

지진발생시 FRP 보강이 횡방향 구속에 미치는 효과

Circumferential Confinement Effect of Circular Bridge Pier with FRP Wrapping in Earthquake

최 영 민* 황 윤 국** 권 태 규*** 윤 순 종****
Choi, Young Min Hwang, Yoon Koog Kwon, Tae Gyu Yoon, Soon Jong

ABSTRACT

The bridge columns with lap-splice reinforcements in earthquake suffered a brittle bond-slip failure due to the deterioration of lap-spliced longitudinal reinforcement without developing its flexural capacity or ductility. In this case, such a brittle failure can be controlled by the seismic retrofit using FRP wrapping. The retrofitted columns using FRP laminated circular tube showed significant improvement in seismic performance due to FRP's confinement effect. This paper presents the circumferential confinement effect of existing circular bridge pier strengthened with FRP wrapping for poor lap-splice details. The effects on the confinement of FRP wrapping, such as gap lengths between footing and FRP, fiber orientations, and thicknesses of FRP, were investigated by Quasi-static experiments.

1. 서론

지진발생시 일반적인 철근콘크리트 교각의 파괴모드는 형상비(교각높이/교각지름)에 따라 휨파괴, 휨-전단파괴, 전단파괴로 나눌 수 있다. 특히, 형상비가 큰(>3) 일체형 철근을 사용한 원형교각은 일반적으로 교각과 기초의 연결부에서 휨파괴가 발생하지만, 겹침이음을 둔 교각은 작은 반복하중으로도 피복콘크리트의 파괴를 유발하고 이로 인해 겹침이음부의 부착응력 손실이 발생하여 급격한 부착파괴로 인한 취성파괴가 발생한다. 본 연구에서는 겹침이음이 있는 큰 형상비의 기존 원형교각에서 교각과 기초 접합부 근처의 부착파괴에 의한 취성파괴를 방지하기 위해 FRP(Fiber Reinforced Polymer) 포장(Wrapping)을 이용하여 피복콘크리트의 구속력을 제공, 콘크리트의 파손, 탈락을 방지하여 일반적인 휨파괴를 유도할 수 있는 보강공법을 고려하고자 한다. 이와 같은 보강설계를 하기

* 정회원 · 한양대학교 토목환경공학과 BK21, 연구교수
** 한국건설기술연구원 구조연구부, 수석연구원
*** 정회원 · 한국건설기술연구원 구조연구부, 연구원
**** 정회원 · 홍익대학교 토목공학과, 교수

위해서는 FRP 포장으로 인한 추가 구속력의 산정(권태규, 2002)이 필요하며, 이는 포장된 FRP의 최외측 수평방향 변형률로부터 추정하게 되는데 이때 적용하는 변형율이 실구조물에서 얼마나 발생하는지를 고찰하고자 실규모 크기의 대형 교각에 대해 의사정적(Quasi-static)실험을 수행하였다. 또한 다양한 FRP 포장보강내용에 따라 횡방향 변형률에 미치는 효과에 대해서도 살펴보았다. 본 연구와 관련된 유사연구로서 국외의 연구로는 Matsuda(1990) 등에 의해 일방향 카본섬유쉬트로 소성현지구간을 감싸는 방식의 연구가 있었으며, Priestley 등(1997)은 경제적인 E-glass 섬유쉬트를 사용한 방법으로 실험하였다. Xiao and Rui(1997)는 기성 복합재료관을 이용한 원형교각의 내진보강에 대해 연구하였다. 또한 국내에서는 권태규(2002)가 FRP 포장보강으로 인한 구속력 산정을 위한 이론적 해석과 설계를 수행한 바 있다.

2. FRP 포장보강에 따른 구속력

FRP 포장시 포장의 최외측 횡방향 변형률과 구속응력과의 관계를 살펴보면 다음과 같다. FRP 포장의 구속응력(p_I)은 고전적 적층이론 및 탄성이론에 근거하여 FRP의 역학적, 기하학적 성질 및 횡방향 변형률로 나타낼 수 있으며 식(1)과 같이 제안하였다(권태규, 2002).

$$p_I = (\bar{S}_{23} + \lambda \bar{S}_{33})A_1 r_I^{\lambda-1} + (\bar{S}_{23} - \lambda \bar{S}_{33})A_2 r_I^{-\lambda-1} \quad (1)$$

여기서, \bar{S}_{ij} 는 FRP 섬유의 배치방향이 부재축과 ϕ° 경사진 경우 강성행렬의 i 행, j 열의 요소를 나타내는 상수($i, j=1 \sim 6$), λ 는 구속응력의 계산에 사용된 상수($=\sqrt{\bar{S}_{22}/\bar{S}_{33}}$), r_I 는 원통관의 내면 반지름이며, A_1 과 A_2 는 상수로서 식(2a)와 식(2b)로부터 구한 값이다.

$$A_1 r_o^\lambda + A_2 r_o^{-\lambda} = w(r_o + \Delta r) \quad (2a)$$

$$(\bar{S}_{23} + \lambda \bar{S}_{33})A_1 r_o^{\lambda-1} + (\bar{S}_{23} - \lambda \bar{S}_{33})A_2 r_o^{-\lambda-1} = 0 \quad (2b)$$

여기서, r_o 는 원통관의 외면 반지름이며, 반경방향의 변위 $w(r_o + \Delta r)$ 는 횡방향 변형률로부터 구한다. 이상으로부터 FRP 포장의 구속응력은 횡방향 변형률로부터 산정되는 것이므로 실제적인 값을 실험을 통하여 확인하였으며, 또한 FRP 포장의 내용에 따른 횡방향 변형률의 변화에 대해 살펴보았다.

3. 실험개요

철근콘크리트로 제작된 교각 실험체는 형상비가 5.83으로서 실제 공용중인 국도상의 비내진 교량의 원형교각을 대상으로 하여 총 6개를 실험크기 그대로 제작하였다. 실험체의 구조상세는 그림 1과 같다. 총 6개 실험체 중 4개는 FRP 포장에 의해 보강하였으나 2개의 실험체는 지진시 겹침이음의 여부에 따른 실제 교각의 거동을 비교, 검토하기 위해서 다른 조건은 모두 같고 무보강으로

겹침이음이 존재하지 않는 일체형 교각과 겹침이음이 있는 교각으로 제작하였다. FRP 포장은 그림 2에서 보인 바와 같이 겹침이음 구간에 1.2m 높이로 자체 개발한 자동화 FRP 포장장비를 이용하여 실험실에서 포장하였다. 이 포장장비는 FRP에서 섬유배향각, 두께, 높이 등이 조절가능하도록 설계되었으며, 본 실험에서는 표 1과 같이 무보강 및 보강 실험체를 제작하였다. 그림에서 살펴볼 수 있는 바와 같이 가력방향의 전면(F)과 후면(B)에 수평방향 변형을 게이지를 상·하단에 각각 부착하였으며 이에 대해 90° 방향인 좌·우측에도 같은 게이지를 부착하였다.

대상이 된 실교량의 실제 하중효과를 반영할 수 있도록 상부구조의 하중을 고려하기 위해 일정한 크기의 수직방향 축하중 155ton을 재하하였으며, 동시에 횡방향의 지진하중을 고려하는 수평하중을 재하하였다. 수평하중 재하방식은 시험체의 높이에 대한 수평방향의 변위수준으로 하중을 재하하는 방법을 사용하였다. 즉, 그림 3과 같이 변위수준의 증가치를 0.25%씩 증가시켜 0.002Hz로 2 cycle씩 반복한 후 다음 단계를 진행하였다.

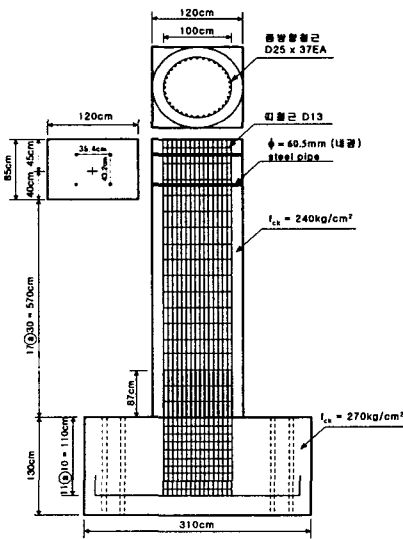


그림 1. 실험체의 설계상세

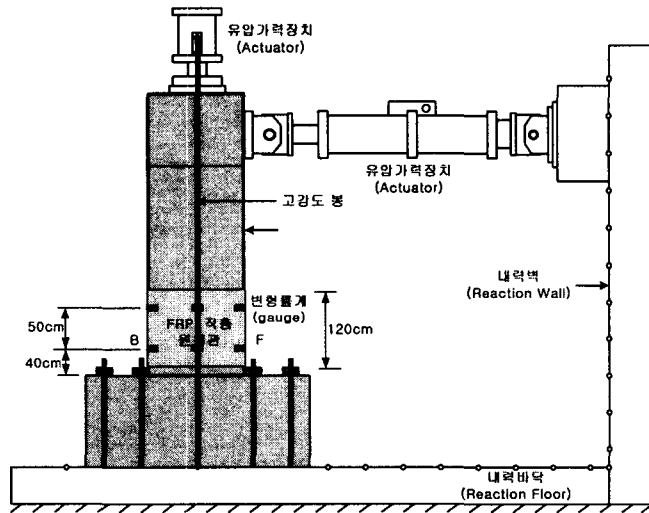


그림 2. FRP 포장 및 가력실험의 개요도

표 1. 실험체의 포장 개요

실험체 번호	보강철근 형태	포장 내용 (높이 : 120cm)		
		두께	배향각	기초와 이격거리
1	일체형	무보강		
2	겹침이음	무보강		
4	겹침이음	10mm	5°	23cm
5	겹침이음	8mm	5°	3cm
6	겹침이음	10mm	10°	3cm
7	겹침이음	6mm	5°	3cm

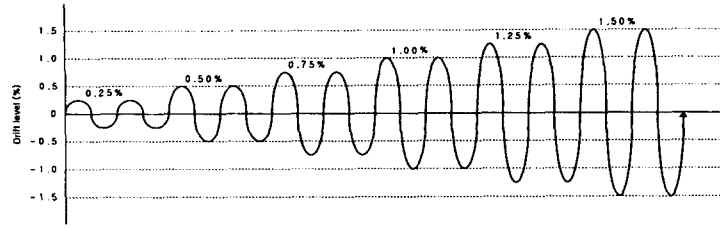


그림 3. 수평하중의 재하방법

4. 실험결과 및 고찰

기본적으로 본 연구에서 고려하는 FRP 포장에 의한 내진보강공법의 효과를 검토하기 위해 하중-변위 곡선을 정리하면 그림 4와 같다. 그림에서 살펴볼 수 있는 바와 같이 무보강 겹침이음에 있는 2번 교각은 항복하중 이후 급격한 취성파괴를 보이는 반면에 일체형 철근으로 배근된 1번 교각에서는 항복하중 이후 일정한 연성을 보이고 있음을 확인할 수 있다. 또한 비록 겹침이음에 있는 교각이라 할지라도 FRP 포장으로 보강하면 4, 5, 6, 7번 교각의 실험결과와 같이 무보강 일체형 교각에 비해서도 상당한 변형에너지를 견뎌내는 효율적인 방법임을 알 수가 있다.

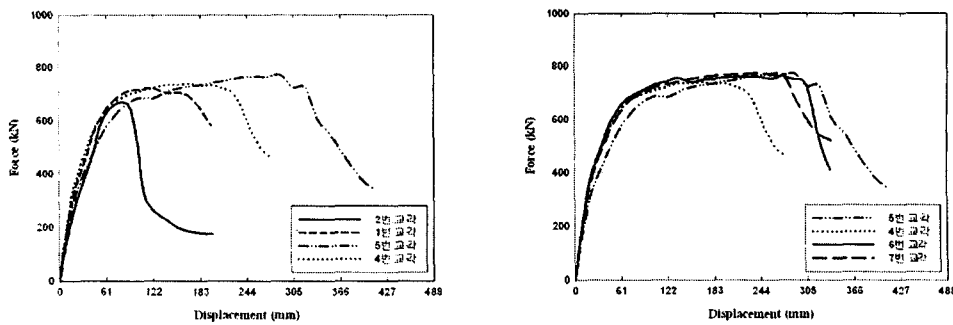


그림 4. 무보강 및 FRP 포장보강 실험체의 하중-변위 곡선

4.1 무보강 일체형 교각과 겹침이음 교각

무보강의 일체형 교각(1번 실험체)과 겹침이음 교각(2번 실험체)에 대하여 준정적 실험을 실시하여 최종파괴모습을 각각 그림 5, 6에 나타내었으며, 하중-횡변형률 이력곡선은 그림 7~그림 10에 나타내었다. 그림에서 살펴볼 수 있는 바와 같이 최종파괴형상은 일체형 실험체의 경우 주철근의 좌굴로 인한 피복콘크리트의 과대 박리파괴를 나타내고, 겹침이음 실험체의 경우 주철근의 슬립(slip)파괴가 발생하였으며 주철근의 좌굴이 거의 없어 피복콘크리트의 탈락은 심하지 않았다. 따라서 콘크리트의 횡방향 변형률은 하중-횡변형률 이력곡선으로부터 일체형 교각이 겹침이음 교각에 비해 큰 변형률을 나타내고 있음을 알 수가 있다. 또한 가력시 휨거동에 의해 게이지 위치 (F, B)에서 종방향의 인장, 압축 상태에 따라 변형률의 형태가 역대칭 모습을 보이고 있으며 압축측에서 좌굴에 의해 더 큰 변형률을 나타내고 있음을 알 수가 있다. 그림 7에서 살펴보면 초기 파괴 이후 횡방향 변형률이 압축변형을 하는 경우도 있음을 확인할 수 있다.



그림 5. 1번 실험체 파괴모습

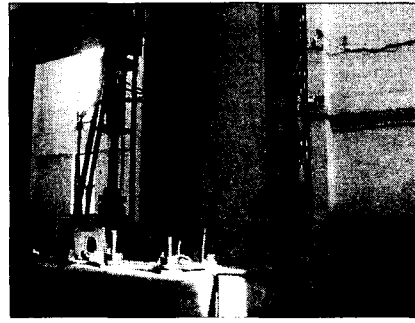


그림 6. 2번 실험체 파괴모습

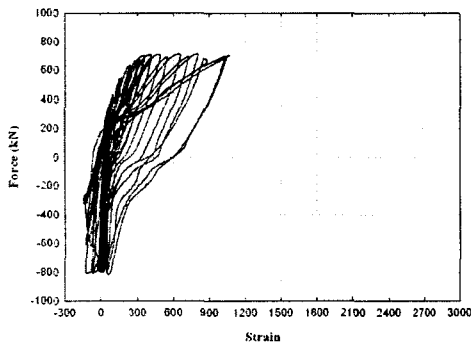


그림 7. 1번 실험체의 하중-횡변형률 이력곡선(B)

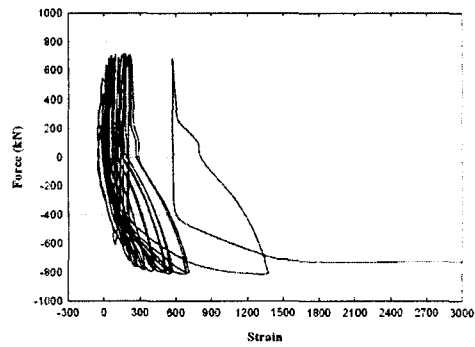


그림 8. 1번 실험체의 하중-횡변형률 이력곡선(F)

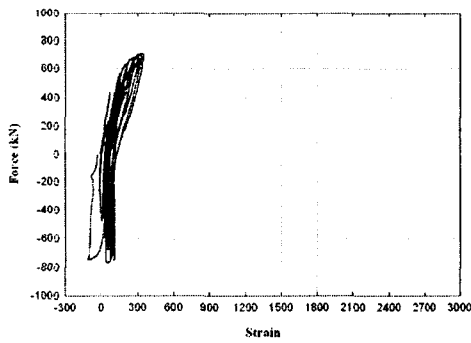


그림 9. 2번 실험체의 하중-횡변형률 이력곡선(B)

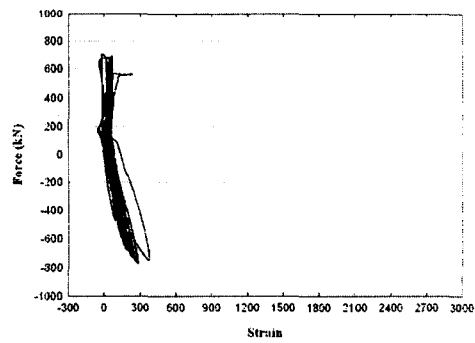


그림 10. 2번 실험체의 하중-횡변형률 이력곡선(F)

4.2 기초와 FRP 포장의 이격거리

기초와 FRP 포장 사이의 이격거리를 달리한 4번 실험체(23cm)와 5번 실험체(3cm)에 대해 최종 파괴형상을 살펴보면 그림 11에서와 같이 4번 실험체에서 교각의 하단 피복콘크리트에 압축파괴가 발생하지만 5번 실험체에서는 그림 12와 같이 기초 콘크리트가 파괴되는 것을 알 수 있다. 그림 13과 14는 4번 실험체, 그림 15와 16은 5번 실험체의 가력 후면과 전면의 하중-횡변형률 이력곡선을 보여주고 있다. 그림으로부터 횡변형률이 4번 실험체는 약 $900 \mu\epsilon$, 5번 실험체는 약 $1200 \mu\epsilon$ 을 전후해서 수평가력의 크기가 감소함을 알 수 있었다. 이는 파괴양상이 교각 자체인지 아니면 기초인지에 따라 발생 변형률의 차이가 있음을 나타내며, 따라서 향후 파괴양상에 따라 FRP

포장에 의한 구속력을 산정할 때 횡방향 변형률은 서로 다르게 적용하는 것이 바람직하다고 판단된다. 또한 각각의 실험체에 대한 실험결과, 가력 전, 후면의 방향에 관계없이 횡방향 변형률이 거의 일정하게 증가하고 있는 것을 확인할 수 있는데 이는 연속섬유를 이용하여 연속적으로 FRP 포장을 하는 본 연구의 공법의 특성에 의해 횡방향으로 비교적 일정하게 응력을 분배하기 때문으로 사료된다. 5번 실험체의 포장두께가 2mm 작게 보장되었음에도 불구하고 기초파괴형태로 유도하였을 경우, 거의 같은 크기의 하중에 대해 더 큰 변형률을 수용함으로써 5번 실험체의 변형에너지 흡수능력이 4번 실험체에 비해 크게 증가함을 알 수가 있다. 이는 4번 실험체의 경우 FRP 포장이 구속응력을 전부 발휘하기 전에 포장 아래의 교각에서 콘크리트 압축파괴가 발생하여 최종 파괴에 이르렀으나, 5번 실험체의 경우 이격거리가 작아 교각의 콘크리트 압축파괴를 제어함으로써(기초 콘크리트의 압축파괴 발생) 좀 더 큰 변형에너지 흡수능력을 가질 수 있게 된 것으로 판단된다. 이는 가능한한 포장을 기초에 근접시키는 것이 바람직함을 알 수 있다.

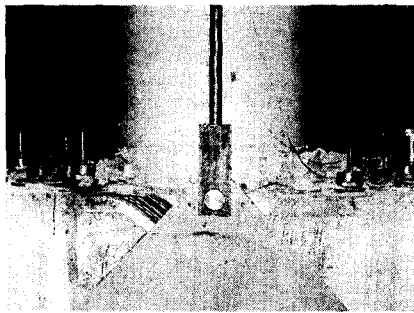


그림 11. 4번 실험체 파괴모습



그림 12. 5번 실험체 파괴모습

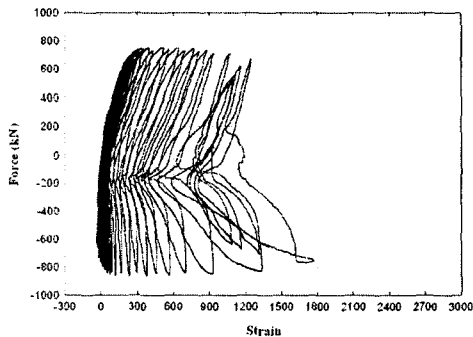


그림 13. 4번 실험체의 하중-횡변형률 이력곡선(B)

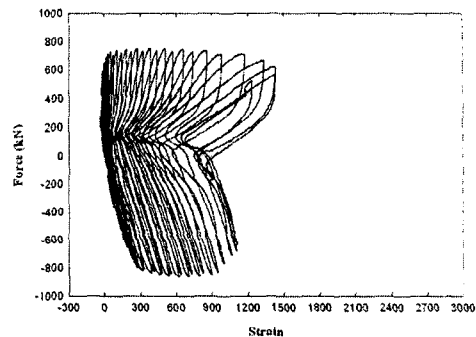


그림 14. 4번 실험체의 하중-횡변형률 이력곡선(F)

4.3 섬유배향각

섬유배향각에 대한 영향을 알아보기 위해 5번 실험체(5°)와 6번 실험체(10°)를 비교하였다. 5번 실험체에 대한 하중-횡변형률 이력곡선은 그림 15와 그림 16에 나타내었으며, 6번 실험체는 그림 17과 그림 18에 제시하였다. 실험결과, 6번 실험체의 횡방향 변형률은 5번 실험체에 비하여 상당히 작게 나타났다. 이는 FRP 포장의 각도가 작은 5번 실험체의 경우 비록 포장두께가 작음에도 불구하고 섬유가 6번 실험체에 비해 보다 수평으로 배치되어 횡방향 변형에 더 많은 변형을 수용하는 것으로 판단된다. 따라서, 섬유배향각에 따라 변형률의 크기가 상당히 차이가 있음을 알 수

가 있으므로 FRP 포장보강에 따른 구속력의 산정시 적용하는 변형률에 대해 신중한 적용이 필요한 것으로 판단된다.

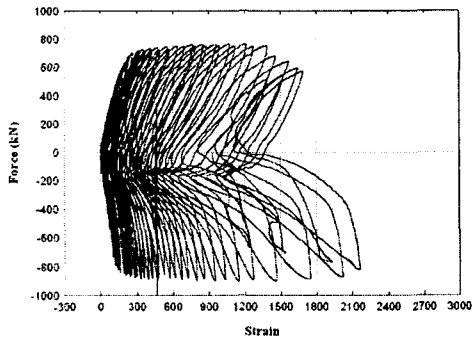


그림 15. 5번 실험체의 하중-횡변형률 이력곡선(B)

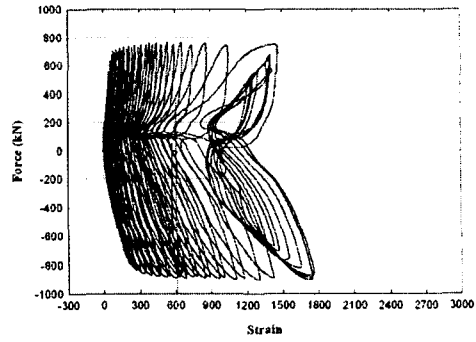


그림 16. 5번 실험체의 하중-횡변형률 이력곡선(F)

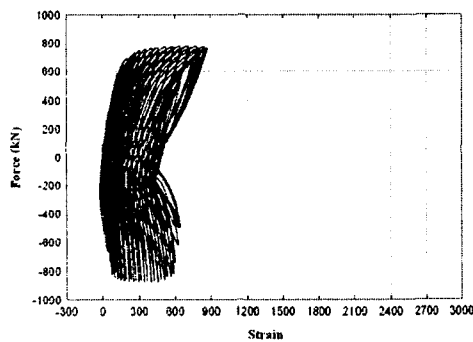


그림 17. 6번 실험체의 하중-횡변형률 이력곡선(B)

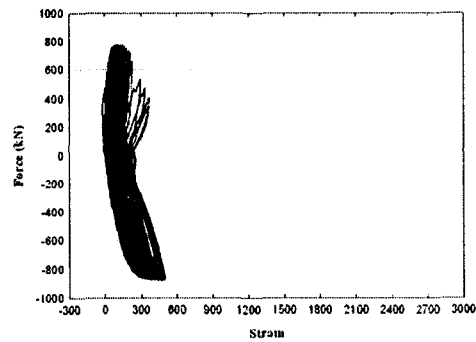


그림 18. 6번 실험체의 하중-횡변형률 이력곡선(F)

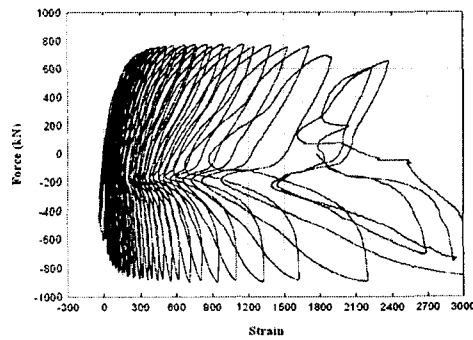


그림 19. 7번 실험체의 하중-횡변형률 이력곡선(B)

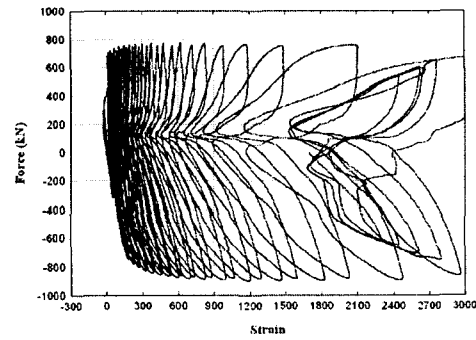


그림 20. 7번 실험체의 하중-횡변형률 이력곡선(F)

4.4 포장두께

FRP 포장두께에 따른 횡방향 변형률에 대해 살펴보기 위하여 7번 실험체(6mm)와 5번 실험체(8mm)에 대한 실험을 수행하였으며 이를 정리하여 그림 19와 그림 20에 나타내었다. 7번 실험체는 횡방향 변형률이 5번 실험체(약 $1200 \mu\epsilon$) 보다 큰 약 $1600 \mu\epsilon$ 을 전후해서 횡하중이 감소함을 알 수 있다. 이는 7번 실험체의 경우 교각과 기초 접합부에서 동시에 파괴가 되며 하중을 분배하

고 있는 반면, 5번 실험체의 경우 상대적으로 과보강되어 기초가 파괴되기 때문인 것으로 판단된다. 이 역시 다른 포장내용과 같이 FRP 포장에 의한 구속력의 산정시 횡방향 변형률의 적용에 있어 신중할 필요가 있음을 알 수가 있다.

5. 결론

본 연구에서는 형상비 3.0이상의 장주에서 흔히 있는 겹침이음을 갖는 기존 비내진 원형교각에 대하여 FRP 포장공법에 의해 내진성능을 향상시키는 기술에 대하여 실험을 하였으며, 특히 FRP 포장보강의 설계시 고려하게 되는 횡방향 변형률의 실제적 내용을 파악하기 위해 보강내용에 따른 횡방향 변형률을 측정하는 실험을 실시하여 결과를 고찰하였다. 전반적으로 FRP 포장에 의한 보강시 무보강에 비해 거의 유사한 파괴하중에 대해 횡변형률이 증가하는 것을 알 수가 있었다. 그러나 구체적으로 FRP 포장보강의 내용(기초로부터의 이격거리, 섬유배향각, 두께)에 따라서 횡변형률의 변화를 관찰할 수 있었는데 이는 설계시 포장내용에 따라 횡변형률을 다르게 적용하여야 함을 알 수 있다. 이는 Priestley(1997)가 제안한 FRP 보강시 횡방향 유효변형률 $1000 \mu\epsilon$ 의 적용을 FRP 포장의 내용에 따라 실제적으로 수정하여야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 근형기업주식회사의 연구비와 실험체 제작 지원으로 수행되었으며 이에 감사의 뜻을 전합니다.

참고문헌

1. Matsuda, T., Sato, H., Fujiwara, H., and Higashira, N., "Effect of carbon fiber reinforcement as a strengthening measure for reinforced concrete bridge piers" Proc., 1st U.S.-Japan Workshop on Seismic Retrofit of Bridges, 1990.
2. Priestley, M. J. N., Seible, F., Gilbert, A. Hegemier, and Donato, Innamorato, "SEISMIC RETROFIT OF RC COLUMNS WITH CONTINUOUS CARBON FIBER JACKETS," Journal of Composites for Construction, Vol.1, No.2, 1997, pp.52-62.
3. Xiao, Y., and Rui Ma, "Seismic Retrofit of RC Circular Columns Using Prefabricated Composite Jacketing," Journal of Struct. Engrg., ASCE, Vol.123, No.10, 1997, pp.1357-1364.
4. 권태규, "원형교각의 휨성능 개선을 위한 FRP 활용에 관한 연구", 석사학위논문, 홍익대학교, 2002.
5. 권태규, 윤순중, 황윤국, 최영민, "기존 원형교각의 휨성능 개선을 위한 FRP활용 내진보강", 한국콘크리트학회 봄학술발표회, 2002.