



기술 초대석 02

필라스터(Pilaster)를 이용한 슬러리월 일체화 방안

— 슬러리월이 적용된 지하구조물 내진설계 —

Structural technology



| 이 정 배 |
 ㈜CWS 엔지니어링 대표이사



| 조 동 진 |
 ㈜한화건설 건축기술팀 팀장



| 강 현 준 |
 범양이엔씨 부사장

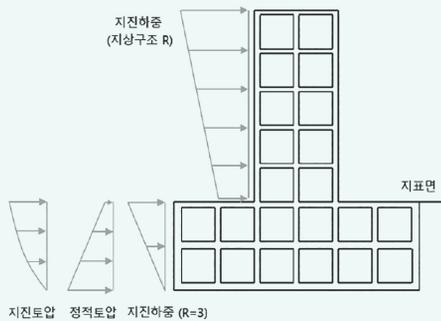


1. 지하구조물 내진설계 개요

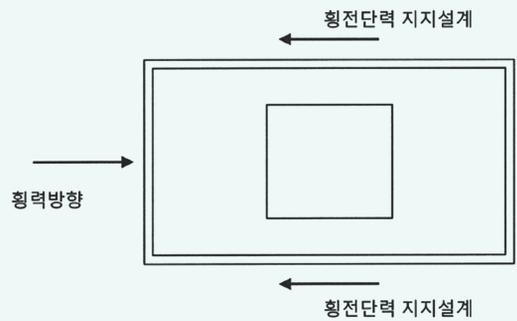
지하 구조물 내진설계 기준이 포함된 KDS 41 17 00이 2019년 3월 14일 시행됨에 따라 건축물의 지하구조물에 대한 내진설계를 수행하여야 한다. 따라서, 지하외벽의 역할이 기존의 토압에 대한 면외저항 외에도 지진하중,

지진토압, 정적토압에 의한 면내 방향의 전단벽 부재 역할이 추가되어 이에 대한 추가 검토가 필요하다.

지하구조물 내진설계에 작용하는 하중과 전단저항 개념은 다음 그림과 같다.



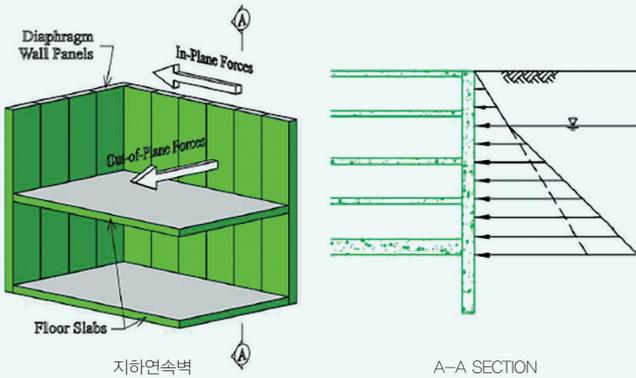
〈건물에 작용하는 지진하중과 지진토압, 정적토압〉



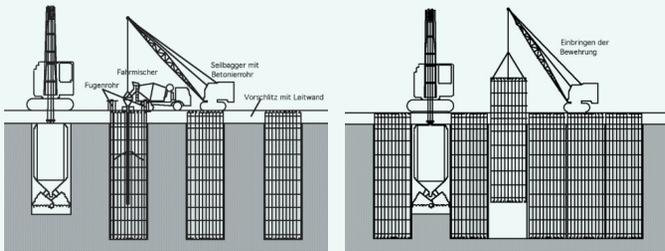
〈지하층 횡력에 대한 지하외벽 저항 개념도〉

2. 슬러리월의 지하구조물 내진설계

슬러리월은 굴착단계에서의 흙막이벽과 영구 지하외벽 역할을 동시에 수행하는 벽으로 일반적으로 연약지반 또는 수위가 높은 지반 등에서 사용된다. 각각의 패널로 나뉜 벽체가 면외방향에 대해서는 슬래브를 지점으로 연속성이 확보 되지만 면내방향에 대해서는 벽체의 일체성이 확보되지 않는 구조형식이다.



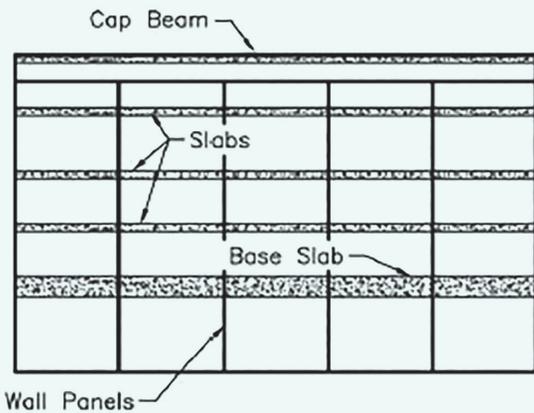
〈슬러리월에 작용하는 하중〉



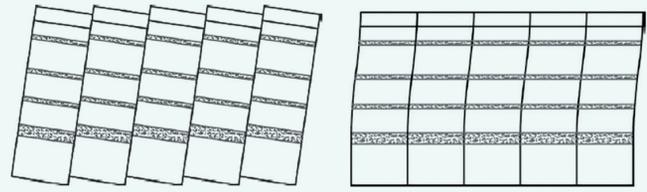
선행 패널공사

후행 패널공사

지하구조물 내진설계가 시행됨에 따라 지상·지하층의 관성력, 지진도압 및 정적도압을 면내방향으로 저항하기 위해서는 슬러리월 벽체의 일체성 확보가 필요하며, 패널 단위로 분리 시공되는 슬러리월 패널간의 연결 보강방법이 요구된다.



〈슬러리월 입면〉

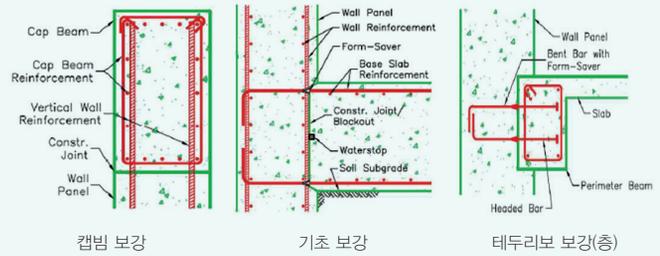


구속되지 않은 경우 거동

구속된 경우 거동

3. 슬러리월 기존 연결보강 방법

슬러리월 패널간 일체성을 확보할 수 있는 전단보강 방법은 다음 그림과 같이 패널 시공 후 슬러리월 상부에서 캡빔을 일체시공하는 방법, 기초 부재에 의해 각 패널을 구속하는 방법, 각 층에 테두리 보를 설치하여 각 패널을 구속하는 방법 등이 종래에 사용되어 왔다.



캡빔 보강

기초 보강

테두리보 보강(층)

지하구조물 내진설계 시행 이전에는 상기와 같은 방법으로 충분히 패널 간에 발생하는 전단응력에 대해 저항할 수 있었다. 그러나 지하구조물 내진설계를 적용하는 경우, 지상 구조물 지진하중외에 지하 구조물 지진하중, 지진도압, 정적도압(가장 큰 하중값임.)에 대해 저항하도록 하기 위해서는 상기와 같은 방법 외에 슬러리월 패널과 패널을 직접 연결하는 방법이 추가로 검토되어야 한다.

따라서 슬러리월을 직접 연결하여 패널간의 일체성을 확보할 수 있는 방안에 대해 검토하고, 시공성과 경제성 측면에서 효율적인 방안을 개발하고자 한다. 또한 지하구조물 내진설계 예제와 동일한 조건으로 슬러리월 패널을 모델링하여 패널간에 발생하는 전단력을 산정하고 이에 대해 개발 제안한 보강 방안으로 보강 설계를 진행하였다.

4. 슬러리월 일체성 확보 방안/패널간 연결

슬러리월은 각 각의 패널 단위로 시공되기 때문에 각 패널간의 수평 철근은 단절되어 있으며, 패널간 콘크리트는 밀착되어 시공되지만 계면 활성도가 높은 벤토나이트액이 충전되어 있는 상태에서 수중 콘크리트로 타설되기 때문에 패널간 접착면의 콘크리트 마찰력에 대한 평가 방법 또한 규정되어 있지 않다. 따라서 패널간의 콘크리트면 마찰은 고려하지 않는 것이 타당하고 판단하였으며, 패널간 연결부에 전단 철근을 배치하여 전단응력에 대한 일체성을 확보하는 방안에 대해 검토하였다.

이러한 전단 철근을 연결하는 방법은 시공 가능성 또한 중요한 요소라고 판단하여 개발 초기부터 한화건설, 범양과 컨소시엄을 형성하여 공동으로

연구 개발하였으며, 보강 성능과 시공성을 동시에 확보할 수 있는 방법을 선정하여 개발하였다.

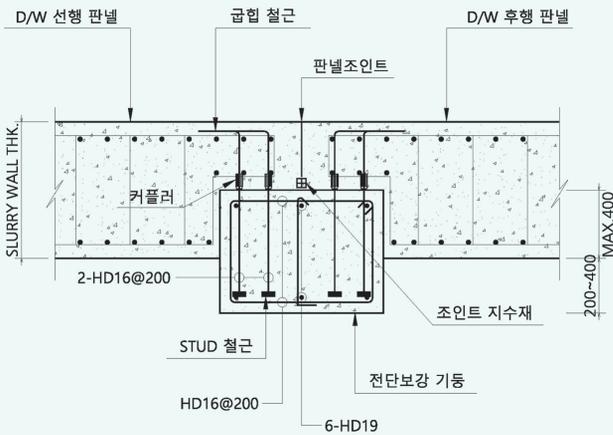
4.1 필라스터(Pilaster) 방식의 보강 방법

당사와 한화, 범양 컨소시엄에서 개발한 방식은 다음과 같다.

벽기둥 형태의 부재(Pilaster)를 슬러리월 조인트에 후시공 설치하여 패널과 패널을 연결하는 방법으로, 슬러리월 시공시 필라스터 시공부에 전단 연결 철근을 매립 시공하고, 필라스터 시공후에는 필라스터와 매립된 철근이 패널간 전단력에 대해 저항하도록 하는 방법이다.

슬러리월 시공성 및 장비 특성을 고려하여 슬러리월의 단면 결손 두께 즉, 필라스터가 슬러리월 내측으로 근입 시공되는 두께는 최대 슬러리월 두께의 1/2를 초과할 수 없다.

슬러리월과 필라스터를 연결하는 전단철근은 절곡하여 매립 시공하거나 기계식 이음장치를 매립하여 추후 연결하는 방법으로 시공 가능하다.



▶ 장점

1. 후시공 설치하므로 필요한 구간만 선택적으로 설치 가능
2. 시공이 용이하고, 필요구간만 설치함에 따라 경제성 측면에서 우수함.
3. 후속 공정으로 공기에 영향이 없음.

▶ 단점

1. 후시공 필라스터의 두께가 두꺼워질 경우 슬러리월 면에서 돌출됨.

4.2 슬러리월 패널간 직접 전단철근 배치 방법

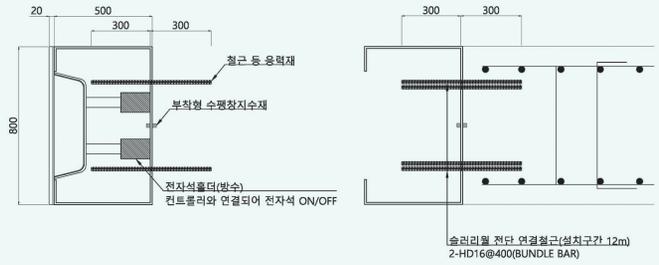
슬러리월 시공 단계에서 패널간 전단철근을 설치하여 직접 연결시공하는 방식이다.

선시공 패널에 전단 철근이 배근되어 있는 개폐 가능한 강제 박스를 매립하여 시공한 후 후시공 패널 시공단계에서 강제 박스를 개방하여 패널이 일체 시공되도록 하는 방법으로 해외에서도 비슷한 방법으로 시공된 사례가 있다.

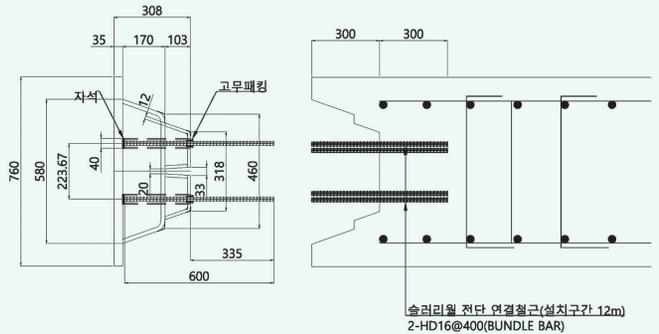
해외의 강진지역에서 슬러리월을 적용하는 경우 면내방향의 일체성 및 전단강도를 확보하기 위해 적용 사례가 있는 공법이다. 국내에서도 강제

장치 매립 등의 방식을 통해서 면내방향 일체성 확보를 위한 연구들이 이루어지고 있으며 몇 가지 사례를 소개하고자 한다.

전단 연결철근을 선시공 패널에 콘크리트가 침범하지 않도록 선설치하는 장치에 대한 방법이며, 추후 장치를 매립하거나 경제성 확보를 위해 탈착하는 방법 등이 있다.



(직접 연결 방법 CASE 1)



(직접 연결 방법 CASE 2)

▶ 장점

1. 슬러리월 패널간 직접 연결 방식, 일체성 측면에서 유리
2. 면의 돌출이 없음.

▶ 단점

1. 강제 박스 제작, 매립 설치 등 추가 공정이 필요.
2. 경제성 측면 불리, 강제 박스 재사용시 탈부착 방안 필요
3. 강제 박스 내부로 벤토나이트 용액 침범 가능성

5. 지하구조물 내진설계 예제/슬러리월 적용

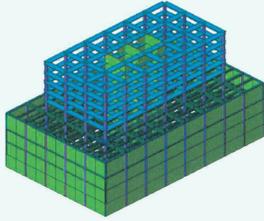
지하구조물 내진 설계 예제에 슬러리월을 적용하여 슬러리월 패널간의 연결부 전단응력을 산정하였으며, 그에 대한 전단 보강 철근량을 산정하였다.

예제는 건축구조기술사회에서 배포한 “지하구조물 내진설계 예제집”의 예제 중에 선정하였으며, 하중 산정 및 해석은 마이더스 GEN을 사용하였다. 각 각의 하중값에 대해 예제집과 마이더스의 값을 비교하여 그 적정성을 확인하였다.

5.1 건물 개요

다음은 적용 예제의 건물개요이다.

항 목	내 용
위 치	서울
구 조	철근콘크리트조
용 도	주거시설
규 모	지하 4층 / 지상 5층
지하층 폭	62.4m×39.0m
지하 수위	G.L -4.0m 고려



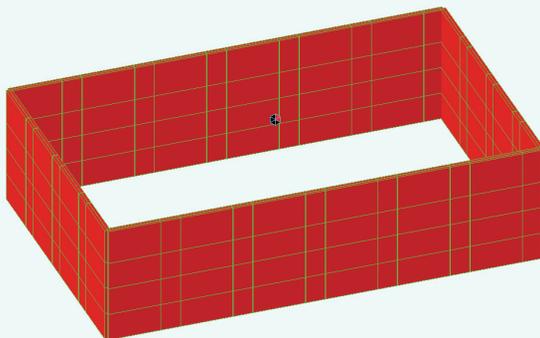
5.2 지반조건 및 탄성파 속도

▶ 지반조건 및 탄성파 속도

공변	심도 (m)	지층분류	지층두께 H_{soil} (m)	적용밀도 γ_{soil} (kN/m ³)	전단파속도(m/s)		동포아송비 (vd)
					V_p	V_s	
BH-3	0.0	지표면	-	-	-	-	-
	2.0	매립층	2	18	261	115	0.380
	4.0	퇴적층	2	18	360	158	0.381
	6.0	퇴적층	2	18	451	197	0.382
	8.0	퇴적층	2	18	560	246	0.380
	10.0	퇴적층	2	18	571	250	0.383
	12.0	퇴적층	2	18	610	266	0.380
	14.0	퇴적층	2	18	674	297	0.370
	16.0	퇴적층	2	18	682	310	0.370
	18.0	퇴적층	2	18	788	358	0.370
	20.0	퇴적층	2	18	874	397	0.370
	22.0	퇴적층	2	18	910	410	0.373
	24.0	퇴적층	2	18	971	438	0.372
	26.0	퇴적층	2	18	1164	526	0.372
	28.0	풍화토	2	19	1294	588	0.372
30.0	풍화암	2	20	1405	654	0.362	
가정	32.0	풍화암	2	20	-	720	-
	34.0	풍화암	2	20	-	786	-

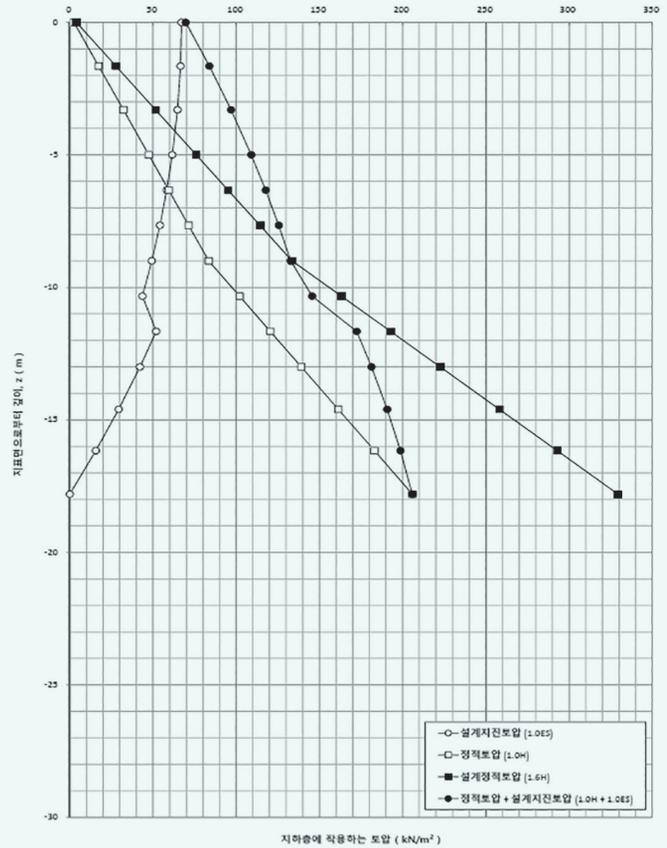
기초지면

30m에서 기반암이 나오지 않아 전단파속도의 기울기로 전단파속도를 연장하였을 때 대략 심도 34m위치에서 V_s 가 760m/s를 초과할 것으로 판단되어 기반암의 위치는 34m로 가정하였다.



<지하구조물 슬러리월 모델링>

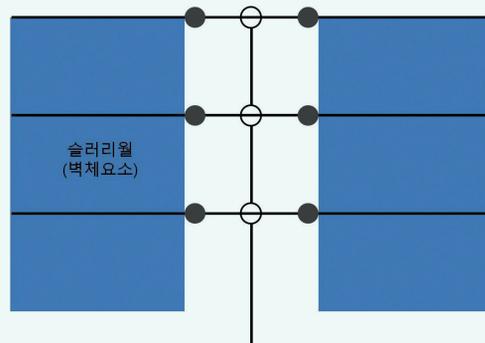
▶ 지하구조물에 작용하는 토압 그래프



5.3 구조해석 / 슬러리월 모델링

슬러리월 모델링은 선시공 패널(Primary Panel)과 후시공 패널(Secondary Panel)의 폭을 각각 7.8m, 2.6m로 고려하여 모델링에 반영하였으며, 패널과 패널 사이는 최소 간격으로 이격시켜 모델링하였다. 패널간의 접합부에 발생하는 전단력을 산정하기 위해 패널과 패널은 보부재로 연결하였다. 연결 보부재의 폭은 슬러리월 두께, 높이는 지하층의 층고를 적용하였고, 각 층 슬래브 Level에 설치하여 모델링 하였다.

다음 그림은 지하외벽 모델링 도식도이다.



보 요소
(BXH = 슬러리월 두께 X 층고)
<슬러리월 이격 및 보 요소 모델링>

▶ 지진토압

구 분	층	층고 m	토압 kN/m ²	총지진토압 kN/m	전체토압 (kN)
X-Dir 39.0m	1F	-	67.1	167.8	6,544.2
	B1F	5	61.6	277.2	10,810.8
	B2F	4	49.2	196.8	7,675.2
	B3F	4	42.2	168.8	6,583.2
	B4F	4	42.2	84.4	3,291.6
	SUM				34,905.0
Y-Dir 62.4m	1F	-	67.1	167.8	10,470.7
	B1F	5	61.6	277.2	17,297.3
	B2F	4	49.2	196.8	12,280.3
	B3F	4	42.2	168.8	10,533.1
	B4F	4	42.2	84.4	5,266.6
	SUM				55,848.0

▶ 정적토압

구 분	층	층고 m	토압 kN/m ²	총정적토압 kN/m	전체토압 kN
X-Dir 39.0m	1F	-	2.7	6.75	263.3
	B1F	5	51.3	230.9	9,005.1
	B2F	4	90.2	360.8	14,071.2
	B3F	4	147.1	588.4	22,947.6
	B4F	4	204.1	408.2	15,919.8
	SUM				62,206.9
Y-Dir 62.4m	1F	-	2.7	6.75	421.2
	B1F	5	51.3	230.9	14,408.2
	B2F	4	90.2	360.8	22,513.9
	B3F	4	147.1	588.4	36,716.2
	B4F	4	204.1	408.2	25,471.7
	SUM				99,531.1

5.4 지하층 지점 고려 방법

지하층 지점의 가정은 KDS 41 17 00:2019 14.5 지진토압의 계산에 해설 문구를 참조하여 다음과 같이 3가지 조건으로 검토하였다.

- 1) 지하 8.0m 하부 지점 구속
- 2) 지하 8.0m 하부 스프링 구속(기초부 지점구속)
- 3) 최하층 기초부만 지점 구속

5.4.1 지점 조건별 패널 조인트 전단력

지하층 지점 조건별 패널 조인트 부분에 발생하는 전단력값은 아래 표와 같으며, 각 지점 조건에 따른 전단력 값의 비율은 지하 8.0m 하부 지점 구속 조건을 기준으로 지하 8.0m 하부 스프링 구속 조건의 경우 246%,

기초부만 구속하는 경우 294%로 평가되었다.

지점조건	하중조건	전단력(X-dir) kN	전단력(Y-dir) kN	비율
-8.0m 하부 지점구속	지진하중	832	1,472	100%
	지진토압	798	2,080	
	정적토압	450	1,173	
	하중조합	2,293	4,824	
-8.0m 하부 스프링구속	지진하중	1,967	3,477	246%
	지진토압	1,941	4,826	
	정적토압	1,234	3,055	
	하중조합	5,634	11,618	
기초부 지점구속	지진하중	2,077	3,908	294%
	지진토압	2,044	5,375	
	정적토압	2,098	5,496	
	하중조합	6,750	15,035	

5.4.2 패널 조인트 연결 철근량 산정

상기 표의 전단력에 대해 패널 조인트 연결 철근량(전단저항 철근)을 산정 결과는 다음과 같다. 산정과정은 발생 전단력에 대해 캡빔이 우선 저항하고, 추가 전단력에 대해 패널 조인트에 전단철근 및 필라스터를 통해 저항하는 것으로 검토하였다.

대표적으로 1) 지하 8.0m 하부 지점 구속 조건에 대한 검토 과정은 다음과 같다.

▶ X-Dir 보강설계

전단보강은 캡빔의 전단강도와 슬러리월의 전단마찰강도의 합으로 설계한다.

- 1) $V_{uh} = 2,293 \text{ kN}$
- 2) CAP BEAM(800*1,200) 전단강도
 $5\phi V_c = 2,870 \text{ kN}$
 \therefore 캡빔만으로 보강 가능.

▶ Y-Dir 보강설계

- 1) $V_{uh} = 4,824 \text{ kN}$
- 2) CAP BEAM(800*1,200) 전단강도
 $5\phi V_c = 2,870 \text{ kN}$
- 3) 슬러리월 수평철근으로 보강
① HD16@200 USE
 $\phi V_c = \phi A_v f_y \times \mu =$
 $0.75 \times (9,000/200 \times 199) \times 500 \times 0.6/1,000 = 2,014 \text{ kN}$
 $\phi V_n = 2,870 + 2,014 = 4,884 \text{ kN} > 4,824 \text{ kN}$

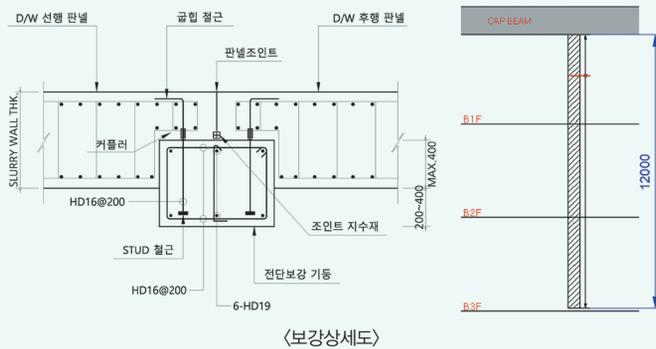
▶ 전단마찰 보강량 적정성 검토

$$\begin{aligned} \Phi V_{n1} &= \Phi 0.2 \cdot f_{ck} \cdot A_c = 0.75 \times 0.2 \times 27 \times (800 \times 5,000 + 800 \times \\ &4,000 + 800 \times 4,000 + 800 \times 4,000) / 1,000 \\ &= 55,080 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Phi V_{n2} &= \Phi 11 \cdot A_c = 0.75 \times 11 \times (800 \times 5,000 + 800 \times 4,000 + 800 \times \\ &4,000 + 800 \times 4,000) / 1,000 \\ &= 112,200 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Phi V_{n3} &= \Phi (3.3 + 0.08 f_{ck}) A_c = 0.75 \times (3.3 + 0.08 \times 27) \times (800 \times \\ &5,000 + 800 \times 4,000 + 800 \times 4,000 + 800 \times 4,000) / 1,000 \\ &= 55,692 \text{ kN} \end{aligned}$$

∴ 캡빔 + 지하 9m 구간 HD16@200 간격으로 보강



(보강상세도)

지점 조건에 따른 X-dir, Y-dir 방향의 패널 조인트에 발생하는 전단력 및 보강량은 다음 표와 같다.

▶ 패널 조인트 보강량 산정 결과

지점조건	하중조건	패널 조인트 전단력(kN)	조인트 보강
-8.0m 하부 지점구속	X-dir	2,293	캡빔만 보강
	Y-dir	4,824	캡빔+HD16@200(9.0m)
-8.0m 하부 스프링구속	X-dir	5,634	캡빔+HD16@200(13.0m)
	Y-dir	11,618	캡빔+HD16@100(20.0m)
기초부 지점구속	X-dir	6,750	캡빔+HD16@200(17.0m)
	Y-dir	15,035	캡빔+2-HD16@100(14.0m)

6. 결론

지하구조물에 대해서도 내진설계를 수행하여야 함에 따라 슬러리월이 적용된 구조물의 경우 슬러리월의 횡력에 대한 저항 성능을 확보하기 위해 패널간의 일체성 확보가 필요하게 되었다. 따라서 시공성과 경제성을 동시에 만족시킬 수 있는 방법으로 패널 간 일체성 확보 방안을 개발하여 제안하고자 한다. 필라스터(Pilaster)를 활용한 슬러리월 패널간 일체화 방안은

절대 공정과 무관한 공정으로 후시공되고, 필요한 구간에 대해서만 보강할 수 있는 효율적인 방법이라고 판단된다.

슬러리월이 적용된 지하구조물 내진설계시 필라스터를 사용한 패널간 일체화 방안을 적용하여 보다 합리적인 설계가 되기를 희망한다.

다음에는 실제 건물에 대한 설계를 통해 시공 과정을 중심으로, 부분 단면 결손된 슬러리월 시공 방법, 철근 배근, 필라스터 시공 방법 등 필라스터 방식의 보강 방법에 대해 소개하고자 한다.