

P.C Beam의 피로파괴 거동해석

안세희*, 고상훈**, 박종철***, 김두환****

서울산업대학교 * ** *** ****

1. 서 론

반복하중에 따른 P.C 구조물의 정착장치로 사용되는 Wedge 형상에 따른 거동특성을 파악하기 위하여 정적최대하중을 이용하여 피로시험을 수행하였다. 또한 피로시험 결과로부터 반복회수에 따른 시험 체의 균열양상, 하중-변위, 하중-변형률, 하중-중량 최대 변위, 하중-영구 변형량, 반복횟수에 따른 S-N선도 등을 고찰하였다.

2. P.C Beam의 피로실험 및 고찰

2.1 정적시험

P.C 구조물의 정착장치로 사용되는 Wedge 형상에 따른 시험 체의 구조특성을 파악하기 위하여 2 piece wedge (Single) 정착 P.C 시험 체와 2차년도에 새롭게 개발된 3 piece wedge (Double) 정착 P.C 시험 체를 제작한 후 각각 3개씩 정적시험을 실시하였으며, 이 정적시험으로부터 시험체의 최대하중, 하중-변위 선도 그리고 하중-변형률 선도들을 고찰하였다.

1. 정적시험 결과 및 고찰

1) 시험체의 파괴양상

정착 장치로 사용되는 Wedge 형상과는 관계없이 모든 시험 체가 전형적인 휨 파괴 양상을 나타내었다. 시험 체 중앙부위에 균열이 발생하였으며 가력 하중이 증가하면서 일반적으로 미소균열이 발생된 후 주 균열이 나타나는데 이 주 균열은 단면에서의 P.C 강재와 콘크리트의 강성차이로 인하여 형성된다.

본 실험에서도 가력 하중이 증가될 때 미소균열이 발생한 후 주 균열의 폭이 커지면서 시험 체의 압축부분까지 진전되는 것을 고찰 할 때 이는 PC강재가 항복되기 전에 콘크리트가 압축파괴를 일으키는 것으로 간주된다.

2) 하중-중앙 변위 관계

2 piece wedge 및 3 piece wedge 정착 시험체의 하중-중앙 변위 선도는 유사한 경향을 나타냈으며, 이를 고찰 할 때 PC구조가 일반적으로 거동하는 특성과 같이 5ton까지는 선형적으로 항복과정을 거치고 있으며 이후 비 선형 형태로 파괴 과정이 진행되었다. 또한 정적 최대하중도 거의 유사한 것을 알 수 있었다. 그러나 엄밀히 분석하여 볼 때 3 piece wedge 시험체는 극한하중에 도달하면서 변위의 양이 상대적으로 2 piece wedge 시험체 보다 큰 것으로 나타났으며, 이는 정착부에서 발생하는 Slip의 양의 차이로 고려된다.

3) 하중-변형률 관계

Wedge 형상에 따른 시험체의 하중-변형률 관계를 나타낸 것이다. Gage1과 Gage2는 시험체 단부 강연선에 부착한 변형률을 나타낸 것이고 Gage3과 Gage4는 시험체 중앙 강연선에 부착한 변형률이다. 2 piece wedge와 3 piece wedge를 비교하여 볼 때 초기 하중에서는 3 piece wedge가 변형률이 상대적으로 적게 형성되었으나 항복하중 이상 과정에서는 정착장치의 재료적인 강성 및 물림상태에서 문제가 형성되었는지 변형률이 급속히 증가하는 현상을 보였다.

2.2 동적시험

반복하중에 따른 P.C 구조물의 정착장치로 사용되는 Wedge 형상에 따른 거동특성을 파악하기 위하여 정적최대하중을 이용하여 피로시험을 수행하였다. 또한 피로시험 결과로부터 반복회수에 따른 시험체의 균열양상, 하중-변위, 하중-변형률, 하중-중앙 최대 변위, 하중-영구 변형량, 반복횟수에 따른 S-N선도 등을 고찰하였다.

1. 정착장치별 반복회수에 따른 균열 및 파괴형상

2 piece wedge 시험체가 파괴될 때까지의 반복회수별 균열의 진전양상을 나타낸 것이다. 반복회수 초기에는 시험체 전 시간에 걸쳐 균열이 발생하였고, 반복회수가 증가하면서 균열은 콘크리트의 압축부위 까지 점증적으로 진전하는 것을 알 수 있었다. 용력 수준별 ($0.5P_{max} \sim 0.8P_{max}$) 시험체의 파괴양상이다. 전 시간에 걸쳐 균열이 발생한 것으로부터 모든 시험체는 안정적인 피로하중을 받는 것으로 사료된다.

용력 수준($0.8P_{max}$)에서는 주 균열(Macro Crack)의 폭이 상당히 큰 것을 알 수 있었으며, 이는 거의 정 하중과 비슷한 하중을 받는 상태이며 높은 용력 수준에서는 정착장치의 Slip이 저 용력 수준보다 크기 때문에 긴장재의 인장력이 감소되어 콘크리트에 과대한 파괴양상이 이루어진 것으로 간주되며, 시험체

의 인장과 압축 부분에도 상당히 많은 균열이 발생 한 것을 알 수 있었다.

3 piece wedge 시험체도 2 piece wedge 시험 체와 유사하게 반복회수 초기에는 시험체 전 지간에 걸쳐 균열이 발생하였고, 반복회수가 증가하면서 균열은 시험 체의 중립 축 위에서 휨 전단 균열형태로 진전하는 것을 알 수 있었다. 2 piece wedge 시험체와 유사한 균열 양상이 나타났으나, 균열의 진전은 더 큼을 알 수 있었다. 전지간에 걸쳐 균열이 발생하여 시험 체는 안정적인 피로하중을 받는 것으로 사료된다.

2 piece wedge 시험 체와는 달리 낮은 응력 수준인 75%에서도 주 균열(Macro Crack)의 폭이 상당히 큰 것을 알 수 있었으나, 모든 시험 체가 인장과 압축 부분에도 상당히 많은 균열이 발생 한 것을 알 수 있었다.

응력 수준 80%인 경우의 시험 체로 반복회수 초기인 정적하중을 재하하는 도중에 시험체가 파괴되었다.

2. 정·동적 시험 체의 균열양상 비교

PC 빔에서 나타나는 파괴형태를 살펴보면 대부분의 시험체 들에서 초기 균열의 발생 위치는 최대 모멘트가 발생하는 중앙부에서 인장철근의 위치까지 수직균열인 미세 균열로 나타났으며, 점증적으로 하중이 증가하면서 좌, 우로 수직 휨 균열이 지지 부로 확산되는 양상을 보였고 휨 균열의 확산범위가 소성 한지로 가정한 범위에서 중단되고 기존에 발생된 균열과 균열사이에 새로운 균열이 발생되었으며 최대 휨 모멘트 구간에서 균열의 폭이 증가되면서 압축 축 콘크리트면 부까지 휨 균열이 진행되고 점차 균열 폭이 주위의 균열 폭보다 넓어져 압축 부 콘크리트의 압괴가 발생하는 상황이 일반적으로 나타난다. 정적 시험체는 급속한 하중 받는 상태이므로 구조 체가 취성화 되어 균열이 시험체 중앙부위에 집중되었으며, 하중이 증가하면서 주 균열(Macro Crack)이 압축부분으로 진전하고 균열폭이 커지면서 시험체가 파괴되었다. 그러나 동적 시험체의 경우 높은 응력 수준 경우는 정적 시험체와 유사하였으나 저응력 수준에서는 반복회수 초기에 발생한 균열의 개수가 많은 이유는 반복회수가 증가하면서 구조체가 노후화 및 기능성 상실 등으로 지점부위까지 새롭게 균열이 발생함을 보였다. 이러한 현상은 2 piece wedge 시험체와 3 piece wedge 시험체에서 유사하게 발생됨을 알 수 있었다.

1. 반복회수에 따른 하중-중앙 변위

낮은 응력수준인 50%인 경우는 정적 Wedge의 형상과는 관계없이 탄성적인 거동을 하는 것으로 나타났는데, 이는 정적의 거동의 경우 낮은 하중 범위에서 선형구간을 형성하는 것과 같이 높은 하중이 작용하는 것이 아니므로 PC보 자체가 평형 상태를 유지하고 있는 것으로 판단된다. 그러나 응

력수준 65% 이상인 경우는 항복수준 이상의 하중을 받는 상태이므로 긴장재가 이완되고 정착부에서 Slip이 형성되어 긴장력이 감소가 이뤄진 상태이므로 과도한 응력이 형성되어 모든 시험체가 비 선형 적인 거동을 한 것으로 나타났다. 또한, 모든 시험체는 반복회수가 증가하면서 내구력의 감소로 중앙 변위는 증가하나 파괴 단계 전까지는 급속한 변화 없이 일정한 경향을 나타내었다.

응력 수준이 낮은 경우 3 piece wedge 시험체의 중앙 변위는 2 piece wedge 시험체보다 상대적으로 크지만 응력 수준이 높은 경우는 2 piece wedge 시험체와 거의 유사하게 나타났다.

2. 반복회수에 따른 하중-변형률

2 piece wedge 시험체와 3 piece wedge 시험체의 변형률은 동일한 응력 수준별로 거의 유사한 경향이 나타내었는데 이는 본 실험 경우 강연선에 과도한 응력이 도입되지 않는 상태로 고찰되어 진다.

3. 반복회수에 따른 하중-잔류 변위량

2 piece wedge 시험체에서는 시험체가 파괴되기 전에 응력 수준에 관계없이 잔류 변위가 크게 나타났으며, 3 Wedge 시험체 보다는 전체적으로 잔류 변위가 적게 나타났다. 3 Wedge 시험체에서는 반복회수가 증가하면서 잔류 변위값도 적지만 약간 변화가 있는 것으로 나타났으며, 시험체 파괴전에도 2 Wedge 시험체 보다 적지만 잔류 변위가 크게 나타났다.

4. 정착장치별 반복회수에 따른 S-N선도

구조물의 피로거동에 관한 작용하중과 반복회수의 관계로부터 S-N 선도는 어느 특정한 반복회수 N에 대한 응력수준 값인 피로강도를 예측하는데 적용된다. 콘크리트는 강재와는 달리 미리 정한 반복회수에 대한 피로강도를 사용한다. 본 실험에서는 정착장치별 정적하중에 대한 피로하중 즉, 최대하중-최소하중 (ΔP)를 피로수명(N)과 비교, 분석하였으며, 적용 최대하중(P_{max})에서 최소하중(P_{min})의 차이 값인 ΔP 와 반복회수 N에 대한 선도를 최종적으로 도시하였다. 피로시험을 통하여 측정된 시험체 파괴시의 반복회수는 표 6-2-2와 같으며 3 piece wedge는 응력 수준이 80%인 경우 반복회수 초기인 정적 하중을 재하 하는 도중에 시험체가 급속히 파괴되어 피로시험을 수행할 수 있었다.

표 2.1 각 시험체별 파괴시의 반복회수 (N_f)

정착 조건	시험체 명칭	파괴시 반복회수
2 wedge	2W-50	1,000,000 만회 이상
	2W-60	455,948
	2W-65	199,283
	2W-70	95,661
	2W-75	49,461
	2W-80	15,320
3 wedge	3W-50	589,652
	3W-60	363,421
	3W-65	199,843
	3W-70	48,357
	3W-75	9,986
	3W-80	-

2 piece wedge의 경우 실험 데이터 거의 정확성을 보이고 있으나 3 piece wedge 경우 구조체의 거동이 일정하지 않아 변동성이 심하므로 보다 많은 실험이 요구되어진다.

각 시험체별 S-N선도로부터 백만 회에 대한 정적하중에 대한 응력수준은 2 piece wedge 시험체와 3 piece wedge 시험체에서 각각 55.56%와 52.45%로 나타났으며, 파괴하중은 2 piece wedge 시험체는 4.167ton이며, 3 piece wedge 시험체는 3.934ton으로 2 piece wedge 시험체가 다소 큰 것으로 나타났는데, 이것은 3 piece wedge 정착장치의 Slip에 의한 것으로 사료된다. 따라서 본 연구에서 P.C 빔은 일반적으로 금속체 들과 달라서 피로한도를 가지지 않기 때문에 미리 반복 횟수를 정하고 이에 견딜 수 있는 최대응력을 피로 한도로 하고 있는데 보통 백만 회를 기준으로 하고 있으며 이 백만 회에 대한 시험체의 피로강도는 일반적으로 알려져 있는 P.C 보의 피로강도 범위인 50%~60% 내에 존재하는 것으로 나타나 본 실험에 사용된 P.C 구조체 및 Wedge 정착구는 충분한 강성을 갖는 것으로 판단되어 졌다.

표 2.2 시험체별 회귀분석 결과 식

시험체명	회귀분석 결과 식
2 Wedge	$S = -6.05072 \times \ln(N) + 139.156$
3 Wedge	$S = -5.35343 \times \ln(N) + 126.412$

3. 결 론

P.C 보를 제작하여 정적 및 동적 시험을 수행한 결과 응력 수준이 높은 범위에서는 두 Wedge 다 거의 유사한 경향을 보이나 응력 수준이 낮은 범위에서는 반복회수의 증가함에 따라 3 piece wedge가 2 piece wedge 보다 Slip이 크게 나타나 긴장력을 감소시켜 균열 등을 증가시키고 있음을 알 수 있다.

피로시험으로부터 얻어진 S-N선도로부터 회귀분석 하여 얻어진 피로강도는 정적 강도의 50~60% 내에 존재하는 것으로 나타나 구조체의 기능은 충분히 확보하고 있음을 알 수 있었으나 회귀분석을 한 결과 2 piece wedge 구조체의 거동은 응력 증가에 따라 일정하므로 안정적인 거동을 하는 데에 비하여 3 piece wedge는 초기 과도한 Slip 변형 등으로 내구성이 상실되어 실험이 이뤄지지 못한 것이 있었고 거동의 변동이 심하므로 안전성이 부족한 것으로 판단되므로 보다 정량적인 분석을 위하여서는 장시간의 폭 넓은 실험이 요구되어진다.

참 고 문 헌

1. Breen, J.E., Cooper, R.L., and Gallaway, T.M., "Minimizing Construction Problems in Segmentally Precast Box Girder Bridges," Research Report No.121-6F, Center for Highway Research, The University of Texas at Austin, August 1975.
2. Dilger, W.H., and Ghali, A., "Remedial Measures for Cracked Webs of Prestressed Concrete Bridges," PCI JOURNAL, V.19, No.4, July-August 1974, pp.76-85.
3. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete and Commentary(ACI 318-77)," American Concrete Institute, Detroit, Michigan, 1977.
4. Stone, W.C., Paes-Filho, W., and Breen, J.E., "Behavior of Post-Tensioned Girder Anchorage Zones," Research Report 208-2, Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin, August 1980.
5. CEB-FIP Committee, Model Code for Concrete Structures, Comité Euro-International du Béton and the Fédération Internationale de la Précontrainte, English Translation, 1978.