

보강된 콘크리트 깊은 보의 스트럿-타이 모델 해석

Analysis of Strengthened Concrete Deep Beam Using Strut-Tie Model

곽 형 욱* 송 하 원** 변 근 주** 지 호 석***
Kwak, Hyung Uk Song, Ha Won Byun, Keun Joo Chi, Ho Seok

ABSTRACT

In this paper, the strengthening analysis by strut-tie model for strengthened shear failed RC deep beam by the so-called the Steel Clamping Unit (SCU), which is a strengthening equipment, is carried out. The analysis considers the span-to-depth ratio, the existence of prestressing and stirrup, the shape of shear crack, and the strengthening position of the SCU. Based on analytical results, optimized strengthening analysis and design are carried out by investigating the behavior of the strengthened deep beams. The comparison between analytical results and experimental results shows that optimum strengthening effect by the SCU can be obtained when compressive strut zone created by SCU is away from major shear crack of the beam as far as possible.

1. 서론

본 연구는 Steel Clamping Unit (SCU)를 이용하여 전단에 의해 파괴된 콘크리트 깊은 보를 보강한 경우 스트럿-타이 모델에 의해 최적의 보강효과를 얻을 수 있는 방법을 제안하고자 한다. 본 논문에서는 지금까지 개발된 스트럿-타이 모델^{1), 2)}을 사용한 해석 및 설계과정을 검토하여 연구의 기본 방향 및 범위를 설정하고, 콘크리트 깊은 보의 거동특성과 보강방법에 대해 검토한다. 또한 영향인자별로 나눈 각각의 대상구조물에 대한 2차원 비선형 유한요소 해석을 통해 영향인자와 균열의 형상에 따른 극한강도의 변화를 분석하고, 최적의 보강방법 및 위치를 분석한다. 마지막으로 스트럿-타이 모델의 해석결과 및 Teng et al.의 실험결과³⁾와의 비교분석을 통해 제안된 보강방법에 대한 검증을 수행하며, 영향인자에 따른 보강효과를 분석하여 보강된 콘크리트 깊은 보의 거동을 파악한다. 본 논문은 SCU를 사용한 손상된 콘크리트 깊은 보의 최적의 보강방법 및 보강 후의 극한강도와 보강효과를 예측하는데 효과적으로 사용될 수 있다고 판단된다.

2. Steel Clamping Unit(SCU)에 의한 보강

본 연구에서는 Teng et al.이 적용한 SCU는 손상된 콘크리트 깊은 보의 전단경간에 보의 상부와

* 정회원, 건화 엔지니어링 구조부 사원

** 정회원, 연세대학교 토목공학과 교수

*** 정회원, 엘지건설 토건팀 사원

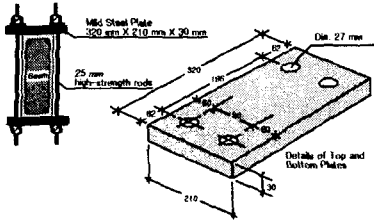


그림 1 Steel Clamping Unit (SCU)

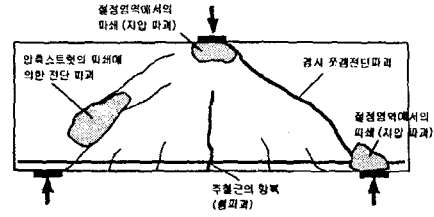


그림 2 콘크리트 깊은 보에서의 파괴모드

하부에 25mm의 지름을 가진 네 개의 철막대로 연결되어진 두 개의 강판으로 구속하여 너트로 조여진다(그림 1.). 이렇게 파괴된 전단경간에 설치된 SCU는 외부스터럽처럼 작용하여 콘크리트의 강도와는 무관하게 보에 가해지는 모든 전단력을 감당할 수 있다. 또한 파괴 후에도 깊은 보의 파괴하중의 약 50%정도되는 후파괴 (postfailure) 용량을 갖는다.

3. 깊은 보 보강에의 스트럿-타이 모델의 적용

3.1. 일반적인 깊은 보의 균열형상

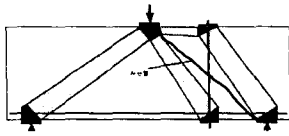
깊은 보의 재하된 하중을 직접적으로 재하점과 지점사이를 연결하는 압축 스트럿을 통해서 지점으로 전달한다. 이러한 경우에서, 프리스트레싱 강재는 보통 주인장 타이의 일부분으로 생각할 수 있을 것이다. 따라서, 콘크리트 깊은 보에서의 파괴는 다음과 같은 방식으로 일어난다고 할 수 있다(그림 2.).

- ① 재하점 아래나 지점위의 절점영역에서의 콘크리트 파쇄
- ② 휨 파괴에 이르게 하는 주철근의 항복
- ③ 콘크리트 압축스트럿의 파쇄
- ④ 압축스트럿을 따라 생기는 경사 조깅파괴

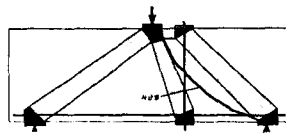
①과 ③의 파괴모드는 실질적으로 깊은 보를 사용할 수 없게하며 이를 보수하기 위해서는 많은 노력이 필요하다. 그러나 일반적으로 ①, ②의 파괴모드에 대한 안전율은 매우 높다. 예를 들어, 철근망을 사용함으로써 절점영역에서의 콘크리트의 압축강도를 굉장히 올릴 수 있다. 또한, 깊은 보에서는 가능한 설계 방법에 따른 휨설계가 과도하게 안전측이라는 것을 알 수 있다. 적절한 설계와 상세로 처음 두 개의 파괴모드는 최소한으로 발생하게 유도할 수 있다. 특히 SCU는 ④의 파괴모드가 발생한 경우의 보강에 매우 잘 작용할 수 있다.

3.2 스트럿-타이 모델의 적용

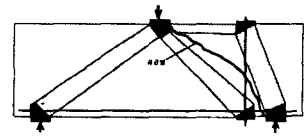
스트럿-타이 모델의 구성은 균열의 형상의 따른 보강장치의 위치에 좌우된다. 그림 3. 전단 사균열의 형상과 그에 따른 보강, 그리고 그림 4.에서는 스트럿-타이 모델을 보여주고 있으며, 그림에 볼 수 있듯이 보강 위치가 달라질 때의 내력의 분포를 나타내었다. 그림 4.에서의 트러스의 축력은 하중 P를 100%로 보았을 때의 각각의 압축 스트럿과 인장 타이에 전해지는 축력의 분포를 나타낸다. 보강장치가 전단경간의 중앙에 위치할 때(a), 새로 형성된 압축 스트럿은 균열의 좌우에서 작용하중의 62.5%를 균등하게 받는다. 이러한 경우 파괴되지 않은 전단경간에서 압축 스트럿이 받는 90.14%보다는 작지만 균열의 형태가 다른 사균열이 발생한 깊은 보((b), (c))에서는 이러한 스트럿-타이 모델의 재배열이 보강위치의 변경에 따라 필요하다. 기하학적으로 아래로 굽은 경우(b)에 보강의 위치가 중앙이나 지점 가까이에 있다면 보강 후 새로 형성된 압축 스트럿이 균열을 중립축 가까에서 보강할 수 없고 압축 스트럿이 발생한 균열과 겹쳐 발생할 수 있으므로 그 성능을 발휘할 수가 없다. 또한 균열의 형상이 위로 굽어있을 경우(c)에도 마찬가지로 보강위치가 하중재하점 근처에 위치하고 있다면 새로이 형성될



(a) 파괴된 전단경간의 중앙에 위치

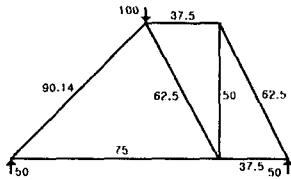


(b) 하중재하점으로부터 파괴된 전단경간의 3/4에 위치

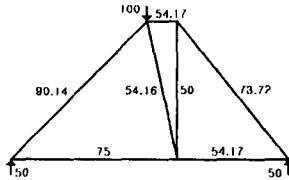


(c) 하중재하점으로부터 파괴된 전단경간의 1/4에 위치

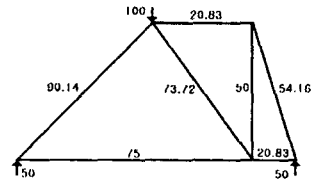
그림 3 보강위치에 따른 주응력의 흐름



(a) 파괴된 전단경간의 중앙에 위치



(b) 하중재하점으로부터 파괴된 전단경간의 3/4에 위치



(c) 하중재하점으로부터 파괴된 전단경간의 1/4에 위치

그림 4 보강위치에 따른 스트럿-타이 모델

압축 스트럿이 기하학적으로 균열과 겹치게 된다. 이러한 경우에도 새로이 형성된 압축 스트럿은 각각 작용하중의 73.72%와 54.16%의 압축력을 받게되는데 이러한 압축력은 스트럿이 파괴균열면을 포함할 때는 발생하지 않으므로 상대적으로 큰 73.72%의 압축력을 받는 스트럿이 균열파괴면에서 보다 멀리 떨어지도록 배치하기 위해서는 아래로 굽은 균열일 때 하중재하점 가까이, 위로 굽은 균열일 때 지점 가까이가 유리함을 알 수 있다. 보강장치에 의해 발생한 압축 스트럿의 값들은 파괴되지 않은 전단경간에서 압축 스트럿이 받는 90.14%보다 적은 축력을 받으므로 보강에 따른 효과를 기대할 수 있다.

4. 보강된 콘크리트 깊은 보의 해석

4.1 대상구조물의 구분

표 1 해석대상 구조물의 상세

Beam	b (mm)	h (mm)	L (mm)	a (mm)	x (mm)	f_{cu} (MPa)	f'_c (MPa)	A_s (mm ²)	d_s (mm)	A_{ps} (mm ²)	d_{ps} (mm)	A_{sv} (mm ²)	s_v (mm)	A_{vh} (mm ²)	s_h (mm)
P-1a	150	600	1800	900	800	55	39	760	550	138	475	-	-	-	-
P-1b	150	600	1800	900	800	54	38	760	550	138	475	-	-	-	-
P-3a	150	600	1800	900	800	55	39	760	550	138	475	157	150	157(T)	100
N-1a	150	600	1800	900	800	52	37	1520	525	-	-	-	-	-	-
N-2a	150	600	1800	900	800	53	37	1520	525	-	-	157	150	-	-
N-3a	150	600	1800	900	800	53	37	1520	525	-	-	157	150	157(T)	90
NI-10-WO	160	600	1200	600	500	43	37	1520	525	-	-	-	-	-	-
NI-10-WV	160	600	1200	600	500	43	37	1520	525	-	-	157	150	-	-
NI-10-WH	160	600	1200	600	500	43	38	1520	525	-	-	157	150	157(R)	90
NI-15-WO	160	600	1800	900	800	41	37	1520	525	-	-	-	-	-	-
NI-15-WV	160	600	1800	900	800	41	37	1520	525	-	-	101	150	-	-
NI-15-WH	160	600	1800	900	800	42	37	1520	525	-	-	101	150	157(R)	90

본 연구에서 사용된 보 대상구조물³⁾은 총 18개의 프리스트레스트된 콘크리트 깊은 보와 프리스트레스트된

지 않은 깊은 보에 대하여 파괴, 보수 또는 보강하기 위해 실험된 보이다. 지간비 L/d가 3.0인 5개의 비부착 포스트텐션 콘크리트 깊은 보와 지간비 L/d가 3.0과 2.0인 프리스트레스트되지 않은 RC 보들이다. 3.0과 2.0의 L/d를 가지는 보에 대해서 보의 지간길이는 각각 1800mm과 1200mm이다. 보 대상구조물은 1) 스테럽 사용안함, 2) 수직스테럽 사용, 3) 수직 및 수평 스테럽사용한 3종류이다. 이러한 스테럽은 각 스테럽의 종류에 따른 영향이 확인되어질 수 있고 각각의 스테럽 배열에 대한 보강장치의 효율성을 알 수 있도록 하였고, 또한 직선과 처진 텐던이 둘 다 사용되었다. 즉, 영향인자는 크게 세가지로 볼 수 있는데, 첫 번째는 지간비, 두 번째는 프리스트레스의 유무, 세 번째는 스테럽의 유무이다. 표 1.은 총 18개의 대상 구조물에서 대표적인 12가지 경우에 대한 대상구조물의 상세이다. 여기서 P는 프리스트레싱된 보를, N은 프리스트레싱 되지 않은 보를 의미하며, WO, WV, WVH는 각각 스테럽 사용안함, 수직스테럽 사용, 수직 및 수평 스테럽을 사용한 것을 의미한다. 또한 a, b, c는 표 1.에서 확인 할 수 있듯이 스테럽에 의한 부류를 나타낸다.

4.2 유한요소해석을 위한 모델링

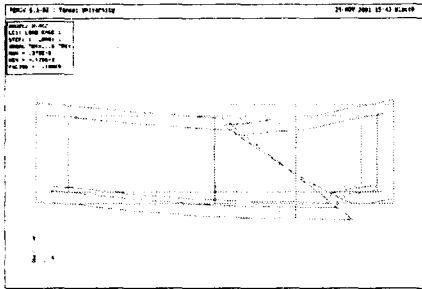


그림 5 보강된 대상구조물의 처짐형상

대상구조물에 대한 모델링은 크게 ① 균열이 가지 않은 보, ② 재하점에서 지점으로 수직균열이 난 상태, ③ 재하점에서 지점으로 위로 굽은 균열이 난 상태, ④ 재하점에서 지점으로 아래로 굽은 균열이 난 상태의 네 가지로 나누고 ②, ③, ④의 경우에는 각각 재하점과 지점사이를 4등분하여 1/4, 2/4 3/4지점에 각각 SCU를 모델링하였다. 각각의 대상구조물에서 9가지 경우의 처짐형상과 극한강도를 2차원 비선형 해석을 통하여 알아보았다. 주인장철근은 보의 상부와 하부에 각각 봉 요소로 모델링 하였다. 해석시 재료의 비선형성을 고려하여 비선형 해석을 실시하였다.

또한 균열은 인터페이스 요소(interface element)를 사용하여 이산균열모델(discrete crack model)로 모델링을 하였다. 각 균열형상에서의 최적의 보강위치를 알아보고, 각각의 대상구조물에 대하여 균열형상에 따라 각각의 보강위치를 적용하여 보강후의 콘크리트 깊은 보를 해석하였다. 그림 5는 보강된 대상구조물의 처짐형상을 나타낸 것이다.

4.3 비선형 유한요소해석에 의한 전단강도

그림 6.은 총 18개의 대상구조물에 대한 비선형 유한요소 해석 결과를 나타낸 하중-변위 곡선이다. 모든 대상 구조물에 대하여 무균열, 무균열+SCU인 경우 그리고 균열+SCU인 경우는 3.2절에서 언급된 대상 구조물별로 균열형상에 따른 최적의 보강위치로 나누어 해석한 결과를 보여주고 있다.

4.4 해석결과의 분석

그림 7.은 균열발생 전의 극한강도와 보강 후의 극한강도를 보여주고 있다. 여기에서 보면 스테럽이 없는 보 대상구조물이 스테럽이 있는 보 대상구조물에 비해 보강 후 극한강도가 상대적으로 많이 증가했음을 알 수가 있다. 또한 프리스트레싱된 깊은 보가 그렇지 않은 깊은 보에서도 스테럽이 없는 보가 스테럽이 있는 보에 비해 더 많은 보강효과를 볼 수 있다. 그 이유는 많은 스테럽을 가지고 있는

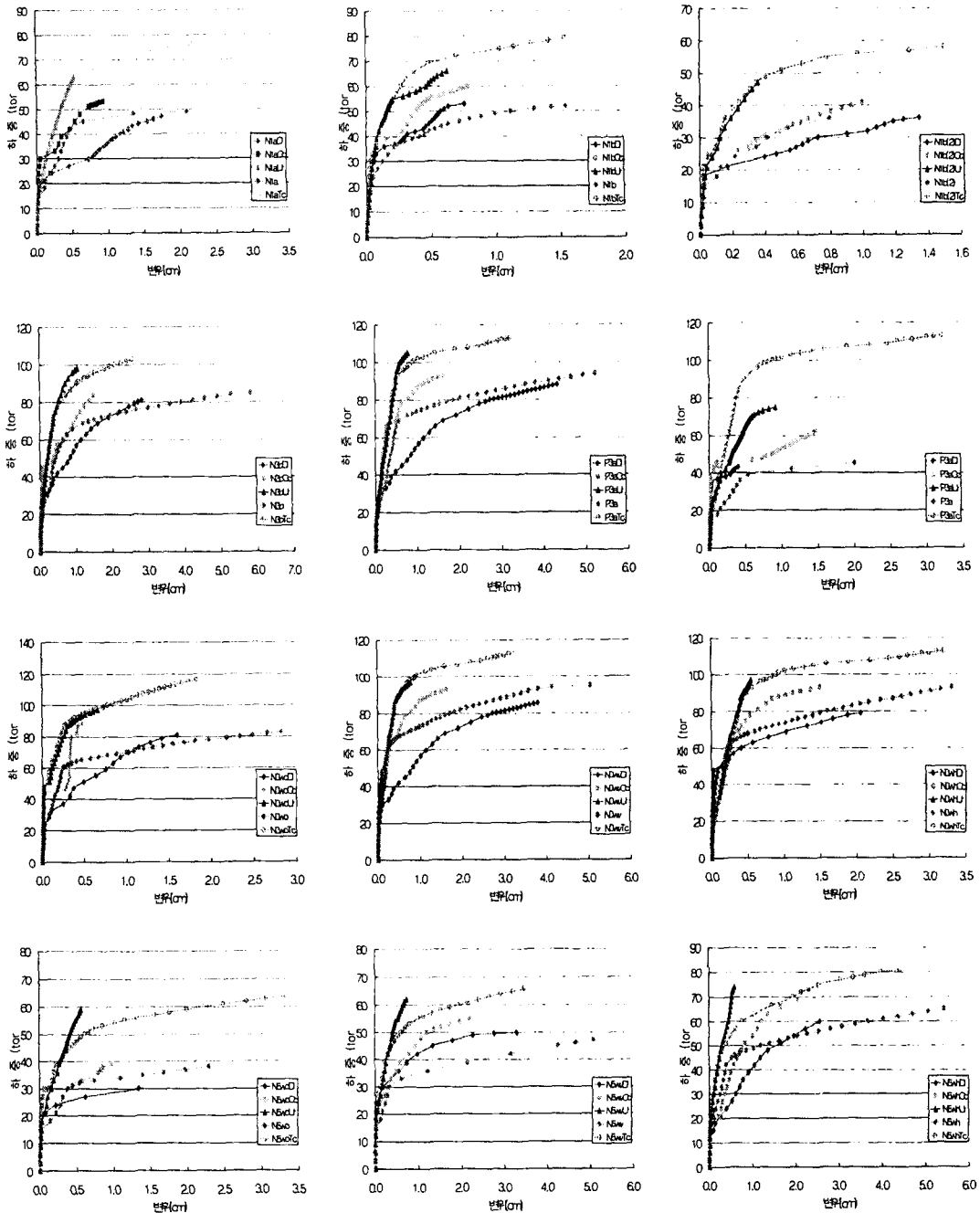


그림 6. SCU 위치에 따른 하중-변위곡선

보는 경사 조깅과피보다는 압축 스트럿의 파쇄에 의해 파괴되는 경우가 더 많기 때문이다. 그리고, 전단지간비가 2.0인 경우와 3.0인 경우를 비교하면, 압축 스트럿이 받는 압축력이 전단지간비가 큰 깊은 보가 작은 깊은 보에 비하여 상대적으로 보강장치가 더 효과적임을 알 수 있다. 일반적인 경우 보수보

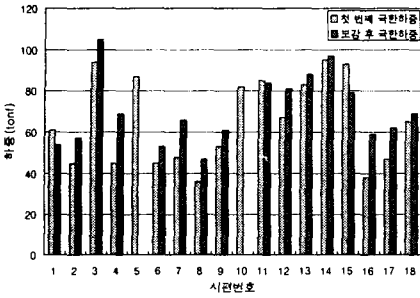


그림 7. 첫 번째와 보강 후 국한하중의 비교

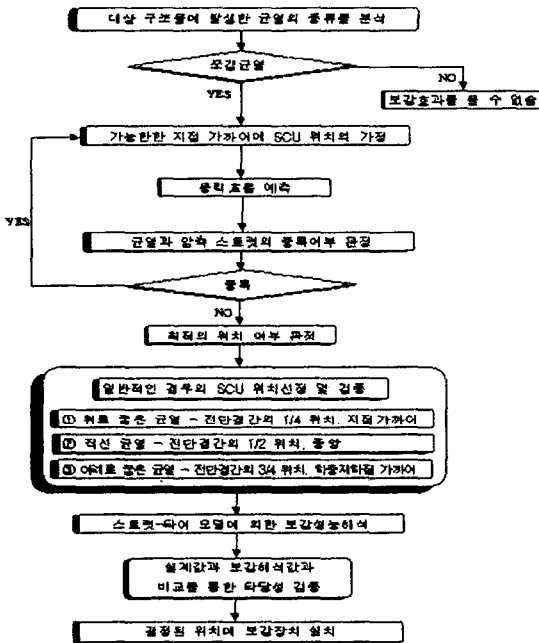


그림 8 콘크리트 깊은 보의 보강설계순서

강이 불가피할 때에, 본 연구로부터 그림 8.에서와 같은 콘크리트 깊은 보의 보강설계순서를 제안할 수 있다.

5. 결 론

본 연구를 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 스트럿-타이 모델을 사용해 전단파괴된 콘크리트 깊은 보의 SCU 보강 후 거동을 해석하였고 해석결과는 실험에 의한 결과와 비교하였다. 이를 통해 스트럿-타이 모델을 이용한 보강 해석방법의 타당성을 검증하였고 검증된 보강해석방법을 이용하여 전단파괴된 콘크리트 깊은 보에 대해 SCU에 의한 최적의 보강방법을 규명하였다.
2. 보강장치의 위치는 보강 후 새로 형성되는 압축 스트럿의 위치가 발생한 전단균열을 포함하지 않도록 설치하는 것이 최적임을 알았다. 즉, 기하학적인 전단균열의 형상이 첫 번째 직선 사균열일 때는, 파괴된 전단경간의 중앙에 보강장치가 위치할 때, 두 번째로 아래로 굽은 사균열일 때는 하중 재하점 가까이에 보강장치가 위치할 때, 세 번째로 위로 굽은 사균열일 때는 지점 가까이에 보강장치가 위치할 때 보강장치는 최적의 보강효과를 얻을 수 있음을 알 수 있었다.
3. 스트럿-타이 모델에 의한 해석을 통하여 보강장치는 보강위치에 상관없이 항상 작용하중의 50%의 인장력을 받음을 알 수 있었다. 그러나 보강위치에 따라 보강 후 새로 형성되는 압축 스트럿에서의 압축력에는 변화가 생겨 구조물 자체의 하중전달 기구에 변화가 생긴다는 것을 알 수 있다.
4. 스트럿-타이 모델은 전단파괴된 콘크리트 깊은 보의 SCU에 의한 보강설계 보 해석에 효과적으로 사용될 수 있다.

참고문헌

1. 배한욱, 송하원, 변근주, 변윤주 (1996), "비선형 스트럿-타이 모델을 이용한 PSC구조물의 정착부 설계," 한국콘크리트학회 논문집, Vol. 10, No. 5, PP. 101-107.
2. 정광희, 송하원, 변근주 (2002), "스트럿-타이 모델에서 중첩의 원리를 이용한 철근 콘크리트 T형 교각 코핑부의 합리적인 설계," 한국토목학회 논문집.
3. Teng, T., Kong, F.-W., Poh, S.-P., Guan, L. W., and Tan, K.-H. (1996), "Performance of Strengthened Concrete Deep Beams Predamaged in Shear," *ACI Structural Journal*, Vol. 93, No. 2, pp. 159-171.