

# 최근 구조실패 사건들의 분석

## (Analysis of Events in Recent Structural Failures)

Fabian C. Hadirpriono(Asst. prof., Dept. of  
Civ. Engrg., Ohio State Univ., Columbus, Ohio)

譯 : 孫 基 詳

建設安全技術士

工學博士

韓國産業安全工團 産業安全教育院 教授

### I. 서 론

과거 수많은 구조적 실패들로 인하여 막대한 인적 참사, 공사비용초과와 공사지연, 도급자 도산과 설계자의 자격 박탈 등이 초래되었다. 예를 들면, 그린 위치(Greenwich 미국소재)의 코네티컷턴픽교량이 최근 붕괴하여 5명이 사망하고 기타 많은 상해자를 내었다. 미시건(미국) 질위키교량의 콘크리트 박스거더 스패이 공사중 1.5 m 내려앉았을 때, 아무도 다친 사람은 없었다. 그러나 공사준공이 5개월이나 지연되는 곤란을 겪게 되었다.

그러한 실패들을 일으킨 사건들을 검사하기 위하여 여러가지 조사가 시행되었다. 예를 들면, Allen과 Schriever는 1968-1972년에 엔지니어링 뉴스 레코드(Engineering News Record)에 보고된 것과 1962-1972년에 캐나다 신문에 보고된 지속적인 붕괴 사고건에 대한 조사를 착수했다. 1980년에 Walker는 영국에서 주로 발생한 구조사고 120가지를 연구하였다. 1977년 ACI 348위원회는 북미에서 주로 한 콘크리트 구조물의 결함 조사법을 고안하였다. 1977년 Matousek에 의해서 800가지 사례를 보험회사 서

류에서 수집하여 광범한 유럽쪽 실패분석이 이루어졌다. 1984년 현재 메릴랜드 대학(미국) 내의 건축 및 공학 이력정보센터(AEPIC : Architecture and Engineering Performance Information Center)는 실패관련 조사를 이용토록 공개하여 하나의 실패 데이터 저장고로 이용되기 시작했다.

본 논문은 미국내외에서 건물 및 교량의 최근의 주요 실패가 생긴 주요 원인 및 경향에 관한 연구의 결과물을 보고하고 있다. 출판된 것이든 안된 것이든 보고서로부터 수집한 데이터들이 분류되고 평가되고 해석되었는데, 사고를 일으킨 통상적인 명명자(denominators)들의 확인이 되었다. 연구결과물은 관련기술 문제에 대해 엔지니어링과 건설 전문가들로 하여금 방심하지 않도록 하는데 도움이 될 수도 있고 이로 인해 장래의 유사 구조물들의 설계와 시공실무를 개선해 주는 지침서로서 이용될 수도 있다.

### II. 정의 및 방법

본 논문을 통하여, “구조실패(Structural failure)”란 말은 “붕괴”와 “곤란” 두가지를 가리

킨다. 그리고 설계와 시공상에 특기된 대로 구조물이나 그 구조물을 이루는 요소들이 작용하지 못하는(작용하는데 역부족인) 것으로 정의되고 있다. “붕괴(Collapse)”란 구조물의 모든 부분 또는 실질적 부분의 실패를 말하는 것이다. “곤란(distress)”이란 붕괴가 되든 안되든 결국 구조물 또는 그 구성요소들의 사용불능을 말한다. 본 보고서에서 곤란이란 즉각적인 붕괴를 일으킬 수 있는 구성요소의 과도한 처짐이나 대형균열 등과 같은 손상을 가리키고 있다. 통상 실패는 “본래의” “일으킨” 원인 두가지가 발생할 때 생긴다. 본래의 원인은 설계, 시공이나 보수의 모순에 의한 구조물 고유의 사건이고 일으킨 원인은 통상 차량의 충돌 충격이나 폭발 등과 같은 외적인 사건으로 구조적 실패를 가져올 수 있는 것이다.

본 연구는 엔지니어링 뉴스 레코드(Engineering News Record)와 신토목기사와 신토목기사 국제(New Civil Engineer International) 1977-1981년 사이의 보고서에 주로 근거하고 있다. 미국 국립표준국의 조사보고서와 저자 자신의 경험을 이용하여 연구를 검증하게 되었다. 저층 건물, 고층건물, 플랜트공장 그리고 장스팬건물을 포함한 건물 및 교량의 주요실패 사례 총 147가지가 검토 조사되었다. 표1은 구조물의 각 범주에 대한 유형이나 기능과 조사된 실패들의 수를 제시하고 있다.

본 연구에서 사례수가 제한되었지만, 저자는 관찰된 연구기간 동안 대부분의 주요 붕괴와 중요 곤란이나 붕괴직전 조건들을 연구 사례들이 포함시키고 있는 것으로 확신한다. 미국 밖에서의 곤란사례는 앞서의 정보원에는 거의 기록되어 있지 않기 때문에 곤란에 대한 관찰은 미국내의 것으로 한정하기로 하고 유럽지역은 여기서는 생략하기로 한다.

이들 실패를 일으키는 사건들은 6개 분야 즉 구조설계, 설계상세, 시공, 구조물보수, 재료, 외

표1. 조사된 붕괴구조 범주와 유형들

범주 (1)	유형/기능 (2)	실패사례 수 (1977-1981) (3)	총 수 (각범주의 %) (4)
교 량	철강 트러스	13	57(39)
	철강관 보	14	
	철강박스 보	2	
	콘크리트 보	2	
	콘크리트 박스 보	8	
	케이블 사장교	3	
	부 교	1	
	철강아치	4	
	도개교(跳開橋)	2	
	보 도	8	
저층 건물 (4층 이하)	사무소 건물	6	13(9)
	주 차 장	7	
	교 회	1	
	공항건물	2	
	병 원	2	
	우편시설	1	
	학교·체육관	12	
	백 화 점	1	
	창고·공장	5	
	시민회관·극장	2	
차양·대피소	3		
고층건물	콘도미니엄·아파트	4	13(9)
	호 텔	3	
	사 무 소	6	
플랜트- 산업용 건물	곡물엘리베이터	9	21(14)
	펌프건물	1	
	고가수조	1	
	핵저장조	2	
	화력발전소	2	
	폐수처리장	2	
	굴 딱	1	
	냉 각 탑	3	
장스팬건물	평지붕(무도장 등)	10	14(10)
	셀 지 붕	3	
	정 비 교	1	

적사건고려로 범주화되어 있다. 이 연구에 대하여, 이들 모순들은 주요원인이라고 하였다. 앞서 언급한 정보원을 이용한 상세데이터의 수량의 제한성 때문에, 각 경우의 가장 가능한 주원인만을 고려하였다. 첫번째 4가지 분야에 있어서의 모순은 구조물 축조에 미치는 이들 전체 역할 때문에 선정되었다.

자재분야에서는 자재 그 자체에서 생긴 것만 고려되었다. 첫번째 5개 모순분야는 본래의 원인으로 보는 반면 6번째 분야는 일으킨 원인으로 관련되었다. 자연재앙, 전쟁, 철거해체, 노후로 인한 실패는 고려되지 않았다. 즉 화재와 관련한 실패는 제외되었다.

### III. 실시결과

#### 1. 실패발생

대체로 연구대상 구조물의 사용연한 중에 발

생한 구조물 실패의 수는 시공중 발생한 것(표 2, 3) 보다 더 많았다. 이것은 주요사례들만이 조사되었고 주요 원인들만이 격리된 사실 때문인 것으로 판단된다. 시공중에 발생한 대부분의 실패들은 신문에 보고되지 않기도 하기 때문이다. 이러한 앞서의 경향과는 예외인 경우가 미국 내의 플랜트-공장건물의 곤란과 미국외의 고층건물과 장스팬건물붕괴, 콘크리트 박스거더 교량의 실패에서 기록되고 있는데, 이것들은 시공중에도 자주 발생하였다.

관찰기간 후반부에 일정비율을 고수한 플랜트-공장건물 붕괴에 대한 것과 1980년에 특히 경고울까지 올라선 저층건물의 곤란에 대한 것을 제외하고는 실패는 대체로 감소율을 보였다. 플랜트-공장 건물은 사일로 폭발이 관찰 5년 동안 매년 발생했기 때문이고, 저층건물 곤란은 안티오 오디토리움지붕(미국 캘리포니아) 실패와 유사한 P.C 부재의 위험균열 발견에 따른 것

표 2. 실패 발생시의 지점에 관한 분포

(미국 1977-1981)

구조물의 범주 (1)	총붕괴수 (2)	시공중 붕괴수 (총붕괴수의%) (3)	사용중 붕괴수 (총붕괴수의%) (4)	총파손수 (5)	시공중 파손수 (총파손수의%) (6)	사용중 파손수 (총파손수의%) (7)
교 량	14	3(21)	11(79)	19	3(16)	16(84)
건 물(총)	35	9(26)	26(74)	30	9(30)	21(70)
저층건물	13	5(38)	8(62)	17	3(18)	14(82)
고층건물	3	1(33)	2(67)	3	-	3(100)
플랜트산업용 건물	15	2(13)	13(87)	5	5(100)	-
장스팬건물	4	1(25)	3(75)	5	1(20)	4(80)

표 3. 실패발생시의 지점에 관한 분포

(기타국가 1977-1981)

구조물의 범주(1)	총붕괴수(2)	시공중 붕괴수(총붕괴수의 %)(3)	사용중 붕괴수(총붕괴수의 %)(4)
교 량	24	4(17)	20(83)
건 물(총)	25	12(48)	13(52)
저층건물	12	3(25)	9(75)
고층건물	7	5(71)	2(24)
플랜트·산업용 건물	1	1(100)	-
장스팬 건물	5	3(60)	2(40)

이다.

고층과 장스팬건물은 자주 실패하는 것 같다. 이것은 연구 데이터 상의 숫자가 상대적으로 작기 때문인 것으로 판단된다. 그러나, 1978년 1월과 1980년 5월 사이의 2 $\frac{1}{2}$ 년 이내 기간에 9개의 대형장스팬건물(미국내의 4개 포함)이 붕괴한 것을 알아보면 재미있는 일이 보인다. 이것은 그 기간중에 같은 유형의 건물에 대해서는 높은 붕괴빈도수를 보이고 있다.

## 2. 교량실패

각 모순의 범주내의 교량실패 원인들의 수는 시공중이나 후에 생긴 경우에 대해 표4에 제시되어 있다. 총교량실패수의 반 이상은 외적 원

인들로서 교량붕괴를 주도하는 것으로 나타났다.

빈발사건들의 조사는 표5에 제시하고 있다. 외적 요인들의 범주에서, 충격력은 가장 주요한 원인이었다. 이들 충격력은 교량기둥에 수평으로 가해진 충돌하중으로서 트럭이나 탈선기차, 과다화물을 운반하는 트레일러에 의하여 거더에 가해진 경우이다. 선박도 강을 횡단하는 교량이 충격을 받는 것으로 관찰되었다. 대부분의 실패 교량은 충격장벽이 갖추어져 있지도 않았고, 충격하중에 대비하여 설계되지도 않았기 때문이다.

또 하나의 빈번한 사건은 사람용 좁은 보도 교량의 과다하중재하이다. 이것은 하중제한이 위반되고 구경꾼이 축제중에 교량을 전망대로 사용한 곳 대부분 나라에서 발생하였다. 실패

표 4. 교량실패의 주원인에 관한 분포

결 점(1)	붕괴요인 결점수 (14개 사례의 %) 미국(2)	파손요인 결점수 (19개 사례의 %) 미국(3)	붕괴요인 결점수 (24개 사례 %) 기타국가(4)	총 결점수 (57개 사례 %)
설 계	-	2(11)	-	2(3)
상 세 도	2(14)	1(5)	1(4)	4(7)
시 공	2(14)	6(31)	4(17)	12(21)
보 수	1(7)	2(11)	1(4)	4(7)
재 료	-	5(26)	-	5(9)
외 적	9(65)	3(16)	18(75)	30(53)

표 5. 교량파괴 빈발사건 및 발생

빈발 주요원인 및 사상(1)	발생수(2)	파괴교량유형(3)	비 고(4)
외 적 원 인			
차량·기차 충격하중	15	철골트러스, 철골판보	미국과 유럽에서 처음 발생한 붕괴
선 박 충 격	5	철골트러스	
인 적 과 다 하 중	5	협로보도	경축행사중 발생한 교량의 과다하중
기 타	5	다 양	
시 공 결 합			
부적절 용접방법(전기스래그, 용접과정 이 균열원인이 될 수 있는 경우)	6	철골판보, 평형아치	오하이오 강 교량에 생긴 균열
가설작업관계문제(부적절 시설가새 및 가설물의 취약기초)	2	콘크리트 박스 보	교량시공중 부분 붕괴요인 사건
기 타	4	다 양	

교량의 유형은 변화가 많으나 여러가지가 현수 구조이었다.

다음으로 가장 중요한 모순은 부적절한 용접 방법으로 인하여 시공중에 발생하였다. 오하이오 강을 따라 여러 개의 강철판보와 타이아치(tie-arch)교량에서 이 문제가 인장부재의 용접접합 부에서 시작된 상당한 크랙의 원인이 되었다. 일렉트로슬래그 용접법(electroslag welding method)이 두꺼운 철판 연결에 사용되었는데 취성균열의 원인으로 판명되었다. 여기에 추가로, 몇가지 사례에서는 용접결합이 균열을 일으킨 것으로 보였다. 이 사건은 비파괴검사 같은 품질관리방법이 부적절하고, 감독실무가 비효과적이었을 때 자주 생겼다.

미국내의 콘크리트 박스거더 교량의 시공중에 생기는 붕괴는 가설공사 문제와 관련되었다. 이들 문제들은 가설공사의 연약기초와 부적절히 설치된 가새로부터 생겼다. 가새는 바람과 같은 수평력 때문에 실패하는 반면, 기초 실패는 물을 뿜어 내서 생기는 지반 침식에 관련되어 있다.

### 3. 저층건물실패들

저층건물실패의 주요원인은 표 6에 제시되어 있다. 조사를 해 본 결과 이들 건물 전체의 거의 50%가 설계 모순으로 판명되었다. 저층 건물의 재난에 관한 빈번한 사건들이 표7에 목록되어 있다. 부적절한 장기 크리프와 수축효과 고려

때문에 콘크리트 건물의 내구 연한에 심각한 문제들을 일으키게 되는 것으로 판명되었다. 이들 크리프와 수축현상은 구성요소의 수평이동과 회전이동을 생기게 한다. 이 구성요소가 구속되면, 상당한 인장 응력이 생긴다. 그러한 응력들이 캘리포니아 학교체육관에서 톱니모양의 그리고 구속된 P·C부재 T형 보접합부에 심각한 균열을 일으켰다.

기타 특기할 만한 설계 모순에는 구조부재의 온도변형의 과소평가, 기초침하의 부적합 평가, 그리고 구조처짐의 계산 잘못들을 들 수 있다. 이들 사건은 미국의 주차건물과 학교건물의 붕괴와 곤란이 되었다.

저층건물실패 전체의 1/3은 가설공사와 콘크리트 공사로부터 생긴 시공 잘못에 기인하였다. 가설공사문제는 비계부재, 가새, 접합과 관련한 부적절한 감독방법에 의해 생기게 되었다. 개발도상국에서는 이들 가설공사문제 여러가지가 국가규정에 미달하는 자재로 시공되었다. 여기에, 콘크리트 타설중의 품질관리도 충분히 시행되지(규정대로) 못했다.

### 4. 고층건물실패

이들 건물실패사례의 수는 조사된 대상건물 총 숫자의 9%만으로 나타났다. 불과 13개 건물만이 조사되었다. 표8에서와 같이, 시공모순의 비율이 주로 지배하고 있다.

표 6. 저층건물실패의 주원인에 관한 분표

결 함(1)	붕괴요인 결함수 (13개사례 %)	파손요인 결함수 (17개사례 %)	붕괴요인 결함수 (12개사례 %)	총 결함수 (42개사례 %)
	미국(2)	미국(3)	기타국가(4)	(5)
설 계	6(46)	11(64)	3(25)	20(47)
상 세 도	-	1(6)	1(8.5)	2(5)
시 공	7(54)	2(12)	4(33)	13(31)
보 수	-	-	-	-
재 료	-	1(6)	1(8.5)	2(5)
외 적	-	2(12)	3(25)	5(12)

표9는 이들 실패에 기여한 사건들을 제시하고 있다. 부적절한 콘크리트배합과 양생이 개발도상국의 콘도미니엄과 사무소건물의 붕괴원인들이었다. 부가적으로 시멘트불량, 자갈골재 기준미달이 콘크리트 배합에서 발견되었다. 미국의 몇몇 콘도미니엄의 시공중의 작업습씨 부족으로 콘크리트 슬라브 부족은 물론 구조철골재 크기 감소의 원인이 된 것으로 증명되었다.

해외의 고층사무소 붕괴원인인 몇가지 사건은 토질조건을 잘못 평가하여 부동침하기초가 된 것도 있다.

### 5. 플랜트-공장건물실패

이들 건물의 압도적인 외적 실패 원인의 수는 곡물사일로와 화력발전소의 붕괴이다. 이들 모순은 건물 내구연한내에 생긴 총 주요 플랜트 실패사례의 2/3를 나타내고 있다(표 10).

이들 사고의 주요 원인은 곡물과 탄가루의 (분진의) 폭발이었다(표11). 이들 입자의 축적은 우연히 담배불, 전기스파크, 그리고 기타 유사사건에 의해 점화되었을 때 폭발을 일으킬 수 있다.

빈번한 사건은 아니지만 여전히 심각한 것은 미국에서 주로 생긴 시공모순으로 범주화된 것이다. 결함있는 흙막이, 부적절한 거푸집공사 접합사용 등과 같은 가설공사와 거푸집공사 문제는 냉각탑 붕괴를 일으킬 수 있는 것으로 관찰되

표 7. 저층건물실패 : 빈발사건 및 발생

주요 빈발원인 및 사건(1)	발생수(2)	파괴건물유형(3)	비 고(4)
설계결함 :			
• 프리스트레스 콘크리트 부재의 장기 크리프와 응축효과의 과소평가	9	학교/강당	강당붕괴후 검열중 발견된 수개의 학교건물보의 균열
• 콘크리트부재의 온도변형 과소평가	3	주차장, 학교	구조부재의 팽창 및 수축 유발온도파동
• 기초침하산정 결함	2	주차장, 공항건물	벽균열, 건물침하 유발 사건
• 구조물 처짐 산정 결함	2	주 차 장	
• 기 타(다양)	4	다 양	
시공결함 :			
• 가설문제(부적절가새보강)집합, 결함 부재 및 가설물 초기 제거	4	사무소, 주차장, 창 고	각 국에서 발생한 붕괴
• 콘크리트타설문제(부적합 배합 및 양생)	3	창 고	개발도상국에서 발생한 붕괴
• 기 타(다양)	6	다 양	

표 8. 고층건물실패의 주원인에 관한 분포

결 함(1)	붕괴요인 결함수	파손요인 결함수	붕괴요인 결함수	총 결함수
	(3개사례 %)	(3개사례 %)	(7개사례 %)	
	미국(2)	미국(3)	기타국가(4)	(5)
설 계	2(67)	-	1(14.3)	3(23)
상 세 도	-	2(67)	1(14.3)	3(23)
시 공	-	-	4(57)	4(31)
보 수	-	1(33)	1(14.3)	2(15)
재 료	-	-	-	-
외 적	1(33)	-	-	1(8)

었다. 국부적으로 발생하는 이들 사건은 점점  
번져서 구조물의 점진적 실패에 도달하게 된  
다.

배합과 양생부족 콘크리트로부터 생긴 콘크  
리트문제는 핵보관함 구조물의 곤란을 일으켰다.

어떤 경우에, 데리크와 크레인 등과 같은 건설  
장비는 바람에 날려, 냉각탑을 가격하여 심한  
손실을 가져왔다.

## 6. 장스팬건물실패

표 9. 고층건물실패 : 빈발사건 및 발생들

주요 빈발요인 및 사건(1)	발생수(2)	파괴건물유형(3)
시공결함 : • 콘크리트 문제(부적합배합 및 양생) • 부적절한 부재크기(철골부재의 크기 축소, 부적절한 콘크리트 슬라브 두께)	2 2	사무소, 콘도미니엄 콘도미니엄
설계결함 : • 기초문제 유발요인의 부적합 토질 평가	2	사 무 소
• 기 타	1	사 무 소

표 10. 플랜트/산업용 건물실패에 관한 분포

결 함(1)	붕괴요인 결함수	파손요인 결함수	붕괴요인 결함수	총 결함수
	(15개사례 %)	(5개사례 %)	(1개사례 %)	
	미국(2)	미국(3)	기타국가(4)	(5)
설 계	1(7)	-	-	1(5)
상 세 도	-	-	-	-
시 공	2(13)	2(40)	1(100)	5(24)
보 수	-	-	-	-
재 료	-	1(20)	-	1(5)
외 적	12(80)	2(40)	-	14(66)

표 11. 플랜트/산업용 건물 실패 : 빈발사건 및 발생

주요 빈발요인 및 사건 (1)	발생수 (2)	파괴건물의 유형 (3)	비 고 (4)
외 적 요 인 • 폭발(곡물, 석탄가루 점화)	12	곡물저장사일로, 석탄공장	조사기간 중 매년 발생한 곡물운반 용 엘리베이터의 붕괴, 미국
	2	다 양	
시 공 결 함 • 가설물·거푸집 문제 (결함가설물·거푸집, 부적합 거푸집 접합)	2	냉 각 탑	
• 콘크리트문제 (부적절 혼합 및 양생 콘크리트)	2	핵저장조	
• 장비충격 (구조물에 전도된 크레인)	1	냉 각 탑	

연구대상인 모든 장스팬 건물은 체육관, 경기장, 격납고 등과 같은 평지붕이거나 셸구조물들이었다. 대체로 이들 구조물들은 60m이상 스패 건물이다. 미국내의 4개를 포함한 총 14개 건물이 조사되었다. 이들 실패에 이른 주요 모순은 설계상세와 시공에 있고 각각은 총 장스팬건물실패의 43%를 나타내고 있다(표 12).

설계상세의 통상적인 문제는 일반적으로 부재접합과 관련된다(표 13). 이들 붕괴에 기여된 사건들은 구조물 유형과 사용재료에 따라 다양하지만, 이것들 중에서 몇가지는 설계개념 변화와 관계되었다. 이것은 특히 상세설계중에 사실로 나타나는데, 여기에는 접합부설계의 중요가정이 간과되었던 곳이다.

장스팬건물의 인장은 상세문제에 특히 민감하다. 압축부재와 달리, 이것들은 통상 가새와

스티프너 등과 같이, 추가지지요소가 없다. 그러므로 이들 장스팬은 하중전달부재일 뿐이기 때문에 압축 부재가 갖는 잉여력을 갖지 못한다. 결국 인장부재의 부적합 접합부 상세가 특히 심각한 것으로 발견되었다.

한편, 압축부재들도 문제가 없는 것은 아니다. 몇가지 실패지붕에 관한 연구를 통해서, 압축부재와 가새사이의 가정된 강접합이 실제로는 다르게 시공된 것으로 나타났다. 이것은 어떤 부재에 국부좌굴을 일으키게 되어 구조물 전체 붕괴로까지 이어진다.

시공모순분야의 주목할만한 사건은 부적절히 설치된 철골부재의 가새와 부적절 철골부재들이었다.

## 7. 방법상의 문제

표 12. 장스팬건물실패의 주원인에 관한 분포

결 함(1)	붕괴요인 결함수 (4개사례 %) 미국(2)	파손요인 결함수 (5개사례 %) 미국(3)	붕괴요인 결함수 (5개사례 %) 기타국가(4)	총 결함수 (14개사례 %) (5)
설 계	1(25)	1(20)	-	2(14)
상 세 도	2(50)	2(40)	2(40)	6(43)
시 공	1(25)	2(40)	3(60)	6(43)
보 수	-	-	-	-
재 료	-	-	-	-
외 적	-	-	-	-

표 13. 장스팬건물실패 : 빈발사건 및 발생

주요 빈발요인 및 사건(1)	발생수(2)	파괴건물유형(3)	비 고(4)
설계 · 상세도 결함 • 설계개념 상실 (구조재와 가새보강재의 접합)	3	운동장 · 경기장 (강재, 콘크리트, 목재)	설계자에 의한 개념 정립 미흡이나 상세도 작성자의 개념무시 및 이에 대한 설계자의 체크가 없는 경우 유발되는 문제들
• 기 타	3	다 양	
시 공 결 함 • 철골가새부재의 부적절 설치	3	철골지붕, 운동장	
• 구조재와 보조재 접합의 작업능력 불량	3	강재, 콘크리트	



여러가지 관찰대상사건, 특히 본래의 사건들은 공사공정의 조직상 그리고 방법상의 부적성에 의해 생겼다. 도급자, 전문건설업자, 공사시공관리자, 설계 엔지니어, 건축가의 교류에서 발생하는 혼돈 등과 같은 운영에 관련된 당사자와 건축주 대리인사이의 상호관계에 이들 부적합성이 반영된다. 결국 이들 부적합성은 설계와 설계 상세검토를 부적합하게 하고 부적절한 시공감독을 유발하게 된다. 그러나 이 문제가 대개 상세한 연구사례로부터 발견되기 때문에, 발생통계숫자는 전혀 인용될 수 없었다.

대부분의 사례조사에서 변화와 불연속성의 반복발생이나 설계개념상실이 있음을 연구를 통해 찾아 내었다. 대부분의 높은 위험도 구조물에서, 이 결점이 시공단계의 상세과정을 통해 발생하였다. 하트포드 공공센터 공간트러스 구조물이 1978년 코네티컷(Conneticut 미국)에서 붕괴된 것이 한 예이다. 시공편의를 위해 가새시스템 변경을 하여 처음 가정된 것보다 훨씬 더 유연한 지지 시스템으로 만들어 결국 트러스부재의 좌굴을 발생시켰다.

1980년에 113명이 사망한 또 하나의 사고는 캔자스시에 있는 하야트 리젠시 호텔에서의 실패이었다. 보도 빔을 지지하는 철봉행거접합상의 변경으로 원래 가정된 것보다 빔에 2배의 스트레스(응력)를 가하게 되어 결국 행거(rod hanger)가 빔에서 뽑히는 사고를 발생시켰다.

앞서의 경우, 그리고 기타 많은 경우가 부적절한 검토절차로부터 파생되었다.

몇가지 경우에는 전문가에게 재하청된 설계 계산이 체크되지 않았다. 나머지 경우에는, 중요 구성 구조 요소의 상세도나 복잡한 가설공사설계는 충분한 검증없이 시행되었다.

본 연구에서 나타난 또 하나의 경향은 공사 공정상의 감시 부족이었다. 여러차례 대개는 공사기간 전체를 통해서 불과 2~3시간 만이 구조엔지니어에 의해 공사 현장에 감리 활동으로

투자되었다. 혁신적인 구조물의 핵심공사단계의 시행중에조차도 현장에 구조엔지니어가 없는 경우는 다반사이다. 설계 축조 접근방법이 조직되어 있는 몇가지 사례에서는, 도급자에 의해 고용된 엔지니어가 공사현장에 떨어져 있으면서 보고를 받는다. 또 대부분의 계약서류에는 엔지니어가 공사과정을 감시하는 것을 특기하지 않고 있다. 게다가 감리비가 너무 낮다. 이 모든 요인들은 앞서 강조한 시공모순으로 돌려질 수 있다.

개발도상국들에서는, 이러한 경향이 한층 더 심각하다. 대개 감독은 피상적으로 이루어지고 대부분 콘크리트구조물들은 콘크리트 테스트 시행없이 축조되고 있다. 철골구조물 시공중에 작업숨씨가 나쁜 것도 발견되었다. 비숙련공들이 용접작업에 투입되어 결국 용접결함을 일으킨다. 적절한 철골세우기 장비가 정착되어 있지 않고 많은 철골 구성요소들이 현지 조립설비에 의해서 양중되고 있어 안전규정을 준수하지 않는다. 콘크리트 박스거더교량이나 장스팬지붕의 조립처럼 인습적인 시공과정에서 탈피하여 시공하는데 필요한 기술과 장비부족은 너무나 흔한 일이 되어 있다.

#### IV. 결론 및 권장사항

최근의 147개 실패건물 및 교량들에 관한 본 연구를 보면 이들 실패의 1/3(50개 사례)은 외적인 요인들 때문이었다. 다음으로 지배적인 주원인들은 시공과 설계결함(각각 40개, 28개 사례)으로 나타났다.

대부분 가능한 사건은 조직적 메카니즘으로부터 생겼는데, 이것들은 설계와 시공단계에 참여한 사람들의 상호연관성에 영향을 주었다는 것을 알게 되었다. 구조엔지니어와 시공자 사이의 의사소통에는 큰 격차가 있음을 느끼게 되었다. 새롭게 더 많은 세련된 설계방법 때문에

많은 구조엔지니어들은 골조세우기 공사에는 친숙지 못한 “순수 분석가”들이 되었다. 많은 혁신적 구조물들은 세울 때 생기는 응력이 중요할 수 있다는 것을 무시하면서, 구조물들의 사용수명조건만을 근거로 해서 설계되고 있다. 또 한편, 상이한 유형의 구조물들과 시공재료의 급속한 개발로 인하여 골조공법의 새로운 기법과 좀 더 복잡한 도면 및 시방서 경험이 없는 다른 분야 사람들은 작업도면에 따라 시공실제를 추진하기에는 어려움이 많다. 본 연구에서 고찰된 구조물의 시공단계중 이러한 현실상의 문제들이 설계해석 손실에 기여할 수 있다.

복잡하거나 중요한 많은 구조물들은 적절한 잉여력을 갖고 축조된다. 즉 국부손실이 발생하면 더이상의 실패 조짐은 다른 요소들에 의해 포착되기 때문에 총붕괴에 반드시 이르지 않으므로, 점증실패가 되는 체인반작용이 발생해서는 안된다. 그러나, 연구로부터 설계개념손실은 구조물의 요소나 부분 다수에 영향을 주는 “통상요인사건들”을 자주 발생시켰음을 알 수 있다.

Hartford Civil Center는 초기에에서 아주 여분있는 구조물이었는데, 불충분한 가새보강으로 상부트러스 모두가 좌굴되었고 결국 건물의 붕괴를 가져왔다.

시공진행을 적절히 감독하는 구조엔지니어의 책임은 통상 계약상의 문제이다. 과거에는, 구조엔지니어가 완전히 프로젝트 완성때까지 관여하였다. 그러나 최근에는 구조엔지니어는 계약상 책임을 좀 더 특기하여 주지 않으면, 상세도와 현장감리에는 별로 관여하지 않았다.

수많은 실패들이 불만족스러운 검토 방법들과 관련되었다. 미국에서 설계 검토는 계속해서 좀처럼 의무적인 경우가 없다. 미국 건축가 협회, 장스팬 건물위원회는, 설계검토는 설계자의 전문적 판단과 소유주의 만족에 의해서 생긴다는 것을 알았다. 그러나 벨기에, 프랑스, 독일과 같은

유럽국가에서는, 중요구조물에 대한 설계검토는 꼭 필요하다. 대부분의 개발도상국가에서, 설계검토는 통상 없다.

마지막으로, 본 연구결과는 다음과 같은 필요성을 제안한다.

1. 과거에 발생한 잠재적 문제의 분석 : 이것은 본 보고서와 이미 언급된 나머지들과 같이, AE-PIC 데이터 뱅크가 현재 Maryland 대학교에서 개발된 것 등과 같은 정보를 사용하여 시행될 수 있다. 대표적인 구조물에 대한 잠재 문제가 의심되면, 유사구조물의 시행데이터가 이들 정보원으로부터 회수될 수 있다. 그러므로 방지조치의 필요성이 예상될 수 있고, 효과적인 품질관리 프로세스들은 충족될 수 있다.

2. 설계사와 시공 프로세스중에 철저적인 고려사항의 개선 : 이 프로세스에 관여하고 있는 당사자들 사이에 혼동을 피하기 위하여, 각 당사자의 책임에 관한 적당한 설정이 조직되어야 한다. 설계엔지니어의 책임은 공사진행 전체에 확대될 수 있다. 시공중의 설계자의 입회, 특히 핵심단계중의 입회는 필수적이다. 독립당사자에 의해 구조설계와 설계상세도를 검토시키는 것은 역시 마찬가지로 중요하다. 설계검토는 구조물 실패의 가능성을 줄여줄 뿐만 아니라, 설계가 적용기준에 맞는지를 서류로서 제시해 주기도 한다.

3. 사용중 그리고 시공중의 구조물에 관한 적절한 위험해석의 필요성 : 사용중인 구조물의 위험은 좀 더 적절한 설계기준을 결정하기 위하여 특히 나중의 충격하중 및 폭발 등과 같은 외적 사건을 수용하기 위하여, 연구되어야 한다.

시공중의 잠재 문제들의 위험분석은 실패확률을 낮추는 방법을 선택하고, 실패시작을 방지하고, 관리를 조직하는데 이용될 수 있고, 시공중의 핵심 측면을 감시하는데 이용될 수 있다.

