

중대사고 이슈 리포트

重大事故 Issue Report

2021. 8



Contents

중대사고 이슈 리포트
重大事故 Issue Report

2021. 8

1.	건축물 해체공사 문제점 및 사고예방 방안 1
	» 중앙사고조사단 김영백 차장
2.	거푸집동바리 붕괴사고 사례 및 대책9
	» 중앙사고조사단 정세균 부장
3.	관로공사 굴착사면 붕괴사고 막을 수 있을까? 20
	» 중앙사고조사단 손진호 과장



중대사고 이슈 리포트 2021. 8

[2021-중앙사고조사단-509]

발행인 박두용
발행처 한국산업안전보건공단
울산광역시 중구 종가로 400(북정동)
문의처 052)703-0129
편집디자인 한국장애인문화인쇄협회
Tel. 02)2683-0955



01 건축물 해체공사 문제점 및 사고예방 방안

일상의
안전을 잇아간 참사

☞ 광주 학동 해체건물 붕괴사고

지난 6월 9일(수) 16시 22분경 광주광역시 동구 학동4구역 주택재개발 정비사업 현장에서 사업부지 내 지장건물 해체작업 중 해체 중이던 건물이 대로변으로 붕괴되면서 정차중인 노선버스가 매몰되어 9명이 사망하고 8명이 부상하는 참사가 발생하였다.

붕괴 잔재물이 편도 3차선 도로와 건너편 차선 일부까지 덮쳐 도로가 상당시간 마비되었고 매몰된 버스에서 인명 구조작업이 완료되기 전까지 사고현장은 아비규환이었다.

안타깝게도 이번 사고로 인해 사망하거나 부상당한 17명은 모두 건물 해체공사와는 무관한 버스 탑승객들이었으며 어머니 병문안을 가던 취업준비생부터 동아리 활동을 하고 귀가하던 고교생까지 모두가 각자의 평범한 일상 속에서 벌어진 일이었다.

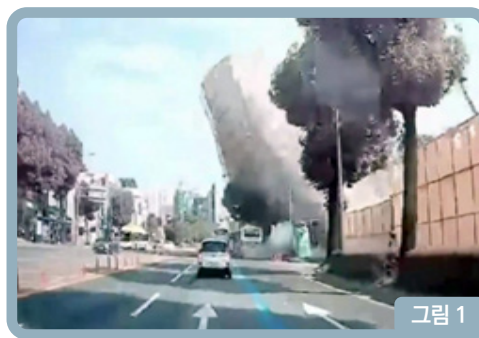


그림 1



그림 2

[그림1] 광주 학동 건물붕괴 순간

[그림2] 붕괴이후 모습

☞ 잠원동 건물 붕괴사고

이번 광주사고는 과거 서울 잠원동 해체건물 붕괴사고와 판박이 사고라고 할 만큼 사고 발생형태 및 사고원인이 흡사했고, 광주사고 직후 잠원동 사고가 다시 언론에 재조명되기도 했다.

잠원동 붕괴사고는 2년 전인 2019년 7월 4일(목) 14시 23분경 5층 건물을 압쇄기로 파쇄하여 해체하던 중 건물의 남아있던 벽체가 인근 대로변으로 붕괴되면서 지나가던 차량을 덮쳐 1명이 사망하고 3명이 부상한 사고이다.

붕괴 건물에 차량이 깔리면서 결혼반지를 찾으러 가던 예비 신부가 숨지고 예비 신랑은 중상을 입었으며 다른 부상자들 역시 사고로 인한 휴유증과 충격은 그들의 일상을 사고 이전으로 되돌릴 수 없었을 것이다.

[그림 3] 잠원동 건물붕괴 순간
[그림 4] 사고발생 위치



그림 3



그림 4



☞ 해체건물의 구조부재 내력에 대한 안전성 검토 부족

공사 계획단계에서 기존 건물의 형태, 구조특성, 현장 주변상황 및 작업여건 등을 충분히 고려하지 못할 경우 해체계획에 빈틈이 생기게 되고 이는 곧 무리한 공법을 적용하거나 위험작업을 유발하는 등 사고 가능성을 높일 수 있다.

관할 지자체에서 허가된 사고건물(지하1층, 지상5층)의 해체계획에 따르면 압쇄기가 직접 닿지 않는 건물의 고층부는 성토체*를 쌓고 성토체 위에 압쇄기를 올린 후 상부층에서 하부층 방향으로 해체하도록 하고 있으며, 건물 벽면에 대한 콘크리트 비파괴 강도 측정결과만을 기준으로 해체 방향(순서)을 정하고 있었다.

* 압쇄기 작업높이를 확보하기 위해 해체 잔재물과 반입토사를 혼합하여 건물 2~3층 높이까지 폐기물 산을 형성

콘크리트 비파괴 시험방법은 해체대상 건축물의 사전조사 방법 중 하나이긴 하나 주요 구조부위의 배치상태 및 구조적 취약부 등에 대한 조사 및 해체순서별 안전성에 대한 종합적 검토 없이 콘크리트 비파괴 시험결과만을 기준으로 해체순서를 정하기에는 무리가 있다.

또한 사고건물과 같이 지하층이 존재하는 건물에 성토체를 쌓을 경우에는 상부하중으로 인한 지하층 붕괴 위험이 존재함에도 잭서포트** 보강 등 적절한 구조보강이 이루어지지 않았고 성토체 위에서의 해체작업도 당초의 계획과는 달리 임의적으로 이루어졌다.

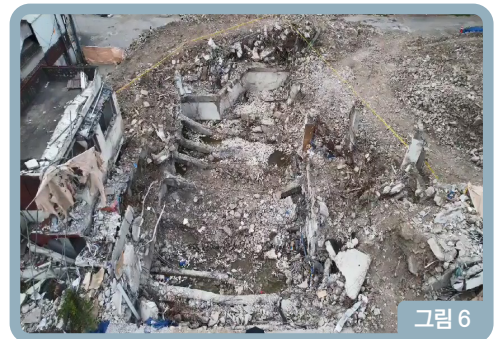
** 구조물 상부에 과도한 하중 및 진동으로 인한 균열로 인한 붕괴의 위험을 방지하기 위해 보 및 슬래브 바닥의 적정 지점에 설치하여 하중을 분담하는 지보재

성토체 작용하중이 건물의 구조적 불안전성 유발

사고 직전 성토체는 건물후면 3층 높이(약10m~12m)까지 쌓여져 있었고 지하층은 중앙부 위주로 일부만 채워져 있었을 것으로 추정되는 상황에서 사고당일에는 평소보다 약 2~3배 많은 과도한 살수작업이 있었다.

사고건물의 해체작업은 건물 후면에서 전면부 방향으로 이루어졌고 사고당시 건물의 폭은 약 2.5m(보 기준 2개열)까지 줄어들어 있었던 것으로 추정되며 압쇄기가 건물 3층 높이 성토체 위에서 5층 슬래브 해체작업 중 지하층 붕괴와 함께 건물이 대로변으로 전도된 것으로 추정된다.

건물 후면에 쌓인 성토체 및 장비의 작업하중은 건물에 지속적인 수직·수평 하중을 부과하고 있던 상태였으며 하중이 계속 증가하다가 지하층 붕괴 및 건물의 전도를 일으킬 수 있는 임계점에 도달했던 것으로 판단된다.



[그림 5] 성토체 및 살수작업 모습
[그림 6] 지하층 바닥 슬래브 보 붕괴모습

해체 건축물 구조 안전성 검토 주요사항 <철거·해체공사 표준안전작업 절차서(안전보건공단)>

1. 해체 건축물 상태 및 설계제원 조사

해체대상 건축물에 대한 안전성 검토를 위해서는 콘크리트 및 철근, 잭서포트의 강도, 탄성계수 등 정확한 재료물성 산정이 중요하고 기존 자료의 확보가 가능한 경우 현장 확인을 통해 비교 후 적용할 수 있으나 자료가 부족한 경우에는 반드시 현장조사를 통해 정확한 재료물성을 산정해야 한다.

[표 1] 콘크리트 및 철근의 탄성계수

구분	탄성계수(MPa)	비고
콘크리트	- 콘크리트 단위질량 ($m_c=1,450\sim 2,300\text{kg/m}^3$) $E_c=0.077m_c^{1.53}\sqrt{f_{cu}}$	-
	- 보통종량골재 콘크리트 ($m_c=2,300\text{kg/m}^3$) $E_c=8,500^3\sqrt{f_{cu}}$ ($f_{cu}=f_{ck}+\Delta f$)	$f_{ck} \leq 40\text{MPa} \rightarrow \Delta f = 4\text{MPa}$ $f_{ck} \geq 60\text{MPa} \rightarrow \Delta f = 6\text{MPa}$ 그 사이는 직선보간한다
철근	200,000	-
형강	205,000	잭서포트 등 구조 보강재

※ 출처 : 콘크리트 구조기준(2012년, 국토해양부)

2. 작용하중 산정

- 건축물의 해체작업 시 작용하는 하중은 크게 건축물 자중, 해체 잔재물의 적재하중, 해체 및 자재반출을 위한 장비하중, 작업과정에서 발생하는 충격하중(장비의 충격계수) 등이 있다.
- 해체 잔재물의 적재하중은 단위중량 14KN/m³을 적용하되 살수작업 등을 고려하여 할증 할 수 있으며 적재위치 및 분포범위, 적재높이 등을 고려하여 검토하는 것이 바람직하다.

[표 2] 해체 시 발생한 잔재물의 단위중량

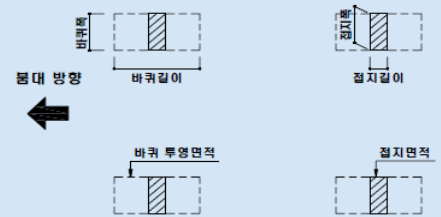
일반적인 해체잔재 계량시(콘크리트+목재 등)					해체된 콘크리트만 분리 계량 시				
측정 횟수	총중량 (KN)	공차중량 (KN)	실중량 (KN)	단위중량 (KN/m ³)	측정 횟수	총중량 (KN)	공차중량 (KN)	실중량 (KN)	단위중량 (KN/m ³)
1	388.4	137.5	250.9	15.18	1	399.7	148.5	251.2	15.20
2	358.2	138.7	219.5	13.28	2	391.0	137.5	253.5	15.34
3	359.8	136.8	223.0	13.50	3	384.1	137.0	247.1	14.95
4	354.3	133.0	221.3	13.39	4	371.1	140.9	230.2	13.93
5	365.2	136.5	228.7	13.84	5	382.6	142.2	240.4	14.55
6	361.6	136.9	224.7	13.60	6	365.5	136.5	229.0	13.86
7	363.6	137.0	226.6	13.71	7	361.8	137.0	224.8	13.60
8	360.9	133.0	227.9	13.79	8	361.8	136.9	224.9	13.61
9	368.0	133.0	235.0	14.22	9	359.1	133.2	225.9	13.67
10	361.5	137.4	224.1	13.56	10	360.5	133.0	227.5	13.77
평균				13.81	평균				14.25

※ 출처: 도심지 고층건물 유형별 최적해체기술개발(2006년, 한국건설교통기술평가원)

- 장비하중은 장비의 위치 및 접지면적 등을 면밀히 고려해야 하며 가장 많이 사용하는 굴착기를 예로 들면 무한계도식은 장비제원에 제시된 접지면적을 적용하고 타이어식은 아래 설계기준을 참고하여 산정할 수 있다.

〈타이어식 굴착기 접지면적 산정〉

차륜의 접지면은 DB하중의 각 차륜에 대해 면적이 $\frac{12,500P}{9}$ (mm²)인 하나의 직사각형으로 간주하며 이 직사각형의 폭과 길이의 비는 2.5:1로 한다. 여기서 P는 차륜의 중량(KN)이다. 접지압은 접지면에 균일하게 분포하는 것으로 가정한다.



※ 접지폭 : 접지길이 = 2.5 : 1

※ 출처 : 도로교 설계기준(2010년, 국토해양부)

- 장비의 충격하중은 장비의 종류, 작업방법, 하중분포 등에 따라 변화하므로 활하중에 의한 충격의 영향은 이론적으로 정확하게 산정하기는 어려우나 해체현장의 다양한 변수와 안전측 검토를 위해 각 국의 도로교에 적용되는 최대 충격계수 '0.3'을 적용하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다.

[표 3] 각국의 도로교 차량의 충격계수

구분	한국(도로교설계기준)	미국(AASHTO)	일본(도로교설계기준)
충격계수	$i = \frac{15}{(40 + L)} \leq 0.3$	$i = \frac{50}{(125 + L)} \leq 0.3$	$i = \frac{7}{(20 + L)}$

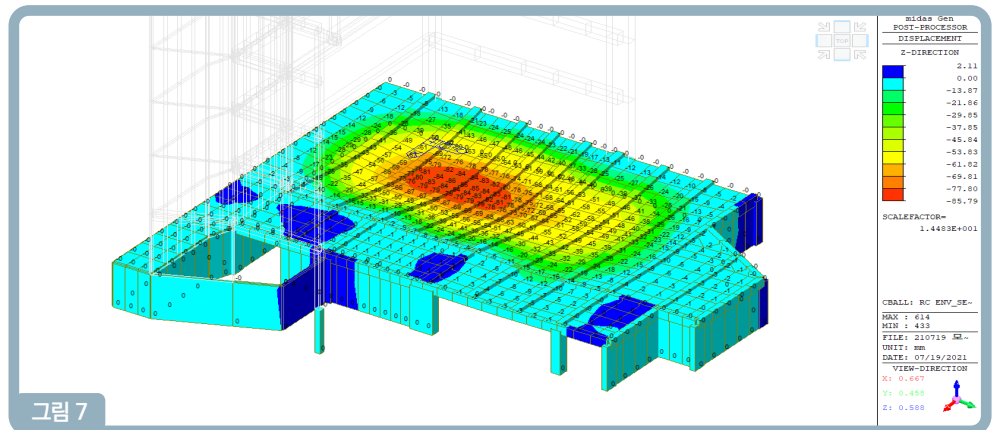
※ L : 설계부재에 최대응력이 일어나도록 활하중이 재하된 시간길이(m)

☞ 붕괴원인 추정을 위한 구조해석 모델링

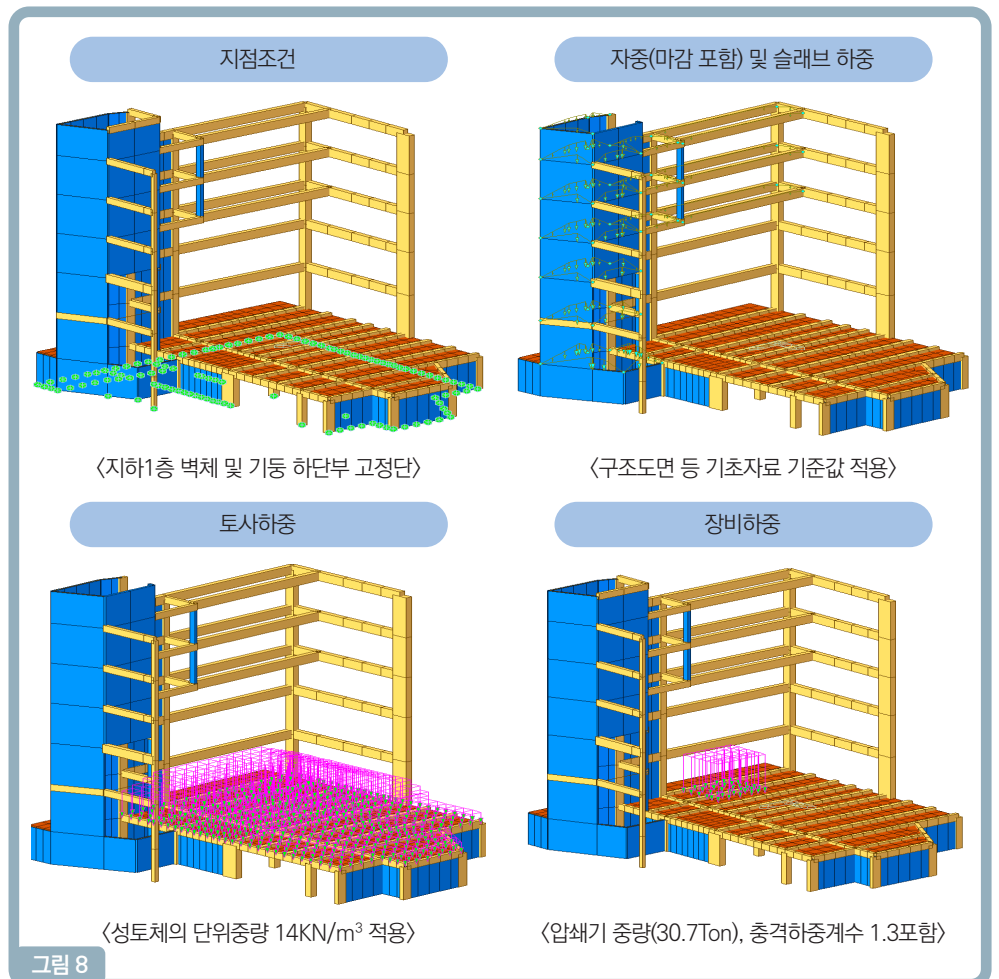
붕괴원인을 추정하기 위한 구조해석 결과 붕괴직전 상부하중에 의해 지하층 거더에서 처짐이 발생(최대 약 86mm) 하는 것으로 나타났으며 지하층 일부에 채워져 있던 성토체에 의해 지하층 천장 구조물이 일정기간 버티다가 사고당시 거더 → 빔 → 기둥의 순으로 붕괴*가 발생했을 것으로 추정되며

* 상부하중에 의한 부재력이 저항력의 3배 이상을 초과할 경우 붕괴에 이를 수 있음

건물 전면부쪽으로 성토체의 횡력이 발생하여 중심을 잃은 건물 벽체를 대로변으로 밀어 넘어뜨린 것으로 판단된다.



[그림 7] 단면 검토결과(MIDAS GEN)



[그림 8] 붕괴직전 작용하중 검토조건

그림 8



➡ 노후 해체 건축물 증가 추세

2020년 12월 기준 전국에 분포된 건축물 중 준공 후 20년 이상 경과한 노후 건축물이 약 58.8% 점유하고 있어 국내 건축물의 50% 이상이 잠재적 해체대상 건축물로 추정되며, 특히 노후가 심한 건축물로서 근래 해체공사의 주요 시장을 형성하고 있는 35년 이상 경과 건축물도 무려 31.4% 달한다.

매년 건축물 착공 물량과 멸실 물량도 증가하고 있고 본격적으로 멸실되기 시작하는 준공 후 20년 이상 노후 건축물의 점유율이 50% 이상임을 고려할 때 향후 국내 해체공사는 시장규모가 지속적으로 확대될 것으로 예상된다.

[표 4] 2020년 노후 건축물 현황통계<국토교통부>

단위(동)					
합 계	10년 미만	10년~ 20년 미만	20년~ 35년 미만	35년 이상	기 타
7,275,266	1,254,371	1,221,200	1,993,606	2,284,186	521,903
100%	17.2%	16.8%	27.4%	31.4%	7.2%

➡ 해체대상 건축물의 대형화

과거 재개발 시 해체대상 건축물의 대부분은 1~2층 조적조 건물로 지상에서 일반 굴착기(압쇄기) 등을 사용한 건물의 해체가 가능하였으나 최근에는 5층 이상 고층 철근콘크리트 건물에 대한 해체가 증가함에 따라 작업의 난이도 및 위험성도 함께 증가하게 되었다.

따라서 기존의 해체계획 및 작업방법만으로는 한계가 있을 수 있고 작업과정에서 여러 문제점에 봉착할 수도 있다.

➡ 과거 유사사고가 현재에도 반복

해체공사 중 붕괴사고 발생 현황

- 2021.06.09.(수) 광주 학동 재개발현장 건물 해체 중 붕괴 <사망 9명, 부상 8명>
- 2021.04.30.(금) 서울 장위동 재개발현장 건물 해체 중 붕괴 <사망 1명>
- 2019.07.04.(목) 서울 잠원동 건물 해체 중 붕괴 <사망 1명, 부상 3명>
- 2017.01.07.(토) 서울 낙원동 건물 해체 중 붕괴 <사망 2명, 부상 2명>

과거 낙원동 사고(2017년) 및 잠원동 사고(2019년) 이후 「건축물 관리법」 및 관련 고시 등이 제정되었고 지자체에서도 조례개정을 통해 해체공사 안전 확보를 위한 부단한 노력에도 유사 사고가 현재까지 되풀이되고 있다.

이번 광주 사고의 경우 관련법령에 마련된 절차를 통해 위험을 예방할 수 있었음에도 법의 실효성과 현장 작동성이 부족하여 사고를 초래하였고 이는 공사와 관련한 여러 책임주체의 노력 없이 관련 법·제도의 정비만으로는 한계가 있음을 극명히 보여주는 사례라 하겠다.

해체공사 전반에 드러난 근원적 문제점

관련 법령 및 고시 등 제정 현황

- 건축물 관리법(2020.5월 시행, 2019.4.30. 제정)
- 건축물 해체계획서의 작성 및 감리업무 등에 관한 기준(국토교통부 고시 제2020-380호, 2020.5.8.제정)
- 건축물 해체공사 안전관리 매뉴얼(서울시, 2019.12월 발행)

☞ 안전 보다는 실익을 우선시 한 사업구조

일반 건축공사와 달리 해체공사는 주 공사에 포함된 부대공사라는 인식과 함께 목적물이 멸실되면서 사후관리 등의 책임이 없어지므로 작업과정에 대한 공사주체의 책임의식은 상대적으로 낮아질 수 밖에 없다.

따라서 작업일정 단축과 이윤추구에만 중점을 둔 사업진행이 만연하거나 이면계약, 단단계 불법 재하도급 등을 통한 공사비 절감 시도 등이 해체공사의 사고위험을 키우고 있다.

특히 이면계약 및 재하청 관행은 의사결정 체계 및 공사 책임관계를 혼탁하게 하여 공사과정에서 문제가 발생해도 즉시 대응하기 힘들고 작업원 관리에도 한계가 발생하여 위험관리의 불확실성을 높인다.

☞ 해체계획서 작성자와 실행자 사이의 괴리(乖離)

사업 참여자 등이 '해체계획서'를 인·허가 수단으로만 인식하여 제3자에 대항 작성하게 함으로써 형식적인 계획이 수립되고 현장 실정과 상이한 해체계획서가 허가권자에 제출되어 허가가 이루어지고 지고 있는 실정이다.

또한 해체계획 내용이 실질적으로 작업을 실행하는 최하위 조직의 공사방법이나 수단을 통제하지 못하고 실행자 임의판단에 의한 해체작업이 이루어지게 됨으로써 사고의 위험성을 높이고 있다.

☞ 위험예방을 위한 현장 감시기능 및 지휘감독 체계 미비

발주자 및 원청이 해체공사의 위험성을 간과한 채 해체업자에게 공사 전반을 일임함에 따라 위험예방을 위한 원청의 역할은 미미해지고 현장을 체계적으로 감시하거나 지휘감독 할 수 있는 전문가 조직체계도 마련되지 않아

공사역량이 부족한 영세업체가 해체계획과 상이한 위험한 작업을 강행하더라도 원청이 이를 묵인하거나 방조하는 상황이 빈번하게 발생하고 있다

또한 해체계획 이행여부를 확인해야 할 감리자 및 허가권자의 관리감독 소홀로 인해 현장의 위험행위가 적발되지 못하고 있는 실정이다.



↔ 구조안전 전문가 현장참여 확대

해체 건축물 조사 등 사전조사에 구조전문가를 포함한 여러 전문가가 함께 참여하도록 하여 해체 작업 단계별 구조 안전성 검토 및 현장 실정에 적합한 해체계획의 수립·이행이 이루어질 수 있도록 해야 한다.

특히 신뢰성 있는 안전성 검토를 위해서는 건축물 현황, 노후화 및 손상정도, 주변상황 등에 대한 사전조사가 무엇보다 중요하며 이를 토대로 구조 전문가의 안전성 검토가 필수적이다.

↔ 발주자 및 원청 주도의 지휘감독 체계 정비

의사결정의 정점에서 영향력을 행사하는 발주자의 안전관리 조직구성 등 역할을 강화하고 원청이 선두에서 총체적 안전관리 책임을 다할 수 있도록 공사 지휘감독 체계를 정비하여 사고 예방에 만전을 기해야 한다.

↔ 해체공사 참여자의 자격기준 제한 및 시공안전 역량 강화

해체대상 건물의 규모 및 특성, 해체공법 등을 고려하여 공사 위험도에 따라 해체공사 사업장을 등급화하고 공사를 수행할 수 있는 건설업체 자격기준도 세분화하여 제한을 둘 필요가 있으며

공사 수행과정에서의 구조안전 이해가 필수적인 해체공사 작업자의 경우 자격·면허·경험 또는 기능과 관련한 취업제한 기준 마련과 함께 교육 프로그램 개설을 통해 시공안전 역량이 우수한 기능공을 상시 확보해 둘 필요가 있다.

↔ 위험요인 사전 감시기능 강화

해체계획서 검토 및 허가단계에서 다수의 전문가가 참여·의결하도록 하는 해체공사 사전 심의제도 마련을 통해 검토절차의 공정성 및 전문성 확보가 필요하며

해체계획의 변경이나 해체계획을 따르지 않는 임의작업이 발생하지 않도록 해체공사 전 과정을 관리감독 할 수 있는 감리제도 보완도 필요하겠다.



02 거푸집동바리 붕괴사고 사례 및 대책

거푸집동바리
붕괴사고는
왜 반복될까?

최근 거푸집동바리 붕괴사고 발생 현황

- 2021. 1.23.(토) 시흥 00아파트 건설현장 벽체 거푸집 붕괴 <사망 1명, 부상 1명>
- 2021. 2. 9.(화) 용인 00근린생활시설 신축현장 거푸집동바리 붕괴 <부상 2명>
- 2021. 6.16.(수) 충주 00산림유역관리 현장 벽체 거푸집 붕괴 <사망 1명, 부상 2명>

위와 같은 거푸집동바리 붕괴사고는 왜 반복하여 발생하는 것인가? 이에 대한 의문점을 해소하기 전에 거푸집동바리에 대해서 알아볼 필요가 있다. 거푸집동바리는 콘크리트 타설 하중을 지지하여 설계대로 구조물을 만들기 위한 형틀인데 붕괴사고는 거푸집동바리가 구조적으로 취약해서 콘크리트 타설 하중을 견디지 못하기 때문에 발생된다고 할 수 있다.

[그림 1] 용인 00사옥 신축현장 거푸집 동바리 붕괴

[그림 2] 충주 00산림유역관리 현장 벽체 거푸집 붕괴



그림 1



그림 2

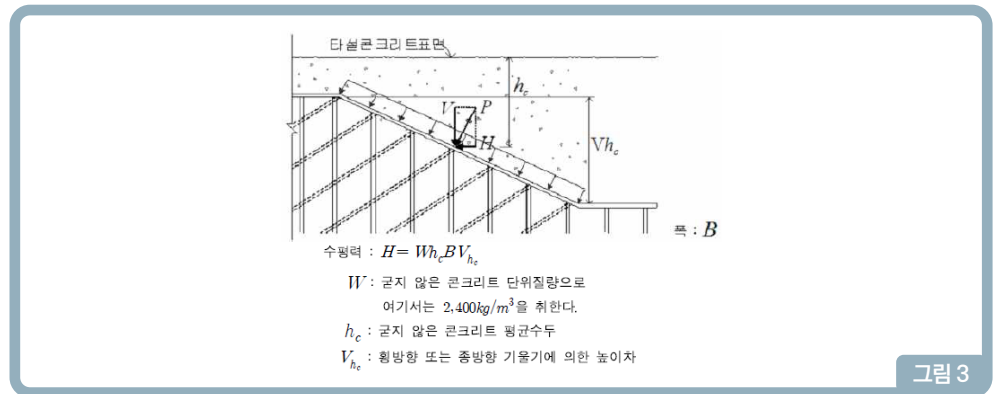
거푸집동바리의
재료, 작용하중
및 구조검토

거푸집동바리 재료는 「가설공사표준시방서」에서 가시설물* 설계에 사용되는 재료는 한국산업 표준(KS) 및 고용노동부 방호장치 의무안전인증고시 및 방호장치 자율안전확인고시에 적합하여야 한다고 규정하고 있다. 또한 목재, 강재, 알루미늄재, 플라스틱재 및 기타 재료는 한국산업표준에 적합하여야 한다고 규정하고 있다.

* 가시설물 : 영구 구조물의 축조를 위하여 임시로 설치하는 시설 또는 구조물로 거푸집동바리, 비계, 흙막이보공 등이 있음

또한 거푸집동바리는 콘크리트 타설 시 작용하는 수직하중, 수평하중, 콘크리트 측압, 풍하중 및 편심하중 등에 대해 안정성을 검토하여야 한다. 수직 하중은 고정하중, 작업하중으로 구분하는데 고정하중은 철근 콘크리트와 거푸집의 무게를 합한 하중이고 보통 콘크리트 기준 2,400kg/m³을 적용한다. 그리고 작업하중은 슬래브 두께가 0.5m 미만일 경우에는 구조물의 수평투영면적 당 최소 2.5kN/m² 이상, 슬래브 두께가 0.5m~1.0m 미만일 경우에는 3.5kN/m² 이상, 1.0m 이상일 경우에는 5.0kN/m²를 적용한다.

수평하중은 고정하중의 2% 이상 또는 수평길이 당 1.5kN/m 이상 중에서 큰 쪽의 하중이 최상단에 작용하는 것으로 산정하고 벽체 거푸집에 고려하는 최소 수평하중은 수직투영면적 당 0.5kN/m²이 작용하는 것으로 산정한다.



[그림 3] 횡방향 또는 종방향 구배에 의한 수평력(H)

그리고 콘크리트 측압은 거푸집의 투영면에 수평방향으로 작용하는 것으로 일반 콘크리트용 측압, 슬립 폼용 측압, 수중 콘크리트용 측압, 역타설용 측압 그리고 프리팩트 콘크리트 (Prepacked concrete)용 측압으로 구분할 수 있는데 일반 콘크리트용 측압 산정식은 $P = W \cdot H \cdot g$ 이다. 여기서 P는 콘크리트 측압(kN/m²), W는 굳지 않은 콘크리트의 단위질량(kg/m³), H는 콘크리트의 타설높이(m), g는 중력가속도 0.01kN/kg 이다.

다음은 안전율에 대해서 알아보면 거푸집 지지를 위해 사용하는 동바리의 허용압축하중에 대한 안전율은 지지형식, 부속품에 따라 다음과 같다.

[표 1] 동바리 지지형식에 따른 안전율

지지형식		안전율	시 공 형태
지주형식 동바리	단품 동바리	3	강제 파이프 서포트, 강관과 같이 개개품을 이용하여 지지하는 동바리
	조립형 동바리	2.5	수직재, 수평재, 가새 등의 각각의 부재를 현장에서 조립하여 거푸집을 지지하는 동바리

보 형식 동바리 중앙부 허용 휨모멘트에 대한 중앙부 단면설계 모멘트의 안전율은 다음과 같다.

[표 2] 보 형식 동바리의 안전율

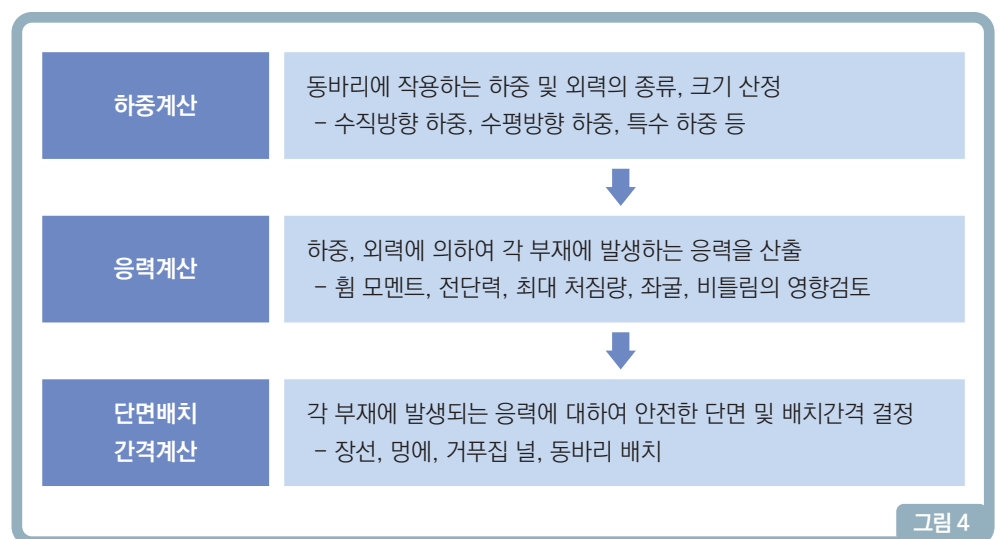
지지형식	안전율	시공형태
보 형식 동바리	2	강제 갑판 및 철재트러스 조립보 등을 수평으로 설치하여 거푸집을 지지하는 동바리

또한 거푸집 긴결재 및 부속품의 안전율은 다음과 같다.

[표 3] 거푸집용 부속품의 안전율

부속품	안전율	시공 형태
거푸집 긴결재	2	모든 경우
앵커	2	거푸집 하중과 콘크리트 축압만을 지지할 경우
	3	거푸집 하중, 콘크리트 축압 및 활하중을 지지할 경우
인장	2	모든 경우
폼 행거	2	모든 경우

거푸집동바리는 「산업안전보건기준에 관한 규칙」에 의거 구조검토 및 조립도를 작성하여야 하는데 일반적으로 현장조건에 부합하는 각 부재의 연결조건과 받침조건을 고려한 2차원 또는 3차원 구조해석을 수행하여야 하나 구조물의 형상, 평면선형 및 종단선형의 변화가 심하고 편재하의 영향을 고려할 경우에는 3차원 구조해석을 수행하여 안전성을 검증하여야 한다. 특히 설치 높이가 5.0m 이하인 시스템 및 강관틀 동바리의 경우에는 2차원 또는 3차원 구조해석을 생략할 수 있으며 구조검토는 다음 순서에 따라 수행하여야 한다.



[그림 4] 거푸집동바리 구조검토 순서도

그림 4

최근 발생한
거푸집동바리 붕괴사고
사례 및 대책

☞ 붕괴사고 CASE 1

충주 수해방지용 사방댐* 건설현장에서 콘크리트 타설작업 중 벽체 거푸집이 붕괴되면서 비계발판에서 작업중이던 재해자가 추락 후 매몰되어 1명 사망, 2명 부상을 당한 재해가 발생하였다.

* 사방댐은 계곡 상류에서 발생한 홍수, 산사태 등으로 입목과 토사가 한꺼번에 쏟아지는 것을 막아주는 역할을 하는 소규모의 댐



[그림 5] 사방댐 전경

[그림 6] 사방댐 붕괴사고 발생 부위



그림 6

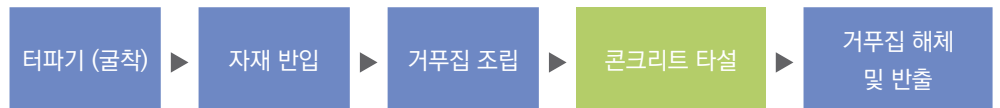
붕괴사고가 발생한 사방댐은 길이 25m, 높이 6m(기초 1m 포함), 두께(하부 4m, 상부 1m) 규모 이고 사방댐 본체 가운데 퇴적물 이동 차단용 철골 스크린(길이 6m, 높이 2m)이 설치되어 있다.



[그림 7] 사방댐 규모

사방댐 작업공정은 터파기, 자재반입, 거푸집 조립, 콘크리트 타설, 거푸집 해체 등 순으로 작업 중이었고 재해는 콘크리트 타설 공정에서 발생하였다.

※ 당 현장 사방댐 작업 순서도



* 재해발생

사고당일 작업은 사방댐 본체 콘크리트 타설작업으로 08:00분경 현장소장, 작업반장 등 8명이 현장에 도착하여 작업 준비를 하였는데 현장소장은 레미콘 물량 주문 후 약 5km 떨어진 장소로 이동하여 레미콘 트럭 안내를 하였고 작업반장은 작업지시 후 타 현장으로 이동하는 등 관리감독을 소홀히 한 정황이 나타났다.

콘크리트 타설 시 펌프카 기사와 목공(5명) 등 6명은 비계발판 2단(H=3.5m) 위에서 작업하였는데 펌프카 기사는 리모콘을 사용하여 펌프카 붐대를 조정하여 콘크리트 타설작업을 하였고 목공은 콘크리트 공극을 최소화하기 위해 나무망치를 사용하여 거푸집의 표면을 두드리는 작업 중이었다.

11:30분경 콘크리트 타설 중 ‘퍽’하는 소리와 함께 사방댐 좌측 본체 거푸집이 벌어지면서 붕괴사고가 발생하는 충격에 의해 비계발판 2단에서 작업중이던 목공 3명이 추락(H=3.5m) 하였는데 1명은 콘크리트에 매몰되어 사망하였고, 2명은 인근병원에 후송 치료중이다.

붕괴사고를 조사하는 과정에서 여러 가지 문제점이 드러났는데 첫째, 거푸집 동바리 구조검토 및 조립도를 작성하지 않은 것으로 조사되었다. 산업안전보건법 「안전보건기준에 관한 규칙 제331조」에서 「사업주는 거푸집동바리 등을 조립 하는 경우에는 그 구조를 검토한 후 조립도를 작성하고 그 조립도에 따라 조립하도록 하여야 한다」고 규정하고 있다. 둘째, 현장에서 임의제작* 하여 설치한 거푸집 긴결재**가 콘크리트 타설 하중을 견디지 못하고 양단부가 파단되면서 붕괴사고가 발생하였다. 「안전보건기준에 관한 규칙 제332조」에서 「사업주는 거푸집을 조립하는 경우에는 거푸집이 콘크리트 하중이나 그 밖의 외력에 견딜 수 있도록 견고한 구조의 긴결재를 설치하는 등 필요한 조치를 할 것」을 규정하고 있다.

- * 철근(φ13mm) 양단부에 플랫폼타이를 용접해서 거푸집긴결재(폼타이)로 사용함
- ** 거푸집이 변형되지 않게 연결, 고정하는 철물로 플랫폼타이, 폼타이 등의 종류가 있음



[그림 8] 임의제작한 거푸집긴결재
[그림 9] 거푸집긴결재(폼타이) 종류

사고현장 사방댐은 벽체두께가 최대 4m로 플랫폼타이 설치가 어려운 구간에 대해서는 한국산업표준(KS F 8023, 거푸집 긴결재)에 의거 분리형 타이(콘과 볼트, 나사로 연결되는 구조)를 사용하여 하나, 당 현장은 플랫폼타이에 철근을 용접하여 KS규격에 부적합한 거푸집 긴결재를 사용한 것으로 조사되었다.

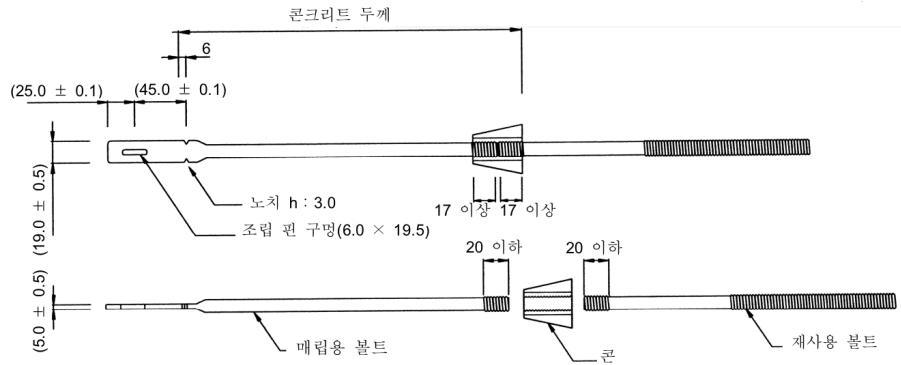
※ 당 현장에서 사용한 플랫폼타이는 한국산업표준 플랫폼타이 규격(폭 19mm, 두께 5mm)에 비해 두께가 약 40%에 불과함

거푸집 긴결재(폼 타이, 플랫폼타이 등)는 거푸집동바리 붕괴사고 예방에 중요한 가설재 임에도 방호장치 의무 안전인증 고시(고용노동부 고시 제2013-54호)의 안전인증 대상에서 제외되어 있어 제도개선이 시급한 실정이다.

4.1.2 분리형 타이

분리형 타이의 구조는 그림 2에 나타낸 바와 같으며, 다음 각 호의 규정에 적합하여야 한다.

- a) 그림 2의 매립용 볼트, 재사용 볼트 및 재사용 핀볼트는 나사산을 포함한 바깥지름이 $(13.0 \pm 0.4) \text{ mm}$ 또는 $(16.0 \pm 0.5) \text{ mm}$ 이어야 하며, 타이를 구성하는 볼트의 지름은 동일한 지름이어야 한다.
- b) 조립 핀 구멍이 있는 단부의 너비는 $(19.5 \pm 0.5) \text{ mm}$, 두께는 $(5.0 \pm 0.5) \text{ mm}$ 이어야 한다.
- c) 조립 핀 구멍의 너비는 $(6.0 \pm 0.5) \text{ mm}$, 길이는 $(19.5 \pm 0.5) \text{ mm}$ 이어야 한다.
- d) 노치 중심에서 조립 핀 구멍 중심까지의 거리는 $(45.0 \pm 0.1) \text{ mm}$, 조립 핀 구멍 중심에서 단부까지의 거리는 $(25.0 \pm 0.1) \text{ mm}$ 이어야 한다.
- e) 콘에 결합되는 볼트 나사의 길이는 17 mm 이상, 20 mm 이하이어야 한다.



[그림 10] 한국산업표준(KS F 8023, 거푸집긴결재)

그림 10

또한 사방댐 거푸집으로 유로폼(Euro form)*을 사용하였는데 거푸집 보강을 위해 설치한 강관파이프는 후크(Hook)** 등 전용철물 대신 철선으로 고정하였고 거푸집 및 긴결재 고정용 웨지 핀(Wedge pin)***은 연결부 마다 2개를 직각으로 설치하여야 하나, 웨지 핀을 일부 미설치하였다. [그림 11~14] 참조

위와 같이 부실하게 설치된 거푸집동바리는 구조검토 결과 콘크리트 타설 하중을 견디지 못하는 것으로 검토되었고 실제로 거푸집 긴결재 양단부에 설치한 플랫폼타이가 파단되면서 거푸집이 붕괴되었다. [그림 15~16] 참조

- * 일정한 규격으로 가공한 합판 뒷면에 강재 틀을 붙여 제작한 거푸집
- ** 유로폼의 변형을 방지하기 위하여 강관파이프를 고정하는 갈고리 형태의 철물
- *** 유로폼 및 플랫폼타이 구멍에 설치하여 거푸집을 고정하는 썸기용 핀

[그림 11] 거푸집 붕괴부위 웨지 핀 및 철선 부실 설치 상태

[그림 12] 거푸집(유로폼) 정상체결 상태 (타현장 사례)

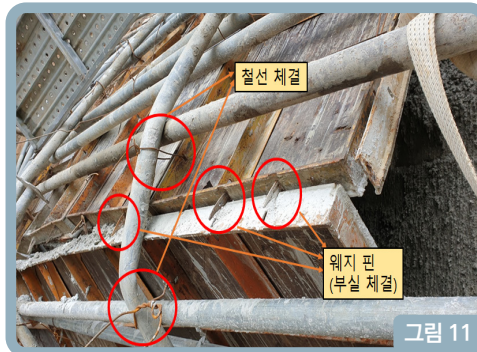


그림 11



그림 12

[그림 13] 유로폼 웨지 핀 정상 체결 상태(타현장 사례)



그림 13

[그림 14] 유로폼 후크 및 웨지 핀 정상 체결 상태(타현장 사례)

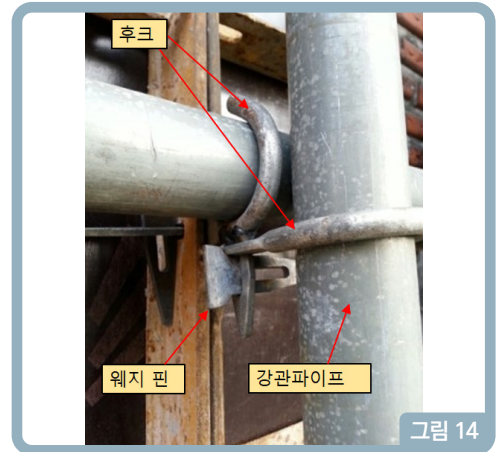


그림 14

[그림 15] 거푸집결재 양단부 플랫타이 파단 상태-1



그림 15

[그림 16] 거푸집결재 양단부 플랫타이 파단 상태-2



그림 16

비계발판은 목공이 직접 설치하였는데 외출 비계 형식으로 영성하게 조립하였다. 사방댐 붕괴사고 발생 시 재해자가 비계발판에서 추락하지 않았다면 인명 피해는 없었을 것인데 비계발판 단부에 안전난간을 미설치한 것이 작업자가 추락하는 원인이 되었다고 할 수 있다.

[그림 17] 붕괴사고 현장 비계발판 설치 상태



그림 17

사방댐 공사 등 사방사업은 「사방사업법 제26조(사업의 위탁)에서 시·도지사 또는 지방산림청장은 대통령령으로 정하는 바에 따라 산림조합법에 따른 산림조합 또는 산림조합중앙회에 사방사업의 시행을 위탁할 수 있다」는 법률에 의거 산림조합에서 시행하고 있다. 산림조합은 「산림자원의 조성 및 관리에 관한 법률」에 의거 임도사업, 사방사업, 산지의 복구 등 산림토목 사업을 수행함에 있어 산림공학 기술자가 참여하고 있으나 토목 기술자 참여는 드문 실정이다.

따라서 사방사업 등 산림토목 수행 시 토목 기술자가 필수적으로 참여할 수 있도록 관련법을 보완하여 거푸집동바리 구조검토 및 조립도를 작성하고 콘크리트 타설작업 시 거푸집동바리 변형, 변위 및 침하 유무를 점검하는 등 건설공사에 대한 사업 역량을 강화할 필요가 있다.

상기 내용을 토대로 사방댐 건설현장 거푸집동바리 붕괴예방대책을 제시하면 다음과 같다.

- ▶ 거푸집동바리 구조검토 및 조립도를 작성하고 조립도를 준수해야 한다.
- ▶ 거푸집 간결재를 안전인증 제도에 포함시켜 안전성을 확보해야 한다.
- ▶ 콘크리트는 분산 타설하고 감시자를 배치하여 거푸집동바리의 변형, 변위 및 침하 유무 등을 점검하여야 한다.
- ▶ 콘크리트 타설 등 위험작업 시 관리감독자는 관리감독을 철저히 해야 한다.
- ▶ 사방댐 등 산림토목 작업시 토목 기술자를 필수적으로 참여시켜 건설공사 역량을 강화해야 한다.

☞ 붕괴사고 CASE 2

용인 00근린생활시설 신축현장에서 지상1층 구조물 콘크리트 타설 작업 중 거푸집동바리가 붕괴되면서 콘크리트 양생용 열풍기에 연료주입 작업 중이던 재해자 2명이 부상을 당하였다.

[그림 18] 거푸집동바리 붕괴사고 현장 전경



그림 18

[그림 19] 거푸집동바리 붕괴사고 현장 부분



그림 19

당 현장에 적용한 거푸집동바리 공법은 데크 플레이트* + RC 보 하부에 파이프서포트(Pipe support)를 설치하였는데 붕괴 구간 거푸집동바리 설치 현황도는 다음과 같다.

* 얇은 강판을 골 모양으로 제작하여 만든 거푸집 대응으로 사용하는 재료

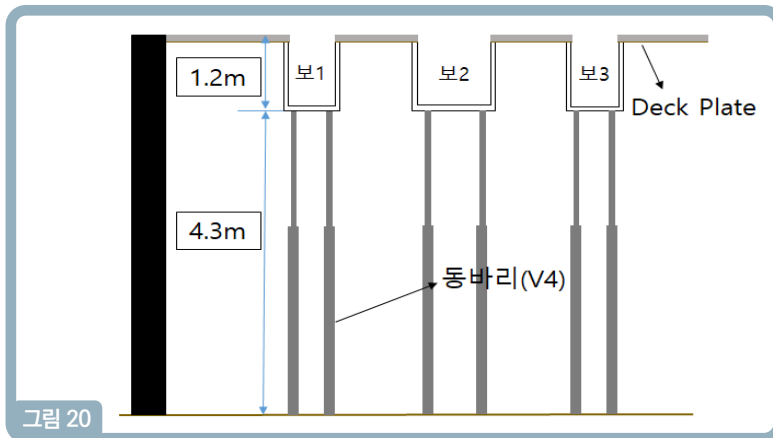


그림 20

[그림 20] 붕괴사고 현장 거푸집동바리 설치 단면도

데크 플레이트 하부에는 동바리가 설치되지 않고 보 하부에 설치한 파이프서포트가 콘크리트 타설하중을 지지하는 구조이다. 하지만 거푸집동바리 구조검토 및 조립도를 작성하지 않고 현장 시공경험에 의해 임의로 거푸집동바리를 설치하였다.

또한 보 하부에 설치한 파이프서포트의 수평하중을 지지하는 수평연결재 설치상태를 조사해보니 산업안전보건기준에 관한 규칙 제332조에 의거 높이 2m 마다 2개 방향으로 설치하여야 하나 한 방향으로 설치하였고 수평연결재 고정은 안전인증을 받지 않은 직교 클램프*를 설치하였다.

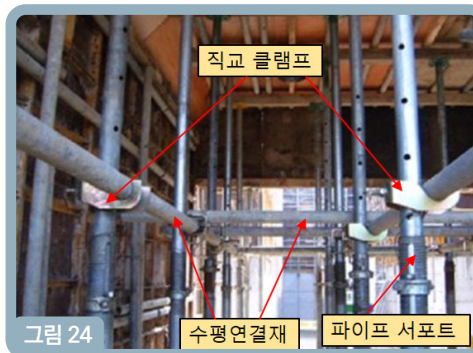
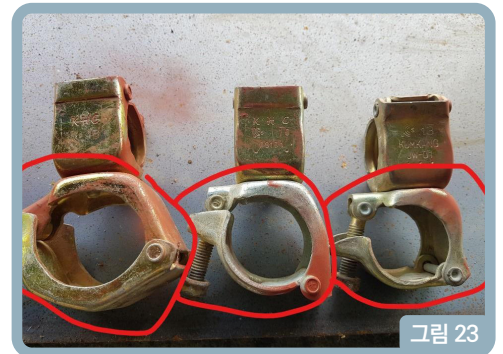
* 수평연결재 체결이 용이하여 현장에서 사용하고 있으나 [그림22]처럼 한쪽이 터져있어 수평하중이 작용할 때 수평연결재에 변위가 발생할 수 있기 때문에 문제가 있음



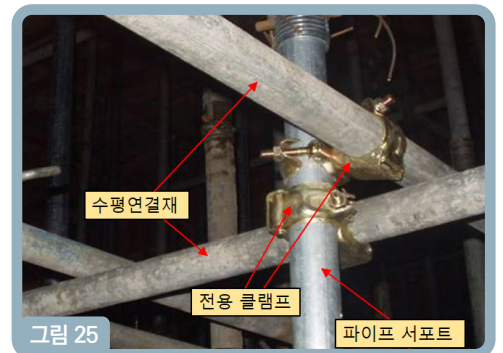
[그림 21] 수평연결재 설치 상태



[그림 22] 직교클램프
[그림 23] 전용클램프



[그림 24] 수평연결재에 직교클램프 설치 상태(불량)
[그림 25] 수평연결재에 전용클램프 설치 상태(양호)



그리고 붕괴된 파이프서포트는 성능검정이 미비되었고 콘크리트 타설 중 거푸집동바리의 변형·변위 및 침하 유무 등을 감시할 수 있는 감시자를 배치하지 않은 것으로 조사되었다.

구조검토 결과 보 하부에 설치한 파이프서포트는 설계 안전율(3.0)을 고려하면 콘크리트 타설 하중을 지지하지 못하는 것으로 나타났고 붕괴 매커니즘 분석 결과는 다음과 같다.

- ① 파이프서포트 시공오차에 의한 초기변형
- ② 재사용에 따른 강도저하 및 변형으로 파이프서포트 좌굴
- ③ 비선형거동에 따라 연쇄적으로 파이프서포트 붕괴

상기 내용을 토대로 데크 플레이트 + 보 거푸집 하부 파이프서포트 구조의 거푸집동바리 붕괴 예방 대책을 제시하면 다음과 같다.

- ▶ 거푸집동바리 구조검토 및 조립도를 작성하고 조립도를 준수해야 한다.
- ▶ 파이프서포트는 안전인증 등 성능검정에 합격한 제품을 사용해야 한다.
- ▶ 파이프서포트 높이가 3.5m 초과하는 경우에는 높이 2m 이내마다 2개 방향으로 수평연결재를 설치하되 파이프서포트와 수평연결재는 전용 클램프를 설치하여야 한다.
- ▶ 데크 플레이트 양단 고정은 골 간격(약20cm) 마다 설치하고 보 거푸집의 변형, 탈락, 전도 방지를 위한 보강조치를 하여야 한다.
- ▶ 콘크리트는 분산 타설하고 감시자를 배치하여 거푸집동바리의 변형, 변위 및 침하 유무 등을 점검하여야 한다.



거푸집동바리 붕괴사고 예방 점검 체크리스트

공 종	체크리스트
거푸집동바리 작업	✓ 거푸집동바리 구조검토 및 조립도 작성/준수
	✓ 거푸집동바리 안전인증, 성능검정 여부 확인
	✓ 파이프서포트 수평연결재, 클램프 전용철물 사용
	✓ 깔목의 사용, 콘크리트 타설 등 동바리 침하방지 조치
	✓ 동바리의 상하 고정 및 미끄러짐 방지 조치
	✓ 데크 플레이트 양단 고정(약 20cm 간격) 조치
	✓ 보 거푸집 변형, 탈락, 전도 방지를 위한 보강 조치
	✓ 거푸집긴결재(폼타이, 플랫타이 등) KS 제품 사용
	✓ 시스템동바리의 구조적 안전성이 확보되도록 조립도에 따라 가새재 설치
	✓ 시스템동바리 수직재와 받침철물의 연결부 겹침 길이는 받침철물 전체길이의 3분의 1 이상 되도록 설치
콘크리트 타설 작업	✓ 작업발판 일체형 거푸집(갱폼, ACS 폼 등)의 지지 또는 고정철물(앵커볼트)의 이상 유무 수시 점검
	✓ 작업계획서 작성/준수, 작업지휘자 지정/지휘
	✓ 콘크리트 타설 작업 전 거푸집동바리 이상 유무 점검
	✓ 콘크리트 타설 작업 중 거푸집동바리의 변형·변위 및 침하 유무 등을 점검하는 감시자 배치
	✓ 편심이 발생하지 않도록 콘크리트 분산타설
	✓ 설계도서의 콘크리트 양생기간을 준수하여 거푸집 동바리 해체
✓ CPB(Concrete Placing Boom) 장비 조립·해체 시 마스트 지지핀, 유압 잭 이상 유무 점검	
✓ 작업계획서 작성/준수, 작업지휘자 지정/지휘	



03 관로공사 굴착사면 붕괴사고 막을 수 있을까?

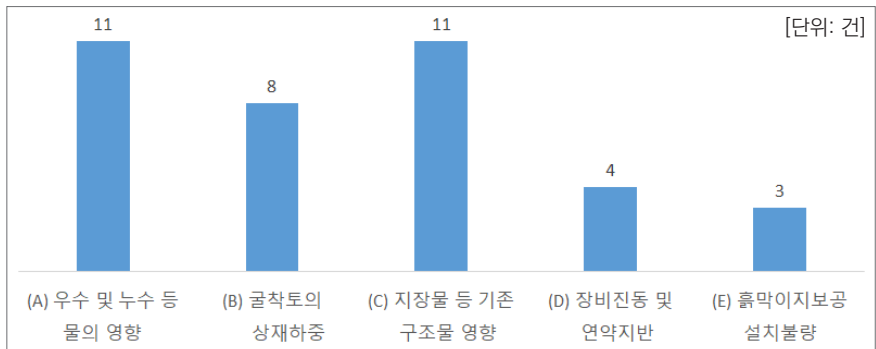
굴착사면 붕괴사고가 계속해서 발생하고 있다

최근 관로공사 굴착사면 붕괴사고 발생 현황

- 2021.06.01.(화) 농장 개축공사 현장 우수관로 굴착사면 붕괴 <사망 1명>
- 2021.05.29.(토) 도로 구조개선 현장 우수관로 굴착사면 붕괴 <사망 1명>
- 2020.10.19.(월) 공장 신축현장 우수관로 굴착사면 붕괴 <사망 1명>
- 2020.10.13.(화) 하수처리구역 우수관로 설치 현장 굴착사면 붕괴 <사망 1명>
- 2020.09.24.(목) 아파트 건설현장 우수관로 굴착사면 붕괴 <사망 1명, 부상 1명>

우리는 위 사고사례를 통해 관로공사 터파기 토사붕괴는 계절을 특정할 순 없지만 비슷한 시기에 몰려 발생하는 경향을 볼 수 있다. 실제 최근 5년 동안 발생한 굴착사면 붕괴사고 30건을 살펴본 결과, 발생일이 비슷한 시기에 몰려있는 사고들이 있었고 강우 등 물에 의한 영향이 있었다는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 30건의 재해조사의견서를 분석한 결과 주요 붕괴원인 등 아래와 같은 특징들을 확인할 수 있었다.

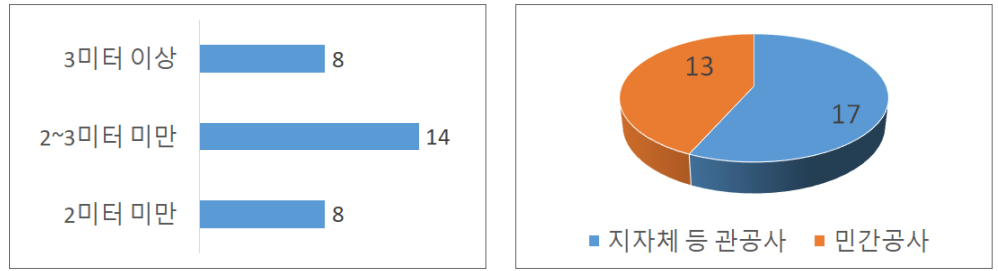
[도표 1] 굴착사면 주요 붕괴원인



※ 중대재해의견서 30건 분석결과 복수의 붕괴원인 중복포함

3건의 흠막이지보공 설치불량을 제외한 27건 모두 흠막이지보공 미설치상태였고, 설계에 흠막이지보공 미반영 등 흠막이지보공 설치계획이 없었던 2미터 미만의 사고도 전체의 27% 점유
 ※ 일부 지자체 등 관로공사 발주기관의 가시설 수량 산출 시 간이흠막이 설치를 2미터이상 (토질검토에 따라 변경가능)으로 적용하는 실정

[도표 2] 굴착사면 붕괴 시 굴착심도 및 관로공사 발주자 현황



즉, 관로공사를 위한 터파기 굴착사면은 굴착높이 및 굴착경사 그리고 지반의 강도, 지하수위 등에 따라 붕괴 위험도가 달라질 수 있고,

굴착배면의 기존 시설물(옹벽, 석축 등), 자재 및 굴착토, 차량운행에 의해 발생하는 상재하중과 우수 침투에 의한 수압증가(활동력 증가) 등이 굴착사면 붕괴사고의 원인이 되고 있다.

또한, 기존 지하매설물을 근접하여 터파기 할 경우, 느슨한 매립토의 붕괴가 빈번히 일어나고 있다.

따라서 우리는 지반의 특성, 상재하중 및 수압 조건 등을 고려한 굴착지반의 자립여부를 파악하여 흙막이 지보공을 설치하거나 터파기 사면의 경사를 결정할 필요가 있다.



국내 지반 굴착 시 안전작업 기준

〈산업안전보건법 및 고시(표준작업지침) 기준〉

산업안전보건법 산업안전보건기준에 관한 규칙은 「제4장 건설작업 등에 의한 위험 예방 → 제2절 굴착작업 등의 위험 방지」에서 굴착면의 기울기 및 흙막이 지보공의 각 조항을 통해 굴착작업 시 위험방지와 흙막이지보공 재료 등 터파기 전반에 대해 다루고 있으며,

고용노동부 고시 2020-5호「굴착공사표준안전작업지침」 제8조(트렌치 굴착)에는 터파기(줄파기) 작업 시 원칙적으로 흙막이 지보공을 설치하고, 굴착 깊이 1.5미터 이하인 경우에만 흙막이지보공을 설치하지 않을 수 있도록 권고하고 있다.

[표 1] 굴착면의 기울기 기준〈산업안전보건기준에 관한 규칙 별표11〉

구분	지반의 종류	기울기
보통흙	습지	1:1 ~ 1:1.5
	건지	1:0.5 ~ 1:1
암반	풍화암	1 : 0.8
	연암	1 : 0.5
	경암	1 : 0.3

해외 지반 굴착 시 안전작업 기준

〈OSHA Technical Manual Section V: Chapter2,

- Excavations: Hazard Recognigion in Trenching and Shoring 참조〉

OSHA Technical Manual에서도 여러 테스트를 통해 흙을 4가지 유형으로 구분하여 경사각을 적용한다.

- (Stable Rock) 수직으로 굴착해서 노출되었을 때 안전하게 유지되는 자연의 견고한 광물
- (Type A) 30cm² 당 1.5톤 이상 일축 압축강도*를 버틸 수 있는 흙
- (Type B) 30cm² 당 0.5~1.5톤의 일축 압축강도를 버틸 수 있는 흙
- (Type C) 30cm² 당 0.5톤 이하 일축 압축강도를 버틸 수 있는 흙

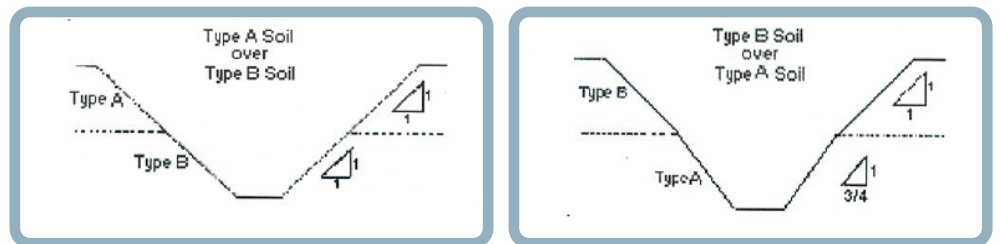
* 일축 압축강도(Unconfined compressive strength) : 수평주변이 구속되지 않은 상태에서 수직으로 누르는 힘을 가하여 파괴 시의 최대 압축응력

[표 2] 허용 가능한 경사각

Soil type	Height: Depth ratio	Slope angle
Stable Rock	Vertical	90°
Type A	3/4 : 1	53°
Type B	1 : 1	45°
Type C	1 1/2 : 1	34°
Type A(단기간)	1/2 : 1	63°

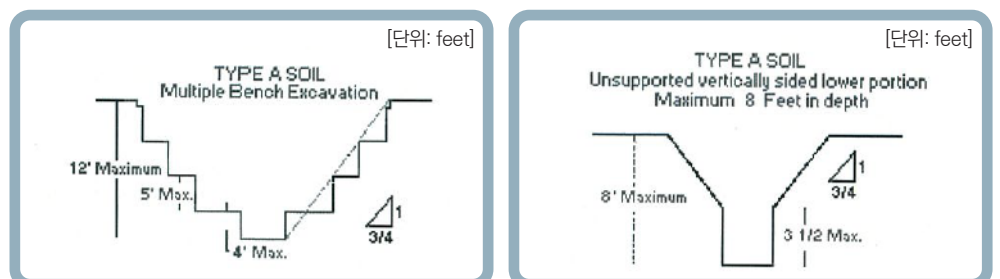
※ 흙의 유형에 따라 정해진 최대 경사각은 굴착 깊이 6m이내만 적용

다른 유형 흙의 단층이 혼합된 경우 일축 압축강도가 약한 흙의 경사각을 기본으로 하고, 일축 압축강도가 강한 흙이 아래에 있는 경우 단층에서 개별적으로 경사각을 적용할 수 있다.



[그림 1] 흙의 혼합단층 경사각

Type A,B 흙의 경우 경사각과 일정 높이 내에서 계단식 굴착(Bench excavation)이 가능하고, Type A 흙은 2.4m 이내 굴착일 경우 굴착저면에서 1m까지 수직 굴착이 가능하다.



[그림 2] 계단식 굴착(Bench excavation) 및 수직굴착 가능깊이

법 · 기준과 현실은 다르다?

☞ 굴착면을 보고 지반의 종류(흙의 유형)을 구분할 수 있을까?

최근 읽고 있는 사고조사기법 관련 서적에 이런 표현이 나온다.

「사고조사의 어려운 점 중 하나는 조사자가 원인을 찾기 위해 “왜”라는 질문을 계속하지만 문제는 질문을 끝내야 할 시점을 모른다는 것이다.」 필자 역시 굴착사면 붕괴현장 사진을 보면서 다양한 의문이 들었다



[그림 3] 굴착사면 붕괴현장

당신은 위 굴착사면 붕괴현장 사진을 보고 습지와 건지를 구분할 수 있겠는가? 왜 습지의 기울기를 건지보다 더 완만하게 해야 하는가? 비가 와서 우수가 지반에 유입된 경우는 습지가 맞을까, 건지가 맞을까? 비온지 얼마나 지나야 흙이 말랐다고 할 수 있을까? 모두 알 수 없다면 습지 기울기가 나오지 않는 모든 줄파기 현장에는 간이 흙막이를 설치해야 할까? 그렇다면 고시에서는 왜 1.5미터 이하인 경우 흙막이를 설치하지 않을 수 있다고 했을까? 법과 현실이 다른 것일까?

사실 그 답은 간단하다. 건설현장 사람들이 하는 말 중에 “땅은 파보기 전에 모른다.”라는 말이 있다. 결국 흙의 특성을 고려하지 않는다면 모든 질문에 대한 답은 “답할 수 없다.”가 될 것이다.

☞ 사면의 안정성을 통해 지반의 종류 유추

사면의 안정성을 단순히 정의하면, 토체의 전단강도와 활동면에 발생하는 전단응력의 비이며, 활동면에 발생하는 전단응력이 토체의 전단강도보다 클 경우 사면의 붕괴가 발생할 수 있다.

사면의 안전율,

$$F_s = \frac{S(\text{토체의 전단강도})}{\tau(\text{발생된 전단응력})} = \frac{c' + (\sigma - u)\tan\phi'}{\tau_n} > 1.0 \text{ 인 경우,}$$

c' : 점착력, σ : 전응력, u : 간극수압, $(\sigma - u)$: 유효응력, ϕ' : 내부마찰각

사면은 안정한 것으로 판단하게 되는데, 이때 안전율의 크기는 지층, 지반강도 추정치의 불확실성, 근접한 기존시설물의 안정성 등을 고려하여 선정하게 된다.

터파기 굴착시 토체의 전단강도는 점착력과 내부마찰각을 구하여 결정할 수 있는데, 지반특성에 따라 배수조건이 고려된 직접전단시험, 일축압축시험, 삼축압축시험(비압밀비배수) 등 시험을 통해 결정할 수 있으며,

발생된 전단응력은 토체의 하중, 상재하중 등에 의해 활동면을 따라 발생하는 응력을 산정하여 구할 수 있다.

즉, 이러한 흙의 특성을 고려하여 습지와 건지 등 지반의 종류를 구분하고 기울기를 적용해야 한다.

[표 3] 깎기 비탈면 안전을 기준(참고용)

구분	최소 안전율	내용(국토교통부 KDS 11 70 05: 2016)
건기시	$F_s > 1.5$	<ul style="list-style-type: none"> 지하수가 없는 것으로 해석하는 경우
우기시	$F_s > 1.3$ or $F_s > 1.2$	<ul style="list-style-type: none"> 연암 및 경암 등으로 구성된 암반 비탈면의 경우, 인장균열의 1/2 심도까지 지하수포화 높이나 활동면을 따라 지하수로 포화된 비탈면 높이의 1/2 심도까지 지하수를 위치시키고 해석을 수행하며 이 경우($F_s = 1.2$ 적용) 토층 및 풍화암으로 구성된 비탈면의 안정해석은 지하수위를 결정하여 해석하는 방법 또는 강우의 침투를 고려한 방법 사용 가능 지하수를 결정하여 해석하는 경우에는 현장 지반조사 결과, 지형조건 및 배수조건 등을 종합적으로 고려하여 지하수위를 결정하고 안정해석을 수행하며, 지하수위를 결정한 근거를 명확히 기술($F_s = 1.2$적용) 강우의 침투를 고려한 안정해석을 실시하는 경우에는 현장지반조사 결과, 지형조건, 배수조건과 설계계획빈도에 따른 해당지역의 강우강도, 강우지속 시간 등을 고려하여 안정해석을 실시하며, 해석시 적용한 설계정수와 해석방법을 명확히 기술($F_s = 1.3$적용)
지진시	$F_s > 1.1$	<ul style="list-style-type: none"> 지진관성력은 파괴토체의 중심에 수평방향으로 작용 지하수위는 실제측정 또는 침투해석을 수행한 지하수위
단기	$F_s > 1.1$	<ul style="list-style-type: none"> 1년 미만의 단기적인 비탈면의 안정성

국내 관로공사 현장에서 주요 붕괴원인은 왜 반복되는가?

⇒ 국내 관로공사 현장에서 지반의 종류 구분과 적정 기울기 적용이 가능할까?

- ▶ 국내 · 외 작업 기준과 사고통계를 통해 우리는 굴착심도가 낮은 경우에도 흙의 특성을 반영한 굴착기울기를 적용해야하고, 일정깊이 이상인 경우 반드시 간이 흙막이를 설치해야 하는 것을 배웠으나 국내 관로공사의 경우 아래와 같은 문제점으로 인해 여전히 지켜지지 않고 있다.

⇒ 길고 좁아 협소한 작업 장소

- ▶ 관로설치를 위해 길고 좁은 장소에서 연속적으로 줄파기를 함에 있어 같은 굴착심도의 흙 상태도 시추주상도와 다를 수 있고, 주변 도로의 통행 등 제약조건과 좁은 공간에서 작업을 진행하여 장비 및 자재 등이 상재하중과 간극수압에 영향을 줄 수 있으나 이를 확인하기 어렵다.

* 시추주상도 : 지반 천공을 통해 지반의 상태, 지하수 유동 등을 조사하여 지질 단면을 도화화한 설계도서

⇒ 시간의 압박

- ▶ 또한, 전체 작업공기가 부족하거나, 도로통행 영향 최소화를 위해 부분적으로 줄파기와 되메우기를 해야 하는 등 반복적인 시간의 압박이 발생한다.

⇒ 경험과 운에 맡기는 작업방법

- ▶ 결국, 흙의 특성이 제대로 반영되지 않은 상태에서 굴착기 장비기사 등 작업자의 경험에 비추어 굴착사면 기울기가 적용되고, 간이 흙막이를 설치하지 않은 상태에서 운에 기대어 빠르게 작업을 진행하게 된다.

줄파기 굴착면을
안전하게
보호하기 위해서는

이것만은 반드시 지킵시다!!

굴착심도 1.5m이상인 경우 간이 흠막이 의무설치 및 확인

- ▶ 상하수도관 등 관발주 공사의 경우 설계 시 노면하중 및 동결심도 등을 고려한 최소토피가 적용되어 굴착심도 1.5미터 이상이 대부분이므로 공사 내역에 간이 흠막이 설치를 의무 반영하고, 발주자가 설치여부 확인

※ 현재 2미터 미만 관로 굴착 시 간이흠막이가 설계에 미반영 되거나, 2미터 이상의 경우 설계에 반영되더라도 설치시기와 설치방법 등이 불량하여 사고로 이어지는 실정이다.
따라서 관발주 공사 설계 시 간이흠막이를 의무반영하고, 검측 등 현장 확인 시 간이흠막이 설치여부를 확인한다면 사고를 예방할 수 있다.

- ▶ 굴착면과 기존시설물(옹벽, 석축, 건물)근접 및 상재하중이 클 경우에는 반드시 안정성 검토 실시하여 적절한 흠막이 지보공 설치
- ▶ 맨홀 등 민간의 단기간 소규모 부분굴착 공사 시 사면굴착이 가능한 경우 흠의 상태를 반영한 굴착 기울기 준수(수직굴착 금지)

주요 붕괴원별 대책

CASE(A) 우수 유입 및 매설물 누수 등 굴착사면 내 지하수 유출 시

근로자 출입금지!!

시공을 중단하고 우수·누수 차단 후 안정성 확인 후 공사재개

- 비닐덮개 등 설치로 토체 내부로 물의 침투 방지
- 인접매설물 누수 차단 후 굴착면의 안정성 확인

CASE(B) 굴착토, 자재 및 장비 등 추가하중은 굴착면과 이격(최소 80cm)*

이격거리 준수가 어려운 경우 흠막이지보공 또는 사면 안정성 검토 시 추가 하중 반영

* 굴착심도 1.5m, 건지 기준 기울기(1 : 0.5) 적용하였을 경우

CASE(C,D) 굴착심도 1.5m미만인 경우 근접시설물과 흠의 상태를 반영한 굴착 기울기 적용

흠의 상태를 반영한 지반의 종류에 따라 굴착기울기 기준 적용

근접시설물(지하, 지상)로 인해 굴착경사 기준 적용이 어려운 경우

- 사면 안정성 검토로 굴착기울기를 선정 또는 흠막이 지보공 설치

향후 기술개발 방향

설치·해체 등 작업성과 안전성이 뛰어난 간이 흠막이 지속개발

상·하수도 관로 등의 세척, 보수 등 작업의 기술개발

- 비굴착방식
- 인력투입을 하지 않는 방식

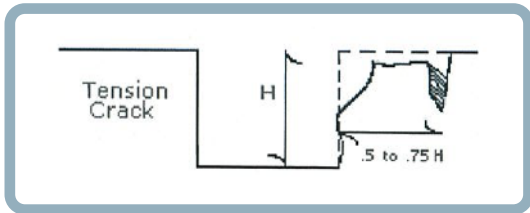
참 고 자 료

흙의 파괴형상과 출파기용 간이 흙막이 종류는?

〈OSHA Technical Manual Section V: Chapter2, - Excavations: Hazard Recognition in Trenching and Shoring 참조〉

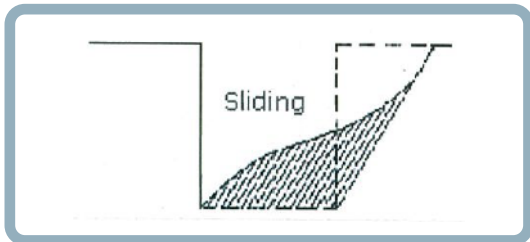
흙의 파괴형상

- ▶ 인장균열(Tension Cracks)은 일반적으로 지면에서 굴착깊이(H) 대비 수평거리 0.5~0.75H에서 형성된다.



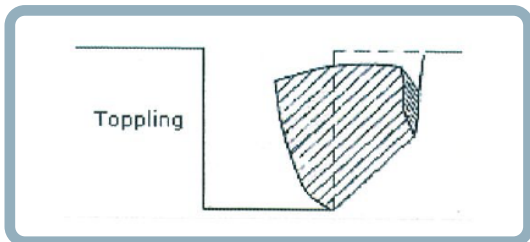
[그림 4] 인장균열(Tension Crack)

- ▶ 미끄러짐(Sliding)은 인장균열의 결과로 발생한다.



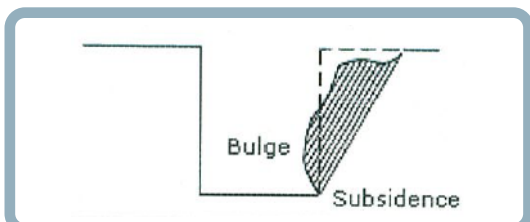
[그림 5] 미끄러짐(Sliding)

- ▶ 흙 덩어리 떨어짐(Toppling)은 미끄러짐과 마찬가지로 인장균열의 결과로 발생하며, 인장균열이 수직으로 확장되어 발생한 전단에 의해 흙이 덩어리 형태로 굴착저면으로 떨어지는 것이다.



[그림 6] 흙 덩어리 떨어짐(Toppling)

- ▶ 지반침하 및 배부름(Subsidence and Bulging)은 흙막이가 없는 수직 굴착 시 지반에 불균형 하중이 발생하여 지반표면이 침하되고, 수직굴착면이 불룩하게 튀어나오는 것이다.

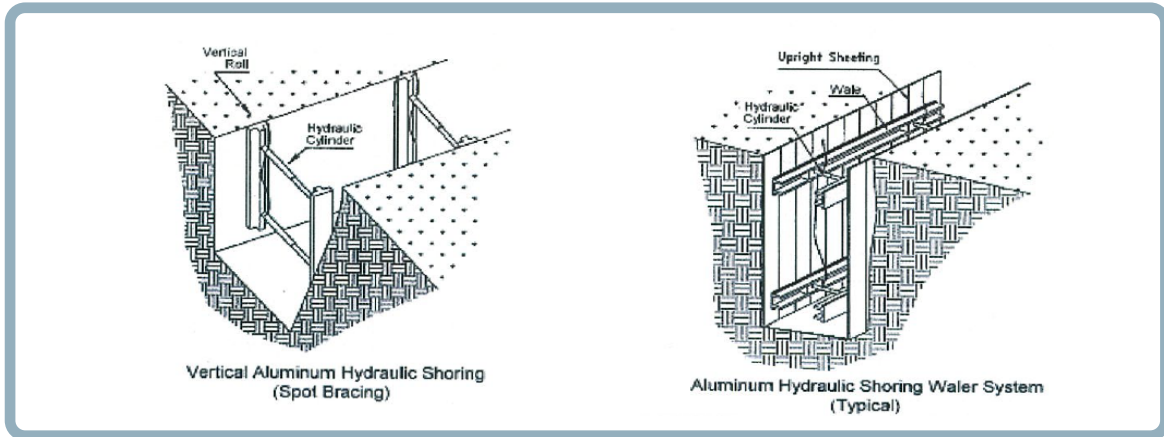


[그림 7] 지반침하 및 배부름(Subsidence and Bulging)

간이 흙막이의 종류

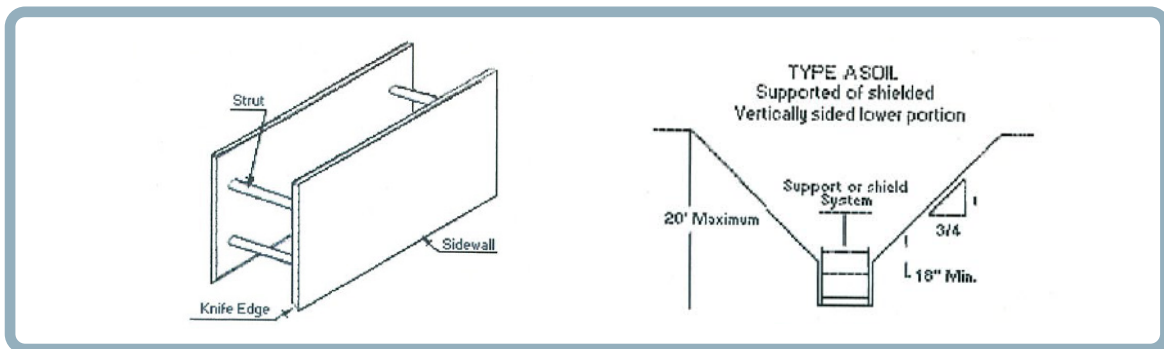
▶ 간이 흙막이는 버팀 형식과 보호 형식이 있다.

- **(버팀 형식, Shoring Types)** 버팀은 지반의 활동을 방지하기 위해 수직굴착면에 지지대를 설치하여 토압을 버티는 것이고, 기둥 · 띠장 · 버팀대 · 흙막이판으로 구성된다. 최근에는 유압 버팀 형식으로 공장에서 제작된 재료를 사전 조립 · 설치하여 굴착저면에서 설치 · 해체하지 않는다.



[그림 8] 버팀형식(Shoring Types) 간이흙막이

- **(보호박스 형식, Shielding Types)** 보호박스는 버팀대와 흙막이판으로 구성되어 흙막이판 하부는 바닥에 박아 넣을 수 있게 날카로운 모서리로 되어있고, 보호박스는 버팀 형식과 달리 사면붕괴 시 작업자 보호를 위해 설치한다. 즉, 보호박스는 토압을 견디는 것이 아니다.



[그림 9] 보호형식(Shielding Types) 간이흙막이



관로공사 토사 붕괴사고 예방 점검 체크리스트

공 종	체크리스트
관로 터파기 작업 전	✓ 현장부근의 제반환경은 어떠한가?
	✓ 도로상황, 교통상황은 어떠한가?
	✓ 지상, 지하의 지장물 위치 및 상태는 어떠한가?
	✓ 매설물의 보호방법은 적정한가?
	✓ 토사의 상태는 어떠한가?
	✓ 용수의 발생유무 및 용수량의 변화는 확인하였는가?
	✓ 우천 또는 해빙으로 토사붕괴 위험에 대한 점검은 실시하였는가?
	✓ 우천시 배수계획은 적절한가?
	✓ 작업중지 시 안전대책은 적절한가?
	✓ 굴착구배 확보가 곤란한 경우 흠막이지보공 설치를 계획하였는가?
	✓ 장비의 선정은 공사의 규모, 주변상황 및 토질조건에 적합한가?
간이 흠막이 설치·관리	✓ 지보공 재료의 변형, 부식 또는 심각한 손상은 없는가?
	✓ 조립도는 작성되어 있는가?
	✓ 조립도를 준수하여 작업을 시행하고 있는가?
	✓ 버팀대 및 락장은 흠막이판 및 말뚝 등과 확실히 부착되어 있고 탈락되지 않도록 하는가?
	✓ 설계 시 흠막이 배면 굴착토, 자재, 장비 등 상재하중을 반영하여 관리하고 있는가?