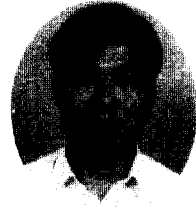




## 외국의 거푸집 붕괴 사례

### Formwork Failures in Foreign Countries



이 차 돈\*

#### 1. 소 개

최근의 건설 시장에서 거푸집 작업은 전체공사비와 인력면에서 큰 부분을 차지한다. 따라서 거푸집 공사는 과다하게 설계되지 않은 적절한 작업이어야 함과 동시에 주의 깊고 안전하게 진행되어야 한다. 이는 콘크리트를 적시 적소에 타설하고 거푸집을 적절한 시기에 해체함과 동시에 거푸집의 재 사용이 계획적으로 진행되어야 함을 의미한다. 그러나 경제성 문제로 인하여 의식적이던 또는 무의식적이던 간에 거푸집 설치 과정에 위험이 수반되는 작업을 하게 된다. 이런 경우 발생하는 문제점은 재난적이고 또 복구하는 데 엄청난 비용을 수반하는 사고를 동반할 수 있다.

거푸집 작업에 있어서의 실수를 감안한 안전계수를 충분히 적용함에도 불구하고 여전히 과다한 경제성 감안, 작업자의 무지 등으로 인하여 거푸집 작업시 사고가 발생하고 있다. 많은 사고들이 과하중이나 거푸집지지 주변 부재의 잘못된 위치로 인하여 연속적인 반력을 거푸집에 가하게 됨으

로써 거푸집 전체가 종국 하중상태에 이르러 파괴를 하게 된다. 과거에 붕괴사고가 없었던 거푸집 자체나 그 설계를 그대로 따라 거푸집을 설치하였다손 치더라도 어떤 예기치 못한 일로 인하여 거푸집 전체가 붕괴에 이르는 경우도 있다.

미국의 Willow Island Station Cooling Tower의 거푸집 붕괴 사고가 이런 경우인데 이 붕괴 사고로 인하여 51명의 아까운 인명을 손실하였다.

비교적 큰 회사들은 유능한 거푸집 설계자가 있으나 대부분 소규모의 회사들은 여기에 대한 충분한 고려를 하지 못하는 경우가 대부분이다. 표 1은 1964-1974년 까지 미국내에서 일어난 거푸집 붕괴사고에 대한 그 형태와 비율을 나타낸 것이다.

비교적 한 지역에서만 시공하는 시공자일 경우 안정된 인력을 창출할 수 있으며 이런 경우 현장 시공자들도 시공자의 방법이나 거푸집 설치 방법 등에 대하여 익숙하므로 안정된 시공력이 형성된다고 볼 수 있다. 그러나 많은 지역에 걸쳐서 일을 하게 되는 시공자의 경우 다른 지방의 시공 방법과 기술에 의존하게 됨으로써 거푸집 설치 작업이 안전 프로그램 등에 대하여 개략적인 방향만을 갖고 그 지방의 시공자 지시에 따라 작업을 진행하

\* 정회원, 중앙대학교 건설대학 건축공학과 부교수

표 1 1964 - 1974년 사이 미국내 발생한 붕괴사고 원인 유형 및 비율

사고유형	거푸집붕괴	지지대의 조기제거	과하중	지반 부적절한 재료사용	화재	기타
건수	13	2	1	1	2	4
비율(%)	54	8	4	4	8	18

게 된다. 그러므로 공사 감독자는 현장 시공자들이 철저히 거푸집 도면을 준수하고 또한 수반될 수 있는 모든 위험한 것들에 대하여 주의를 주어야 한다. 그러나 작업을 빨리 진행하기 위하여 개인적인 차원에서의 안정성은 무시되는 경우가 허다하다.

시공에 있어서의 생산성을 향상시키기 위하여 일반적으로 최소의 작업자를 고용하여 최소한의 시간내에 주어진 작업을 완성하고자 한다. 그림 1은 미국내 작업자의 생산성을 나타내는 그래프로서 특히 점심식사 후 2-3시간이 지난후에 작업성이 현저하게 떨어지는 것을 보여준다. 따라서 이후에 작업자가 주의력이 떨어지고 실수를 할 확률이 많아지며 이로 인한 사고를 방지하기 위하여 하루의 일이 진행됨에 따라 철저한 감독과 조사가 진행되어야 한다. 안전을 확보하기 위하여 안전한 작업장, 안전한 거푸집 설치방법, 그리고 교육을 받은 작업자가 반드시 있어야 한다.

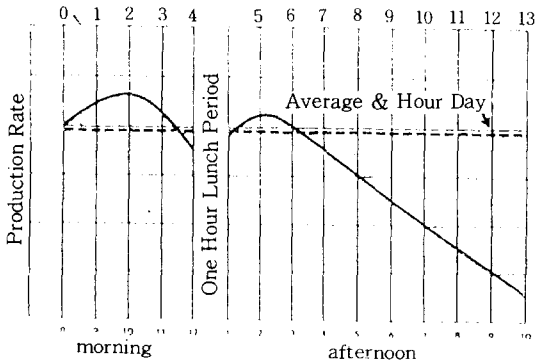


그림 1 하루 8시간 이상 노동하는 노동자의 상대 생산성 (피로가 가중됨에 따른 생산성 저하를 나타냄)

거푸집 붕괴는 주로 부적절한 거푸집의 설치나 제거로 인한 경우가 많다. 오늘날의 거푸집은 타설된 콘크리트의 수직하중을 견디지 못할 만큼 약

한 경우는 거의 없지만 시공 중에 가하여지는 여러 형태의 수평하중에 대하여 충분히 지지되지 못하는 경우는 가끔씩 발견된다. 수평력은 빠르게 움직이는 운반차의 출발시나 정차시 또는 콘크리트를 deck 위에 갑자기 부어 넣을 때 발생할 수 있다. 무거운 시공재료가 콘크리트 위에 비대칭적으로 모이거나 또는 바람이 불때 횡력이 작용하게 되는데 이에 대한 적절한 bracing이 거푸집에 대하여 필요하다. 거푸집과 이를 받치는 버팀대를 조기에 제거하거나 또는 부주의하게 이들을 설치한 시공형태가 결국은 완공된 건물에 균열을 일으키거나 또는 과도한 처짐 그리고 붕괴까지 일으킬 수 있다. 부적절한 단면 크기나 간격으로 설치된 버팀대에 의해 시공시 붕괴가 일어날 수 있으며 버팀대가 지지되어 있는 밑부분이 결합이 있는 지반으로 되어 있을 때도 붕괴가 일어날 수 있다. 때로는 시공시 여러 차례 이상없이 안전하게 사용되었던 거푸집 형태일지라도 미세한 상에서의 차이 때문에 거푸집의 부분적인 결합을 가져오며 이로 인하여 거푸집 전체가 붕괴될 수 있다. 거푸집 붕괴사건 실례를 들어 그 원인을 간략히 정리하면 다음과 같다:

- 1) 수직 또는 수평력의 과하중
- 2) 수평력에 대한 부적절한 bracing
- 3) 연결 부위나 지압(bearing pressure)에 대한 부적절한 상세
- 4) 거푸집 버팀대의 불완전한 설치
- 5) 거푸집의 조기 제거
- 6) 버팀대 설치 문제
- 7) 이전에 시도되지 않은 공법의 사용

본 사례들에 나타난 외국의 거푸집 붕괴사고는 현재의 거푸집 공사에 많은 안정성이 요구되어야 함을 보여주는 좋은 예라고 할 수 있다.

## 2. 과하중

### 2.1 수직하중

오늘날 단순한 과하중에 의한 거푸집 붕괴건은 비교적 드물다고 볼 수 있다. 1903년 미국 피츠버그에서 발생한 8층 Bellefield 아파트 건물의 지붕

이 붕괴한 것이 미국에서 이런 유형으로서는 초기의 붕괴사고의 경우에 해당된다. 슬래브의 지간 거리가 3.9m로서 기푸집의 목재에 질함이 있음으로 인하여 하중이 작용하였을시에 붕괴가 일어났다.

서중 부분의 구조체에 콘크리트를 타설하기 전에 나쁜 일기 기상으로 인하여 건물 전체를 덮을 목적으로 먼저 지붕층부터 콘크리트를 타설하기 시작하였다. 그러나 슬래브가 붕괴되면서 2내지 3층 높이 거리를 낙하하여 그 아래부분의 슬래브에 충격 하중을 가함으로써 지하층까지 모든 슬래브가 연쇄적으로 붕괴하게 되었다. 1957년에 Yonkers, N. Y.에서 발생한 대형 차고의 1층 바닥 붕괴건의 조사에 의하면 지토의 불충분한 저항력에 의한 것으로 조사되었으나 당시 작업자들의 증언에 의하면 콘크리트를 적재한 5.7m<sup>3</sup> 용량이 트럭이 실게 하중인 콘크리트 9.2m<sup>3</sup>에 해당하는 하중을 이미 받고있는 넓이 4.6×5.2m의 바닥 슬래브 기푸집 가운데에 추가적으로 콘크리트를 타설함으로써 붕괴되었다고 보고하였다. 실제 과하중을 일으키는 요인은 여러가지가 혼합적으로 작용함으로써 매우 복잡한 현상이라고 볼 수 있다. 기푸집 버팀대의 부분적인 침하는 그 부근 몇 개의 버팀대에 부분적인 과하중을 줄 수 있으며 휘거나 결손이 있는 버팀대를 사용하였을 경우에도 부분적인 과하중이 가해질 수 있다. 만일 어떤 한 버팀대가 자신이 감당할 하중을 충분히 지지하지 못한다면 이 버팀대 부근의 다른 버팀대에 추가적인 과하중이 걸리게 된다. 편심이 걸릴 경우에도 버팀대의 좌굴 하중에 대한 저항력을 급격히 감소시킴으로써 과하중에 의한 파괴를 일으킬 수 있다.

## 2.2 콘크리트의 측압

부적절한 콘크리트 측압에 대한 기푸집 설치는 대형사고를 일으키기 보다는 기푸집을 부풀어오르게 하여 횡방향으로의 변형을 발생시키는 요인이 된다. 온도변화나 기푸집내에 수직으로 콘크리트를 타설하는 속도로 인하여 측압이 발생하는 경우가 있다. 만일 타설시에 온도가 내려가면 기푸집에 과하중을 일으킬 수 있는 측압을 줄이기 위하

여 타설 속도를 늦추어야 한다. 다행히 수직 기푸집의 경우는 타설 진행시 횡방향변형을 관찰할 수 있으므로 변형이 과도하게 일어난다고 판단될 경우에는 타설 속도를 늦추거나 타설을 중지해야 한다. 측압에 의한 기푸집 붕괴사고는 상기와 같이 예측 가능함으로써 이로 인한 붕괴의 사례는 드물다고 볼 수 있다.

## 3. 횡력에 대한 부적절한 bracing

지반위 비교적 높은 곳에 위치하거나 또는 바로 전 단계에서 시공된 바닥판에 지지된 일련의 기푸집들은 안정된 구조물이라고는 고려될 수 없다. 대부분의 하중이 버팀대 위에 작용하며 이들 하중이 버팀대 상부와 기푸집 버팀대 밑부분과 바닥판 사이의 연결부분이 완전히 고정되어 있다고 볼 수 없는 버팀대를 통하여 아래층 바닥상부로 전달되게 된다. 바람, 지지 케이블에 의한 인장력의 발생, 운반화물의 이동에 의한 출발 및 정지, 콘크리트의 타설 등에 의하여 발생하는 횡력에 의한 대각선 방향으로의 부적절한 bracing은 현장에서 흔히 볼 수 있다.

아래 경우들은 이와같이 부적절한 bracing으로 말미암아 발생할 수 있는 기푸집 공사 사고예를 보여준다.

### 3.1 저수조 지붕, Santa Monica, California - 1949

1949년 캘리포니아 주의 Santa Monica에서 저수조를 지지하는 새로 타설된 12.2×25.9m 크기의 지붕 deck를 지지하는 기푸집이 붕괴되었다. 6m 높이의 철재 기푸집으로 쌓인 기둥과 12.7cm 두께의 deck에 콘크리트를 타설할 시 붕괴가 발생하였는데 이때 기푸집은 전형적인 잭 버팀대로 지지되어 있었다. 붕괴 현장의 사진에 의하면 기푸집 위에 판자를 대고 이 위로 고무 타이어를 갖는 운반차가 운행되었음이 판명되었다. 파괴되지 않은 부근 기푸집을 지지한 jack은 옆으로 어긋나게 튕겨나왔으며 또 대각선 방향으로 bracing이 없었음이 판명되었다. 슬래브가 붕괴된 후에도 기둥은 수직 상태로 서있었다.

### 3.2 Parke-Bernet 갤러리, New York, N. Y. - 1949

펜트 하우스가 있는 5층 건물을 시공하는 중에 5층의 11.7×22.8m 크기의 바닥 슬래브가 붕괴되었다. 기둥은 5.9×6.8m 간격으로 계획되었으나 붕괴된 부분에서는 2층 높이(6.6m)의 판매매장의 공간(3층의 두 중심 bay)을 확보하기 위하여 기둥들이 생략되었다. 17.8cm 슬래브가 1.6cm 두께를 갖는 합판으로 지지 되었으며 이 합판은 30.5cm 간격의 5×10cm 단면의 목재 장선으로 지지되었다. 수평 bracing이 이 층의 상하로 설치되었으나 대각선 방향의 bracing은 설치되지 않았다. 1949년 6월 15일 아침에 매장 부근에 위치한 5층 바닥의 3개 bay에 대하여 콘크리트를 타설하였으며 오후에 매장의 슬래브가 타설되었는데 이때 버팀대를 제거한 3층 바닥으로 붕괴가 발생하였다. 붕괴는 타설 부위에서만 국부적으로 일어났으며 붕괴된 파편들은 이미 타설 완성되고 버팀대가 제거된 아래 3층 바닥판에 의하여 잘 지지되었다. 현장 사진에 의하면 콘크리트를 타설할 시에 큰 바퀴를 갖는 운반차를 기둥집위 판자길 위로 운행하였음이 밝혀졌다. 붕괴는 거의 정확하게 길이가 긴 높은 버팀대로 지지된 부분에 대하여 발생하였음이 밝혀졌다.

### 3.3 석유저장 탱크, Everett, Massachusetts - 1953

54×50.4m의 바닥 크기와 9m 높이의 석유 저장 탱크 4개가 시공되던 중에 1953년 10월 3일에 이들 중 1개의 탱크가 목재 기둥집의 파손으로 인하여 붕괴되었다. 원래 25.4cm 두께의 flat plate 지붕이 60cm 외벽과 중심거리 6.3×5.4m 간격으로 배열된 63개의 원형 기둥으로 지지 될 예정이었다. 기둥은 지붕 슬래브에 대해 capital과 drop pannel을 갖는 실린더 형의 강재 기둥집을 이용하여 콘크리트가 타설될 예정이었다. 붕괴 당시 한 개의 탱크는 천정 면적의 반에 해당하는 부분이 이미 타설되었고 기둥집을 해체하였으며 나머지 반에 대해서는 부분적으로 기둥집 공사가 이루어진 상태였다. 사고당시 또다른 탱크 지붕 부분에 약 306m<sup>3</sup>의 콘크리트를 타설하여 지붕 면적의 반

정도에 콘크리트를 채워 넣었을때 목재 기둥집에서 붕괴 현상이 일어났다. 이 기둥집은 1.6m 직간을 갖고 중심거리 40.6cm 상선위에 지지된 1.5cm 합판 기둥집으로 이루어졌다. 이 장선들은 높이가 9m이고 중심거리 1.8m인 버팀대들과 세로보에 의해 지지되어 있었다. 이 버팀대는 두 방향으로 4조의 brace로 수평 버팀 지지되어 있었다. 부근의 탱크에 이와 유사한 버팀대가 아무런 이상없이 성공적으로 사용되었으나 이 탱크의 경우 이전에 타설된 콘크리트 기둥만 남겨 놓은채 완전하게 붕괴되었다. 좀 더 적절한 bracing을 사용하였다면 적어도 붕괴 면적을 축소할 수 있었으리라 사료된다.

### 3.4 뉴욕 체육관, New York, N. Y. - 1955

약 930m<sup>2</sup>에 해당하는 뉴욕 체육관 주 전람 바닥의 기둥집이 붕괴되었다. 바닥은 waffle flat slab 구조였다. 붕괴된 부분은 별개의 깊은 보가 주계단과 에스컬레이터를 위한 개구부와 연결되어 있었다. 기둥집 버팀대는 최대 6.6m 높이를 가지는 두 층으로 이루어졌다. 하부 층은 두 방향의 수평 bracing로 이루어진 격자형태(75×120cm 간격)의 목재 버팀대와 약간의 대각선 방향으로의 bracing으로 이루어졌다. 상부층은 조정 가능한 파이프 형태의 버팀대로 이루어졌으며 윗부분은 목재 장선을 지지하기 위하여 철관을 대었다. 유사한 기둥집 형태가 동일한 프로젝트에서 약 60군데 사용되었다. 예정된 770m<sup>3</sup> 콘크리트 중 540m<sup>3</sup>의 콘크리트를 타설하였을때 아무런 예고없이 급작스런 붕괴가 발생하였다.

붕괴사고 이후에 더 많이 보강된 bracing이 나머지 버팀대에 설치되었으며 붕괴된 부분은 수평 및 대각선 방향으로 새로운 두 층의 버팀대로 보강되었다. 사고후 운반차의 작업속도는 감소시켜서 진행하였으며 고무로된 완충제를 운행로에 설치함으로써 이미 완성된 콘크리트 바닥에 충격이 덜 가도록 하였으며 파이프형 버팀대에 대하여 대각선 방향의 타이를 설치하였다.

### 3.5 주차장, Jackson, Mississippi – 1956

메탈 pan forms 위에 타설이 막 끝난 6×9m 크기의 콘크리트 슬래브에 진동을 주기 시작하였을 때 거푸집 파괴가 발생하였다. 거푸집은 높이 9m인 screw-jack 파이프 형태의 버팀대에 받혀진 10×15cm 목재에 의해서 지지되었다. 파이프형 버팀대는 버팀대의 중간 높이에서 수평방향에 대해서만 버팀지지되었다. 본 건물의 감독관은 그 붕괴가 아마도 타설 장비의 타설시 진동에 의하여 발생한 힘을 대각선 방향의 bracing이 받아주지 못함으로써 발생하였으리라고 추측하였다.

### 3.6 공장 지붕, Montreal, P. Q. – 1959

Johnson and Johnson, Ltd. 공장의 36×48m 지붕에 570m<sup>3</sup>에 콘크리트 타설이 거의 끝날 무렵에 거푸집 붕괴가 발생하였다. 지반으로부터 6m 높이에 24cm 두께를 갖는 9×9.6m 크기의 지붕에 공사가 진행중이었다. 단지 한 층의 수평 bracing을 갖는 6m의 높이의 가느다란 파이프로 된 비게로 거푸집이 지지되어 있었다. 5개의 구간중 4번째 구간의 타설이었으며 앞의 3구간의 경우에는 아무런 사고가 발생하지 않았다. 콘크리트를 2대의 트럭 크레인으로 타설하고 있었으며 붕괴시 45mph의 바람이 또한 불고 있었다. 목격자 증언에 의하면 건물의 드러난 곳을 덮어서 보호하기 위하여 배어놓은 천막에 풍하중이 걸린 것이 붕괴의 한 요인이 될 수 있었음을 알 수 있었다.

### 3.7 조지아 전기사무소 건물, Atlanta, Georgia – 1959

22층 사무소 건물의 2층 바닥에 해당하는 6.3×8.1m 슬래브가 붕괴하여 7.8m 아래의 1층 바닥으로 떨어지면서 현장 작업자들이 추락하는 사고가 발생하였다. 작업자들이 부상자들을 구조하기 위하여 붕괴 현장으로 뛰어들었을때 또 다른 건물 부분이 그들 위로 붕괴되었다. 10cm 두께의 슬래브와 35.6cm 리브를 형성하는 metal pan이 양 방향으로 중심간격 1.2m 간격으로 배열된 강재 파이프로 된 비게에 의하여 지지된 합판 deck로 지지

되고 있었다. 강재 비게 다리들은 7.8m 높이를 가졌으며 붕괴 후 조사에 의하면 이들의 일부 상부는 휘어져 있음이 밝혀졌다. 콘크리트는 버켓에 의하여 운반되어 바퀴차에 의하여 바닥에 타설되었다. 이 붕괴 사고에 대한 정확한 원인은 공개되지 않았으나 높은 버팀대를 사용한 것과 가늘고 튼튼 형태의 강재 버팀대를 사용함으로써 이들이 휘거나 부분적인 손상을 입었을 경우에 편심에 대하여 파괴를 일으킬 수 있는 가능성을 제시한 붕괴 예라고 할 수 있다. 이 사고로 한명의 작업 인부가 사망하였으며 15명이 부상을 당하였다.

### 3.8 토론토 지하철, Toronto, Ontario – 1955

토론토 지하철 지붕 슬래브에 대한 아취 형태의 거푸집은 9.7cm 두께의 합판으로서 목재로 된 골조에 고정되었다. 이 목재 골조들은 다시 슬래브에 조정 가능한 버팀대로 지지 되었으나 이 목재 골조는 길이 방향의 움직임에 대하여 지지되지 않았다. 한 구간 끝에 있는 이어붙이용 가로재의 움직임에 대하여 bracing 되었으나 콘크리트가 타설되면서 이 가로재에 대한 하중이 bracing을 처지게 하고 가로재의 움직임을 허용함으로써 몇개의 잭 버팀대가 미끄러지고 기울어져 전체적인 거푸집 붕괴가 발생하게 되었다. 몇 명의 증언자에 따르면 이런 형태의 거푸집이 이미 60대지 70군데의 현장에서 사고없이 사용되었으며 본 붕괴의 원인은 추정하기 어렵다고 하였다.

## 4. 연결부위 및 지압에 대한 상세

거푸집은 연속적인 골조위에 지지됨으로써 등분포적인 반력을 가져야 한다. 그러나 거푸집 위의 아직 굳지 않은 콘크리트 위에 설치된 버팀대의 반력은 변할 수가 있으며 따라서 콘크리트에 의해 지지된 버팀대외의 다른 부분에 지지된 버팀대는 상대적으로 위로 솟구칠 수 있다. 따라서 이러한 것을 방지하기 위하여 주의가 요구된다. 대부분의 경우 이집에 대한 부주의는 거푸집이 붕괴에 이르게 하기 보다는 거푸집이 부풀어 오르거나 또는 제 위치에서 어긋나도록 한다.

#### 4.1 돔(Dome)형 물 탱크 지붕, Hillsboro, Oregon - 1962

12월 중순경에 작업자들이 300m 직경을 갖는 돔 형태의 물탱크 지붕에 콘크리트를 거의 타설할 무렵 중심 부분의 기푸집이 붕괴되어 19.5m 아래로 추락함으로써 5명이 사망하는 사고가 발생하였다. 사고 바로 전날 타설된 돔의 외부 ring은 별 움직임이 없이 그대로 남아있었다. 바깥 부분에서 25.4cm 두께를 갖고 중심부에서 10cm 두께를 갖는 돔은 자체적으로 하중을 견디기 전에 prestressing될 예정이었다. 기푸집은 여러개의 목재로서 지지되었는데 상부는 높이를 조절하기 위하여 잣을 사용하였다. 오레곤 주의 산업재해 진상반은 사고의 명확한 원인을 밝히지 않았으나 기둥 높이를 조절하기 위하여 사용한 잣과 기푸집 상부간의 연결 부위가 고정 상태를 유지하는 데에 따른 어려움으로 말미암은 사고라 추측하였다.

### 5. 불안정한 지지 지반

바로 아래층의 완성된 바닥판에 의해 지지되는 버팀대는 동일하고 균등한 지압을 받고 있다고 가정할 수 있으나 최하층 바닥에 대한 기푸집은 주로 토층에 지지되는 경우가 종종 있다. 이런 토층은 견고하지 않을 수 있으며 대개의 경우 물의 흐름이나 트럭 믹서와 기푸집을 씻어 내린 물 등으로 인하여 연약해지기 쉬운 가능성이 있는 되때운 흙으로 되어있는 지반에 버팀대가 지지되어 있는 경우가 있다. 지반층의 불균등한 부동침하는 계획시 균등한 반력을 받을 것으로 예측한 버팀대에 과하중을 줄 수 있는 위험을 수반할 수 있다. 또 동결된 지반의 토층에 지지한 경우도 구조적인 결함을 가져올 수 있다. 공사가 진행되는 동안 동결 방지형 히터나 콘크리트 타설시 흐르는 물들은 지반을 약화시켜 지지된 구조물에 원치않는 처짐을 발생시킬 수 있다.

#### 5.1 Brooklyn N. Y.의 학교 - 1956

본 학교의 슬래브가 1층부터 최상층까지 겹치 모양으로 눈에 띄게 휘어진 것이 시공 후 발견되

었다. 조사에 따르면 최저층 부분이 부동침하를 일으킨 토층에 지지되어 있었으며 그 상층 부분은 처짐이 발생한 슬래브에 연속적으로 버팀대로 지지하였음이 밝혀졌다. 시공중에 바닥판의 수평에 대한 leveling이 이루어지지 않았으며 단지 슬래브는 각각의 기푸집에 따라 일정한 두께만을 유지하도록 시공되었다.

#### 5.2 고속도로 고가도, Cleveland, Ohio, - 1961

수백톤의 콘크리트가 9명의 작업인부 그리고 중장비와 함께 5.4m 아래로 붕괴된 경우이다. 다리를 받치는 기푸집은 아래의 기존 포장된 도로위에 있는 보에 지지되어 있었다. 도로가 처지면서 기푸집이 결과적으로 붕괴하였으며 상당한 피해를 가져왔다.

#### 5.3 아치교, Spokane, Washington - 1917

1917년 2월 6일에 Spokane 강을 가로지르는 Post St. 교가 그 교량의 보에 콘크리트를 타설하는 중에 아무런 경고없이 붕괴되는 사고가 일어났다. 75m span을 갖는 두개의 아치가 강바닥 바위에 지지된 목재 교각 파일에 지지된 목재 골조 형태의 비계위에 세워지고 있었다. 중심 간격 3.6m로 배열된 18개의 교각으로 되어있었다. 콘크리트는 구간별로 타설되고 있었다. 붕괴가 일어날 시에 crown 부분과 서쪽의 한 구간을 제외한 전 구간이 타설 완료된 상태였다. 조사 결과에 의하면 파일이 너무 작았으며 상부의 버팀대들이 불충분한 단면을 갖는 것으로 판명되었다. 또한 비대칭형태로 콘크리트를 타설한 것도 버팀대를 파괴에 이르도록 하였으리라 추측되었다. 이들 요소외에 일반적인 것으로 취약한 버팀대 골조 방식이나 콘크리트 타설시 충격이 붕괴에 이르게 하였으리라 추측하였다.

### 6. 거푸집의 조기제거

거푸집을 조기 제거하는 것은 건물의 붕괴를 초래할 뿐만 아니라 추후에 콘크리트 구조물에 부

적인 처짐을 가져오게 하거나 건물 유지상 곤란할 정도의 미세균열(haircracks)을 유발할 수 있다. 초기 무렵의 동기 콘크리트 공사에서 거푸집을 제거했을 경우에 콘크리트가 제대로 양생되지 않아 붕괴하는 사고가 보고되었다. 이러한 붕괴는 거푸집이 제거되기 전에 충분한 온도와 시간이 확보되어야함을 교훈적으로 가르쳐 주었다.

### 6.1 4층 건물, Winnipeg, Manitoba – 1911

보와 슬래브로 이루어진 이 건물은 각층 바닥판에 대하여 200내지 250psf의 적재 하중과 40psf의 지붕에 대한 하중에 대하여 설계되었다. 지붕을 받치는 기둥이 8월 15일 타설되었으며 8월 18일과 19일 양일에 걸쳐 지붕에 콘크리트가 타설되었다. 그리고 8월 21과 22일에 지붕구조가 완성되었다. 9월 7일에 버팀대를 제거하였는데 이때 6.9×5.7m의 9bays의 본 건물이 붕괴되었다. 이 사고로 2명의 인부가 사망하였으나 건물의 4층이하 부분은 붕괴되지 않은채 남아 있었다. 보고에 따르면 지붕층의 취약성에 대한 현상이 미리 보였으며 작업시 가해진 충격으로 말미암아 버팀대가 제거되었을때 지붕이 붕괴된 것으로 추측되었다.

### 6.2 Paddington 아파트 건물, Chicago – 1902

이 빌딩의 거푸집은 25.4cm I-beam과 완성된 콘크리트 바닥에 지지되어 있는 대각선 목재 골조 형태로된 구조물에 지지되어 있었다. 이 건물의 4층 바닥 콘크리트의 재령은 당시 21일 이었으며 이 바닥은 15.2cm 깊이의 콘크리트 filling으로 덮여있었다. 미숙한 작업 인부가 원래 2내지 3주간 더 지지하고 있어야 할 목재 버팀대를 제거하였을 때 붕괴가 일어났다. 이 붕괴로 말미암아 슬래브에 12m의 직경의 구멍이 생겼으며 이 붕괴로 말미암은 충격으로 12m 아래의 지하층까지 이보다 작은 구멍들이 생기게 되었다.

### 6.3 Bridgman 건물, Philadelphia – 1907

이 건물의 버팀대는 2주간 지지되어 있어야 했

으나 약 6일만에 제거되었다. 실제로 현장에서 전체 버팀대의 반만을 제거하라고 지시되었으나 현장 작업자들이 전체 버팀대를 제거함으로써 부분적인 건물의 붕괴가 발생하였다.

### 6.4 2층 차고, Ogden, Utah – 1914

붕괴 당시 콘크리트 재령은 10일이었으며 비가 내리고 있었다. 현장 작업자들의 효율성을 높이기 위하여 버팀대를 미리 제거한 것이 본 건물의 지붕 붕괴를 초래 하였으며 이로 말미암아 2명의 작업 인부가 사망하였다.

## 7. 버팀대 작업

부적절한 버팀대의 단면 크기나 이들의 배치 간격으로 말미암아 여러 형태의 시공시 붕괴 사고가 발생할 수 있다. 특히 비교적 가벼운 적재 하중에 대하여 설계되는 다층의 flat slab의 경우 붕괴의 심각성은 더 할 수 있다. 급방 타설된 콘크리트와 부분적으로 양생된 콘크리트의 중량, 그리고 시공시 구조물에 가해지는 적재 하중 등의 총합이 구조물이 제 강도를 충분히 발휘할 때에 감당할 수 있는 하중보다 상대적으로 더 클 수가 있다. 다음 층에 대한 시공이 이루어지기 전에 부분적인 강도 발현만이 이루어지므로 이에 대한 주의가 버팀대 설치 및 제거에 대한 계획시 주의깊게 검토되어야 한다.

### 7.1 Underground Municipal Parking Garage, Newark, New Jersey – 1960

약 1.2m 두께의 흩을 감당할 수 있도록 설계된 5.4m 두께의 3층 차고의 지붕 슬래브 표면을 작업 인부가 마무리 작업을 하고 있을 때 약 91.7m<sup>3</sup>에 해당하는 콘크리트의 붕괴가 발생하였다. 이로 말미암아 약 2주의 재령을 갖는 185.8m<sup>2</sup> 2층 슬래브 바닥판이 연쇄적으로 붕괴되었다. 사용된 콘크리트는 조강 시멘트를 사용한 콘크리트였으며 이들 붕괴된 바닥판은 철재 pipe screw jack으로 버팀 지지되어 있었다. 조사 결과에 의하면 이 붕괴의

원인은 슬래브가 받아야 할 장기 하중보다 훨씬 큰 단기 하중에 대한 버팀대의 부적절한 설치에 있었다. 또한 튜브 형태의 버팀대는 지지되기 전에 이미 휘어져 있었음이 발견되었으며 주의 깊게 수직으로 받쳐지지 않았음이 조사되었다. 이는 편심으로 말미암아 버팀대가 충분히 하중에 저항을 할 수 없었음을 나타낸다. 또한 슬래브에 사용된 조강 콘크리트의 배합비가 부적절한 것으로 판명되었다.

## 8. 새롭거나 이전에 시도되지 않은 공법의 사용

새로운 거푸집 재료나 또는 방법을 사용하여 시공하거나 새로운 구조물 형태의 시공시에 거푸집 붕괴 사고가 일어날 수 있다. 이들 붕괴 사고는 주로 새로운 거푸집이나 구조물 형태에 따른 하중의 크기를 제대로 예측하지 못함으로써 거푸집에 과하중이 걸림으로 인하여 발생하는 경우가 많다.

### 8.1 로켓트 실험용 사일로, Tullahoma, Tennessee - 1962

로켓트 실험용 사일로를 덮는 6개의 새기 모양을 한 지붕중 첫번째 지붕에 콘크리트를 타설하고 있을때 약 900톤에 해당하는 콘크리트 붕괴 사고가 발생하였다. 붕괴된 지붕은 두께가 2.7m로서 직경이 30m 이상 그리고 지하로 75m까지 들어가는 지층 사일로를 덮을 예정이었다. 삼각형 형태의 9m 깊이의 트러스로 된 강재 버팀대가 사용되었으며 이 트러스는 콘크리트에 지지된 철판에 볼트로 연결되었다. 붕괴당시 이들 연결 부위에는 이상이 없었으나 축력을 받는 트러스의 하현 부분에 횡좌굴을 방지하기 위한 충분한 bracing에 대한 고려가 없었음이 고찰되었다. 이로 말미암아 비틀림이 발생하여 붕괴가 일어나게 되었다.

### 8.2 돔(Dome)용 공기막 거푸집, Los Angeles, California - 1943

최고 천장 높이가 9.6m이고 직경이 30m인 돔의

지붕에 콘크리트를 타설하기 위하여 공기막을 사용하였다. 콘크리트는 1.5m내지 1.8m 넓이로써 0.6cm 두께로 공기막 위에 링형태로서 연속적으로 타설되었다. 각각의 링은 새로운 링을 형성하기 전에 3.2cm 두께로서 완성되었다. 첫번째 링에 대한 첫번째 층이 완성된 후에 공기기를 빼고 이 층 위에 철근 배근을 한 후 철근 위에 또다른 층을 형성하는 콘크리트를 타설하고자 하였다. 그러나 거푸집에 과하중이 걸리면서 부분적인 붕괴가 발생하였으며 이를 보수한 후 다시 작업을 진행하였을 때 공기막에 공기기를 공급하는 장비의 고장으로 공기막의 압력이 감소하였고 따라서 건물전체가 붕괴하는 사고가 일어났다.

### 8.3 돔(Dome)용 공기막 거푸집, Cincinnati, Ohio - 1962

이 돔을 형성하기 위하여 공기압으로 부풀려진 나일론으로 보강된 비닐 막 거푸집에 대하여 콘크리트가 내부에서 뿜어지는 공법을 사용하였다. Morton Salt Company의 9.3m<sup>2</sup>의 창고 건물의 6.9m 높이의 천장 돔을 형성하기 위하여 공기막에 3회에 걸친 콘크리트 spary로 6.4cm 두께의 shell을 형성하고자 하였다. 그리고 돔을 덮는 비닐 거푸집은 돔의 방수를 위하여 그대로 둘 예정이었다. 그러나 shell의 두께가 3.8cm가 되도록 약 42m<sup>3</sup>의 콘크리트를 타설하였을때 shell의 붕괴가 일어났다. 매끄러운 표면을 갖는 플라스틱은 콘크리트와 접촉하지 못하였으며 이로 말미암은 조그만 덩어리의 콘크리트가 플라스틱 막에 구멍을 내고 떨어져 나감으로써 막을 유지하는 공기 압력이 저하되면서 shell 전체의 붕괴가 일어나게 되었다. 붕괴후에 이 돔을 다시 시공하기 위하여 돔의 경사를 더 크게 하였고 철근의 배근형태를 수정하였으며 콘크리트와 공기막과의 접착력을 증가시키기 위하여 면을 덧댄 천을 사용하였다.

## 9. 맺음말

거푸집 붕괴의 주요 원인은 설계범위를 벗어나는 과하중, 부적절한 bracing 및 상세, 불완전한



설치와 조기제거, 그리고 새로운 공법의 시도등으로 구분될 수 있음을 살펴보았다. 이런 원인들에 의하여 거푸집이 설치되기 전에 시공상의 여건을 충분히 고려하여 구조적으로 안정되고 주어진 구조 system에 적절한 거푸집 설계가 필수적이다. 앞에서 기술한 전례를 통하여서 거푸집의 붕괴가 재난적이고 또한 많은 복구비용을 요구하는 것을 볼 때 이를 방지하기 위하여 시공사측의 철저한 감독, 안전한 작업장의 확보, 안전한 거푸집 설치를 위한 방법연구, 작업자들에 대한 교육이 병행되어야 한다고 사료된다.

## 참 고 문 헌

1. "Construction Problems : Formwork Failures"
2. Jacob Feld, "Failure Lessons in Concrete Construction - Formwork Failures."
3. Paul H. Sommers, "Better Construction Practices for Greater Formwork Safety," Concrete International, May 1982, pp. 31-39. 