



강선량 및 긴장력에 따른 외부 강선을 가진 PSC 보의 휨거동 실험

유성원¹⁾ · 양인환^{2)*} · 서정인¹⁾

¹⁾우석대학교 토목환경공학과 ²⁾군산대학교 토목공학과

Experiment of Flexural Behavior of Prestressed Concrete Beams with External Tendons according to Tendon Area and Tendon Force

Sung-Won Yoo,¹⁾ In-Hwan Yang,^{2)*} and Jeong-In Suh¹⁾

¹⁾Dept. of Civil and Environmental Engineering, Woosuk University, Jeonbuk 565-701, Korea

²⁾Dept. of Civil Engineering, Kunsan National University, Jeonbuk 573-701, Korea

ABSTRACT Recently, the externally prestressed unbonded concrete structures are increasingly being built. The mechanical behavior of prestressed concrete beams with external unbonded tendon is different from that of normal bonded PSC beams in that the slip of tendons at deviators and the change of tendon eccentricity occurs as external loads are applied in external unbonded PSC beams. The purpose of the present paper is therefore to evaluate the flexural behavior by performing static flexural test according to tendon area and tendon force. From experimental results, before flexural cracking, there was no difference between external members and bonded members. However, after cracking, yielding load of reinforcement, ultimate load, and the tendon stress of external members was lower than that of bonded members. For the relationship of load-tendon stress, the increasing of tendon strain was inversely proportional to the initial tendon force. However, even if the initial tendon force was large, the tendon strain with small effective stress was smaller than that with large effective stress. The concrete compressive strain was proportional to the effective stress of external tendon. From the comparison between test results and codes, the ACI-318 could not consider the effect of tendon force or effective stress, and especially the results of ACI-318 were very small, so it was very conservative. And the AASHTO 1994 could be influenced on the tendon area, initial force and effective stress, but as it was made on the basis of internal unbonded tendon, its results were much larger than the test results. For this reason, the new correct predict equation of external tendon stress will be needed.

Keywords : prestressed concrete, external unbonded tendon, tendon area, tendon force

1. 서 론

프리스트레스트 콘크리트(prestressed concrete; 이하 PSC) 부재는 일반적으로 프리스트레스 강재(prestressing steel; 이하 PS강재)가 단면 내부에 설치되고 또한 그라우팅으로써 부착되어 시공된다. 최근 들어 비교적 시공이 간편하고, 유지관리가 손쉬운 장점을 가지고 있는 외부 강선을 갖는 PSC부재가 장대 교량의 신설이나 기존 교량의 보강공사 등에 자주 이용되고 있다. 그러나 내부 강선과 외부 강선의 구조적 거동에 차이가 있으며 그 차이는 다음과 같이 크게 세 가지로 대별된다.

첫째, 일반적으로 부착식 내부 긴장재를 갖는 PSC보의 해석은 콘크리트와 강선이 완전히 부착되어 거동한다는 가정 하에 단면 적합조건을 이용하게 되나, 외부 강

선을 갖는 부재는 내부 강선을 가진 부재와는 다르게 강선을 정착하는 정착부(anchorage)나 강선의 힘을 부재에 전달하고, 강선의 방향을 바꾸는 역할을 하는 편향부(deviator)에서만 부재와 일체거동을 하고 그 이외의 부분에서는 부재의 변형과는 상관없이 직선거동을 보이는 것이 특징이다.¹⁻³⁾

둘째, 외부 강선을 갖는 부재는 외부하중에 의한 처짐이 발생하는 경우, 정착부와 편향부에서만 강선의 변위와 부재의 변위가 일치하며, 부재와 일체화되지 않은 강선의 나머지 부위는 직선으로 존재하기 때문에 결과적으로 부재 변위가 발생할수록 편심량이 변화하여 그로 인한 2차 효과가 발생하는 등의 특징을 가지고 있다.¹⁻³⁾

셋째, 편향부는 외부 비부착 강선의 방향전환 역할을 수행하며 낮은 하중효과에서는 고정단처럼 거동하나, Rao *et al.*⁴⁾에 의하면 하중효과가 증가하여 강선의 마찰력을 초과하면 편향부에서 슬립현상이 발생하여 강선의 이동 및 응력재분배로 인하여 프리스트레스 효과가 약간 감소하며, 극한으로 갈수록 더 큰 현상을 유발하는 것으로

*Corresponding author E-mail : ihyang@kunsan.ac.kr

Received March 27, 2009, Revised May 16, 2009

Accepted June 17, 2009

©2009 by Korea Concrete Institute

연구되고 있다.

이러한 외부 강선의 거동 특징에 대한 구명은 아직까지 크게 발전되지 않고 사용되고 있는 실정이다. 따라서, 이 논문에서는 외부 강선을 가진 PSC 보의 휨거동을 평가하기 위해서 외부강선의 면적 및 긴장력 등을 주변수로 하여 지간 길이 7.5 m의 T형 보 실험부재 5개를 제작하여 정적 실험을 수행하였다. 실험 부재의 정적 실험을 통하여 균열하중, 파괴하중, 처짐, 변형률 및 강선의 응력 등을 측정하였으며, 실험 결과를 정리·분석 외부 강선의 극한응력 특성을 평가하여 구명하고자 하였다.

2. 실험 계획 및 방법

2.1 실험변수 및 부재 형상

실험변수는 외부 강선량, 외부 강선 긴장력으로 나눌 수 있고, 실험 변수들은 Fig. 1과 Table 1에 나타내었다. 또한 각 실험 부재의 철근 배근 형상은 Fig. 2에 나타내었으며, 제작 완료된 부재와 하중 재하장치 형상은 Fig. 3에 나타내었다. 한편 외부 강선과 비교용으로 부착 강선 부재 1개를 실험 부재에 추가하여 제작하였다.

2.2 콘크리트의 배합설계

실험 부재 제작에 사용된 콘크리트는 압축강도가 35 MPa인 레미콘을 이용하였다. 콘크리트에 사용된 시멘트는 1종 보통포틀랜드시멘트이며, 쇄석과 쇄사를 사용하였으며, 콘크리트의 배합설계표는 Table 2에 나타내었다.

실험 부재는 야외에서 제작하였으며, 콘크리트의 다짐은 레미콘의 타설 후 다짐봉을 이용하였고, 최초 7일간은 습윤양생을 그 이후에는 기건양생을 실시하였다. 또한 타설 3일이 경과된 후에 거꾸집을 탈형하였다.

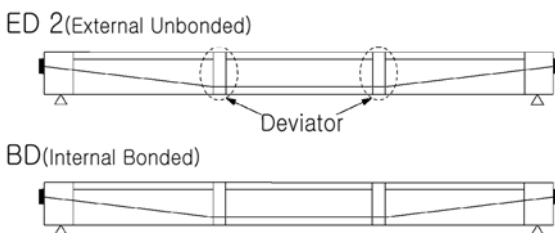


Fig. 1 Tendon profile

Table 1 Test variables and identification of members

ID	A_p (mm ²)	P_j (kN)	P_i (kN)	f_{pc} (MPa)	
1	ED2-0	830	1011.4	889.8	1068.6
2	ED2-1	830	937.9	815.4	980.4
3	ED2-2	830	775.2	652.7	784.3
4	ED2-3	1,660	1133.9	889.8	534.3
5	BD	830	1011.4	889.8	1068.6

Remark : E (unbonded), B (bonded), D (draped)

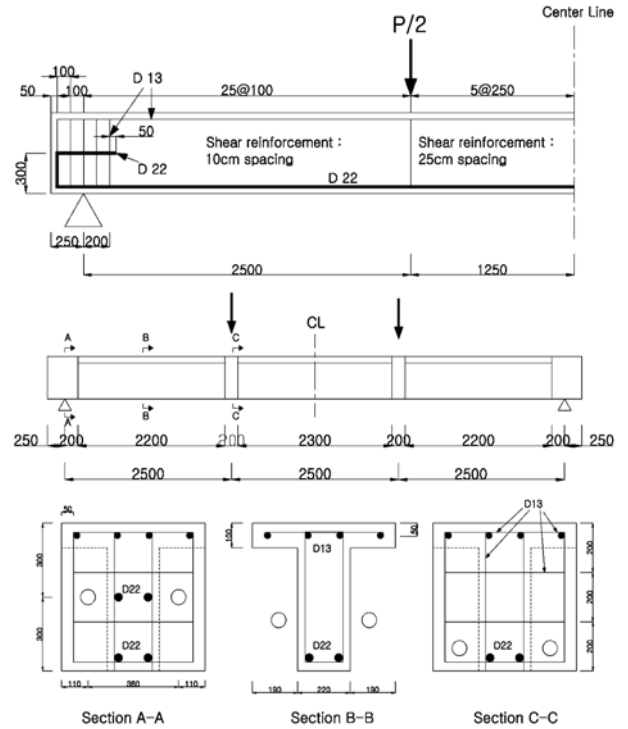


Fig. 2 Details of test members



Fig. 3 Test setup

Table 2 Mix design proportion of concrete

W/C	S/a(%)	Water (kgf/m ³)	Cement (kgf/m ³)	Sand (kgf/m ³)	Gravel (kgf/m ³)
0.42	46	176	418	788	942

2.3 철근 및 PC강연선

실험 부재에 사용된 철근은 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 인장철근은 D22-2EA, 압축철근과 전단철근은 D13 철근을 사용하였으며, 인장철근의 경우는 콘크리트 구조설계기준에서 제시하는 최소철근량을 배근하여 휨파괴의 유발 및 PS힘의 영향을 크게 하였고, 또한 전단철근의 경우는 전단파괴가 발생되지 않도록 설계기준 값을 배근하였다. 한편 사용된 철근은 SD400으로 직접인장실험 결과 항복강도는 평균 392 MPa로 나타났다.

또한 실험 부재에 사용된 PSC 강연선은 15.2 mm 7연선(SWPC 7B) 6개($A_p=830 \text{ mm}^2$)와 12개($A_p=1,660 \text{ mm}^2$)를 사용하였으며, 직접인장실험 결과 인장강도(f_{pu})는 평균 1,813 MPa, 탄성계수는 204.4 GPa로 나타났다. 한편 실험 부재에 작용시킨 유효 프리스트레스(f_{pe})는 Table 1에 나타난 바와 같으며, 이 값은 실험 부재 상연에 인장 응력이 거의 발생되지 않는 값으로 결정하였다.

2.4 측정 센서의 설치

실험 부재의 변형률, 처짐, 긴장력, 편심 변화량, 균열 폭 및 강선 슬립량 등을 측정하기 위하여 철근용 변형률 게이지, 콘크리트용 변형률 게이지, LVDT, 로드셀(load cell), 강선 변형률 측정용 Tensmac 등을 설치하였다. 또한 강선의 슬립량과 편심 변화량을 측정하기 위하여 와이어 형태의 LVDT를 설치하였다. 처짐 측정용 LVDT와 변형률 게이지는 실험 부재의 중앙점, 1/3점에 설치하였으며, 로드셀은 긴장단에 설치하였다. 한편 Tensmac과 편심 변화량 측정용 LVDT는 정착부와 편향부의 중앙에 각각 설치하였으며, 강선의 슬립량 측정을 위한 LVDT는 편향부 인접부에 설치하였다. 그리고 콘크리트에 휩균열이 발생하는 즉시 균열폭 게이지를 설치하여 측정하였으며, 또한 균열발생현황을 스케치하였다. 측정 센서들의 설치 위치 및 형상은 Figs. 4 및 5에 나타내었다.

2.5 하중재하 방법

실험 부재들의 하중재하는 콘크리트에 휩균열이 발생하기 전에는 5 kN씩 증분하여 하중제어방법에 의해서 가력하였으며, 휩균열발생 후부터 철근 항복하기 전 수준 즉, 약 0.0015의 철근 변형률이 발생될 때까지는 10 kN씩 증분하여 역시 하중제어방법으로 가력하였으며, 그 이

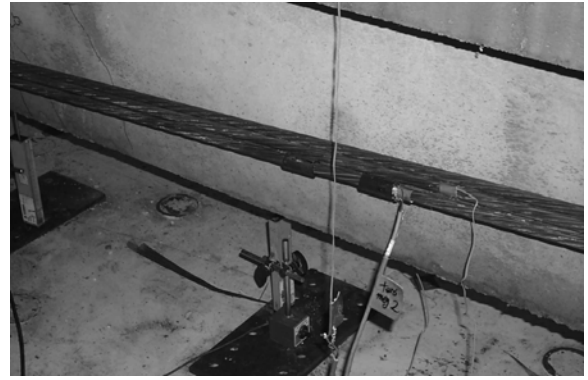


Fig. 5 Figure of measuring sensors (Tensmac, LVDT)

후부터는 1 mm씩 증분하여 변위제어방법으로 가력하였다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 균열, 항복, 슬립 및 극한하중

실험 부재들의 휩 파괴 실험 결과에서 얻어진 콘크리트에 균열이 발생된 균열하중, 인장철근의 항복하중, 강선 슬립이 발생되기 시작한 슬립하중 및 극한하중 등의 결과는 Table 3에 나타내었다. Table 3에서 알 수 있듯이 균열하중은 196.0 kN에서 313.6 kN으로 나타났으며, 초기 긴장력 (Pi)의 크기에 비례하는 것으로 나타났으며, 특히 부착강선 부재의 균열하중과의 차이가 거의 없는 것으로 나타나 균열발생 이전의 외부 강선 PSC부재는 부착 강선 PSC부재와 큰 거동 차이가 없음을 알 수 있었다.

균열이 발생한 이후에는 부착 강선 부재와 외부 강선 부재의 거동의 차이가 크을 알 수 있다. 즉, ED2-3를 제외한 부재들은 철근의 항복하중과 극한하중에 대한 외부 강선 부재의 값이 부착 강선 부재에 비해서 작게 나타

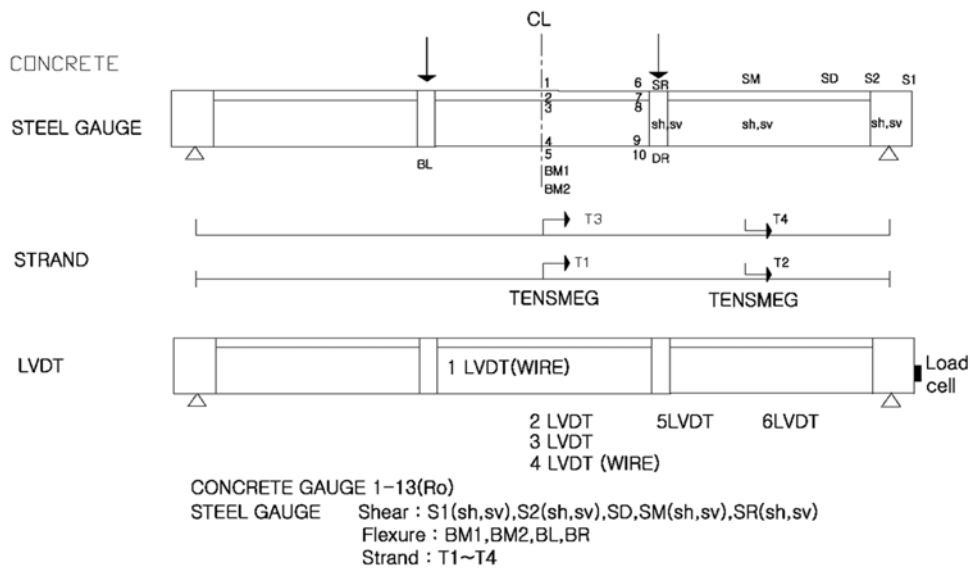


Fig. 4 Detail for measuring sensors

Table 3 Measured loads at important steps

No.	ID.	Cracking load (kN)	Yielding load (kN)	Ultimate load (kN)	Slipping load (kN)
1	ED2-0	313.6	431.2	529.2	431.2
2	ED2-1	235.2	392.0	470.4	392.0
3	ED2-2	196.0	366.5	401.8	366.5
4	ED2-3	313.6	509.6	588.0	362.6
5	BD	303.8	509.6	568.4	-

나고 있으나, 유효 긴장력이 다소 작더라도 강선량이 많으면(ED2-3부재) 비록 외부 강선일지라도 부착 강선과 유사한 것으로 나타났다. 한편 강선의 응력재분배가 일어나는 슬립하중의 경우, 외부 강선부재는 강선량의 크기에 관계없이 강선의 유효응력 크기에 비례하여 발생하는 것으로 나타났으며, 강선량이 많고, 강선의 유효 응력이 적은 ED2-3을 제외하고는 철근의 항복 근처에서 슬립이 발생하는 것으로 나타났으나, ED2-3의 경우에는 철근 항복하중 이전에 발생하는 것으로 나타났다. 이는 강선의 유효 응력이 적은 경우에는 콘크리트에 다수의 균열이 발생되고 이로 인하여 철근 항복이전에 슬립이 조기에 발생되어 균열로 인한 외부 강선의 역할이 조기에 부담하기 시작하고, 철근이 항복한 이후부터 외부 강선의 저항이 증가함을 의미하는 것으로 추정된다.

3.2 하중-처짐 관계

Fig. 6의 강선량 및 유효 응력에 따른 내부 부착 및 외부 강선 부재의 하중-변위관계 그래프를 살펴보면 콘크리트에 균열이 발생하지 않는 초기 탄성구간에서는 초기 긴장력에 영향을 받아 동일한 초기 긴장력을 가지는 부착, 외부 강선을 가진 부재들의 그래프가 거의 일치하나, 콘크리트에 균열이 발생한 이후에는 동일한 강선량을 가지는 외부 강선을 가진 부재의 처짐이 부착 강선 부재의 처짐보다 급격히 증가함을 알 수 있다. 이는 균열발생 이후 처짐이 증가함에 따라 부재 중앙부의 편심이

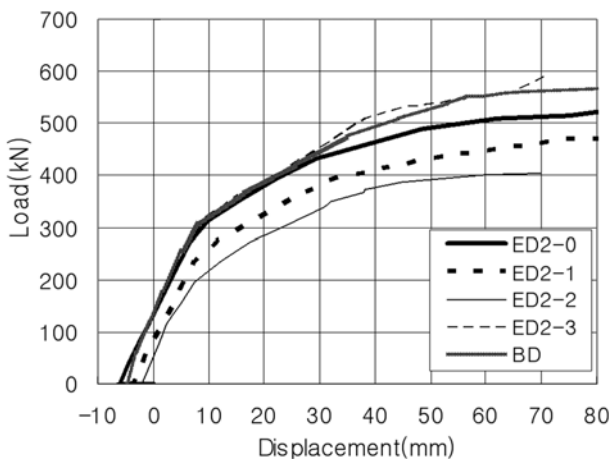


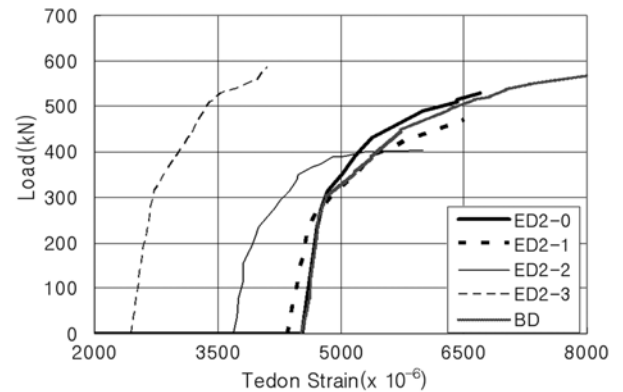
Fig. 6 Load-displacement relationship

감소하기 때문이다.^{1,2)} 또한 철근이 항복하고 최대 하중에 다다름에 따라 강선량이 많은 경우를 제외한 외부 강선 부재들은 초기 긴장력의 비율만큼 극한으로 갈수록 편심변화 효과에 의해 처짐이 더욱 크게 증가함을 알 수 있다.

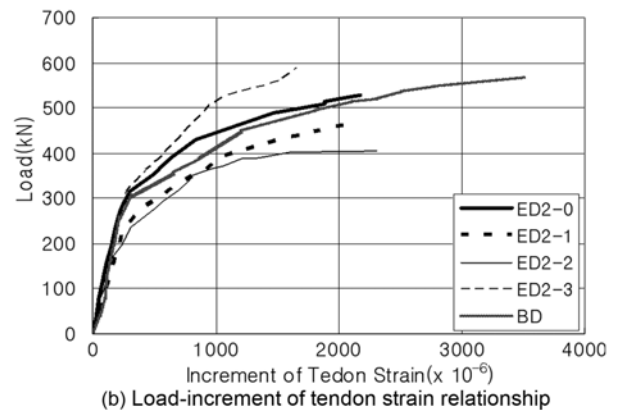
3.3 하중-강선 인장 변형을 관계

실험에서 얻어진 부착 및 외부 강선 부재의 하중-강선 변형을 관계는 Figs. 7~8에 나타내었다. Fig. 7(a)는 각 부재들의 하중-강선 변형을 관계이며, Fig. 7(b)는 각 부재들의 하중-강선 변형을 증가량 관계이다. Fig. 7에서 알 수 있듯이 부착강선을 가진 BD부재의 강선 변형을 증가량이 크게 나타났으며, 특히 철근 항복 이후의 증가량은 더욱 더 크게 나타났다. 반면 외부 강선 부재들의 경우, 하중 증가에 따른 외부 강선 변형률의 증가량은 ED2-2, ED2-1, ED2-0 및 ED2-3의 순서로 나타났다. 즉, 초기 긴장력의 크기 순서와 거의 반대의 순서로 외부 강선의 변형률이 증가한 것으로 나타났으나, 다만 ED2-3의 경우처럼 초기 긴장력이 크더라도 강선의 유효응력이 작은 경우의 강선 변형률은 강선의 유효응력이 큰 부재들 보다는 다소 작게 증가하는 것으로 나타났다.

Fig. 8은 강선량 및 긴장력이 동일한 조건인 부착강선 BD부재와 외부강선 ED2-0부재를 비교한 그림으로 역시 부착강선을 가진 BD부재의 강선 변형을 증가량이 가장



(a) Load-tendon strain relationship



(b) Load-increment of tendon strain relationship

Fig. 7 Load-tendon strain relationship

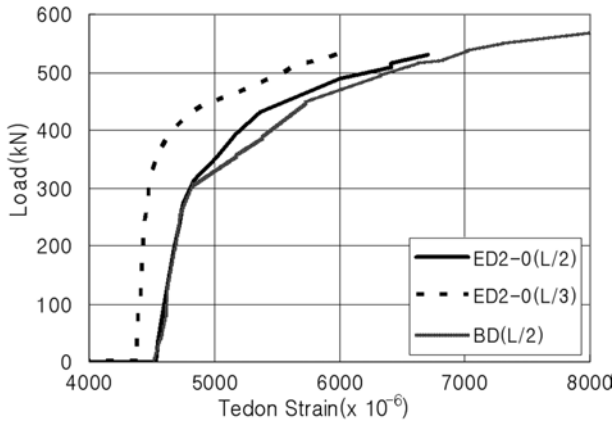


Fig. 8 Load-tendon strain relationship for BD, ED2-0

크게 나타났으며, 특히 철근 항복 이후의 증가량은 다른 외부 강선 부재보다 더욱 더 크게 나타났다. 또한 비교용으로 외부강선의 지간 1/3지점에서의 강선 변형률을 측정된 결과로서 지간 중앙부의 변형률보다는 작은 것으로 나타났으나, 철근 항복 이후 지간 중앙과 지간 1/3지점에서의 변형률 차이는 점점 줄어드는 것으로 나타났을립현상의 발생을 추정할 수 있었다.

즉, 실질적인 강선의 슬립은 철근 항복 이후 주로 발생하는 일종의 응력 재분배 현상으로 볼 수 있으며, 극한 상태에 접근할수록 강선의 변형률은 거의 같아질 것이나 계측 상의 어려움으로 차이의 감소만을 확인하였으며 거의 동일한 변형률이 발생하는 현상은 확인하지 못하였다.

3.4 균열발생 현황

실험 부재들의 휨 파괴 실험 결과에서 얻어진 콘크리트 균열 형상을 Fig. 9에 나타내었으며 대표적 형상은 Fig. 10에 나타내었다. 실험 부재들에 발생한 균열 현황에서 크게 두 가지 정도의 특징을 얻을 수 있었다. 첫 번째 특징은 부착 강선 부재에 비해서 외부 강선 부재는 발생한 균열의 개수가 적다는 것이다. 이는 외부 강선 부재는 콘크리트와 강선의 변형률이 동일하게 발생되지 않으므로 전반적인 분포의 균열이 발생하지 않은 것으로 확인되었다. 두 번째 특징은 전반적으로 외부 강선 부재에 발생한 균열의 형상이나 개수 및 진전 위치(폭) 등은 유사하나, 다만 앞의 3.3절에서 언급한 것처럼 외부 강선의 변형률 증가량이 가장 작은 ED2-2 부재에 조금 더 많은 균열의 수가 발생한 것으로 나타났다. 이는 외부 강선의 기여도가 작기 때문에 콘크리트에 발생한 휨균열의 수가 증가한 것으로 판단된다.

3.5 하중-콘크리트 압축 변형률 관계

실험 부재들에 대해서 하중에 따른 지간 중앙 상연 콘크리트에 발생한 압축 변형률을 Fig. 11에 나타내었다.

Fig. 11에서 알 수 있듯이 외부 강선 부재의 하중-콘크리트 변형률 관계는 일반적인 부착 강선 부재와 큰 차이가 없음을 알 수 있었다. 다만 극한 상태에서의 최종 콘크리트 변형률이 0.002 정도로 나타났으며 이는 외부강선 부재의 특성상 강선의 저항 능력이 작아 부재가 일찍 파괴된 것이 주원인으로 추정되며, 또한 극한 상태의 측정에 어려움도 부수적인 원인으로 추정된다.

Fig. 11에 의하면 외부 강선 부재의 콘크리트에 발생한 압축 변형률의 크기는 ED2-0가 가장 크게, ED2-2가 가장 작게 발생되었으며, ED2-1, ED2-3 부재들은 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 이 순서는 외부 강선의 긴장력 크기 순서와 일치하므로, 콘크리트의 압축변형률은 외

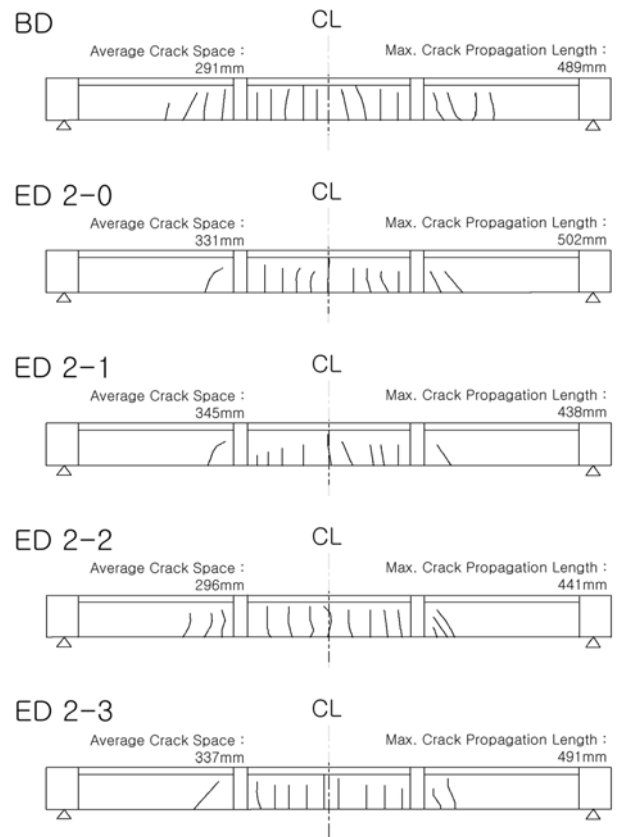


Fig. 9 Shape of crack distribution

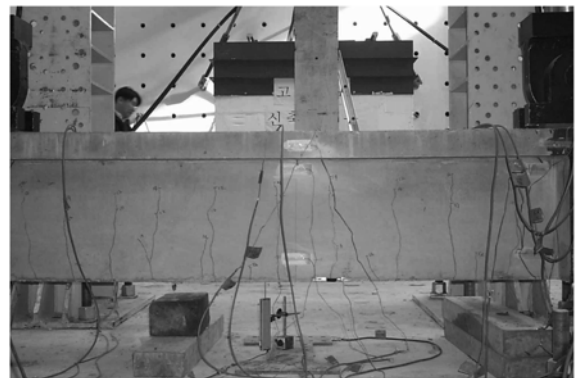


Fig. 10 Crack patterns

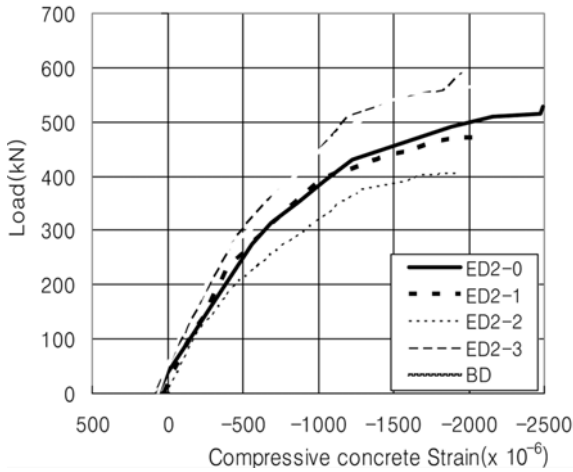


Fig. 11 Load-concrete strain relationship

부 강선의 긴장력 크기에 비례함을 확인하였다.

3.6 하중-철근 인장 변형률 관계

실험 부재들의 휨 파괴 실험 결과에서 얻어진 인장철근에 발생된 변형률과 하중 관계를 Fig. 12에 나타내었다. Fig. 12에서 알 수 있듯이 부착강선을 가진 BD부재의 인장철근 변형률이 가장 작게 나타났으며, 특히 철근 항복 이후의 증가량은 다른 외부 강선 부재보다 더욱 더 작게 나타났다. 반면 외부 강선 부재들의 경우, 하중 증가에 따른 외부 강선 변형률의 증가량은 ED2-2, ED2-1, ED2-0는 유사하며 ED2-3만 다소 작게 나타났다. 즉, 부재의 하중 저항 능력의 순서와 반대로 나타나, 부착강선 혹은 외부 강선의 기여도가 클수록 인장철근의 기여도는 반비례하게 감소하는 것을 알 수 있다.

3.7 하중-강선 슬립량 관계

실험 부재들에 설치한 와이어 형태의 LVDT를 이용하

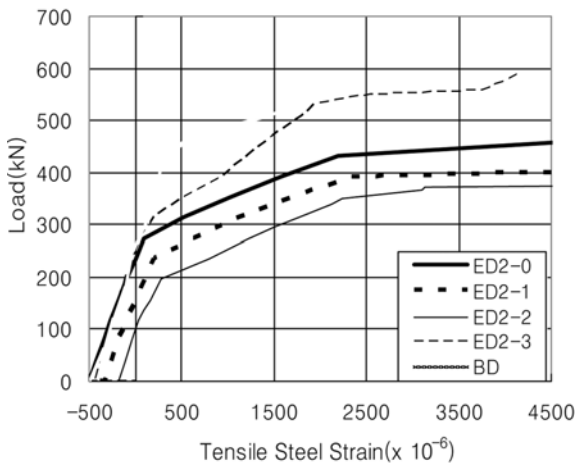


Fig. 12 Load-steel strain relationship

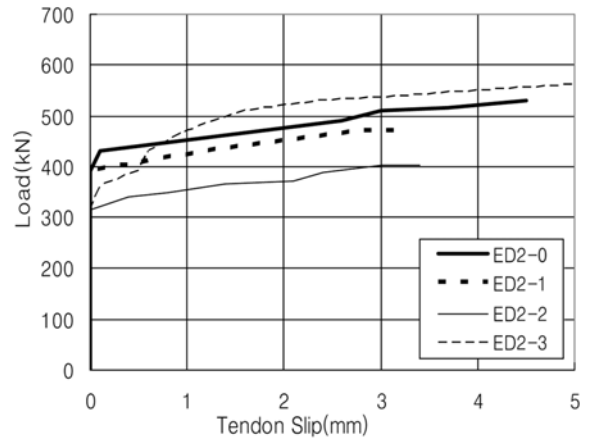


Fig. 13 Load-tendon slip relationship

여 강선 슬립현상을 측정된 결과를 Fig. 13에 나타내었다. 측정된 결과에서 알 수 있는 큰 특징은 콘크리트에 균열이 발생하기 전까지는 강선 슬립현상이 거의 없었으며, 또한 철근이 항복한 직후부터 강선 슬립량이 급격하게 증가하였고, 그 이후에는 서서히 증가하는 것으로 나타났다.

이러한 현상은 철근이 항복한 이후부터 강선의 하중 부담이 더욱 커져 중앙 강선 세그먼트와 좌우 강선 세그먼트의 응력 차이를 해소하기 위한 강선의 응력 재분배가 일어나며, 어느 정도의 강선 응력 재분배가 일어난 후 편향부가 없는 부위에서 파괴가 진행되고, 그 이후에는 슬립량이 서서히 증가하는 것으로 판단된다. 또한 부재별로 발생된 슬립량을 비교해 보면 외부 강선의 초기 힘이 클수록 많은 슬립 현상이 발생하는 것으로 나타났다.

4. 외부 강선의 극한 응력 평가

4.1 기존 설계규정과 비교

4.1.1 ACI 318 규정⁵⁾

비부착 강선의 극한응력 증가량을 결정하기 위해서 1971년 ACI규정에서는 다음 식 (1)을 제안하였다. 식 (1)은 Mattock⁶⁾이 수행한 단순지지 부재의 실험 결과에 의해 제안되었으나, Gamble과 Mojtahedi⁷⁾는 트러스요소를 이용한 이론적 접근에 의해 식 (1)의 변수인 외에 지간길이-유효깊이비(L/d_p)에도 영향을 받는 것으로 발표하였다.

$$f_{ps} = f_{pe} + 70 + \frac{f'_c}{100\rho_p} \leq f_{py} \text{ or } (f_{pe} + 400) \text{ (MPa)} \quad (1)$$

여기서, f_{pe} = 유효프리스트레스이며, f_{py} = 강선의 항복강도, f'_c = 콘크리트 압축강도이다.

Gamble과 Mojtahedi의 연구 결과에 의해 1983년에 ACI규정은 식 (1)은 지간길이-유효깊이비가 35이하의 경

우로 제한함과 동시에 지간길이-유효깊이비가 35를 초과하는 경우는 다음 식 (2)를 규정하여 현재에 이르고 있다.

$$f_{ps} = f_{pe} + 70 + \frac{f'_c}{300\rho_p} \leq f_{py} \text{ or } (f_{pe} + 210) \text{ (MPa)} \quad (2)$$

ACI-318에서 제시하고 있는 식 (1) 및 (2)의 비부착 강선의 극한 응력식은 최소 철근 부재에 설치된 비부착 강선을 가진 보를 근거로 제안된 식으로 여러 실험 결과와 잘 일치하지 않으며, 경향성도 없는 것으로 최근 연구 결과에서 나타나고 있다.^{2,8)}

4.1.2 AASHTO 규정⁹⁾

1983년의 AASHTO 규정 역시 ACI와 유사하였으나, 1994년의 규정에서는 지간길이-유효깊이비와 부착감소계수(bond reduction factor) 및 작용하중형태를 변수로 하여 다음 식 (3a)과 같이 개정하였다.

$$f_{ps} = f_{pe} + \Omega_u E_p \varepsilon_{cu} \left(\frac{d_p}{c} - 1 \right) \frac{L_1}{L_2} \leq 0.94 f_{py} \quad (3a)$$

여기서,

$$c = \frac{A_p f_{ps} + A_s f_y - A'_s f'_y - 0.85 \beta_1 f'_c (b - b_w) h_f}{0.85 \beta_1 f'_c b_w}$$

Ω_u (부착감소계수) = $\frac{1.5}{L/d_p}$: 1점 집중하중경우,

$\frac{3.0}{L/d_p}$: 2점 집중하중 또는 등분포하중경우

L/d_p = 지간길이-강선의 유효깊이비,

L_1 = 하중을 받는 지간길이, L_2 = 강선의 길이

ε_{cu} = 콘크리트 압축연단의 극한변형률 (= 0.003),

E_p = 강선의 탄성계수,

d_p = 강선의 유효깊이,

A_p 와 f_{ps} = 외부 강선의 면적과 극한응력,

A_s 와 f_y = 인장철근의 면적과 항복강도,

A'_s 와 f'_y = 압축철근의 면적과 항복강도,

f'_c = 콘크리트 압축강도,

b = 플랜지의 유효폭,

b_w = 복부 폭 및 h_f = 플랜지의 두께이다.

이러한 AASHTO의 개정은 Naaman과 Alkhairi¹⁰⁾의 연구결과에 근거한 것으로 그들은 내부 비부착 강선의 응력증가량은 f'_c/ρ_p 보다는, c/d_p , L/d_p 및 작용 하중형태에 의존하는 것으로 주장하였다. 한편, 1998년에 AASHTO는 다시 1994년 식의 단순화를 위해 $\varepsilon_{cu} = 0.003$, $\Omega_u = 3/2(d_p/L)$, $E_p = 2.1 \times 10^5 \text{ MPa}$, $L_1/L_2 = L/L_i$, $d_p/c \approx 10$, $3/2L_i = (2 + N_s)/(2L_i) = 1/l_e$ 값을 이용하여 다음 식 (3b)와 같이 개정하였다. 그러나, 본 논문에서는 좀 더 정확한 비교를 수행하기 위하여 AASHTO 1994 규정을 본

연구 실험 결과와의 비교대상으로 선정하였다.

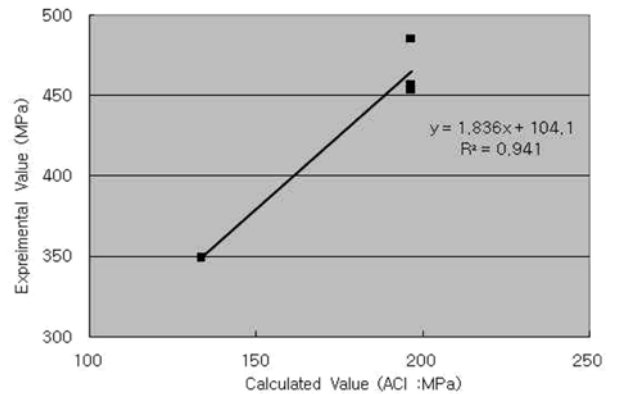
$$f_{ps} = f_{pe} + 6300 \left(\frac{d_p - c}{l_e} \right) \quad (3b)$$

4.1.3 각 규정과 실험 결과의 비교

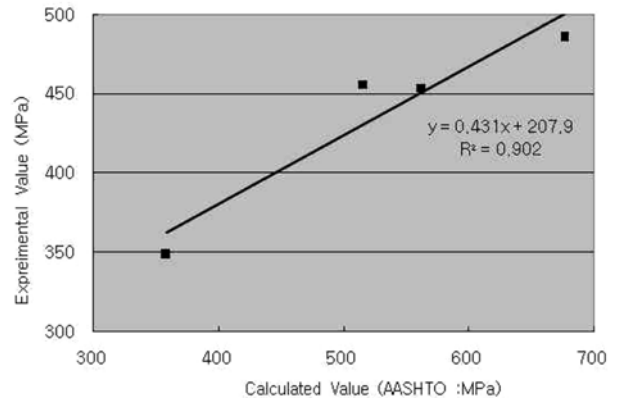
본 연구에서 수행한 실험에서 얻어진 외부 강선의 극한응력 증가량 결과와 ACI-318, AASHTO 1994에 의한 극한응력 증가량 계산결과를 다음 Table 4와 Fig. 14에 나타내었다. Table 4와 Fig. 14에서 알 수 있듯이 실험 결과와의 기존 설계식들과의 상관계수는 0.90이상으로 좋은 상관성을 가지는 것으로 나타났다. 그러나, 그 결과를 좀 더 자세히 고찰해보면, ACI-318에 의한 결과는 강선량이 다른 ED2-3부재의 경우를 제외하고는 모두 같은 결과를 나타내므로 긴장력 혹은 유효응력이 차이를

Table 4 Ultimate increment of tendon strain

ID	Test results		Predicted results	
	Increment of ultimate strain ($\times 10^{-6}$)	Increment of ultimate stress (MPa)	ACI-318 (MPa)	AASHTO 1994 (MPa)
ED2-0	2171	456	197	516
ED2-1	2160	454	197	562
ED2-2	2311	485	197	676
ED2-3	1661	349	133	359



(a) Comparison between test and ACI-318 for Δf_{ps}



(b) Comparison between test and AASHTO 1994 for Δf_{ps}

Fig. 14 Comparison of test and codes for Δf_{ps}

전혀 반영하지 못하고 있고 특히, 그 결과가 실험 결과보다 상당히 작게 나타났다. 한편 AASHTO 1994는 ACI-318과는 다르게 강선량, 초기 힘 및 유효응력 등의 변화에 적절하게 영향을 받고 있는 것으로 나타났지만 내부 비부착 강선의 실험 결과를 이용하여 부착감소계수를 결정한 이유로 외부 강선 실험 결과보다 지나치게 큰 결과를 유발하고 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 최근 들어 그 활용이 증가되고 있는 외부 강선을 가지는 프리스트레스트 콘크리트(PSC) 보의 거동 특성을 평가하기 위하여 외부강선 면적, 긴장력 등을 변수로 하여 시간 길이 7.5 m의 대형 실험 부재 5개를 제작하여 정적 휨실험을 수행하였고, 이로부터 하중-변위, 하중-강선 변형률, 균열발생 현황, 하중-콘크리트 변형률, 하중-철근 변형률 및 하중-강선 슬립량 등의 외부 강선 부재의 휨거동 특성을 얻었으며, 기존 설계식과의 비교분석을 실시하였다. 이 연구의 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 균열발생 이전의 외부 강선 PSC부재는 부착 강선 PSC부재와 큰 거동 차이를 보이지 않음을 알 수 있었다. 그러나 균열이 발생한 이후의 거동에서는 철근의 항복하중과 극한하중 모두 외부 강선 부재의 값이 부착 강선 부재에 비해서 작게 나타났다.
- 2) 콘크리트에 균열이 발생한 이후에는 동일한 강선량을 가지는 외부 강선을 가진 부재의 처짐이 부착 강선 부재의 처짐보다 급격히 증가함을 알 수 있다. 또한 철근이 항복하고 최대 하중에 다다름에 따라 강선량이 많은 경우를 제외한 외부 강선 부재들은 초기 긴장력의 비율만큼 극한으로 갈수록 편심변화 효과에 의해 처짐이 더욱 크게 증가함을 알 수 있다.
- 3) 하중-강선 변형률 관계에서 보면, 외부 강선 부재들의 경우, 하중 증가에 따른 외부 강선 변형률의 증가량은 초기 긴장력의 크기 순서와 거의 반대의 순서로 외부 강선의 변형률이 증가한 것으로 나타났으나, 다만 ED2-3의 경우처럼 초기 긴장력이 크다 할지라도 강선의 유효응력이 작은 경우의 강선 변형률은 강선의 유효응력이 큰 부재들보다는 다소 작게 증가하고 있는 것으로 나타났다.
- 4) 외부 강선 부재의 콘크리트에 발생된 압축 변형률의 크기는 외부 강선의 유효응력 크기 순서와 일치하는 것으로 나타나, 콘크리트의 압축변형률은 외부 강선의 유효응력에 비례함을 알 수 있다.
- 5) 부착강선 혹은 외부 강선의 기여도가 클수록 인장 철근의 기여도는 반비례하게 감소하는 것을 알 수 있다.
- 6) ACI-318에 의한 결과는 긴장력 혹은 유효응력이 차

이를 전혀 반영하지 못하고 있고 특히, 그 결과가 실험결과보다 상당히 작게 나타나, 지나치게 보수적인 것으로 판단된다.

- 7) AASHTO 1994는 ACI-318과는 다르게 단면적합조건의 영향을 잘 반영하고 있는 것으로 나타났지만 통계처리에 의존하는 부착감소계수의 타당성이 떨어지는 문제점을 내포하고 있다.
- 8) 이러한 이유로 본 연구진은 시간길이/유효깊이, 강선량, 초기힘, 유효응력, 콘크리트 압축강도, 편향부의 개수, 강선배치 형상 및 기존 내부 강선의 영향 등을 변수로하여 총 25개의 부재를 제작하여 휨거동 실험을 실시하였으며, 후속 논문에서는 이 부재 전체의 실험결과를 이용하여 새로운 외부강선의 극한 응력 제안식을 제안할 예정이다.

감사의 글

이 논문은 2009학년도 우석대학교 교내학술연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. 오병환, 유성원, “외부 비부착 강선을 가진 PSC 교량의 휨거동 해석기법 및 해석 프로그램 개발,” 대한토목학회 논문집, 19권, 5호, 1999, pp. 761~771.
2. 유성원, “외부 비부착 강선을 가진 프리스트레스트 콘크리트 부재의 극한 휨거동 해석,” 서울대학교, 박사학위논문, 1999.
3. 조윤구, “편향부와 강선구배 특성을 고려한 외부 프리스트레스트 콘크리트 보의 휨거동에 관한 실험적 연구,” 서울대학교, 박사학위논문, 2002.
4. Rao, P. S. and Mathew, G., “Behavior of External PS Concrete Beams with Multiple Deviators,” *ACI, Structural Journal*, Vol. 93, No. 4, 1996, pp. 387~396.
5. ACI, “Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-95),” *ACI*, 1995.
6. Mattok, A. H., Yamazaki, J., and Katula, B., “Comparative Study of Prestressed Concrete Beams, With and Without Bond,” *ACI Journal, Proceedings*, Vol. 68, No. 2, 1971, pp. 116~125.
7. Mojtahedi, S. and Gamble, W., “Ultimate Steel Stress in Unbonded Prestressed Concrete,” *J. of Structural Division, ASCE*, Vol. 104, No. ST7, 1978, pp. 1159~1165.
8. 박상렬, 양철영, 김창훈, “CFRP 긴장재를 이용한 외부보강 철근콘크리트 보의 극한 휨강도,” 콘크리트학회 논문집, 27권, 5A호, 2007, pp. 671~679.
9. AASHTO, *Standard Specifications for Highway Bridges*, 1st Edition, 1994, 1998.
10. Naaman, A. E. and Alkhairi, F. M., “Stress at Ultimate in Unbonded Post-Tensioning Tendons: Part 2 - Proposed Methodology,” *ACI, Structural Journal*, Vol. 88, No. 6, 1991, pp. 683~692.

요 약 최근 들어 외부 강선을 이용한 프리스트레스트 콘크리트구조물의 건설이 증가하고 있다. 그러나 극한거동 해석시 단면 적합조건을 이용하는 내부 부착 강선과는 다르게 외적 비부착 강선은 부재의 전체거동에 의해서 응력 증가량이 결정된다. 또한 편향부에서의 미끌림 효과와 강선의 편심 변화 효과 등이 발생하게 된다. 따라서 본 연구는 외부 강선을 가지는 프리스트레스트 콘크리트(PSC) 보의 거동 특성을 평가하기 위하여 강선량, 긴장력 등을 변수로 하여 정적 휨실험을 수행하여 외부 강선 부재의 휨거동 특성을 얻었다. 실험 결과에 의하면 균열발생 이전의 외부 강선 PSC 부재는 부착 강선 PSC부재와 거동 차이가 크지 않음을 알 수 있었다. 그러나 균열이 발생한 이후의 거동에서는 철근의 항복하중, 극한하중, 강선 응력 등이 외부 강선 부재에서의 값이 부착 강선 부재에 비해서 작게 나타나고 있다. 하중-강선 변형률 관계에서 보면, 외부 강선 부재들의 경우, 하중 증가에 따른 외부 강선 변형률의 증가량은 초기 긴장력의 크기 순서와 거의 반대의 순서로 외부 강선의 변형률이 증가한 것으로 나타났으나, 다만 초기 긴장력이 크다할지라도 강선의 유효응력이 작은 경우의 강선 변형률은 강선의 유효응력이 큰 부재들보다는 다소 작게 증가하고 있는 것으로 나타났다. 외부 강선 부재의 콘크리트에 발생된 압축 변형률의 크기는 외부 강선의 유효응력 크기 순서와 일치하는 것으로 나타나, 콘크리트의 압축변형률은 외부 강선의 유효응력에 비례함을 알 수 있다. 실험 결과와 기존의 설계식과 비교해본 결과, ACI-318에 의한 결과는 긴장력 혹은 유효응력이 차이를 전혀 반영하지 못하고 있고 특히, 그 결과가 실험 결과보다 상당히 작게 나타나, 지나치게 보수적인 것으로 판단된다. 한편 AASHTO 1994는 ACI-318과는 다르게 강선량, 초기 힘 및 유효응력 등의 변화에 적절하게 영향을 받고 있는 것으로 나타났지만 내부 비부착 강선의 실험 결과를 이용하여 작성된 이유로 외부 강선 실험 결과보다 지나치게 큰 결과를 유발하고 있는 것으로 평가된다. 이러한 이유로 외부 강선의 극한응력을 정확하게 예측할 수 있는 새로운 규정이 필요하다.

핵심용어 : 프리스트레스트 콘크리트, 외부 강선, 강선량, 긴장력