

3D 콘크리트 부재의 해석 및 설계를 위한 2D SUB-3D STM 방법

2D SUB-3D STM Approach for Design and Analysis of 3D Structural Concrete

윤영목* 김승억** 오진우*** 박정웅****
Yun, Young Mook Kim, Seung Eock Oh, Jin Woo Park, Jung Woong

Abstract

In this paper, 2D SUB-3D STM approach for analysis and design of 3D structural concrete is presented. In the approach several 2D sub strut-tie models which are representations of compressive and tensile stress flows of each projected plane of 3D structural concrete are utilized in the sketch of a 3D strut-tie model, in the evaluation of effective strengths of compressive concrete struts, and in the verification of geometric compatibility and bearing capacity of critical nodal zones of 3D strut-tie model. To prove the validity and rationality of the suggested approach, the behavior and strength of a prestressed box girder diaphragm tested to failure are evaluated.

1. 서 론

2차원으로 간주될 수 있는 부재 혹은 구조물에서의 내부의 응력흐름을 잘 표현하는 힘 전달메카니즘인 2D 스트럿-타이 모델의 형성은 비교적 간단하나, 3차원의 경우는 응력의 흐름 뿐 아니라 이를 잘 대변하는 3D 스트럿-타이 모델이 형성되었다고 콘크리트 스트럿의 유효응력의 결정방법과, 3D 스트럿-타이 모델의 기하학적 적합성 검토 및 절점영역의 강도검토 방법이 제안되어 있지 않아서 형성된 3D 스트럿-타이 모델의 적합성 여부에 문제가 있다.

따라서 본 연구에서는 3차원의 부재를 여러 개의 2차원 부재로 간주하여 스트럿-타이 모델 방법에 필요한 모든 조건을 만족하는 여러 개의 2D SUB 스트럿-타이 모델을 형성하고, 2D SUB 모델을 조합하여 형성한 3차원 스트럿-타이 모델을 이용하여 3차원 콘크리트 부재를 해석·설계할 수 있는 이른바 2D SUB-

3D STM 방법을 제안하였다. 이 방법의 타당성 및 합리성을 검증하기 위하여 실험·파괴된 PC BOX 다이어프램을 제안된 방법에 의해 해석하였으며 그 결과를 실험결과와 비교하였다.

* 정회원, 경북대학교 토목공학과 조교수

** 정회원, 세종대학교 토목환경공학과 조교수

*** 정회원, (주)동명기술공단 이사

**** 경북대학교 토목공학과 석사과정

2. 2D SUB-3D STM 방법

복잡한 기하학적 형상을 갖는 3차원 콘크리트 부재의 합리적인 해석 및 설계를 위해서는 3차원 스트럿-타이 모델이 필요하다. 그러나 3차원 스트럿-타이 모델은 3차원 부재 내부의 주압축력의 흐름에 근거해서 형성되어야 하기 때문에 모델자체의 개발이 쉽지 않다. 뿐만 아니라 3차원 스트럿-타이 모델의 ¹⁾스트럿의 압축강도 결정, ²⁾기하학적 적합성 검토 및 ³⁾절점영역의 강도검토가 어렵다. 따라서 본 연구에서는 상기와 같은 문제점을 해결하기 위한 2D SUB-3D STM 방법을 제안하였는데, 이 방법은 ¹⁾3차원 콘크리트 부재의 해석 및 설계를 위한 3차원 스트럿-타이 모델을 여러 개의 2차원 SUB 스트럿-타이 모델을 형성하여 구성하고, ²⁾3차원 스트럿-타이 모델의 스트럿의 압축강도를 여러 개의 2차원 SUB 스트럿-타이 모델로부터 결정하며, ³⁾3차원 스트럿-타이 모델의 적합성 검토 즉 기하학적 적합성 및 절점영역의 강도검토를 2차원 SUB 모델에서 검토하는 것이다.

3. 2D SUB-3D STM 방법의 적용

본 연구에서는 3차원 콘크리트 부재의 해석 및 설계를 위한 이른바 2D SUB-3D STM 방법의 타당성 및 합리성을 검증하기 위하여 Texas대학에서 실험·파괴된 PC BOX 다이어프램¹⁾을 해석하였다.

3.1. 실험 프로그램

2D SUB-3D STM 방법의 적용성을 검토하기 위해 채택한 실험·파괴된 PC BOX 다이어프램 모형 공시체의 콘크리트 압축강도는 5900psi이며, 공시체의 단면형상 및 철근배치도는 그림 1 및 그림 2와 같다. 모형공시체 다이어프램의 끝면에 집중적으로 다이어프램의 휨철근과 복부할열철근(5#5 및 4#3)이 배치되었다. 추가된 철근으로는 다이어프램 앞부분에 플랜지할열(4#2)과 다이어프램 복부 사이의 전단-마찰철근(6#3)이 있으며, 철근으로 구속된 범용 7-1/2 in. 스트랜드 텐던 정착판이 사용되었다.

3.2 2D SUB 스트럿-타이 모델의 형성

다이어프램에 작용하는 수직간장력이 연속적으로 복부와 플랜지로 전달되는 하중전달 미케니즘은 크게 다각뿔형 모델, 코벨거동형 모델, 그리고 프레임거동형 모델로 생각할 수 있다. 본 연구에서는 다이어프램부 및 다이어프램 전면에서의 플랜지와 복부 부분의 거동을 예측하기 위하여 다각뿔형 3D 스트럿-타이 모델을 선정하였으며, 선정된 3D 스트럿-타이 모델의 타당성을 검토하기 위하여 응력이 집중되는 2D SUB 스트럿-타이 모델의 절점영역의 강도를 검토하였다. 최종적인 다각뿔형 3D 스트럿-타이 모델의 형상 및 스트럿 부재의 유효압축응력을 결정하기 위하여 그림 3 및 4와 같이 x축(중력방향) 및 z축(휨방향)에서 투영한 2D SUB 스트럿-타이 모델을 Yun과 Ramirez²⁾에 의해 개발된 그래픽 프로그램을 이용하여 선정하였으며, 선정한 각 2D SUB 스트럿-타이 모델은 그림 3 및 4와 같이 스트럿-타이 모델 방법에서 필요한 기하학적 적합성을 만족하였다.

실험·파괴된 다이어프램의 최종파괴는 다이어프램의 전면 플랜지 부근의 콘크리트 파쇄에 의한 것이므로 파쇄된 콘크리트 영역에 해당되는 절점영역의 강도를 검토하였다. 3D 스트럿-타이 모델의 양의 z축에서 투영한 2D SUB 모델의 스트럿 부재 2, 3 및 11과 타이 부재 8에 의해 형성된 절점영역 유한요소들의 실제 두께는 22"이나 실제의 외부하중은 3D 모델의 양의 x축에서 투영한 2D SUB 모델의 1번(z방향 폭=1.33") 및 2번(z방향 폭=9") 부재폭의 합인 10.33"의 폭으로 전달되므로 절점영역 유한

요소들의 두께를 10.33"로 취하였다. 그림 5에서 볼 수 있듯이 최종의 증분하중이 작용할 때 즉 실험·파괴된 다이어프램에 파괴하중이 작용할 때 절점영역의 대부분이 실험에서와 같이 파쇄되었으므로 3D 스트럿-타이 모델은 실험된 다이어프램의 강도를 거의 정확하게 예측할 수 있음을 알 수 있다.

3.3 3D 스트럿-타이 모델의 형성

다이어프램의 해석을 위한 3D 스트럿-타이 모델은 그림 3 및 4의 2D SUB 모델을 기초로 그림 6과 같이 선정하였다. 3D 스트럿-타이 모델에서 인장부재 12, 14, 16, 23, 25, 27의 위치에 철근 인장타이 이외에 콘크리트 인장타이 부재 30, 31, 32, 33, 34, 35가 각각 추가로 배치되었다. 추가된 콘크리트 인장타이 부재의 단면적은 각 스트럿이나 타이 간격의 중심에서 작은 폭을 배가하여 형성되는 직사각형의 면적으로 취하였다. 콘크리트 인장타이 부재 30, 32, 33은 이들 부재의 위치에서 62%의 극한하중 작용시 균열이 발생하였으므로 극한하중의 62%까지만 저항한다고 가정하였다. 3D 스트럿-타이 모델의 부재의 단면적 산정에 필요한 스트럿의 유효압축응력은 그림 3 및 4의 2D SUB 모델에서 산정된 유효압축응력값들의 조합 값으로 취하였다.

3.4 결과분석

최종적으로 선정된 3D 스트럿-타이 모델을 비선형 스트럿-타이 모델 방법³⁾에 의해 해석하였으며, 그 결과를 다이어프램 휨철근, 복부할열철근, 다이어프램 수평할열철근, 그리고 플랜지 할열철근의 변형을 거동에 관한 실험결과와 비교·분석하였다. 또한 응력이 집중되는 2D SUB 스트럿-타이 모델 절점영역의 강도를 검토하여 실험·파괴된 다이어프램 부재의 파괴강도를 예측하였다.

그림 7에서 볼 수 있듯이 3D 스트럿-타이 모델에 의한 다이어프램 휨철근의 변형률 거동이 실험결과와 비교적 잘 일치하고 있다. 3D 모델에 의한 다이어프램 수평할열철근의 변형률 거동은 그림 8에서와 같이 실험결과와 파괴하중의 90%정도까지 잘 일치하고 있다. 파괴하중이 작용할 때의 해석에 의한 변형률은 실험결과 보다 약 20%정도 작게 나왔는데, 이는 3D 스트럿-타이 모델에서 다이어프램 수평 할열철근을 대표하는 철근 인장타이 부재의 단면적이 플랜지에 배근된 다이어프램 수평할열철근 량에 철근 인장타이와 만나는 비교적 변형률이 작게 발생하는 전단-마찰 철근의 일부 철근량이 추가되었기 때문이라고 추정된다. 그림 9 및 10은 3D 스트럿-타이 모델에 의한 다이어프램부의 복부할열철근 및 다이어프램 전면부 플랜지 할열철근의 변형률 거동을 보여주는 것으로, 비교적 해석결과와 실험결과가 잘 비교됨을 알 수 있다.

2D SUB-3D STM 방법에 의한 실험·파괴된 다이어프램의 파괴강도는 3가지 방법 즉 2D SUB 모델에서의 기하학적 적합성 만족여부 검토, 2D SUB 모델 절점영역에서의 파괴미커니즘 발생여부 검토, 그리고 3D 모델에서의 철근인장타이 부재의 파단여부 검토에 의해 예측 할 수 있다. 3D 스트럿-타이 모델의 각 2D SUB 모델은 기하학적 적합성 조건을 만족시켰으며, 3D 모델에 의한 철근인장타이 부재의 변형률 거동을 검토한 결과 몇몇 철근이 항복하였으나 파단되지는 않았다. 실험·파괴된 다이어프램은 다이어프램부 전면 플랜지 부근의 콘크리트 파쇄에 의해서 파괴되었으므로, 본 연구에서는 3D 모델의 2D SUB 모델에서 파쇄된 콘크리트 부분에 해당되는 절점영역의 강도를 검토하였으며, 검토결과 다이어프램의 파괴하중이 작용할 때 해당 절점영역에 파괴미커니즘이 발생하였으므로 거의 100%에 가까운 파괴강도를 예측할 수 있었다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 3차원의 부재를 여러 개의 2차원 부재로 간주하여 스트럿-타이 모델 방법에 필요한 모든 조건을 만족하는 2D SUB 스트럿-타이 모델을 형성하고, 2D SUB 모델을 조합하여 형성한 3D 스트럿-타이 모델을 이용하여 3차원 콘크리트 부재를 해석·설계할 수 있는 이른바 2D SUB-3D STM 방법을 제안하였다. 이 방법의 타당성 및 합리성을 검증하기 위하여 실험·파괴된 PC BOX 다이어프램을 제안된 방법에 의해 해석하였으며 그 결과를 실험결과와 비교하였다. 제안된 방법에 의해 최종적으로 선정된 3D 스트럿-타이 모델을 비선형 스트럿-타이 모델 방법에 근거하여 해석한 결과와 실험결과 즉 다이어프램 휨철근, 복부할열철근, 다이어프램 수평할열철근, 그리고 플랜지 할열철근의 변형률 거동 및 실험·파괴된 PC BOX 다이어프램의 극한강도는 비교적 잘 비교되었다. 위의 해석결과로 미루어 볼 때 2D SUB-3D STM 방법을 실제 PC BOX 다이어프램의 거동해석 및 설계를 비롯한 일반 3차원 콘크리트 부재의 해석 및 설계에 직접 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

● 참고문헌 ●

1. G.P.Wollmann, "Anchorage Zones in Post-Tensioned Concrete Structures", Ph D Thesis, The University of Texas, Austin, Texas, 1992.
2. 윤영목, J.A.Ramirez, "비선형 스트럿-타이 모델 방법을 위한 컴퓨터 그래픽 프로그램", 대한토목학회 학술발표논문집, pp. 195-198, 1997.
3. 윤영목, 박문호, "콘크리트 구조물의 해석 및 설계를 위한 비선형 스트럿-타이 모델 방법", 대한토목학회 학술발표논문집, pp. 247-250, 1996.

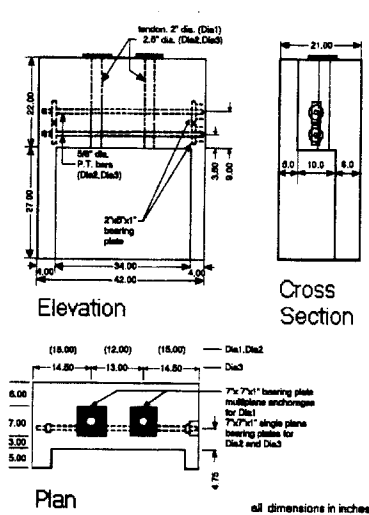


그림1. 다이어프램 공시체의 기하학적 형상

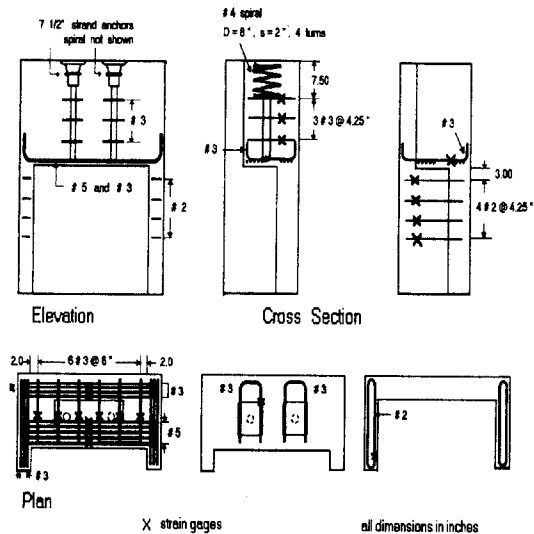


그림2. 다이어프램 공시체의 배근상세도

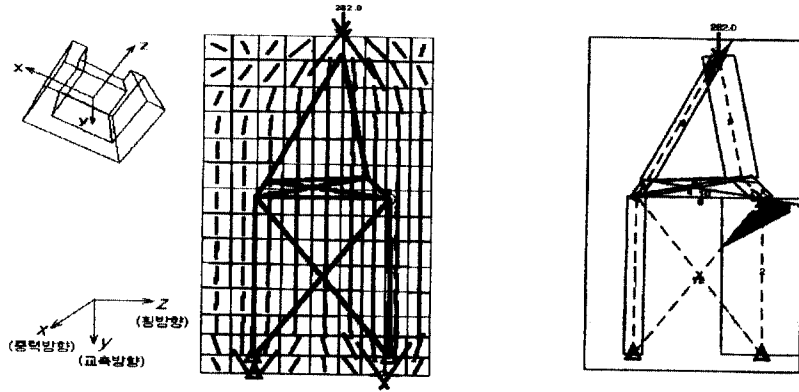


그림 3. 3D 스트럿-타이 모델의 양의 x축에서 투영한 2D SUB 스트럿-타이 모델

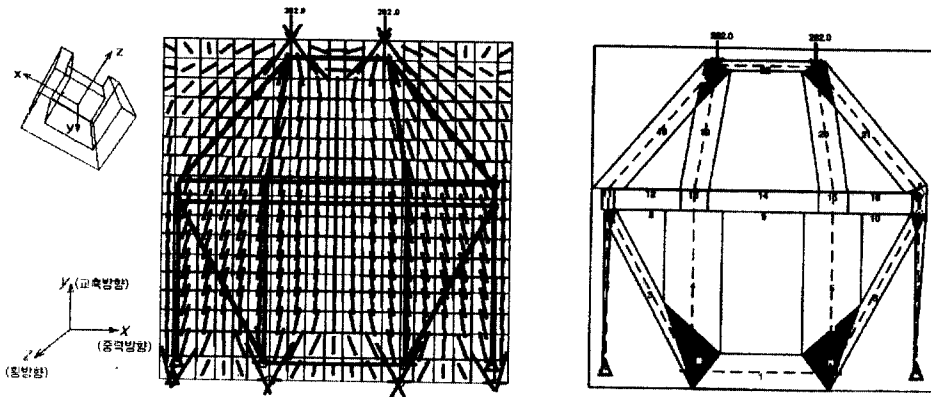
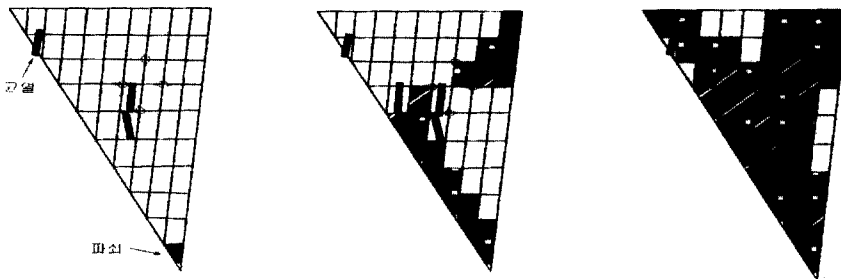


그림 4. 3D 스트럿-타이 모델의 z축에서 투영한 2D SUB 스트럿-타이 모델

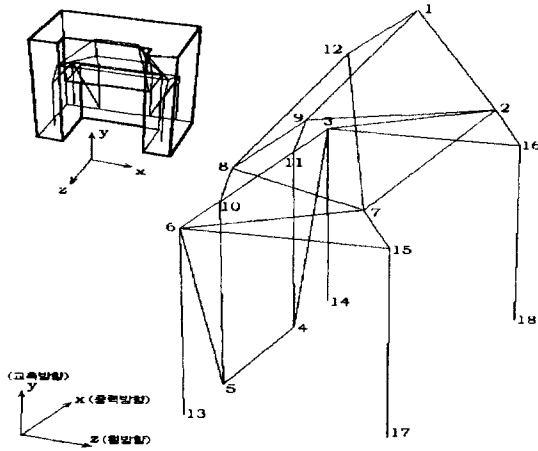


중분하중단계 6

중분하중단계 8

중분하중단계 10(최종)

그림 5. 2D SUB 스트럿-타이 모델 절점 영역의 강도검토



Element	Element	Element	Element	Element	Element
no	no	no	no	no	no
1	4	5	15	8	12
2	6	13	20	1	9
3	5	6	21	1	2
4	10	5	22	12	1
5	11	4	25	7	2
6	3	4	24	7	15
7	3	14	25	6	15
8	6	10	26	2	16
9	10	11	27	3	16
10	11	3	28	15	17
11	6	7	29	16	18
12	7	8	30	7	8
13	8	10	31	8	9
14	8	9	32	9	2
15	9	11	33	7	2
16	9	2	34	6	15
17	2	3	35	3	16
18	7	12	-	-	-

그림 6. 실험·파괴된 PC BOX 다이어프램의 거동해석을 위한 3D 스트럿-타이 모델

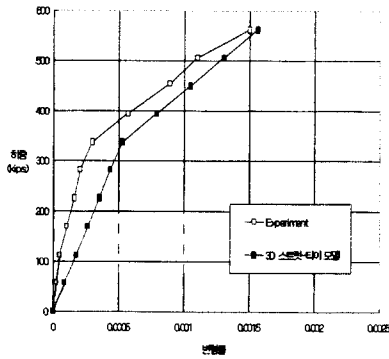


그림 7. 실험·파괴된 다이어프램 휨철근의 하중-변형률 관계

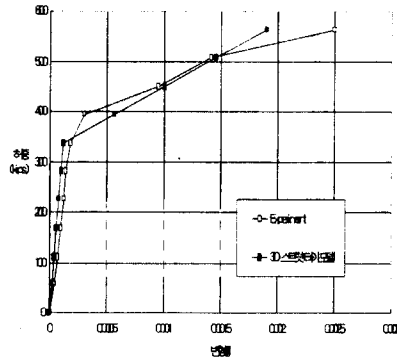


그림 8. 실험·파괴된 다이어프램 수평할철근의 하중-변형률 관계

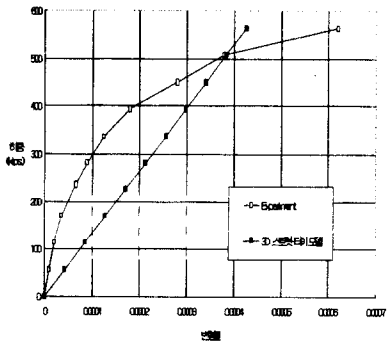


그림 9. 실험·파괴된 다이어프램 복부할철근의 하중-변형률 관계

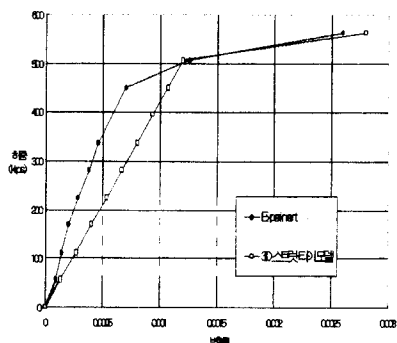


그림 10. 실험·파괴된 다이어프램 전면부 플랜지 할철근의 하중-변형률 관계