

RC보의 피로상능에 관한 실험적연구

Experimental Study to fatigue performance of reinforced concrete beam

김순철*
Kim, Soon-Chul

김은겸**
Kim, Eun-Kyum

ABSTRACT

This is a basic experimental study elaborated on reinforced concrete beam under load, especially crack behavior, bending stiffness, deflection and strain of concrete and reinforced bar for reinforced concrete and steel fiber reinforced concrete beam in relation to fatigue loading in service ability limit states.

Test parameters are concrete strength, volume and type of steel fiber and fatigue loading in service ability limit states to be changed. In order to obtain the actual conditions of various working loads for the aforesaid reinforced concrete beam, minimum load is applied 10% of maximum design load and maximum load was applied 60%, 80% and 100% respectively. Under the same condition, the test was implemented up to 1 million cycle and the result was thoroughly analyzed and reviewed.

1. 서 론

1.1 연구목적

앞으로는 외국은 물론 국내의 교통 시스템은 철도가 수송에 큰 역할을 하게 될 것이다. 이와 같은 철도시스템의 선로는 내구적이며 유지관리가 효과적이고 시공이 용이한 궤도를 건설하기 위한 대책이 필요하다. 콘크리트 슬래브궤도는 자갈궤도보다 상대적으로 경제적이므로 독일이나 우리나라에서도 주로 신설선에 많이 건설되고 있다. 일반적으로 슬래브궤도류 구조적으로 설계할 때 지반의 동적 불성치와 지반과 구조물의 상호작용 이용한 정확한 구조물 해석으로 궤도의 단면, 질량 및 강성을 최적화 시키고 진동을 감소할 수 있는 합리적 설계와 더불어 공용기간동안 사용조건에서 반복되는 동적하중에 대한 콘크리트 슬래브의 피로거동에 대한 검증된 결과가 필요하다. 여기서는 콘크리트 슬래브궤도의 피로거동 연구를 위한 기본적인 RC 보 휨시험의 실험적 연구를 하게 될 것이다.

* 서울산업대학교 철도전문대학원 석사과정, 정회원

** 서울산업대학교 교수, 정회원

2. 본 문

2.1. 실험계획

본 논문의 실험에서는 RC 보의 휨 시편의 크기는 길이 150cm, 높이 20cm 폭은 15cm이고 콘크리트의 강도는 $500\text{kg}/\text{cm}^2$ 으로 하였다. 철근비는 0.5%, 하중은 공용기간에 올 수 있는 다양한 사용하중의 변화와 유사하게 하기 위하여 진폭을 변화시켜 최소하중을 설계시 시편의 사용최대하중의 10%로 하고 최대하중은 각각 설계 최대하중의 60%, 80% 및 100%로 변화시켜 100만번 까지 재하 하였다. 이 사용반복하중 후에는 잔존 내하력을 알기위하여 파괴까지 하중을 정적으로 재하 시켰다.

실험결과로는 다음과 같은 것을 목적으로 하였다

- 균열기동(균열 폭, 균열 간격 및 균열 수)
- 휨 시편의 압축부에 콘크리트의 변형률
- 철근의 변형률
- 처짐
- 휨 강성

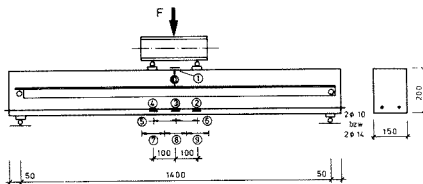


그림 1 Test set up

2.1.1 사용하중

사용반복 피로하중은 100만 번까지 3단계로 나누어 재하 시켰고 반복하중 후에는 정적으로 파괴까지 하중을 재하 시켰다.

1단계: 10만 번까지 최대하중은 설계시(시편) 사용최대하중의 60% (13.8 KN)

2단계: 50만 번까지 최대하중은 설계시(시편) 사용최대하중의 80% (18.4 KN)

3단계: 50만 번이상 최대하중은 설계시(시편) 사용최대하중의 100%(23.0 KN)

3단계 모두 최소하중은 설계시 사용최대하중의 10%로 일정하게 재하 시켰다.

사용피로하중은 100만번 반복 후 파괴까지 정적으로 재하 하였다.

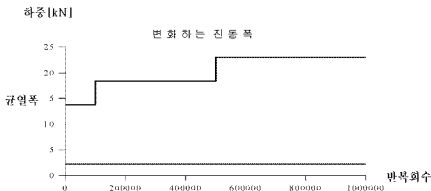


그림 1 사용반복 하중

2.1.2 시편의 종류

시편은 일반철근콘크리트와 강섬유 철근콘크리트로 제작 하였고, 변수로서 강섬유의 형태 및 혼입량을 변화 시켰다. 간략하기 위하여 다음과 같은 부호로 편의상 나타내었다.

일반 철근콘크리트 시편 : NF(non fiber)

강섬유 Dramix 30kg/m³을 혼입한 철근콘크리트 시편 : D30

강섬유 Dramix 60kg/m³을 혼입한 철근콘크리트 시편 : D60

강섬유 Harex 30kg/m³을 혼입한 철근콘크리트 시편 : H30

강섬유 Harex 60kg/m³을 혼입한 철근콘크리트 시편 : H60

2.2 균열거동

균열거동에서는 균열 폭, 균열간격 및 균열수를 관찰 하였다. 이 크기는 실험이 수행되는 동안에 특별히 다음 하중단계로 넘어갈 때 연속적으로 측정되었다.

1단계에서의 균열거동은 정적으로 최대사용하중의 60%로 첫 하중을 재하 할 때 미세한 일정한 최대 모멘트가 발생중양부 20cm 내에서 0.02mm 이하의 미세한 균열만 발생하였다. 이 미세한 균열은 균열확대경으로 거의 식별이 어렵다. Harex 강섬유 60kg/m³ 혼입한 철근콘크리트 휨시편(H30)시리즈의 균열은 다른 일반 콘크리트 및 Dramix 강섬유 30kg/m³ 혼입한 시편시리즈 보다 더욱 더 미세한 균열을 작은 보여주어 작은 사용반복하중에 섬유 표면이 거칠고 크므로 콘크리트 속에서 부착특성이 우수하여 효과적인임을 알 수 있다.

하중의 반복회수가 더 커질수록 미세한 균열은 시편의 폭으로 길어진다. 10만번의 반복하중 후에는 Harex시리즈를 포함한 모든 휨시편이 미세한 균열이 전폭으로 진행되었다. 균열간격은 모든 휨시편이 약 100mm이고 D60시편만 50에서 70사이를 나타내고 있다.

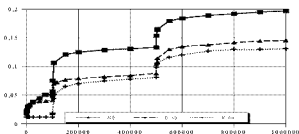


그림 2 변화하는 사용반복하중에 대한 3종류 휨시편의 균열폭 발전

2단계와 3단계의 균열거동은 정적 하중을 각 단계별로 최대사용하중의 60%에서 100%까지 20%씩 증가시킬 때 모든 시편의 균열특성은 일반 철근콘크리트 또는 강섬유 철근콘크리트나 상관없이 큰 하중진폭을 갖고 있는 3단계에서는 상당히 유사하다. 균열사이의 간격은 1단계와 변함이 없다. 100만번의 사용반복하중 후 잔존 내하력을 알기 위하여 파괴까지 재하 시켰다. 모든 휨시편은 예외 없이 중앙부에 기 발생된 균열과 균열사이에는 새로운 균열이 발생되지 않고 지점방향 쪽으로 몇 개의 새로운 균열이 발생되었다. D30시리즈 시편은 중앙부 발생된 균열사이 및 지점방향 쪽으로 새로운 균열이 발생되었다. 중앙부의 균열 간격은 약 50mm 정도로 작아졌다. D60시리즈 시편은 일정한 최대모멘트가 발생하는 중앙부는 약 50mm정도 지점부에서는 80mm에서 100mm 사이를 나타내고 지점방향 쪽으로 새로운 균열이 발생되었다.

기본적으로 이 실험에서 알 수 있는 것처럼 Harex시편의 균열간격은 일반철근콘크리트시편보다 약간 작아지고 Dramix시편은 강섬유 혼입량에 따라 작은 하중에서도 뚜렷하게 작아진다.

2.1 균열폭 발전

정하중의 의미는 각 단계별로 동하중을 시작하기 전에 첫 하중을 서서히 정적으로 재하 시킬 때 균열 폭이, 동하중은 일정한 진폭을 갖고 반복하는 하중을 재하 시킬 때의 균열폭을 나타내게 된다.

표 2 각 하중단계별 시편의 평균 균열 폭 발전

최대하중[kN]	실험	NF[mm]	D30[mm]	H60[mm]
13.8(60%)	정하중	0.049	0.013	0.015
	1단계(시작)	0.050	0.015	0.016
	1단계(종료)	0.063	0.034	0.024
18.4(80%)	정하중	0.077	0.045	0.030
	1단계(시작)	0.082	0.052	0.033
	1단계(종료)	0.119	0.087	0.070
23.0(100%)	정하중	0.127	0.100	0.081
	1단계(시작)	0.141	0.103	0.086
	1단계(종료)	0.172	0.123	0.114

표2에서 볼 수 있는 것처럼 정적하중 보다 동적하중이 재하 되었을 때 균열폭이 크게 증가된다. 균열폭은 2만번대 사용반복하중에서는 크게 발전하고 그 후에서는 약하게 증가하는 모습을 볼 수가 있다. 한 단계에서 다음단계로 20%씩 증가하는 정적하중은 균열폭이 약 0.02mm 정도씩 증가된다. 이 경우에는 균열확대경으로 측정되었다. 균열폭 증가는 연결해서 반복하중이 작용될 때 주로 생긴다. 이로 인해 정하중의 증가에서 발생한 미세한 균열은 내부 힘의 새로운 평형을 이룰 때까지 증가 된다. 그 다음에 오는 약간의 증가는 콘크리트의 크리프 현상으로 추측할 수 있다.

모든 하중단계에서 일반 철근콘크리트의 균열폭은 가장 큰 것을 알 수 있다. 그러나 최대 측정 균열폭은 0.2mm로 독일 철근콘크리트협회(DAFStb) 한열제어보고서 400에서 제안한 내구성을 위한 균열제한 0.25mm 보다는 작다.

1단계 하중재하 후에는 대부분 2~3개만 균열만 볼 수 있기 때문에 균열과 균열사이의 간격은 2단계 하중 재하부터 유효한 것으로 생각된다. 강섬유 철근콘크리트 시편은 일반 철근콘크리트 시편에 비해 상대적으로 많은 균열수를 갖고 있지만 그 균열폭을 일반 철근콘크리트 시편보다 성향을 갖고 있다

균열간격은 철근콘크리트 시편의 경우 각 단계별로 증가될 때 감소된다. 첫 균열 사이에 중간에

한 작은 균열이 또 발생되고 부수적으로 지점부 방향으로 작은 균열 간격을 형성한다. 이와 같은 측정된 110mm의 균열간격은 독일콘크리트협회 보고서 400에서 계산된 균열간격과 잘 일치한다.

표 3 각 시편의 균열간격

시편의 종류	3단계 후	NF/강섬유	파괴상태 후 균열간격[mm]	NF/강섬유
	(10 ⁶) 균열간격[mm]	철근콘크리트균열 간격비율		철근콘크리트균열 간격비율
NF	110	-	108	-
D 30	96	0.87	66	0.61
D 60	84	0.76	62	0.57
H 30	98	0.89	91	0.84
H 60	94	0.85	79	0.73

2.3 콘크리트변형률 및 철근변형률 발전

일반적으로 휨강성은 모멘트를 곡률로 나누어 얻어진다. 곡률은 다시 압축측의 콘크리트변형률 및 인장측 철근변형률에 영향을 받으므로 각 하중단계별로 그 크기를 측정하여 나타내었다.

이 본문에서는 주로 사용반복하중에 대한 변위거동을 연구하였다. 이 조건은 압축측 콘크리트의 최대 변형률이 7%를 넘지 않게 된다. 따라서 인장측 및 압축측의 선형적 탄성재료법칙의 사용이 허용된다.

2.3.1 콘크리트 변형률의 비교

D60은 경우에는 콘크리트의 변형률이 다른 콘크리트 시편보다 크게 나타난 것을 볼 수 있다. 이것은 섬유의 영향으로 최초의 휨강도가 일반 콘크리트보다 작게 되는 영향으로 추측된다. 휨시편에서 늘려진 압축측 끝부분에서 중립축까지의 거리는 증가되는 휨강성 및 증가되는 콘 압축변적을 얻기 때문에 강섬유 콘크리트인 경우 변형률의 감소를 계산할 수 있다.

이러한 거동은 H30 경우에서도 반복하중 크기가 작은 1단계 재하 후 나타난다. 하중이 커질수록 H30의 콘크리트 변형률은 거의 철근콘크리트 및 D30의 콘크리트 변형률과 큰 차이가 없다.

강섬유의 혼입에 의한 콘크리트 변형률의 변화를 볼 수가 있다. Dramix 섬유의 경우 특히 D60에서는 콘크리트 변형률만 본다면 부정적인 영향을 끼치고 Harex 섬유의 경우 혼입량의 차이가 크게 발견할 수가 없었다.

이와 같은 결과에서는 고강도 콘크리트에 강섬유를 혼입할 때 콘크리트의 압축 변형률에는 큰 영향을 주지 못하고 초기에서는 오히려 변형률이 더 커지는 경향이 있을 수 있다.

2.3.2 철근변형률의 비교

철근변형률에서는 일반 철근콘크리트와 강섬유 철근콘크리트 시편의 차이가 분명해진다. 일반 철근콘크리트 시편이 가장 큰 철근변형률을 나타내었고, Dramix 시편은 초기에 작은 휨강도로 먼저 균열이 발생되므로 초기하중단계에서는 다소 큰 철근변형률을 준다. D30과 D60은 모든 하중 단계에서 같은 수준의 변위를 나타내어 NF에 비해 10%에서 15% 정도 적은 철근변형률을 보였다.

가장 큰 철근변형률 감소는 모든 하중단계에서 Harex 강섬유를 혼입한 시편임을 알 수 있다. 특별히 1단계 작은 하중에서는 콘크리트 속에서 표면이 거친 Harex의 부착특성이 우수하여 일반 철근콘크리트 시편보다 아주 작은 철근 변형률을 갖고 있어 45%의 감소를 나타낸다. 하중단계가 올라가면 콘크리트 속에서 우수한 부착특성을 점차 잃어버려 강섬유 효과가 감소된다.

100만 번의 사용반복하중 후 철근콘크리트시편의 철근변형률은 1.4%로 가장 크고 Dramix 시편의 경우는 강섬유 영향을 나타내고 Harex 시편의 경우는 강섬유의 혼입량의 차이가 거의 없다고 할 수 있다.

2.4 휨강성 변화 및 처짐 발전

균열전의 보의 초기강성은 $EI^0 = 3.15 \text{ MNm}^2$ 이다. 그러나 균열발생 후 강성은 ($EI^t = M/\kappa$) 현저하게 떨어졌다. 보통 반복하중이 작용할 경우는 동적 강성은 최대하중과 최소하중이 반복되는 동안 충분히 하중에서 벗어나기 전에 다시 재하 되므로 위에서 언급한 정적강성보다 다소 큰 강성을 나타내고 있다. 철근콘크리트 시편의 처짐은 가장 크고 휨강성은 가장 작게 나타나 50번의 반복하중 후에도 벌써 비균열 상태의 휨강성(3.15MNm^2)보다 작아진다.

Dramix 시편도 그렇게 효과적이지 못한 것을 볼 수 있다. 강섬유 혼입량의 증가는 휨강성 및 처짐 변화에 큰 영향을 못 미쳐 50번 반복하중 후 D60은 철근콘크리트 시편의 크기 수준이다.

Harex 시편은 하중의 진폭이 작은 1단계에서는 좋은 결과를 보여준다. 시작할 때 휨강성 및 처짐이 비균열 상태에 가깝고 10만 번 사용반복하중 후에도 현저히 큰 휨강성을 갖고 있는 것을 알 수 가 있다. 2단계 하중이 재하 될 때는 강성이 급격히 감소하였다. 3단계 하중이 끝난 후에도 Dramix 시편보다 다소 우위에 있다.

강섬유 혼입량이 처짐에 미치는 영향은 첫 단계에서는 강섬유의 혼입량 차이가 거의 없었으나 마지막 하중 단계에서는 처짐에 좋은 결과를 보여주고 있다.

2.5 100만번 사용반복하중 후 파괴거동

100만번 사용반복하중 후 잔존 내하력을 알아보기 위하여 파괴상태까지 하중을 재하시켜 최대하중을 구하고자 한다. 동적실험을 수행한 모든 시편의 평균 최대파괴하중을 서로 비교하였다. 증가하는 강섬유 혼입량에 따라 파괴하중이 Dramix 시편은 D30은 약 10%, D60은 약 20% 정도 증가하였고 Harex 시편 약 3%에서 4%정도 다소 증가하였다.

3. 결 론

본 논문에서는 콘크리트 슈래브케도의 피로거동 연구를 위한 기본적인 RC 보 피로의 실험적 연구로서 사용반복하중에 대한 균열거동, 휨강성, 콘크리트 변형률 및 철근 변형률 그리고 처짐에 관하여 다루었다.

1. 피로하중하에서 철근콘크리트에 보강된 강섬유는 뚜렷한 균열억제와 강성이 증대되어 공용기간에 강섬유 철근콘크리트 구조물의 사용성이 향상됨을 보여 주었다.
2. 작은 하중 단계에서는 표면이 거칠고 큰 Harex 강섬유가 효과적 이었다.
3. 큰 하중과 파괴하중에서는 강성이 좋고 섬유 길이 후크처리가 된 Dramix 강섬유가 효과적임.
4. 시험시 하중이 너무 과대하게 선정되어 강섬유의 영향이 감소하여 그렇게 좋은 결과만 얻지만은 못하였지만, 일정한 진폭을 갖는 실험결과에서 강섬유의 영향이 혼입량 및 형태의 차이와 함께 뚜렷하게 나타나고 있다.
5. 강섬유(Harex) 30kg/m^3 을 혼입할 때는 50만번 부터는 강섬유와 콘크리트 사이의 부착효과가 상실되어 균열발전의 기율이 감소한다.

참고문헌

1. 변동균, 신현목, 문재결저, " 철근콘크리트 사용성과 내구성 pp191~pp221,"
2. 장보순(2001), "사용반복하중에 대한 철근콘크리트 부재의 피로거동," 한국콘크리트학회
3. 오병환외4(1998), "반복하중을 받는 철근콘크리트보의 전단피로 손상거동," 콘크리트학회