지지 강도를 확보하지 못하였는데, 이는 동바리와 수평 연결재의 수량 부족이나 이들 부재들의 긴결성 부족에 기인한 것으로 판단된다.

5. 맺음말

5.1 사고원인 요약 및 결론

본 진단연구에서는 붕괴사고 현장에 대한 현장 조사를 바탕으로 사고 당시 채용한 거푸집 구조 시스템 및 붕괴사고와 관련된 일체의 자료 등을 검토·분석하여 붕괴사고의 원인을 규명할 수 있었으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 거푸집 및 거푸집동바리 구조와 설치 조건에 대한 검토가 미흡하였고 거푸집 조립도의 내용이 매우 불충분하였다.

- ① 구조적으로 가장 불리한 장소에 설치된 상하단 이종(異種) 동바리 사이의 멩에에 대한 구조검토 미비로 멩에의 강도가 부족하였다.
- ② 조립시공이 복잡한 경사로 구간에 대한 조립도의 내용이 매우 불충분하였다.
- ③ 원도급업자 및 감리단이 조립도를 면밀하게 검토하지 않았다.

(2) 불안정한 거푸집 동바리 구조 및 조립 상태로 인하여 동바리의 지지력이 감소하였다.

- ① 경사면인 동바리 하단부에 대한 췌기목 고정이 불량하였다.
- ② 동바리 상부의 수평 연결재가 부족하였다.
- ③ 일부 강관 동바리의 도립(倒立) 시공, 강관 동바리와 상단 멩에의 고정 상태 불량, 경사면 하단 동바리 받침판의 받침과 고정상태 불량, 가새의 미설치 등으로 동바리의 허용지지력이 감소되었다.

(3) 콘크리트의 타설방법이 적절하지 못하였다.

- ① 콘크리트 타설 속도가 과도하였다.
빠른 속도로 일시에 많은 콘크리트가 타설됨으로써, 경사진 슬래브에 하중이 집중하고 슬래브를 지지하는 거푸집 동바리에 편심력을 발생시켰다.
- ② 편심이 예상되는 부위였지만 콘크리트를 나누어 타설하지 않았다.

붕괴 부위는 거푸집 및 동바리의 조립 상태가 복잡하고 보의 깊이가 깊어 반드시 콘크리트를 나누어 타설해야 했으나, 거푸집공사 및 콘크리트 타설공사 하도급업체간 상호 협조와 조정이 미흡하였고, 공사초기에 콘크리트하도급업자에 대한 거푸집공사업자의 콘크리트 나누어 치기 요구가 제대로 이행되지 못하였다.

(4) 보 및 슬래브 거푸집의 조립상태가 불량하였다.

- ① 의회동 부출입구 경사슬래브 부위의 보의 조립상태가 불량하고 강도가 부족하였다.
보 밑판과 옆 판의 조립 상태가 불량하였고, 강성이 낮은 플라스틱 거푸집을 보 밑판으로 사용하여 강도가 떨어졌다.
- ② 슬래브 거푸집 구조가 불안정하였다.
각형 강관을 장선으로 사용함으로써 슬래브 합판, 장선과 멩에가 견고하게 긴결될 수 없었고, 주변 슬래브가 들뜨는(lifting) 현상이

나타난 것으로 판단된다.

(5) 거푸집 및 콘크리트 작업에 대한 관리감독과 감리가 소홀하였다.

- ① 콘크리트를 타설하는 도중에 기둥과 보의 거푸집이 여러 차례 터지는 등 사고가 발생할 조짐이 있었음에도 작업 상황에 대한 감시 감독이 소홀하고 응급조치가 미흡하였다.
- ② 거푸집 조립상태 특히 슬래브 하부 동바리 구조에 대한 점검이 소홀하였다.
- ③ 콘크리트 타설 계획에 대한 사전 검토와 작업지시가 제대로 이루어지지 않았다.
- ④ 공사진행 전반에 대한 감리단의 점검과 확인이 미흡하였다.

5.2 유사거푸집 붕괴 사고예방책

거푸집 및 동바리는 공사가 완료되면 해체되는 일시적인 가설구조물로서 소홀히 취급되는 경향이 강하며, 사고 또한 빈번하게 일어나고 있다. 거푸집은 구조물의 품질과 안전에 직접적인 영향을 미치므로 안전을 고려한 공사계획이 수립되어야 하며, 거푸집의 설계 또한 구조물의 설계와 마찬가지로 확실한 안전성을 확보할 수 있도록 구조계산과 설계기준에 의거 정확하게 이루어져야 한다.

현장에서는 거푸집의 안전과 품질상의 중요성을 인식하지 못하여 경험에 의존하여 공사를 수행할 뿐 만 아니라, 안전성이 결여된 거푸집의 설계와 시공 등으로 거푸집 사고가 빈번히 일어나고 있는 실정이다.

유사 사고의 방지를 위해서는 우선 산업안전기준에 관한 규칙의 준수가 선행하여야 하며, 특히 다음 사항에 유의한다면 거푸집의 붕괴사고를 줄일 수 있을 것이다.

- ① 거푸집 동바리 지지토대의 경사여부와 견고성, 슬래브 형상의 부정형 또는 경사여부 및 복잡성, 높은 층고 등 동바리 조립상의 제약조건에 유의하여 거푸집의 구조계산을 통해 안전도를 검사하고, 이를 근거로 하여 조립도를

반드시 작성한다.

- ② 동바리의 높이가 3.5m이상일 경우에는 2m마다 수평 연결재를 4개 이상의 볼트 또는 전용 철물로 2방향으로 설치한다.
- ③ 동바리를 2단 이상으로 할 때에는 반드시 동바리와 동바리의 이음판에 볼트와 너트(또는 전용철물)를 사용하여 단단히 체결되도록 한다.
- ④ 동바리와 동바리 사이 이음부에 각재를 넣는 것은 되도록 피하고 부득이 사용하고자 할 경우에는 상부 동바리와 하부 동바리가 일치하도록 설치하고, 이음부는 단단히 체결되도록 전용철물 등을 이용하여 고정한다.
- ⑤ 강관지주 대신에 단관 파이프를 사용할 때에는 상단에 강재의 단판을 부착하여 사용한다. (특히, 단관 파이프의 이음은 2본 이상 사용하지 않으며, 겹치이음시 충분한 이음길이를 확보한다.)
- ⑥ 동바리 지지점의 침하 또는 미끄러짐이 일어나지 않도록 확실하게 고정한다.
- ⑦ 장선은 거푸집 밑에, 멍에는 장선에, 동바리는 멍에에 반드시 고정시킨다.
- ⑧ 내관과 외관을 연결하는 연결나사 부분이 마모되거나 부식된 동바리는 사용하지 않는다.
- ⑨ 변형되거나 부식된 동바리는 사용하지 않는다.
- ⑩ 경사면이나 지지높이가 높은 경우는 반드시 별도의 조립도를 작성하여 검토한다.
- ⑪ 전용수명의 기준을 정하여 전용수명이상인 가설재는 폐기 처분한다.
- ⑫ 슬래브 두께 및 보의 크기에 적합한 동바리 간격이 유지되도록 한다.

참고자료

- (1) 설계도서 : 설계도면, 거푸집조립도(시공도), 콘크리트 타설계획도
- (2) 시방성 : 건축공사표준시방서, 콘크리트공사 시방서
- (3) 진술서 : 원도급 및 하도급업체, 감리단 등 관계자
- (4) 연수경찰서 실황조사서 및 수사보고 자료
- (5) 업무일지(안전, 감리), 공사일보
- (6) 사용자재 재료시험성적서, 카다로그, 구입송장 :

- 거푸집, 거푸집지보공 장선 및 멩에(목제, 강제), 콘크리트, 플라스틱거푸집
- (7) 콘크리트타설 계획서
 - (8) 철근조립 및 거푸집조립상태 검측요청서
 - (9) 유해위험방지계획서
 - (10) 사고현장 사진
 - (11) 안전관리비 계획서 및 집행 실적

- (4) 산업안전연구원, 가설공사안전모델개발에 관한 연구(도괴재해사례를 중심으로), 1997.12
- (5) 산업안전연구원, 건설공사표준안전시설 기준 연구(단관비계를 중심으로), 1997.12
- (6) 산업안전연구원, 검정대상, 가설기자재 품목확대 연구, 1997.12
- (7) 산업안전보건법령집, 홍문관, 1997.9
- (8) 시설물안전진단협회, 건설공사안전관리계획서 작성 지침, 1997
- (9) 쌍용건설, 거푸집설계 및 시공표준안, 1994
- (10) 한국산업안전공단, 노동부, 거푸집동바리 안전작업 매뉴얼, 1998.5
- (11) Raymond Kuhlman, Professional Accident Investigation, ILLI, 1997

참고문헌

- (1) 김기동 외, 거푸집공사의 이해와 시공, 기문당, 1993
- (2) 대한건설협회, 건설기술관리법령집, 1997.9
- (3) 대한건축학회, 건축공사표준시방서, 1994

〈 연구부 연구소위원회 공모 〉

한국콘크리트학회 연구부 연구기획분과 위원회에서는 아래와 같이 요건을 갖춘 연구소위원회를 공모하고자 하오니 활동계획서를 제출하여 주시기 바라며, 회원 여러분의 많은 참여를 부탁드립니다. 공모된 소위원회에 대하여 10월 학회 이사회 인준을 거쳐 1999년 11월 1일부터 시행할 예정입니다.

- 아 래 -

1. 활동계획서에 포함되어야 할 내용

- 소위원회 명칭

(1999년 7월 현재, 내진상세, 콘크리트 진단, 콘크리트 균열, 콘크리트 내구성설계 및 수명평가, 폴리머 콘크리트, 현장 콘크리트의 품질관리, 콘크리트 구조물 보수·보강 연구소위원회가 활동중에 있습니다.)

- 활동 내용

2년동안 1회 특별 session 개최 (학술발표대회 시)가 포함되어야 하며, 결과물로서 최소한 하나의 특별 논문집(special publication)을 출판하여야 함. 소위원회는 단위별로 학회 연구용역, 지침서 작성, 기술교육에 참여하게 되어 학회의 학술활동을 촉진하게 될 것입니다. 소위원회는 출판비 등 최소한의 활동비를 지급할 예정입니다.

- 소위원회 인적 구성(위원장 및 위원, 근무처 등)

- 위원수 : 10명 내외

2. 활동기간

- 2001년 11월에 평가하며 결과에 따라 2개년씩 연장이 가능함.

3. 1999년 9월 10일 마감

4. 제출처 : 한국콘크리트학회 연구부 연구기획분과위원회