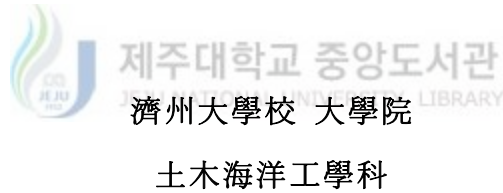


碩士學位論文

외부 프리스트레싱으로 보강한
콘크리트보의 힘 거동



愼 庸 哲

2003年 12月

외부 프리스트레싱으로 보강한 콘크리트보의 휨 거동

指導教授 朴 相 烈

愼 庸 哲

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함



愼庸哲의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 _____ (인)

委 員 _____ (인)

委 員 _____ (인)

濟州大學校 大學院

2003年 12月

Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams by External Prestressing

Yong-Chul Shin

(Supervised by Professor Sang-Yeol Park)

A thesis submitted in partial fulfillment of the
requirements for the degree of Master of
Engineering

2003. 12.

This thesis has been examined and approved.

Department of Civil & Ocean Engineering
GRADUATE SCHOOL

CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

Contents

Contents	i
List of Tables	iii
List of Figures	iv
Notation	vi
Summary	vii
I. 서 론	1
1. 연구배경	1
2. 연구목적	2
3. 연구내용	3
1) 기존문헌연구	3
2) 실험연구	3
II. 기존 연구동향 탐구	5
1. 개론	5
2. 보강재 조합에 따른 해석	7
1) 부착 프리스트레스트 콘크리트	7
2) 내부 비부착 프리스트레스트 콘크리트	7
3) 외부 비부착 프리스트레스트 콘크리트	8
4) 외부 프리스트레싱 강재로 보강된 프리스트레스트 콘크리트	8
3. 프리스트레싱 강재의 극한응력식	11
1) ACI 시방식	11
2) ACI 시방식의 확장 및 수정	11

3) Naaman식의 확장 및 수정	13
4) 극한응력 예측 제안식	14
III. 실험체 제작 및 실험	17
1. 실험체 제원	17
2. 실험변수	17
1) RC보 실험변수	18
2) PC보 실험변수	19
3. 사용재료	20
1) 콘크리트	20
2) 철근 및 PS강재	20
3) 변형계	21
4. 실험 데이터 수집	22
IV. 실험결과 및 분석	24
1. 철근 콘크리트보	24
1) 철근비의 영향	25
2) 외부 PS강재비의 영향	28
3) 지간/유효높이비의 영향	30
4) 균열 및 파괴형태	34
2. 프리스트레스트 콘크리트 보	39
1) 내부 PS강재비의 영향	40
2) 외부 PS강재비의 영향	43
3) 지간/유효높이비의 영향	45
4) 균열 및 파괴형태	49
5) 변형률 비교	54
V. 결론	55
VI. 참고문헌	57

List of Tables

Table 1.1	Experiment parameter	4
Table 3.1	Parameter for RC Beam	18
Table 3.2	Parameter for PC Beam	19
Table 3.3	Concrete specification	20
Table 3.4	Test results of tensile strength of reinforcement	21
Table 3.5	Strain gauge specification	22
Table 4.1	Summary of ultimated Load and deflection(RC Beam)	24
Table 4.2	Summary result of experiment(RC Beam)	34
Table 4.3	Summary of ultimated Load and deflection(PC Beam)	39
Table 4.4	Summary result of experiment(PC Beam)	49



List of Figures

Fig 3.1	Section view of test beam	5
Fig 3.2	Dimensions and loading layout of test beam	9
Fig 3.3	Jacking instrument	10
Fig 3.4	Real view of test beam	12
Fig 3.5	Arrangement for data acquisition	12
Fig 4.1	Increased ultimate stress of external PS steel and reinforcing index of re-bar	13
Fig 4.2	Load-deflection curves with different re-bar ratio	15
Fig 4.3	Load-strain of external PS steel curves with different re-bar ratio	16
Fig 4.4	Deflection-strain of external PS steel curves with different re-bar ratio	17
Fig 4.5	Increased ultimate stress of external PS steel and reinforcing index of external PS steel	18
Fig 4.6	Load-deflection curves with different external PS steel reinforcement ratio	21
Fig 4.7	Load-strain of external PS steel curves with different external PS steel ratio	22
Fig 4.8	Deflection-strain of external PS steel with different external PS steel ratio	24
Fig 4.9	Increased ultimate stress of external PS steel and span/depth ratio	25
Fig 4.10	Load-deflection curves with different span/depth ratio	27
Fig 4.11	Load-strain of external PS steel curves with different span/depth ratio	31

Fig 4.12	Deflection-strain of external PS steel with different span/depth ratio	33
Fig 4.13	Comparison of measured and calculated moment	35
Fig 4.14	Increased ultimate stress of external PS steel and reinforcing index of internal PS steel	37
Fig 4.15	Load-deflection curves with different internal PS steel ratio	39
Fig 4.16	Load-strain of external PS steel curves with different internal PS steel ratio	41
Fig 4.17	Deflection-strain of external PS steel curves with different internal PS steel ratio	44
Fig 4.18	Increased ultimate stress of external PS steel and reinforcing index of external PS steel	44
Fig 4.19	Load-deflection curves with different external PS steel reinforcement ratio	45
Fig 4.20	Load-strain of external PS steel curves with different external PS steel ratio	46
Fig 4.21	Deflection-strain of external PS steel with different external PS steel ratio	46
Fig 4.22	Increased ultimate stress of external PS steel and span/depth ratio	47
Fig 4.23	Load-deflection curves with different span/depth ratio	50
Fig 4.24	Load-strain of external PS steel curves with different span/depth ratio	51
Fig 4.25	Deflection-strain of external PS steel with different span/depth ratio	52
Fig 4.26	Comparison of measured and calculated moment	53
Fig 4.27	Comparison of strain RC beam and PC beam	54

Notation

- $A_{ps(b)}$ = 부착 프리스트레스트 보강재의 단면적, cm^2
 $A_{ps(u)}$ = 비부착 프리스트레스트 보강재의 단면적, cm^2
 c = 압축연단에서 중립축까지의 거리, cm
 d_p = 압축연단에서 프리스트레싱 보강재의 도심까지의 거리, cm
 d_s = 인장철근의 유효깊이, cm
 f_{ck} = 콘크리트의 설계기준강도, kgf/cm^2
 f_y = 철근의 설계기준항복강도, kgf/cm^2
 f_{pe} = 프리스트레스트 보강재의 유효응력, kgf/cm^2
 $f_{ps(b)}$ = 공칭강도 발휘시 부착 프리스트레스트 보강재의 인장응력, kgf/cm^2
 $f_{ps(u)}$ = 공칭강도 발휘시 비부착 프리스트레스트 보강재의 인장응력, kgf/cm^2
 f_{pu} = 프리스트레싱 긴장재의 설계기준 인장강도, kgf/cm^2
 f_{py} = 프리스트레싱 긴장재의 설계기준 항복강도, kgf/cm^2
 M_n = 단면의 공칭 휨모멘트 강도, $tonf \cdot m$
 M_u = 단면의 계수모멘트, $tonf \cdot m$
PC = Prestressed Concrete
RC = Reinforced Concrete
 α = 응력수정계수로 실험 등을 통하여 통계적으로 구하는 계수, 무차원량
 β = 응력수정계수로 실험 등을 통하여 통계적으로 구하는 계수, 무차원량
 ν_p = PS강재의 종류에 따른 계수
 μ_p = PS 강재비
 $\mu_{p(ex)}$ = 외부 PS 강재비
 μ_u = 응력 평준화 계수
 μ_u = 부착감소계수
 ω = 인장철근의 강재지수
 ω' = 압축철근의 강재지수

Summary

This thesis is external prestressing one of the repair and reinforcement method. What is external prestressing, in a word, external prestressing steel was installed reinforced method by outside members. But we look into KCI Code equations, evaluate overestimation or underestimation the unbonded prestressing tendon because we can not consider internal bonded tendon. In the experimental study, steel reinforced concrete beams(RC 12 beams, PC 12 beams) strengthened using external prestressing steel are tested with the test parameters having a large effect on the ultimate stress of prestressing steel. The test parameters includes reinforcing bar(PC beam : internal prestressing steel reinforcement ratios) and external prestressing steel reinforcement ratios, and span to depth ratio. Ultimately, we proposed prestressing steel stress predicting equation in RC and PC beam by external unbonded tendons. The proposed predicting equation takes rationally the effect of internal reinforcing bars into consideration as a function of prestressing steel depth to neutral depth ratio. The test results are analyzed to confirm the applicability the proposed equation for predicting the stress of external prestressing tendon.

I. 서론

1. 연구배경

우리나라는 1970년대에 들어 급속한 경제발전을 이루어 사회간접 인프라를 빠른 속도로 구축하게 되었다. 이러한 경제성장에 근간이 되는 도로나 항만, 교량들도 많이 건설이 되어오고 있다. 하지만 기존에 건설된 교량들이 트럭 교통량의 증가와 트럭의 대형화, 부실설계 및 부실시공 등의 요인 외에 콘크리트 균열의 확산, 염해, 콘크리트 중성화에 의해 구조부재인 철근의 부식, 노화로 인한 구조물의 내하력 저하, 내구성, 방수성의 저하, 교통량의 증가에 따라 설계수명 이전에 적절한 사용성(serviceability)과 안전성(safely)을 빠르게 잃어가고 있는 처지에 놓여 있다. 이러한 교량의 내하력 감소는 성수대교 붕괴 참사의 경우를 생각해 보면 알 수 있듯이 사회적으로도 큰 문제가 되고 있다.

이러한 교량의 내하력 감소를 해결하기 위한 방법으로,

기존 교량을 철거하여 새로운 교량으로 교체하는 방법과 기존 교량을 철거하지 않고 적절한 방법으로 보수, 보강하는 방법이 있다. 그러나 첫 번째 방법은 건설비용에 따른 경제적인 문제와 늘어나는 교통량에 대한 대책 마련, 인근 도로의 교통체증 등 많은 문제를 포함하고 있는 실정이다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위해 적절한 보수, 보강 공법에 대한 개발이 필요하다.

지금까지 많은 공법이 연구되어 왔는데 그중 유용한 보강공법 중의 하나는 외부 프리스트레싱(external prestressing)을 이용하는 방법이 있다. 외부 프리스트레싱 공법은 말 그대로 프리스트레싱 강재를 부재단면 밖에 설치하여 구조물을 보강하는 방법인데, 최근 들어 기존 교량의 보강뿐만 아니라 추후 보강의 필요성에 대비하기 위하여 신설교량에도 사용하고 있다. 기존부재에 외적 프리스트레싱을 부여함으로써 부재에 발생하고 있는 인장응력을 감소시켜 균열을 복귀시킬 뿐만 아니

라 압축응력을 부여하여 휨모멘트, 전단력, 축력의 증가로 구조물의 내력 및 강성의 증가 등을 기대할 수 있는 보강공법이다. 이렇게 외부 프리스트레싱 공법의 장점을 요약하면,

첫째, 시공이 간단하여 강재의 설치가 매우 용이하다.

둘째, 프리스트레싱 강재가 외부에 노출되어 있어서 강재의 상태를 파악하기가 쉬워 부식 등의 이유로 강재의 하자 발생시 대체가 용이하다.

셋째, 기타 보강공법에 비해 보강효과가 현저하게 크고, 보강정도를 조정하기 쉽다.

위와 같이 외부 프리스트레싱 공법의 장점을 들 수 있다.

그러나 외부 프리스트레싱 보강공법이 시공의 단순성이나 경제적인 이유로 선호되지만 외부 프리스트레싱 강재로 보강된 콘크리트보의 극한상태에서의 휨모멘트 강도 예측에 관한 설계기준은 불행하게도 아직까지 마련되어 있지 못하다. 즉, 현재 우리나라의 콘크리트 구조설계기준에 따르면 각각 독립적으로 분리된 내부 부착 프리스트레싱 강재의 극한 응력 예측식과 비부착 프리스트레싱 강재의 극한 응력 예측식을 사용하여야 한다. 여기서 눈여겨볼 대목은 각각의 응력 예측식이 상호간 즉, 내부 부착 프리스트레싱 강재나 외부 비부착 프리스트레싱 강재의 영향을 전혀 고려하고 있지 못하는 맹점이 있다. 따라서 본 연구에서는 외부 프리스트레싱 콘크리트보나 철근콘크리트보의 극한 휨 해석모델을 제시하고 이를 실험결과와 비교, 검토함으로써 실제 설계에 적용할 수 있는 합리적이고 단순한 해석 응력예측식을 제안하고자 한다.

2. 연구목적

앞서 언급했듯이 현행 시방서 규정에 나온 예측식은 상호간의 영향(내부 부착 프리스트레싱 강재와 외부 비부착 프리스트레싱 강재의 영향)을 전혀 고려하고 있지 못하고 있다. 따라서 본 연구에서는 철근, 내부 및 외부 프리스트레싱 강재를 갖는

프리스트레스트 콘크리트보에서 상호간의 영향이 있음을 확인하고, 나아가서 비부착 강선의 극한응력에 대한 제안식의 검증과 경향성을 파악하는 것이다. 이를 위하여 프리스트레싱 종류에 따라 독립적인 기존의 해석 모델을 통합하여 서로 다른 종류의 프리스트레싱 강재를 갖는 콘크리트보의 해석에 합리적인 해석 모델을 제공함에 있다. 여기서, 제안된 해석모델은 극한상태에서의 내부 및 외부 프리스트레싱 강재의 응력예측과 휨모멘트 강도 예측을 주목적으로 한다.

따라서 본 연구의 목적은 서로 다른 종류의 프리스트레싱 강재(철근, 내부 부착과 외부 비부착 등)를 함께 갖는 부재의 거동을 정확히 예측하여 제안식을 도출하여 보다 실용적이고 경제적인 콘크리트 부재를 설계하는 것이다. 더 나아가 극한 휨 거동에 미치는 영향인자들에 대한 해석을 가능하게 하여 구조물의 용도, 하중조건, 시공능력 등을 고려한 강재들의 최적조합으로 보다 경제적이고 실용적인 콘크리트 부재를 설계, 시공할 수 있는 근거를 제공할 수 있다.

3. 연구 내용



1)기존문헌연구

기존문헌연구와 해석 모델개발을 위해 참고하였던 자료는 참고문헌 목록에 수록하였고, 기존문헌연구는 이제까지 여러 연구자들에 의해 제안되었고, ACI Code, Candian Code, Euro Code 등에서 사용하고 있는 부착 및 비부착 프리스트레싱 강재의 극한 응력 예측식과 극한 휨 해석 방법을 철근, 부착 및 비부착 강재의 영향을 함께 고려할 수 있는 통합모델의 개발을 염두에 두고 분석하여 새로운 통합해석 모델의 아이디어를 찾아 극한응력 예측식과 해석방법을 개발하여 그의 합리성과 적용성을 확인한다.

2)실험연구

본 실험에서는 현행 콘크리트 구조설계기준에서 영향을 고려하고 있지 못하고 있는, 즉 철근, 부착 및 비부착 강재의 영향을 함께 고려할 수 있도록 실험변수를

선정하여 실험을 실시하였고, 실험 콘크리트보는 T형 단면을 가진 단순보로써 4점 하중재하를 변위 제어(displacement control) 방식으로 재하하였다. 각각의 실험체로부터 도출할 수 있는 정보는 다음과 같다.

- ① 하중과 처짐 : Load cell, 변위계(LVDT)
- ② 철근, 내부 및 외부프리스트레싱 강재의 응력 : 강제용 strain gauge
- ③ 콘크리트의 변형률 : 콘크리트용 strain gauge
- ④ 균열 : 일정한 하중주기에 따른 균열 표시

그리고 실험을 행할 실험변수로는 기존연구를 바탕으로 가능성 있는 변수를 선정하였는데 실험변수는 Table 1.1과 같다.

Table 1.1 Experiment parameter

Reinforced with External Unbonded Tendon	
RC beam	PC beam
Re-bar ratio(ρ_s)	Internal PS steel ratio(ρ_p)
External PS steel ratio($\rho_{p(ex)}$)	External PS steel ratio($\rho_{p(ex)}$)
Length/depth ratio(L/d_p)	Length/depth ratio(L/d_p)

Ⅱ. 기존 연구동향 탐구

1. 개론

외부 프리스트레싱(external prestressing)은 기존 콘크리트 교량의 보강에 가장 적합한 기술 중의 하나이며,¹⁶⁾ 특히 시공의 용이성과 경제적인 이유로 기존 콘크리트 구조물의 보강에 가장 널리 쓰이고 있는 공법중의 하나이다.¹¹⁾ 외부 프리스트레싱 보강공법은 프리스트레싱 강재를 부재단면 밖에 설치하여 보강하는 방법인데, 근래에는 기존 교량의 보강뿐만 아니라 추후 보강의 필요성에 대비하기 위하여 신설교량에도 사용되고 있다. 여기서 보강이라 함은 극한상태에서 부재의 공칭강도를 증가시켜 안전성을 높이거나 사용하중 하에서 변형(균열의 크기, 처짐 등)의 정도를 감소시킴으로써 사용성을 향상시키는 것을 의미한다. 외부 프리스트레싱 보강공법의 장점은 크게 세 가지로 첫째는 시공의 단순성으로 강재 설치가 매우 용이하다. 둘째는 프리스트레싱 강재가 외부에 노출되어 강재의 상태를 점검하기 쉽고, 부식이나 기타 이유로 강재에 하자가 발생할 경우 대체가 가능하다. 셋째는 다른 공법에 비해 보강효과가 매우 크고, 보강 정도를 조정하기 쉬운 점이다.

구조적으로 외부 프리스트레싱으로 보강된 철근 콘크리트 보나 프리스트레스트 콘크리트 보는 외부 비부착 강재를 가진 부분 프리스트레스트 콘크리트 보로 분류될 수 있는데, 이 부재는 철근, 내부 부착 프리스트레싱 강재 및 외부 비부착 프리스트레싱 강재로 보강되어 있다.¹²⁾ 그러나 이러한 다른 종류의 강재를 조합하여 사용하는 것은 부재의 해석과 설계를 보다 복잡하고 어렵게 만든다. 비록 외부 프리스트레싱 보강공법이 시공의 단순성이나 경제적인 이유로 선호되지만 외부 프리스트레싱 강재로 보강된 콘크리트 보의 휨모멘트 강도 계산을 위한 프리스트레싱 강재의 극한응력 예측식은 아직까지 우리나라 콘크리트 구조 설계기준¹⁷⁾이나 미국 ACI 시방서¹⁾에 마련되어 있지 못하다. 두 시방서의 응력 예측식은 그 내용에 있어

서 단위계만 틀릴 뿐 거의 동일하다.

이제까지 외부 비부착 프리스트레싱 강재로 보강된 내부 부착 프리스트레스트 콘크리트 보의 극한상태에서의 해석방법은 각각의 독립된 응력 예측식을 사용하여 내부 및 외부 프리스트레싱 강재의 응력과 인장력을 계산하고 이를 합한 총 인장력으로 단면해석을 실시하여 극한 휨 모멘트 강도를 구하였다. 여기서 콘크리트 구조설계기준이나 ACI 시방서의 내부 및 외부 프리스트레싱 강재의 극한응력식은 한 가지 종류의 프리스트레싱 강재만 사용하였을 때의 예측식으로 이를 철근과 내부 부착 강재 그리고 외부 비부착 강재를 함께 갖는 콘크리트 보에 적용하는 것은 적합하지 않다. 왜냐하면 내부 프리스트레싱 강재의 극한응력은 철근과 외부 프리스트레싱 강재의 영향을 받으며, 또한 외부 프리스트레싱 강재의 극한응력 역시 철근과 내부 프리스트레싱 강재의 영향을 받기 때문이다.

Du와 Tao,⁴⁾ Campbell과 Chouinard²⁾는 최소 철근량 이상을 갖는 비부착 프리스트레스트 콘크리트 보에서 비부착 프리스트레스트 강재의 극한응력은 철근의 양이 증가함에 따라 감소한다는 사실을 실험연구로부터 확인하였고, 철근의 영향을 포함한 총 보강지수가 극한응력 예측에 합리적인 변수임을 주장하였다. 또한 Canada 시방서 CAN3-A23.3-M843)은 비부착 프리스트레싱 강재의 극한응력은 텐던과 중립축의 깊이 차의 함수로 표현하고 있다.

한편, 외부 비부착 프리스트레싱 강재로 보강된 콘크리트 보는 비부착 문제뿐만 아니라 보의 변형에 따른 편심변화와 텐던 선형변화 지지점에서의 마찰력 집중 문제를 갖는다. 편심변화는 보의 변형이 비선형임에도 텐던의 모양은 각 지지점 사이에서 직선을 이루기 때문이다. 텐던의 마찰력은 외부 텐던의 경우 중간 지지점에서의 갑작스런 선형변화에 따른 높은 마찰력에 의해 프리스트레싱 응력이 감소될 수 있다.

2. 보강재 조합에 따른 해석

1) 부착 프리스트레스트 콘크리트

부착 프리스트레싱 강재와 재래 철근을 갖는 보의 해석은 프리스트레싱 강재나 철근이 주위의 콘크리트와 완전 부착되어 있다는 가정에 의하여 비교적 간단하다. 예로서 철근 및 부착 프리스트레스트 콘크리트 보에 있어서 내부 힘과 모멘트 평형방정식으로 중립축의 위치를 찾고 공칭 모멘트강도를 계산한다. 대부분의 저보강 철근 콘크리트 단면에서는 철근의 응력은 항복응력으로 취한다. 그러나 부착 프리스트레스트 콘크리트 보의 정확한 해석을 위해서는 많은 노력이 든다. 최대 모멘트 단면에서 콘크리트와 프리스트레싱 강재의 응력을 구하기 위해서는 두 개의 평형방정식 뿐만 아니라 변형률 적합조건식을 필요로 한다. 이는 프리스트레싱 강재와 콘크리트의 성질에 대한 지식을 전제로 비선형 해석이나 유사-비선형 해석을 요구한다.⁹⁾

한편, 이러한 복잡한 해석 대신에 극한상태에서 부착 프리스트레싱 강재의 응력을 예측하는 여러 실험식이 여러 연구자에 의해 소개되고 있으며 ACI 시방서나 Canadian 시방서에서도 이러한 응력 예측 실험식을 채택하고 있다.^{1,3,6,7)} 이러한 실험식은 변형 적합조건 관계식을 대체하여 공칭 모멘트 강도 계산을 매우 단순화하였다.

2) 내부 비부착 프리스트레스트 콘크리트

프리스트레싱 강재가 콘크리트에 부착되어 있지 않을 때에는 극한하중 상태에서 보의 휨 거동 해석은 어려움에 부딪힌다. 이 경우 프리스트레싱 강재와 주위 콘크리트의 완전부착 가정은 더 이상 유효하지 않게 되어, 보의 변형은 단면종속(section dependent)이 아니라 부재종속(member dependent)이 된다. 완전부착 가정을 사용할 수 없음은 많은 연구자들로 하여금 실험 결과들을 곡선추정(curve fitting)함으로써 문제를 해결하게끔 이끌었다. 이는 그들로 하여금 극한상태에서 비부착 프리스트레싱 강재의 응력을 실험식을 기초로 예측하였고,^{4,8,10,14,15)} ACI 시

방서도 비부착 프리스트레싱 강재의 극한응력을 예측하는데 실험식을 채용하고 있다.¹⁾ 그러나 이 모델은 전 하중 단계의 모멘트-곡률 관계를 얻지 못하는 단점을 가지고 있다. 그 후 Naaman이 부착감소계수의 개념을 이용한 모델이 제안되어,¹¹⁾ 선형 탄성 균열단면의 가정 하에 모멘트-곡률 관계의 예측을 가능하게 하였다. 우리나라에서 비부착 강재의 극한응력과 해석방법에 대한 최근의 연구는 이종윤의²⁰⁾와 임재형의²⁵⁾에 의한 것이 있다.

3)외부 비부착 프리스트레스트 콘크리트

외부 비부착 프리스트레스트 콘크리트 보는 프리스트레싱 텐던을 부재단면 밖에 설치하는 보이다. 외부 프리스트레스트 보는 내부 비부착 프리스트레스트 보의 문제뿐만 아니라 보의 변형에 따른 편심변화와 텐던 마찰력의 deviator에서의 집중문제를 가진다. 편심변화는 보의 변형이 비선형임에도 텐던의 모양은 각 deviator 사이에서 직선을 이루기 때문이다. 텐던의 마찰력은 내부 비부착의 경우 텐던의 모양이 포물선이나 직선으로 이루어져 있고 그리스 등으로 충전되어 마찰력을 무시할 수 있으나, 외부 텐던의 경우 deviator에서의 갑작스런 선형변화에 따른 높은 마찰력에 의해 프리스트레싱 응력이 감소될 수 있다. 이러한 우리나라에서도 외부 비부착 프리스트레싱 강재의 극한응력과 해석방법에 대한 연구들이 있다.^{18,19)}

4)외부 프리스트레싱 강재로 보강된 프리스트레스트 콘크리트

아쉽게도 현재까지 내부 부착 프리스트레싱 강재와 외부 비부착 프리스트레싱 강재를 함께 갖는 콘크리트 보의 극한 휨 거동 해석을 위한 공인된 모델은 없으며 그 연구 또한 매우 드물다. 그 중 Harajli는 철근 콘크리트 보와 프리스트레스트 콘크리트 보를 외부 프리스트레싱으로 보강하여 실험하였고, ACI 시방서의 부착 강재 응력 예측식만 일부 수정하여 극한 휨 모멘트 강도를 실험결과와 비교하였다.⁵⁾

이제까지 외부 프리스트레스트 강재로 보강된 내부 부착 프리스트레스트 콘크리트 보의 극한상태에서의 해석방법은 각각의 응력 예측식을 독립적으로 사용하여 내부 부착 및 외부 비부착 강재의 응력을 계산하고 이를 합하여 총 인장력으로 하는 단면해석으로 극한 휨 모멘트 강도를 예측하였다. 그러나 여기에서 가장 큰 문

제점은 각각의 응력 예측식은 각각의 프리스트레싱 강재 종류만 독립적으로 가질 때의 예측식으로 이를 내부 부착 강재와 외부 비부착 강재를 함께 사용하는 콘크리트 보의 해석에 사용하는 것이 적합하지 않다는 것이다. 왜냐하면 부착 프리스트레싱 강재의 극한 응력은 극한상태에서 외부 프리스트레싱 정도에 따라 영향을 받으며, 외부 프리스트레싱 강재의 극한응력 역시 내부 프리스트레싱 정도에 영향을 받기 때문이다.

위와 같은 사실은 ACI 시방서에서 채택하고 있는 부착 프리스트레싱 강재와 비부착 프리스트레싱 강재의 극한응력에 관한 예측 실험식을 살펴보면 이해할 수 있다. ACI 시방서에 따른 프리스트레싱 강재의 극한응력은 다음과 같다.

① 부착 프리스트레싱 강재의 극한응력 :

$$f_{ps} = f_{pu} \left[1 - \frac{\gamma_f}{\beta_1} \left\{ \rho_p \frac{f_{pu}}{f'_c} + \frac{d_s}{d_p} (\omega - \omega') \right\} \right]$$

② 비부착 프리스트레싱 강재의 극한응력 :

$$\frac{L}{d_e} \leq 35 \text{ 일 때,}$$

$$f_{ps} = f_{pe} + 700 + \frac{f'_c}{100\rho_p} < f_{py} \quad \text{or} \quad f_{pe} + 4,000 \quad (\text{kg/cm}^2)$$

$$\frac{L}{d_e} > 35 \text{ 일 때,}$$

$$f_{ps} = f_{pe} + 700 + \frac{f'_c}{300\rho_p} < f_{py} \quad \text{or} \quad f_{pe} + 2,100 \quad (\text{kg/cm}^2)$$

(f_{pe} : 유효 프리스트레스, f_{py} : 강선의 항복강도, f'_c : 콘크리트의 압축강도)

위 식들을 살펴보면 부착 강재와 비부착 강재의 응력 예측식은 강재비의 함수로 되어 있는데 이는 강재량에 따른 인장력의 크기에 영향을 받는 중립축의 위치 변화에 기인하고 있다. 따라서 외부 프리스트레싱 강재로 보강된 부착 프리스트레스트 콘크리트 보에서 각각의 식을 독립적으로 사용하고 이를 합하여 총 인장력을 구한

다면 이는 ACI 공식을 기준으로 볼 때, 총 인장력을 과대평가하는 결과를 가져온다. 따라서 각각의 프리스트레싱 강재의 극한 응력 예측식은 다른 편, 즉, 내부 부착 프리스트레싱 강재나 외부 비부착 프리스트레싱 강재의 보강정도에 따라 달라져야 한다.

따라서 극한 휨 해석모델은 외부 프리스트레싱 강재를 함께 사용하는 철근 콘크리트 보나 프리스트레스트 콘크리트 보의 극한 휨 모멘트 강도를 계산하기 위하여 서로 다른 종류의 프리스트레싱 효과를 통합적으로 고려한 극한 응력 예측식과 해석방법을 포함한다. 따라서 이 해석모델은 다음과 같은 보강재(reinforcement) 조합을 갖는 콘크리트 보, 즉, ① 외부 프리스트레싱으로 보강된 철근 콘크리트 보, ② 외부 프리스트레싱으로 보강된 프리스트레스트 콘크리트 보, ③ 외부 프리스트레싱으로 보강된 부착 부분 프리스트레스트 콘크리트 보에 가능하다. 또한 제안하고자 하는 해석 모델은 직사각형 보나 플랜지를 가진 보 등에도 적용될 수 있는 일반적인 합리적이고 되도록 단순한 해석 방법을 제시하고자 한다.

다음 3절의 연구결과는 외부 프리스트레싱 강재로 보강하거나 처음부터 외부 프리스트레싱 강재를 일부 갖는 철근콘크리트 보나 프리스트레스트 콘크리트 보, 혹은 부분 프리스트레스트 콘크리트 보에 있어서 극한상태에서의 각 프리스트레싱 강재의 극한응력을 예측하고자 기존의 독립된 시방식이나 제안식을 서로 다른 강재 종류사이의 상호 영향을 고려하기 위하여 확장, 수정하여 새로운 응력 예측식을 제안하였다. 이를 위하여 콘크리트 구조 설계기준과 같은 내용의 ACI 시방식을 이용한 각 프리스트레싱 강재의 예측응력과 제안식에 의한 예측응력을 Harajli⁵⁾의 실험으로부터 얻어진 계측응력과 비교하여 그 합리성과 적용성을 검토하였다.

3. 프리스트레싱 강재의 극한응력식

1) ACI 시방식

(1) 부착 프리스트레싱 강재의 극한응력 :

$$f_{ps} = f_{pu} \left[1 - \frac{\gamma_p}{\beta_1} \left\{ \rho_p \cdot \frac{f_{pu}}{f'_c} + \frac{d_s}{d_p} (\omega - \omega') \right\} \right] \quad (1)$$

(2) 비부착 프리스트레싱 강재의 극한응력 :

$\frac{L}{d_e} \leq 35$ 일 때 :

$$f_{ps} = f_{pe} + 10,000 + \frac{f'_c}{100\rho_p} < f_{py} \quad \text{or} \quad f_{pe} + 60,000 \quad (\text{psi}) \quad (2)$$

$\frac{L}{d_e} > 35$ 일 때 :

$$f_{ps} = f_{pe} + 10,000 + \frac{f'_c}{300\rho_p} < f_{py} \quad \text{or} \quad f_{pe} + 30,000 \quad (\text{psi}) \quad (3)$$

2) ACI 시방식의 확장과 수정

부착 및 비부착 프리스트레싱 강재의 극한응력에 대한 독립된 ACI 시방식 (1), (2) 혹은 (3)을 살펴보면 모두 강재비의 함수로 되어 있는데, 이는 강재량에 따른 인장력과 강재 깊이의 함수임을 뜻한다. 또한 인장력은 중립축의 깊이를 결정할 수 있어 강재의 극한응력은 중립축의 깊이와 강재 깊이의 함수로 나타낼 수 있다. 다음은 그 과정을 설명하고 있다.

부착 프리스트레싱 강재의 극한응력식 (1)을 인장력의 항으로 나타내면 다음과 같으며,

$$f_{ps(b)} = f_{pu} \left[1 - \frac{\gamma_p}{\beta_1} \left\{ \frac{A_{ps(b)} \cdot f_{pu(b)} + A_s \cdot f_y - A_s' \cdot f_y}{b \cdot d_{p(b)} \cdot f'_c} \right\} \right] \quad (4)$$

비부착 프리스트레싱 강재의 극한응력식 (2)를 인장력의 항으로 나타내면 아래

와 같다.

$$f_{ps(ub)} = f_{pe} + 700 + \frac{f_c'}{100 \left(\frac{A_{ps(u)} \cdot f_{py(u)}}{b \cdot d_{p(u)} \cdot f_{py(u)}} \right)} \quad (5)$$

위 식들을 살펴보면 프리스트레싱 강재의 극한응력 시방식은 부착 프리스트레싱 강재의 경우 자신과 철근, 비부착 프리스트레싱 강재의 경우 자신만에 의한 인장력의 함수로 표시되어 있다. 따라서 외부 프리스트레싱 강재로 보강된 부착 프리스트레스트 콘크리트 보에서 위와 같은 각각의 독립식을 사용한다면, ACI 시방식의 기준으로 볼 때 각 강재의 극한응력을 높게 평가하여 결국 공칭 휨 모멘트 강도를 높게 평가하는 결과를 가져온다. 그러므로 외부 프리스트레싱 강재로 보강된 콘크리트 보에서 각 프리스트레싱 강재의 극한응력은 다른 종류의 강재 보강정도에 따라 달리 계산되어야 할 것이다. 따라서 외부 프리스트레싱 강재를 갖는 콘크리트 보에서 부착 프리스트레싱 강재의 응력은 비부착 외부 프리스트레싱 강재의 영향을 고려하여 다음과 같이 확장, 수정하였다.

$$f_{ps(b)} = f_{pu} \left[1 - \frac{\gamma_p}{\beta_1} \left(\frac{A_{ps(b)} \cdot f_{pu(b)} + A_{ps(u)} \cdot f_{py(u)} + A_s \cdot f_y - A_s' \cdot f_y}{b \cdot d_{p(b)} \cdot f_c'} \right) \right] \quad (6)$$

같은 내용과 방법으로 비부착 강재의 극한응력은 철근과 부착 프리스트레싱 강재의 영향을 고려하여 다음과 같이 확장, 수정하였다.

$$f_{ps(u)} = f_{pe} + 700 + \frac{f_c'}{100 \left(\frac{A_{ps(b)} \cdot f_{pu(b)} + A_{ps(u)} \cdot f_{py(u)} + A_s \cdot f_y - A_s' \cdot f_y}{b \cdot d_{p(u)} \cdot f_{py(u)}} \right)} \quad (7)$$

위의 각 수정식에서 부착 프리스트레싱 강재의 응력과 비부착 강재의 응력은 보수적으로 최대한계값을 사용하였다.

위 식들을 중립축의 위치와 강재 깊이의 함수로 간단히 나타내면,

① 부착 프리스트레싱 강재의 극한 응력 :

$$f_{ps(b)} = f_{pu} \left[1 - 0.85 \gamma_p \left\{ \frac{c_u}{d_{p(b)}} \right\} \right] \quad (8)$$

②비부착 프리스트레싱 강재의 극한 응력 :

$$f_{ps(ub)} = f_{pe} + 10,000 + \frac{f_{py(u)}}{85\beta_1} \left(\frac{d_p(u)}{c_u} \right) \quad (9)$$

이 된다.

여기서, $c_u = \frac{A_{ps(b)} \cdot f_{pu(b)} + A_{ps(u)} \cdot f_{py(u)} + A_s \cdot f_y - A_s' \cdot f_y}{0.85 \cdot f_c' \cdot b \cdot \beta_1}$ 은 각 강재가

극한상태에서 동시에 최대 한계응력에 도달하였을 때의 중립축 깊이다.

3)Naaman 식의 확장과 수정

Naaman은 부착 강재의 극한응력을 중립축과 강재깊이 비의 함수로 이미 제안하였고¹²⁾, 또한 비부착 강재의 극한응력도 극한상태에서의 부착감소계수 Ω_u 를 사용하여 중립축과 강재 깊이비의 함수로 제안하였기 때문에¹³⁾, 서로 다른 종류의 프리스트레싱 강재를 조합 사용한 콘크리트 보에서 비교적 손쉽게 그의 두 식을 위와 같은 내용과 형태로 확장, 수정하였다.

Naaman이 제안한 부착 프리스트레싱 강재의 응력은 아래와 같고,

$$f_{ps} = f_{pu} \left(1 - 0.3 \frac{c}{d_p} \right) \quad (10)$$

비부착 프리스트레싱 강재의 응력은 다음과 같다.

$$f_{ps} = f_{pe} + \Omega_u \cdot E_{ps} \cdot \epsilon_{cu} \cdot \left(\frac{d_p}{c} - 1 \right) < 0.94f_{py} \quad (11)$$

여기서, $\Omega_u = \frac{1.5}{\left(\frac{L}{d_p(u)} \right)}$ (1점 집중하중)

$$\Omega_u = \frac{3.0}{\left(\frac{L}{d_p(u)} \right)}$$
 (2점 집중하중과 등분포 하중)

Naaman 제안식을 이용할 경우 위 두 식이 중립축의 깊이, c 의 함수로 되어 있기 때문에 위의 두 식과 단면의 평형조건식 $C = T$ 의 세 방정식으로부터 미지수 $f_{ps(b)}$, $f_{ps(u)}$, c 를 구하여야 한다. 따라서 위에서 정의한 c_u 와 유사한 c_u' 를 아

래와 같이 정의하였다.

$$c_u' = \frac{A_{ps(b)} \cdot f_{pu(b)} + A_{ps(u)} \cdot (0.94f_{pv(u)}) + A_s \cdot f_y - A_s' \cdot f_y}{0.85 \cdot f_c' \cdot b \cdot \beta_1}$$

따라서 부착 프리스트레싱 강재의 극한 응력식을 서로 다른 강재 종류의 상호영향을 고려하여 확장, 수정하면 아래와 같고,

$$f_{ps(b)} = f_{pu(b)} \left(1 - 0.3 \frac{c_u'}{d_{p(b)}} \right) \quad (12)$$

비부착 프리스트레싱 강재의 응력식도 확장, 수정하면 다음과 같다.

$$f_{ps(u)} = f_{pe} + \Omega_u \cdot E_{ps} \cdot \epsilon_{cu} \left(\frac{d_{p(u)}}{c_u'} - 1 \right) \quad (13)$$

4)극한응력 예측 제안식

앞 절에 나열한 시방식들을 수정, 확장 분석한 결과 내부 및 외부 프리스트레싱 강재의 극한 응력은 프리스트레싱 강재의 깊이와 중립축 깊이의 비의 함수임을 알 수 있었다. 따라서 극한상태의 단면에서 변형률 적합조건식을 이용하여 이론적으로 프리스트레싱 강재의 응력을 구할 수 있다. 따라서 내부 부착 프리스트레싱 강재의 경우 그 응력은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$f_{ps(b)} = f_{pe} + E_{ps} \cdot \epsilon_{ps} = f_{pe} + E_{ps} \cdot \epsilon_{cu} \left(\frac{d_p}{c_u} - 1 \right) \quad (14)$$

여기서 E_{ps} = PS 강재의 탄성계수

ϵ_{cu} = 콘크리트의 극한 최대 변형률

식(14)에서 $c_u = \frac{A_{ps(b)} \cdot f_{pv(b)} + A_{ps(u)} \cdot f_{pv(u)} + A_s \cdot f_y - A_s' \cdot f_y}{0.85 \cdot f_{ck} \cdot b_o \cdot \beta_1}$ 로 각

강재가 극한상태에서 동시에 최대한계응력에 도달하였을 때의 중립축 깊이로 T형 보 거동의 경우는 다음과 같다.

$$c_u = \frac{A_{ps(b)} \cdot f_{pv(b)} + A_{ps(u)} \cdot f_{pv(u)} + A_s \cdot f_y - A_s' \cdot f_y - 0.85 \cdot f_{ck}(b - b_0) \cdot h_f}{0.85 \cdot f_{ck} \cdot b_o \cdot \beta_1}$$

그러나 식(14)의 경우 프리스트레싱 강재의 선형탄성 가정과 극한상태에서의 중

립축을 구할 때 프리스트레싱 강재의 최대응력을 가정하였기 때문에 실제 실험값들과 차이가 날 수 있다. 이러한 영향을 고려하여 식(15) 와 같이 프리스트레싱 강재깊이와 극한상태에서의 중립축 깊이와의 비의 함수로 표시하여 아래와 같이 나타내었다.

$$f_{ps(b)} = f_{pe} + df_{ps(b)} = f_{pe} + [\beta + \alpha \cdot E_{ps} \cdot \epsilon_{cu}(\frac{d_p}{C_u} - 1)] \quad (\text{kg/cm}^2) \quad (15)$$

여기서 α 와 β 는 무차원량이며, 위의 기본가정이나 그 외의 요인 등으로 인한 응력수정계수로 실험 등을 통하여 통계적으로 구할 수 있다.

한편, 외부 프리스트레싱 강재의 경우는 비부착 되어 응력이 단면중속이 아니라 부재중속이라는 특성을 고려하여 단면의 변형률 적합조건식으로부터 구한 응력에 다 응력의 전 부재깊이에 걸친 균등화에 따른 감소계수를 곱해야 할 것이다. 따라서 이를 고려하여 외부 프리스트레싱 강재의 극한응력은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$f_{ps(u)} = f_{pe} + \Phi_u \cdot E_{ps} \cdot \epsilon_{cu}(\frac{d_p}{C_u} - 1) \quad (16)$$

여기서, Φ_u = 응력 평준화 계수

$$\Phi_{ud} = \frac{\bar{d}_p}{d_p} = \frac{\sum(d_{pi} \times L_i) / \sum L_i}{d_p}$$

Φ_{ud} = 외부 PS강재의 길이에 따른 깊이 변화를 고려한 응력 평준화 계수

$$\Phi_{um} = \frac{\bar{M}}{M} = \frac{\sum(M_i \times L_i) / \sum L_i}{M}$$

Φ_{um} = 부재깊이에 따른 휨모멘트 변화를 고려한 응력 평준화 계수

외부 프리스트레싱 강재의 선형탄성 가정과 최대 중립축 가정, 그리고 그 외의 요인들에 의한 극한응력의 차이를 고려하여 일반적인 형태로 프리스트레싱 강재의 깊이와 극한상태의 중립축 깊이의 함수로 나타내면 다음과 같다.

$$f_{ps(u)} = f_{pe} + d \cdot f_{ps(b)} = f_{pe} + [\beta + \alpha \cdot \Phi_u \cdot E_{ps} \cdot \epsilon_{cu}(\frac{d_p}{C_u} - 1)] \quad (17)$$

여기서, $c_u = \frac{A_{ps(b)} \cdot f_{pv(b)} + A_{ps(u)} \cdot f_{pv(u)} + A_S \cdot f_y - A_s' \cdot f_y}{0.85 \cdot f_{ck} \cdot b_o \cdot \beta_1}$ 이고,

T형보의 경우는

$$c_u = \frac{A_{ps(b)} \cdot f_{pv(b)} + A_{ps(u)} \cdot f_{pv(u)} + A_S \cdot f_y - A_s' \cdot f_y - 0.85 \cdot f_{ck}(b - b_0) \cdot h_f}{0.85 \cdot f_{ck} \cdot b_o \cdot \beta_1}$$

이다.

위 제안식은 앞서도 언급하였듯이 극한상태에서 프리스트레싱 강재의 선형탄성 가정에 기초하고 있다. 이러한 가정은 외부프리스트레싱 강재의 경우 일반적으로 항복응력을 넘지 않고 있으며 내부 프리스트레싱 강재의 경우도 외부 프리스트레싱으로 보강된 경우 극한응력이 보강되지 않는 경우에 비하여 최대응력이 감소하기 때문에 유효하다고 할 수 있다.



III. 실험체 제작 및 실험

1. 실험체 제원

실험체 제원은 Fig.3.1과 Fig.3.2와 같이 T형 단면으로 제작하였다. 그리고 압축 부분의 균열을 방지하기 위하여 압축철근을 4H13을 사용하였으며, PC보에서 D10 철근은 스티립 고정용으로 배근하였다.

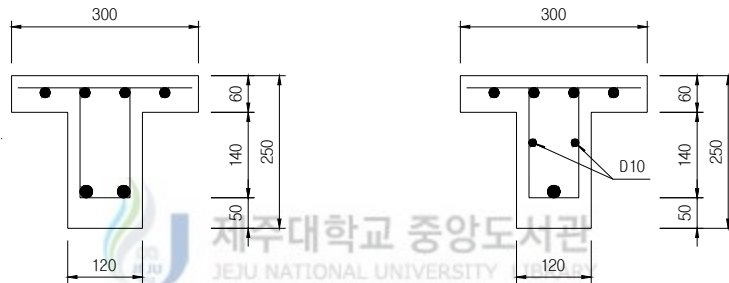


Fig 3.1 Section view of test beam

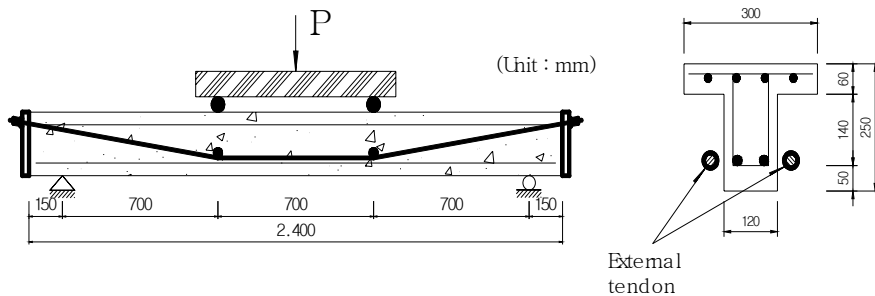


Fig 3.2 Dimensions and loading layout of test beam

2. 실험변수

실험을 행한 실험체는 RC보 12개, PC보 12개로써 각각의 실험변수는 다음과 같다.

1)RC보 실험변수

Table 3.1 Parameter for RC Beam

Parameter	Beam No.	Reinforcing bar	External PS steel	PS steel depth
Control	RC0	2H22, $A_s = 7.74\text{cm}^2$ $\rho_{\text{used}} = 0.51\rho_{\text{max}}$	-	-
Re-bar ratio	RC1	2H16, $A_s = 3.97\text{cm}^2$ $\rho_{\text{used}} = 0.26\rho_{\text{max}}$	$2 \times 3\phi 5.20$ $f_j = 0.6f_{pu}$ $A_{ps} = 127.42\text{mm}^2$	$d_p = 190\text{mm}$
	RC2	2H19, $A_s = 5.73\text{cm}^2$ $\rho_{\text{used}} = 0.38\rho_{\text{max}}$		
	RC3	2H22, $A_s = 7.74\text{cm}^2$ $\rho_{\text{used}} = 0.51\rho_{\text{max}}$		
	RC4	2H25, $A_s = 10.1\text{cm}^2$ $\rho_{\text{used}} = 0.66\rho_{\text{max}}$		
External PS steel ratio	RC5	2H22, $A_s = 7.74\text{cm}^2$ $\rho_{\text{used}} = 0.51\rho_{\text{max}}$	$2 \times 3\phi 4.35$ $f_j = 0.6f_{pu}$ $A_{ps} = 89.17\text{mm}^2$	$d_p = 190\text{mm}$
	RC6		$2 \times 3\phi 5.20$ $f_j = 0.6f_{pu}$ $A_{ps} = 127.42\text{mm}^2$	
	RC7		$2 \times \phi 12.7$ $f_j = 0.6f_{pu}$ $A_{ps} = 197.42\text{mm}^2$	
Length/depth ratio	RC8	2H22, $A_s = 7.74\text{cm}^2$ $\rho_{\text{used}} = 0.51\rho_{\text{max}}$	$2 \times 3\phi 5.20$ $f_j = 0.6f_{pu}$ $A_{ps} = 127.42\text{mm}^2$	$d_p = 210\text{mm}$
	RC9			$d_p = 190\text{mm}$
	RC10			$d_p = 170\text{mm}$
	RC11			$d_p = 150\text{mm}$

2)PC보 실험변수

Table 3.2 Parameter for PC Beam

Parameter	Beam No.	Reinforcing bar	External PS steel	PS steel depth
Control	PC0	1× Φ 15.2, $f_j=0.7f_{pu}$ $A_{ps}=138.7\text{mm}^2$	-	-
Re-bar ratio	PC1	1× Φ 12.7, $f_j=0.7f_{pu}$ $A_{ps}=98.71\text{mm}^2$	2× Φ 5.20 $f_j=0.6f_{pu}$ $A_{ps}=127.42\text{mm}^2$	$d_p = 190\text{mm}$
	PC2	2× Φ 5.20, $f_j=0.7f_{pu}$ $A_{ps}=127.42\text{mm}^2$		
	PC3	1× Φ 15.2, $f_j=0.7f_{pu}$ $A_{ps}=138.7\text{mm}^2$		
	PC4	2× Φ 12.7, $f_j=0.7f_{pu}$ $A_{ps}=197.42\text{mm}^2$		
External PS steel ratio	PC5	1× Φ 15.2, $f_j=0.7f_{pu}$ $A_{ps}=138.7\text{mm}^2$	2× Φ 4.35 $f_j=0.6f_{pu}$ $A_{ps}=89.17\text{mm}^2$	$d_p = 190\text{mm}$
	PC6		2× Φ 5.20 $f_j=0.6f_{pu}$ $A_{ps}=127.42\text{mm}^2$	
	PC7		2× Φ 12.7 $f_j=0.6f_{pu}$ $A_{ps}=197.42\text{mm}^2$	
Length/depth ratio	PC8	1× Φ 15.2, $f_j=0.7f_{pu}$ $A_{ps}=138.7\text{mm}^2$	2× Φ 5.20 $f_j=0.6f_{pu}$ $A_{ps}=127.42\text{mm}^2$	$d_p = 210\text{mm}$
	PC9			$d_p = 190\text{mm}$
	PC10			$d_p = 170\text{mm}$
	PC11			$d_p = 150\text{mm}$

3. 사용 재료

1) 콘크리트

콘크리트는 설계 강도가 RC보는 $240\text{kg}/\text{cm}^2$, PC보는 $350\text{kg}/\text{cm}^2$ 로 설계된 레미콘 제품을 사용하였다. 콘크리트는 굵은 골재의 최대치수가 25mm, 슬럼프 값은 10cm 인 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였고, 실험시편의 제작을 위한 레미콘 제품사양은 다음과 같다.

Table 3.3 Concrete specification

골재의 종류에 따른 구분	콘크리트용 부순 골재	
	호칭강도 (kg/cm^2)	RC
	240	350
슬럼프 (cm)	10	
굵은 골재의 최대 치수에 따른 구분 (mm)	25	
시멘트 종류에 따른 구분	1종보통 포틀랜드 시멘트	
공기량	$4.5 \pm 1.5\%$	
염화물량	$0.30\text{kg}/\text{m}^3$ 이하	

2) 철근 및 PS강재

철근은 RC보에서 인장철근으로 D16, D19, D22, D25를 사용하였고, 압축철근으로 D13을, PC보에서는 스티럽 고정용으로 D10을, 전단철근으로 RC보, PC보 각각 D10을 사용하였다. PS강재는 SWPC 7B의 지름 12.7mm와 15.2mm를 주로 사용하였으며, 일부 실험체는 강재량을 변화주기 위해 SWPC 5.20mm와 4.35mm를 내부 프리스트레싱 강재와 외부 프리스트레싱 강재로 사용하였다. Table 3.4는 강재의 항복강도 실험결과값을 나타내고 있고, Fig 3.3은 긴장장치를 나타내고 있다.

Table 3.4 Test results of tensile strength of reinforcement

Type	Diameter(mm)	Yield stress f_y (kg/cm ²)
Re-bar (SD40)	H10	4,059
	H13	4,479
	H16	4,664
	H19	4,729
	H22	4,276
	H25	4,615
PS steel (SWPC 7B)	ϕ 4.35	18,359
	ϕ 5.20	17,988



Fig 3.3 Jacking instrument

3) 변형계

실험체의 변형률을 측정하기 위하여 타설 전에 강제용 변형계를 부착하였고, PC 강선에도 타설전에 평균값을 알아내기 위해 변형계를 2개씩 부착하였다. 변형계는 먼치리된 철근부에 변형계 제조회사에서 권장하는 접착제를 사용하여 부착하였고, 방수테이프로 마감하였다. 그리고 실험전 보 상단을 매끄럽게 한 후, 접착제인 P-2를 발라 콘크리트의 공극을 없앤 후 콘크리트용 변형계를 부착하였다. 변형계의 세목은 다음과 같다.

Table 3.5 Strain gauge specification

Type	Concrete	Re-bar & PS Steel
Gauge Type	FLA-5-11	PL-60-11
Gauge Factor	2.13±1%	2.13±1%
Adhesive	P-2	P-2
Coefficient of Thermal Expansion	$11.8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	$11.8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
Other	Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd.	

4. 실험 데이터 수집



하중은 4점 재하법으로 지간의 1/3 지점 두 곳에 하중이 작용될 수 있도록 강재 보를 설치하고 가력 프레임에서 유압하중기를 사용하여 파괴시까지 재하하였고, 가력 프레임과 유압하중기 사이에 Load cell을 설치하여 하중값을 확인하였다. 그리고 하중은 변위조절 방법으로 분당 약 1.5mm의 속도로 재하하였으며, 재하하중 약 2tonf 마다 균열을 표시하여 확인하였다. 데이터의 수집은 동적변형률 측정기를 이용, 컴퓨터 자동데이터 수집프로그램을 이용하여 작용하중 및 처짐과 철근콘크리트, 내부 및 외부 프리스트레싱 강재의 변형률을 측정하였다. Fig. 3.4와 Fig. 3.5는 데이터 수집을 위한 기기 및 strain gauge 위치를 나타내고 있다.

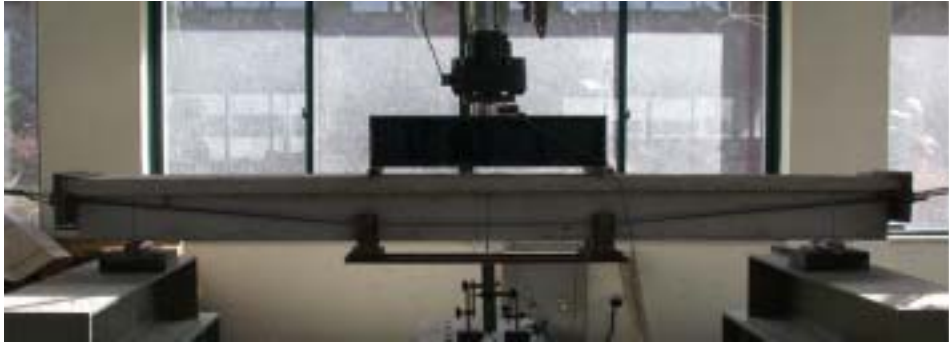


Fig.3.4 Real view of test beam

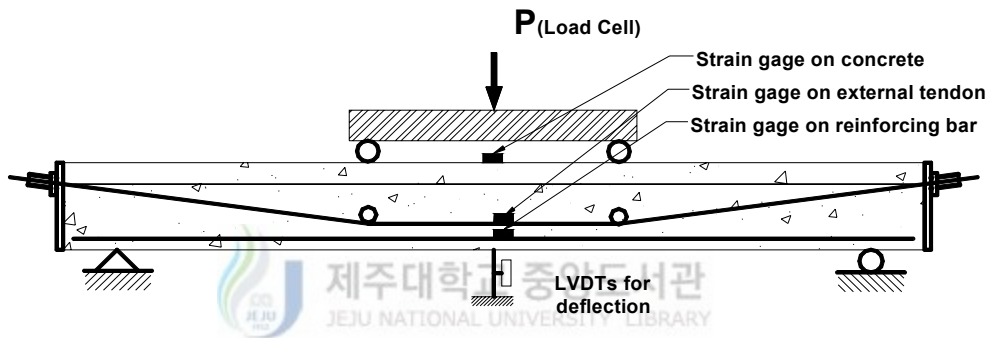


Fig.3.5 Arrangement for data acquisition

IV. 실험결과 및 분석

1. 철근 콘크리트보

다음 표는 외부 프리스트레싱으로 보강된 RC보의 최대하중과 최대처짐을 나타낸 것이다.

Table 4.1 Summary of ultimated Load and deflection(RC Beam)

Parameter	Beam No.	Ultimated Load (tonf)	Ultimate deflection (mm)
Control	RC0	21.74	36.30
Re-bar ratio	RC1	17.98	42.06
	RC2	22.88	42.33
	RC3	27.33	33.87
	RC4	27.13	29.56
External PS steel ratio	RC5	26.19	33.43
	RC6	26.08	29.76
	RC7	31.00	35.14
Length/depth ratio	RC8	27.49	26.52
	RC9	27.13	41.50
	RC10	25.36	32.21
	RC11	24.92	29.09

콘크리트재령 28일 압축강도는 실험결과 $318\text{kg}/\text{cm}^2$ 으로 나타났고, 제안식(17)을 다시 한번 나타내면 다음과 같고, d_p/c_u 로 표시하여 응력수정계수 α, β 를 구하여

제안식을 나타내었다.

$$f_{ps(u)} = f_{pe} + d \cdot f_{ps(u)} = f_{pe} + [2000 + 0.85 \cdot 0.445 \times E_{ps} \times \varepsilon_{cu} (\frac{d_p}{c_u} - 1)] \quad (17)$$

$$c_u = \frac{A_{ps(b)} \cdot f_{py(b)} + A_{ps(u)} \cdot f_{py(u)} + A_s \cdot f_y - A_s' \cdot f_y - 0.85 \cdot f_{ck} (b - b_0) \cdot h_f}{0.85 \cdot f_{ck} \cdot b_o \cdot \beta_1}$$

다.

1) 철근비의 영향

본 실험에서 세가지 변수들 중에 첫 번째로 철근비의 영향을 살펴보면, 우선 철근비의 영향을 살펴보기 위해 RC1 ~ RC4의 시험체를 비교하였다. Fig. 4.1을 살펴보면 ACI 시방식은 내부 철근의 영향을 전혀 고려하고 있지 않고 있기 때문에 내부철근의 영향을 나타내고 있지 못함을 확인할 수 있다. 반면 제안식(17)은 실험값과 유사한 기울기를 나타내고 있으며, 실험값과 유사하게 나타내고 있음을 알 수 있다. Fig. 4.2는 철근비에 대한 하중-처짐도 곡선을 나타내고 있다. 여기서 RC0은 외부강선을 배치하지 않은 무보강 RC보를 나타낸 것이며, Fig. 4.3은 하중-외부 PS강재의 변형률을 나타내고 있는데, 그림을 살펴보면 하중-처짐도곡선과 유사한 경향을 나타내고 있음을 보여주고 있다. 그리고 Fig. 4.4는 처짐-외부 PS강재의 변형률을 나타내고 있는데 동일 처짐에서 철근비가 증가할수록 외부 PS강재의 응력 증가의 정도가 낮아짐을 기울기로부터 확인할 수 있다.

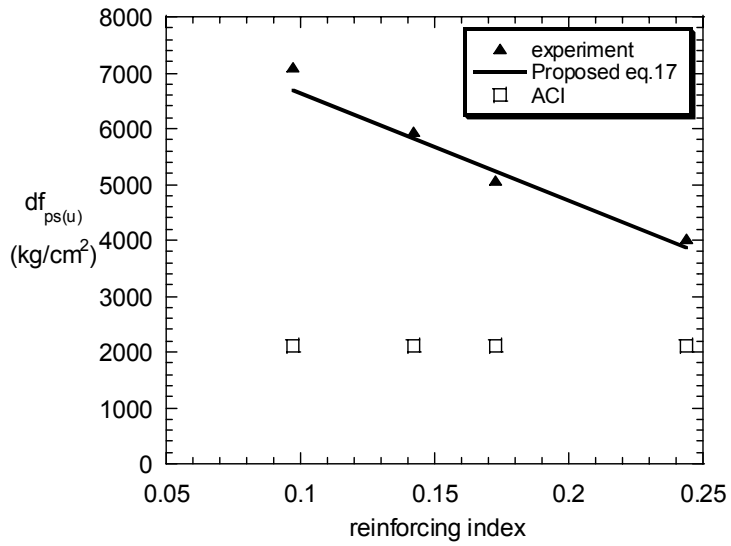


Fig.4.1 Increased ultimate stress of external PS steel and reinforcing index of re-bar

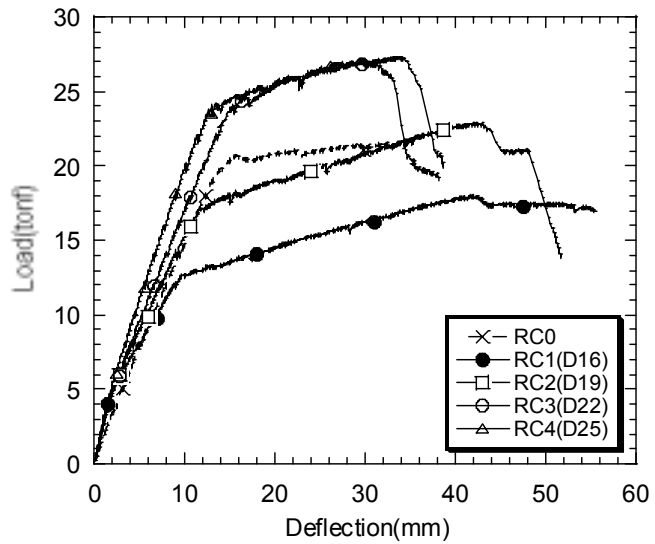


Fig.4.2 Load-deflection curves with different re-bar ratio

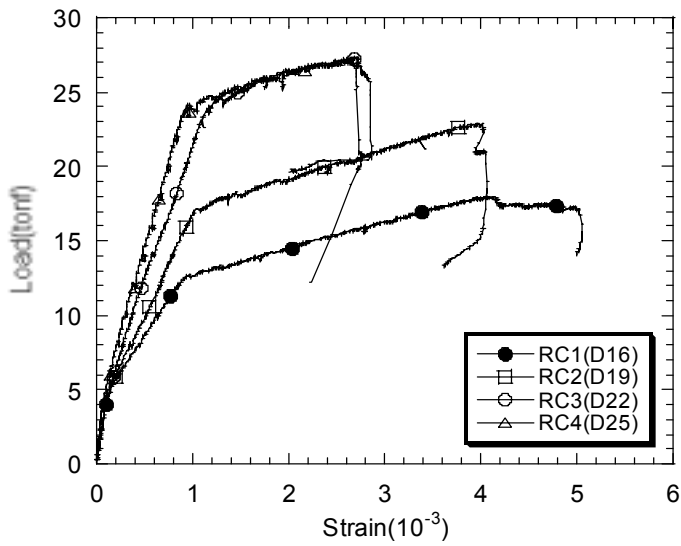


Fig.4.3 Load-strain of external PS steel curves with different re-bar ratio

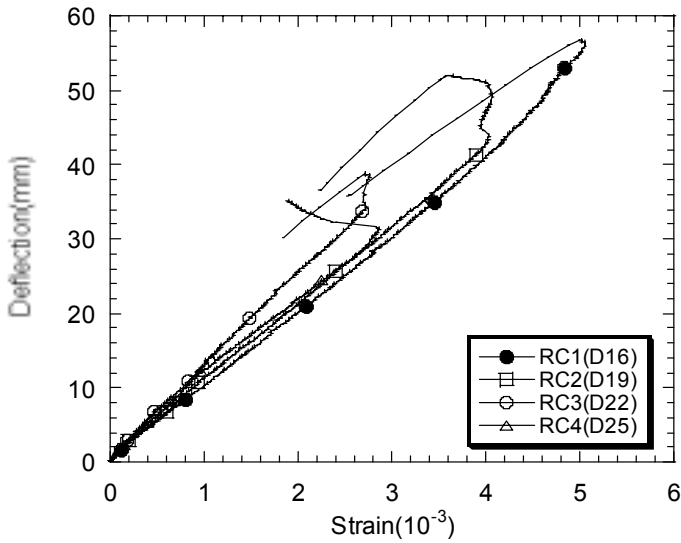


Fig.4.4 Deflection-strain of external PS steel curves with different re-bar ratio

2)외부 PS강재비의 영향

두 번째 실험변수로써 외부 PS강재비를 변화시켜서 실험하였는데 RC5 ~ RC7 보가 여기에 해당된다. Fig. 4.5는 외부 PS강재비에 대한 극한응력 증가분을 나타내고 있는데 그림을 살펴보면, ACI시방식은 외부 강재량을 표현하고는 있지만 실험값과 제안식(17)과 비교해 볼 때 기울기로부터 차이가 나고 있음을 확인할 수 있다. Fig. 4.6은 외부 PS강재비에 대한 하중-처짐도곡선을 나타내고 있는데 외부 PS 강재비에 따라 최대하중 값이 커지는 것을 확인할 수 있으며, Fig. 4.7 은 하중-외부 PS강재 변형률을 나타내고 있는데, 앞선 하중-처짐도와 유사함을 알 수 있다. 이 그림으로 앞선 변수인 철근비에서와 마찬가지로 외부 PS 강재의 극한응력이 외부 PS강재비의 증가에 따라 선형적으로 비례하고 있음을 알 수 있다. 다음 Fig. 4.8 은 외부 PS강재비에 따른 처짐-외부 PS강재 변형률도를 나타내고 있는데, 앞에서 처럼 동일 처짐에서 강재비가 증가할수록 응력의 증가가 낮게 나타내고 있음을 알 수 있다.

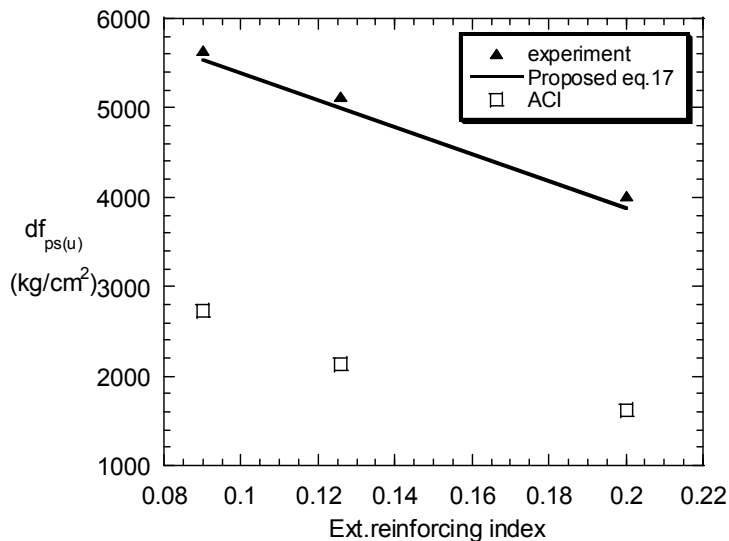


Fig.4.5 Increased ultimate stress of external PS steel and reinforcing index of external PS steel

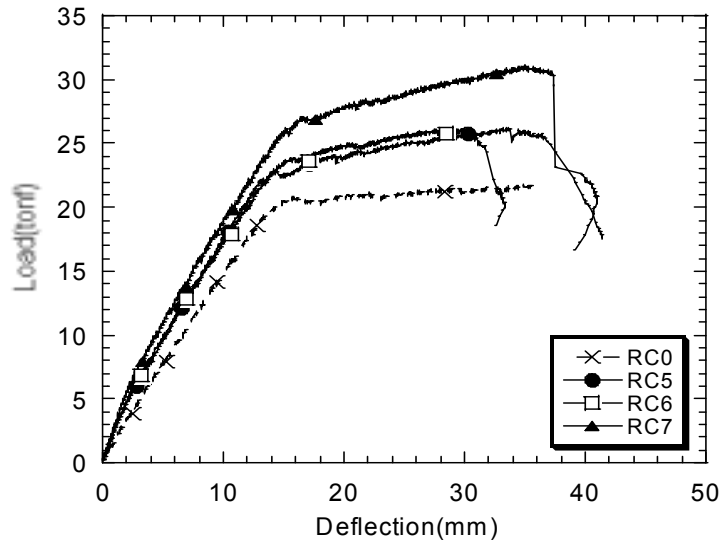


Fig.4.6 Load-deflection curves with different external PS steel reinforcement ratio

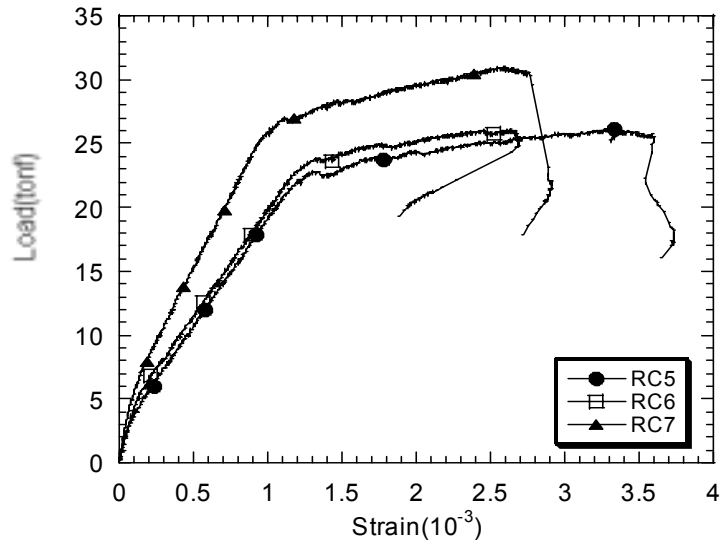


Fig.4.7 Load-strain of external PS steel curves with different external PS steel ratio

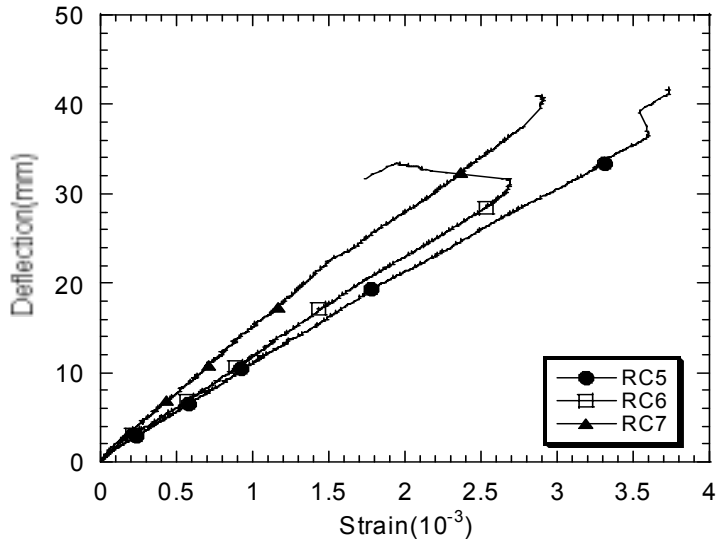


Fig.4.8 Deflection-strain of external PS steel with different external PS steel ratio

3) 지간/유효높이비(L/d_p)의 영향

본 실험의 변수중 마지막으로 지간/유효높이비의 영향을 살펴보았는데 여기에는 RC8 ~ RC11이 해당된다. Fig. 4.9에서도 앞선 변수들과 마찬가지로 기울기의 경향성으로 봐서 차이가 남을 확인할 수 있다. Fig. 4.10은 지간/유효높이비에 따른 하중-처짐도곡선을 나타내고 있는데, L/d_p 가 증가할수록 최대하중값이 커짐을 알 수 있으며, Fig. 4.11은 L/d_p 에 따른 하중-외부 PS강재변형률도를 나타내고 있는데 이 도 앞에서처럼 하중-처짐도 곡선과 유사한 경향을 나타내고 있다. 이 도 앞의 변수 처럼 외부 PS강재의 극한응력이 L/d_p 의 증가에 따라 선형적으로 비례함을 알 수 있다. Fig. 4.12는 L/d_p 에 따른 처짐-외부 PS강재 변형률도를 나타내고 있는데 마찬가지로 동일 처짐에서 L/d_p 가 증가할수록 외부 PS강재의 극한응력이 작아짐을 기울기로부터 알 수 있다.

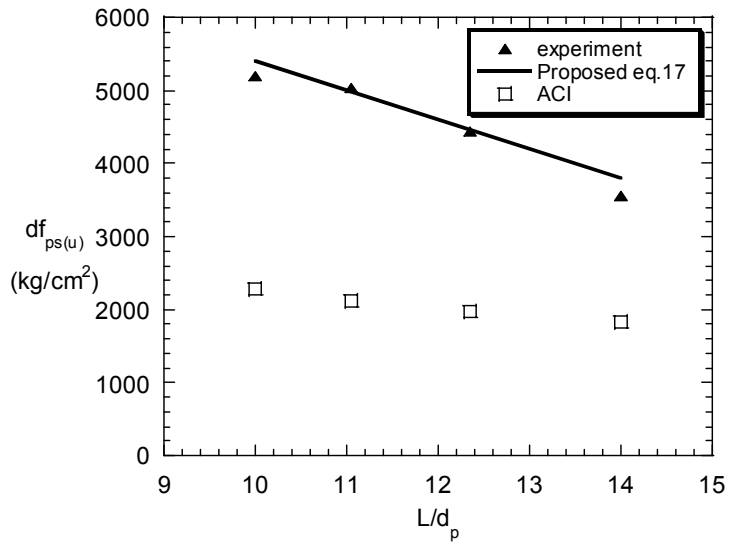


Fig.4.9 Increased ultimate stress of external PS steel and span/depth ratio

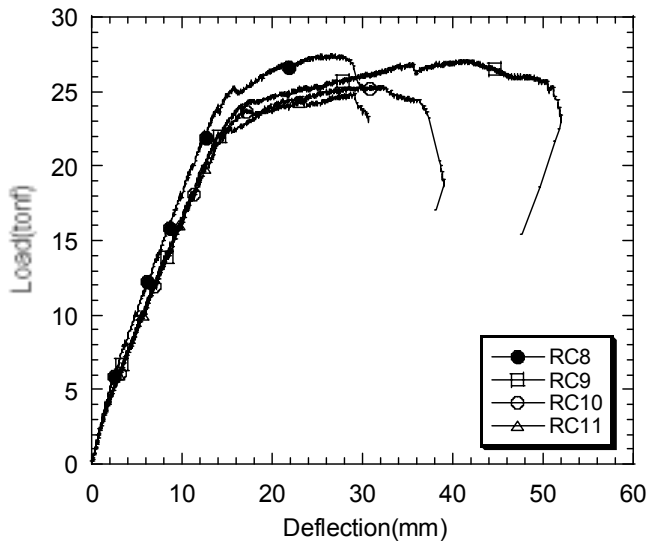


Fig.4.10 Load-deflection curves with different span/depth ratio

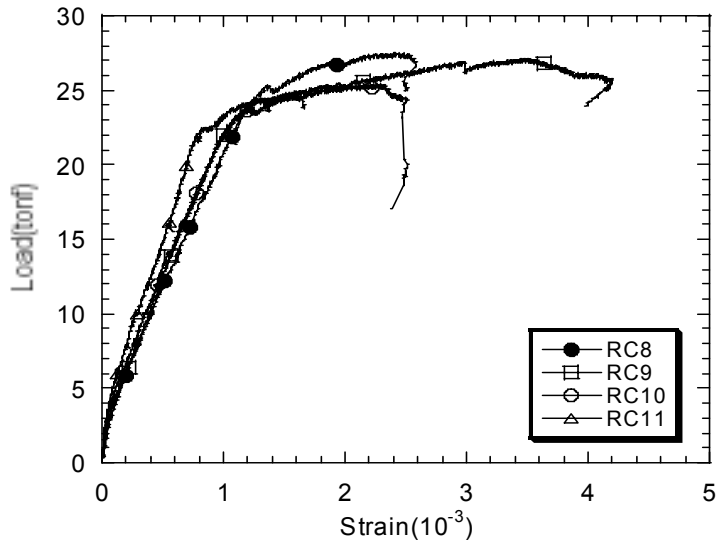


Fig.4.11 Load-strain of external PS steel curves with different span/depth ratio

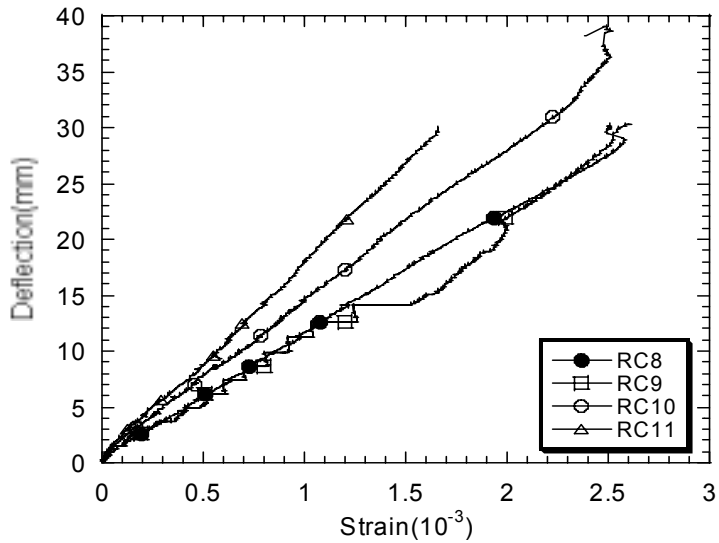
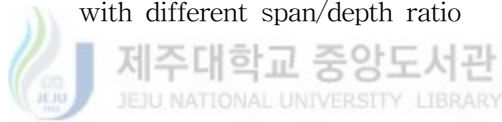


Fig.4.12 Deflection-strain of external PS steel with different span/depth ratio

Fig. 4.13은 계산된 M_n 과 측정된 M_u 값의 비교를 나타낸 것인데, 이는 제안식 (17)에 의해 계산된 모멘트강도값과 실험에 의해 측정된 모멘트강도값을 그래프로 나타낸 것이다. Fig. 4.13을 살펴보면, 계산된 모멘트강도가 측정된 모멘트강도의 약88% 정도로 예측하고 있다.

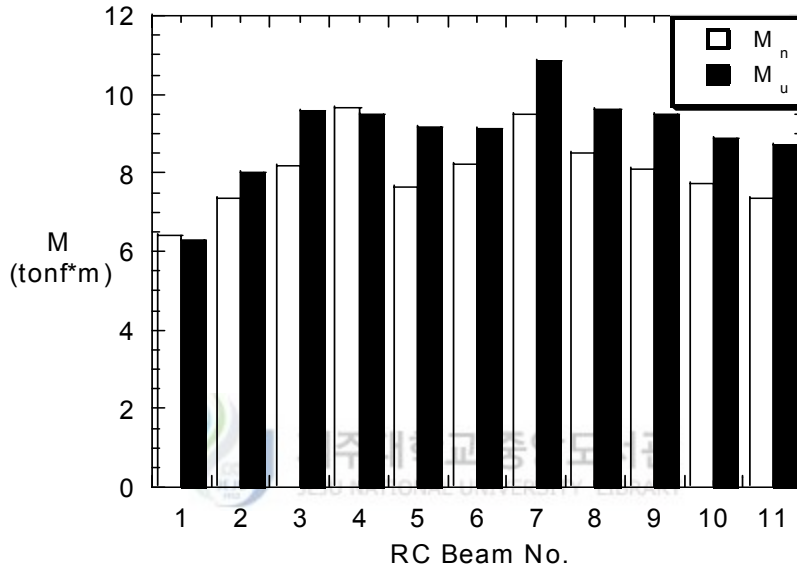


Fig.4.13 Comparison of measured and calculated moment

이상의 실험결과를 다음 Table 4.2로 나타내었다.

Table 4.2 Summary result of experiment(RC Beam)

시험체	d_p/c_u	f_{pe} (kg/cm ²)	측정응력 f_{ps} (kg/cm ²)	ACI식 f_{ps} (kg/cm ²)	제안식17 f_{ps} (kg/cm ²)	제안식17 f_{ps} (kg/cm ²)	측정 M_u tf · m	계산 M_n tf · m	M_u/M_n 비
RC1	3.06	8100	7100	2123	6675	14775	6.293	6.42	0.98
RC2	2.54	7303	5960	2123	5495	12798	8.008	7.356	1.09
RC3	2.26	7775	5060	2123	4860	12635	9.566	8.185	1.17
RC4	1.82	7880	4020	2123	3861	11741	9.496	9.672	0.98
RC5	2.56	7944	5640	2733	5540	13484	9.167	7.648	1.20
RC6	2.26	7931	5120	2123	4860	12791	9.128	8.212	1.11
RC7	1.83	8173	4020	1618	3884	12057	10.85	9.501	1.14
RC8	2.5	7149	5200	2272	5404	12553	9.622	8.493	1.13
RC9	2.26	7186	5030	2123	4860	12046	9.496	8.088	1.17
RC10	2.03	7202	4440	1973	4338	11540	8.876	7.71	1.15
RC11	1.79	7286	3560	1823	3793	11079	8.722	7.362	1.18

4) 균열 및 파괴형태

본 절에서는 실험을 행하면서 매 2tonf 마다 균열을 표시하였는데 파괴시의 균열 모습을 나타내면 다음과 같다.

RC0



RC1



RC2



RC3



RC4



RC5



RC6



RC7



RC8



RC9



RC10



RC11



2. 프리스트레스트 콘크리트 보

다음 표는 외부 프리스트레싱으로 보강된 PC보의 최대하중과 최대처짐을 나타낸 것이다.

Table 4.3 Summary of ultimated Load and deflection(PC Beam)

Parameter	Beam No.	Ultimated Load (tonf)	Ultimate deflection (mm)
Control	PC0	13.52	24.70
Internal PS steel ratio	PC1	17.44	51.57
	PC3	17.96	27.62
	PC4	25.91	38.58
External PS steel ratio	PC5	16.84	32.91
	PC6	19.17	40.04
	PC7	22.02	35.13
Length/depth ratio	PC8	20.29	29.63
	PC9	19.22	32.97
	PC10	15.29	31.17
	PC11	14.78	38.85

콘크리트재령 28일 압축강도는 실험결과 $395\text{kg}/\text{cm}^2$ 으로 나타났고, 제안식(17)을 다시 한번 나타내면 다음과 같고, d_p/c_u 로 표시하여 응력수정계수 α, β 를 구하여 제안식을 나타내었다.

$$f_{ps(u)} = f_{pe} + d \cdot f_{ps(u)} = f_{pe} + [2000 + 0.85 \times 0.445 \times E_{ps} \times \epsilon_{cu} \left(\frac{d_p}{c_u} - 1 \right)] \quad (17)$$

$$c_u = \frac{A_{ps(b)} \cdot f_{py(b)} + A_{ps(u)} \cdot f_{py(u)} + A_s \cdot f_y - A_s' \cdot f_y - 0.85 \cdot f_{ck} (b - b_0) \cdot h_f}{0.85 \cdot f_{ck} \cdot b_o \cdot \beta_1}$$

다.

1) 내부 PS강재비의 영향

세가지 변수들 중에 첫 번째로 내부 PS강재비의 영향을 살펴보기 위하여 PC1, PC3, PC4보의 시험체를 비교하였다. Fig. 4.14를 살펴보면 앞선 RC보에서와 마찬가지로 ACI시방식이 내부 철근이라든가 내부 PS강재의 영향을 서로 다른 두 식으로 표현하고 있기 때문에 실험값과 차이가 나고 있음을 확인할 수 있다. 반면 제안식(17)은 기울기를 살펴보면 알 수 있듯이 잘 반영하고 있다. Fig. 4.15는 내부 PS강재비에 대한 하중-처짐도곡선을 나타내고 있는데 PC0보는 외부강선을 배치하지 않은 무보강 PC보를 나타낸 것이며, Fig. 4.16은 내부 PS강재비에 대한 하중-외부 PS강재의 변형률도를 나타낸 것인데 RC보에서처럼 하중-처짐도와 유사한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이는 Fig. 4.17에 보인바와 같이 처짐-외부 PS강재의 응력이 RC보에서와 마찬가지로 선형적으로 비례하고 있음을 알 수 있고, 또한 동일 처짐에서 내부 PS강재비가 증가할수록 외부 PS강재의 응력 증가의 정도가 낮아짐을 기울기로부터 확인할 수 있다.

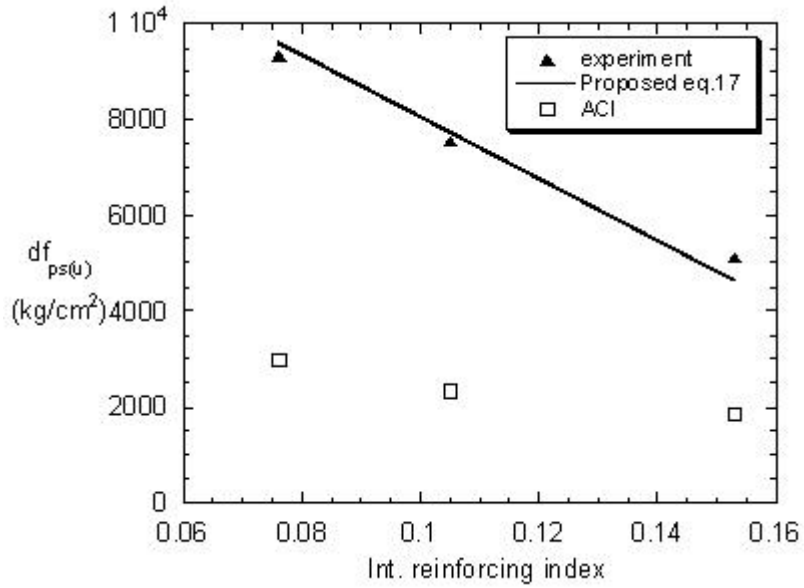


Fig.4.14 Increased ultimate stress of external PS steel and reinforcing index of internal PS steel

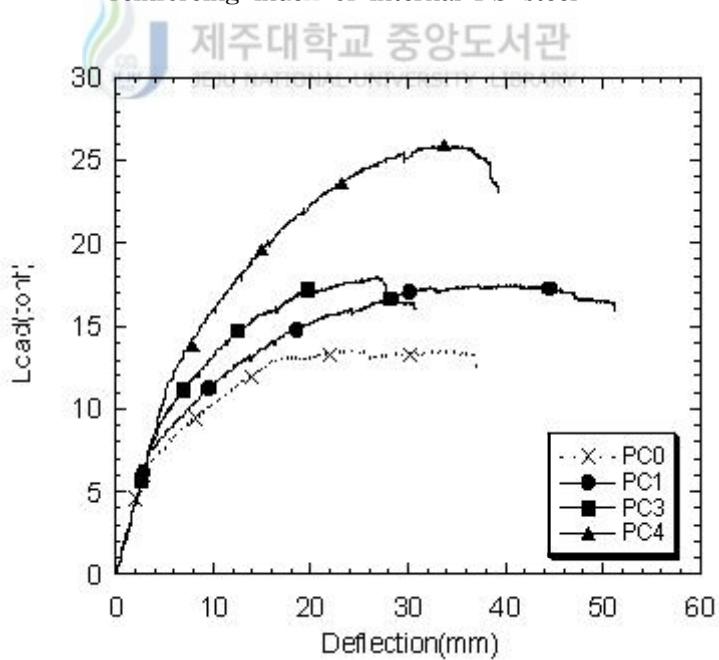


Fig.4.15 Load-deflection curves with different internal PS steel ratio

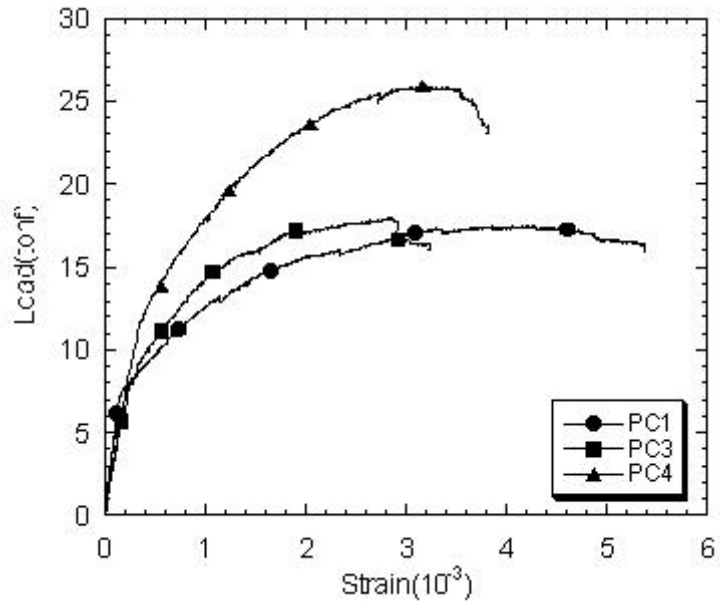


Fig.4.16 Load-strain of external PS steel curves with different internal PS steel ratio

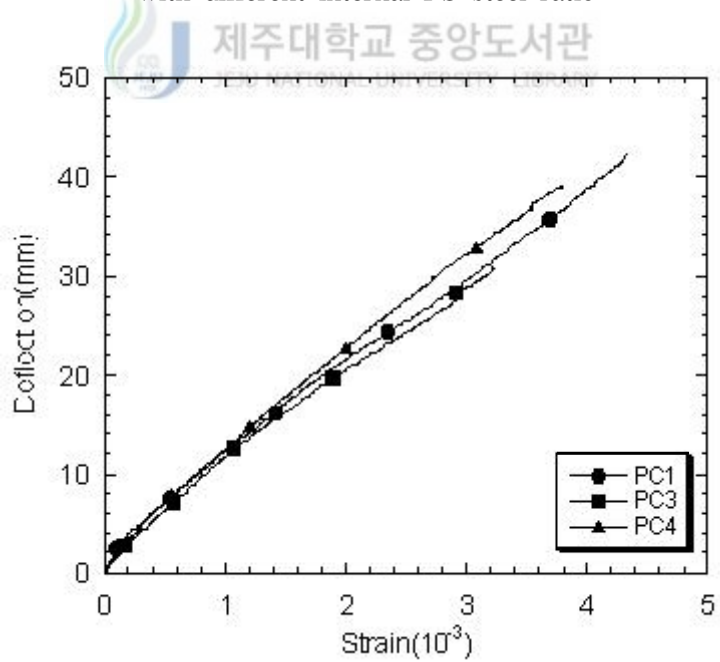


Fig.4.17 Deflection-strain of external PS steel curves with different internal PS steel ratio

2)외부 PS강재비의 영향

두 번째 실험변수로서 외부 PS강재량을 변화시켜 실험하였는데 PC5 ~PC7보가 여기에 해당된다. Fig. 4.18을 살펴보면 RC보와 유사하게 PC보에서도 ACI시방식은 반영을 못하고 있음을 알 수 있다. Fig. 4.19는 외부 PS강재비에 대한 하중-처짐도곡선을 나타내고 있는데 외부 PS강재비에 따라 최대하중값이 커지는 것을 확인할 수 있으며, Fig. 4.20은 하중-외부 PS강재 변형률을 나타내고 있는데 앞선 하중-처짐도와 유사함을 알 수 있다. 본 실험변수로 실험도 RC보에서와 마찬가지로 외부 PS 강재의 극한응력이 외부 PS강재비의 증가에 따라 선형적으로 비례하고 있음을 알 수 있다. 다음 Fig. 4.21은 외부 PS강재비에 따른 처짐-외부 PS강재 변형률도를 나타내고 있는데 앞에서처럼 동일 처짐에서 외부 PS강재비가 증가할수록 응력의 증가가 낮게 나타내고 있음을 알 수 있다.

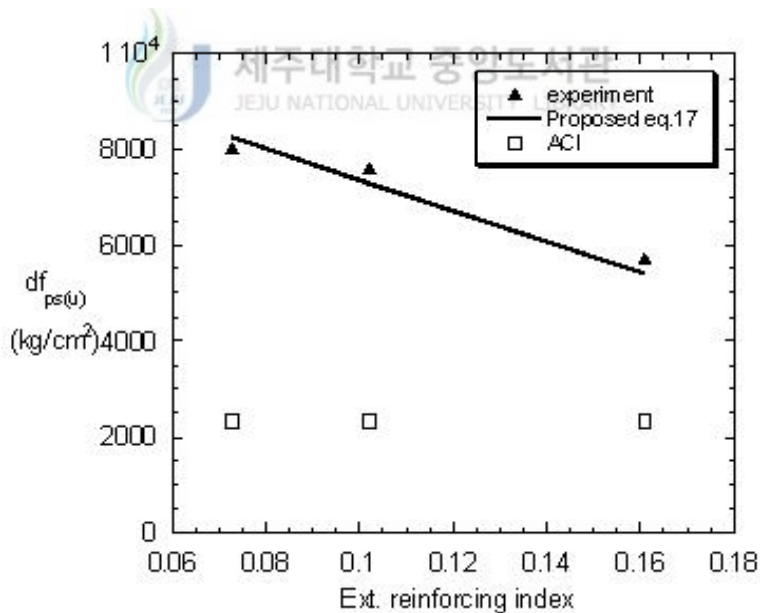


Fig.4.18 Increased ultimate stress of external PS steel and reinforcing index of external PS steel

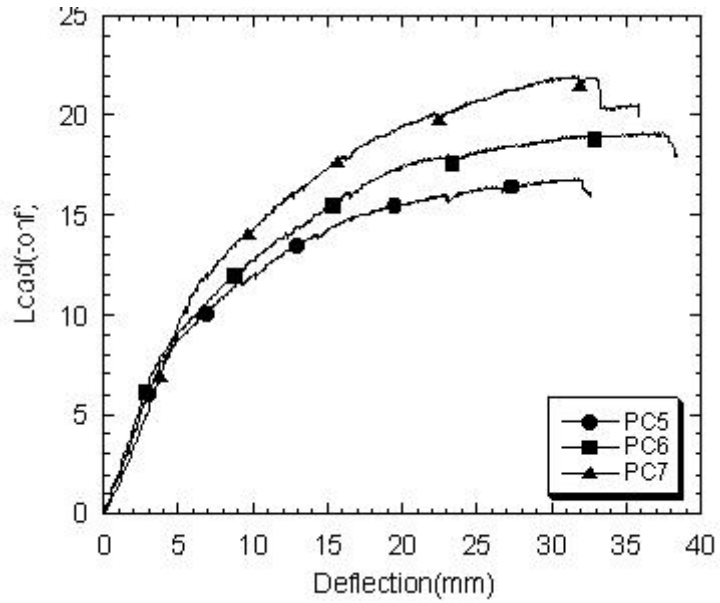


Fig.4.19 Load-deflection curves with different external PS steel reinforcement ratio

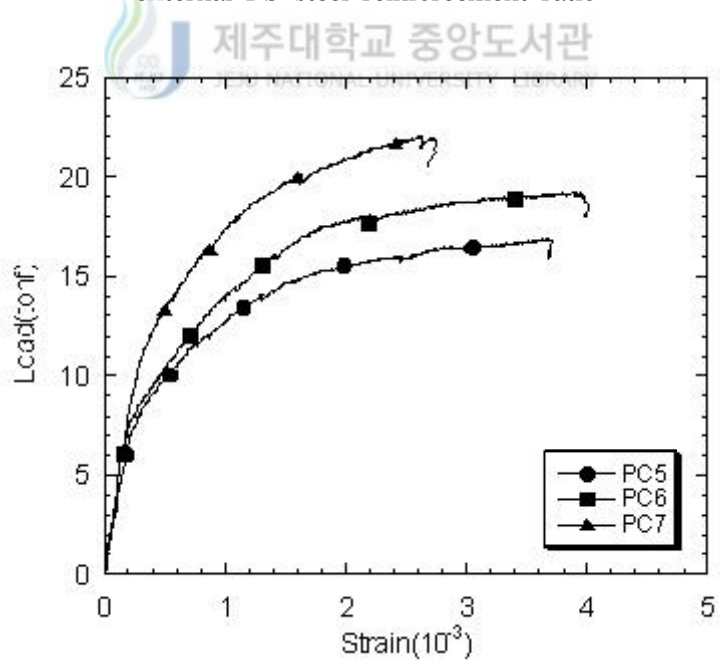


Fig.4.20 Load-strain of external PS steel curves with different external PS steel ratio

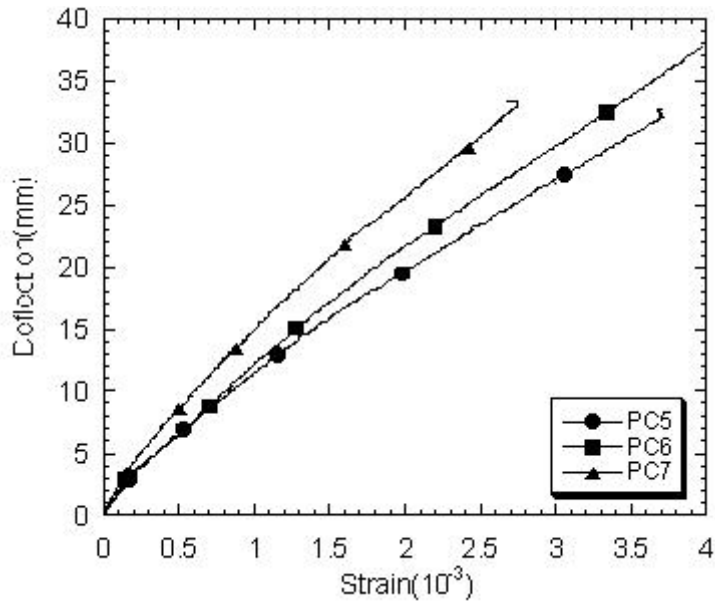


Fig.4.21 Deflection-strain of external PS steel with different external PS steel ratio



3) 지간/유효높이비(L/d_p)의 영향

본 실험의 변수중 마지막으로 지간/유효높이비의 영향을 살펴보았는데 여기에는 PC8 ~ PC11이 해당된다. Fig. 4.22도 앞선 변수들과 마찬가지로 ACI시방식은 서로 다른 두식으로 외부강선의 극한응력을 표현하고 있기 때문에 연속적으로 나타내고 있지 못하고 있음을 알 수 있다. Fig. 4.23은 지간/유효높이비에 따른 하중-처짐도 곡선을 나타내고 있는데, L/d_p 가 증가할수록 최대하중값이 커짐을 알 수 있으며, Fig. 4.24은 L/d_p 에 따른 하중-외부 PS강재변형률도를 나타내고 있는데 이도 앞에서 처럼 하중-처짐도 곡선과 유사한 경향을 나타내고 있다. 이도 RC보에서와 마찬가지로 외부 PS강재의 극한응력이 L/d_p 의 증가에 따라 선형적으로 비례함을 알 수 있다. Fig. 4.25은 L/d_p 에 따른 처짐-외부 PS강재 변형률도를 나타내고 있는데 마찬가지로 동일처짐에서 L/d_p 가 증가할수록 외부 PS강재의 극한응력이 작아짐을 기울기로부터 알 수 있다.

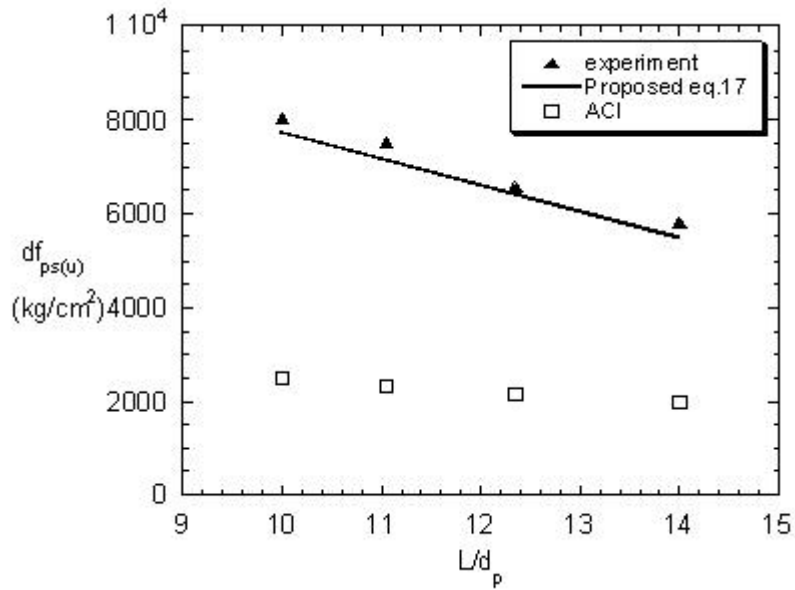


Fig.4.22 Increased ultimate stress of external PS steel and span/depth ratio

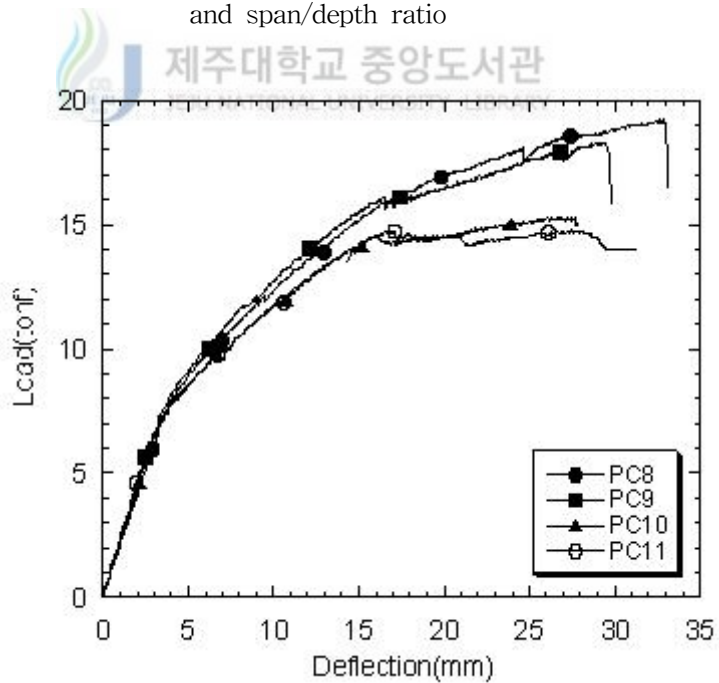


Fig.4.23 Load–deflection curves with different span/depth ratio

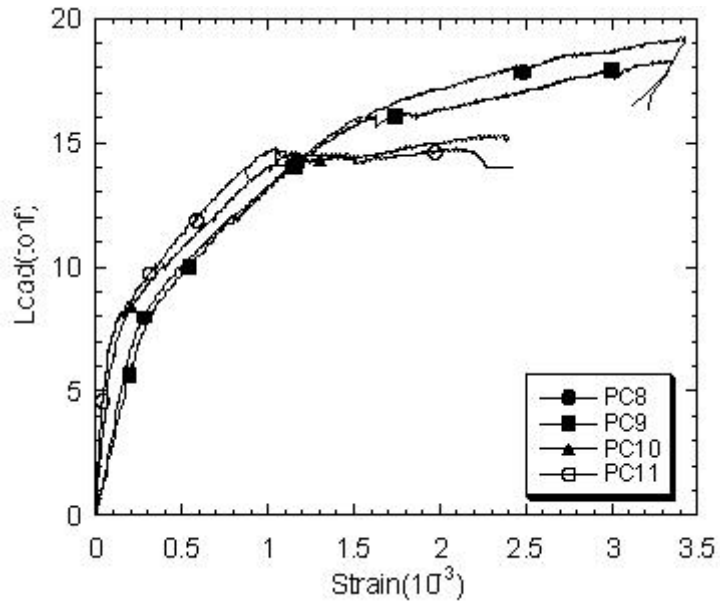


Fig.4.24 Load-strain of external PS steel curves with different span/depth ratio

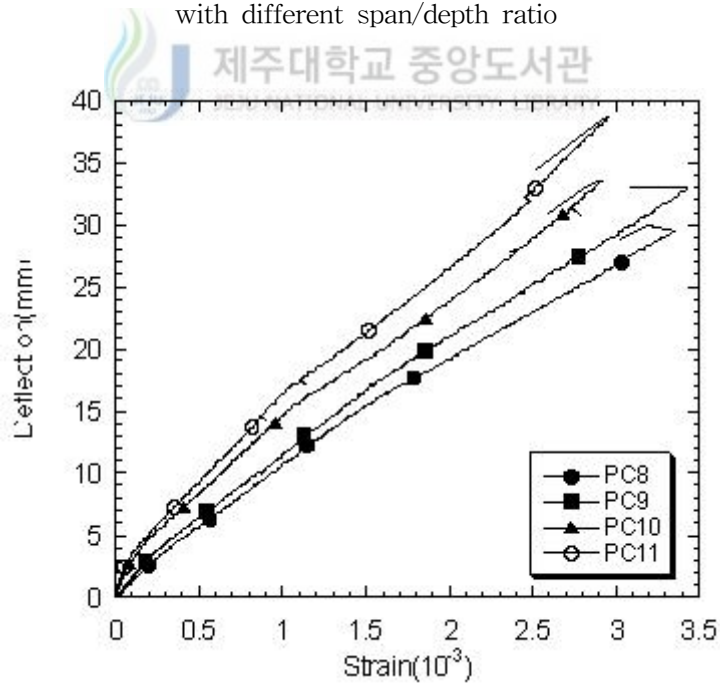


Fig.4.25 Deflection-strain of external PS steel with different span/depth ratio

Fig. 4.26은 RC보에서처럼 계산된 M_n 과 측정된 M_u 값의 비교를 나타낸 것인데, 이는 제안식(17)에 의해 계산된 모멘트강도값과 실험에 의해 측정된 모멘트강도값을 그래프로 나타낸 것이다. Fig. 4.26을 살펴보면, 계산된 모멘트강도가 측정된 모멘트강도의 약102% 정도로 예측하고 있어 오차범위가 평균 2%로 높은 정확도를 나타내고 있음을 알 수 있다.

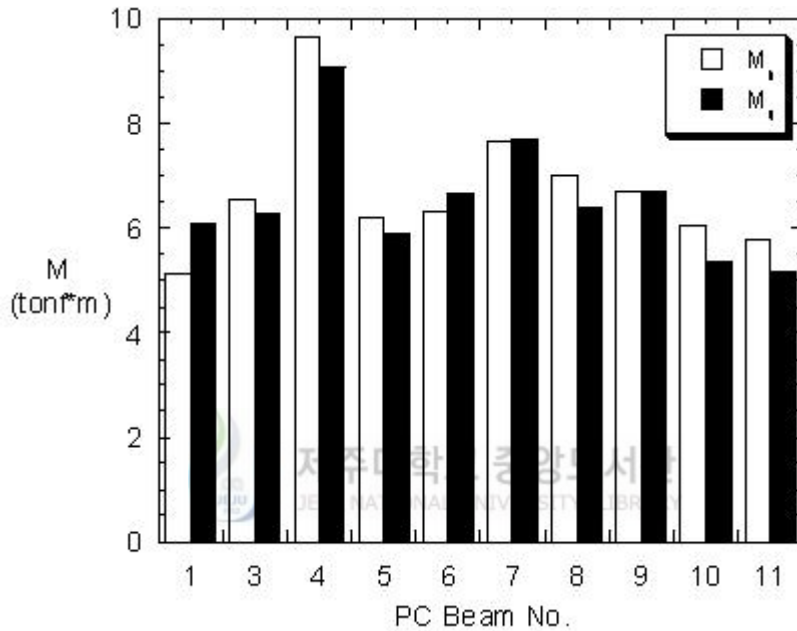


Fig.4.26 Comparison of measured and calculated moment

이상의 실험결과를 Table4.4로 나타내었다.

Table 4.4 Summary result of experiment(PC Beam)

시험체	d_p/c_u	f_{pe} (kg/cm ²)	측정응력 Δf_{ps} (kg/cm ²)	ACI식 Δf_{ps} (kg/cm ²)	제안식17 Δf_{ps} (kg/cm ²)	제안식17 f_{ps} (kg/cm ²)	측정 M_u tf · m	계산 M_n tf · m	M_u/M_n 비
PC1	4.34	4287	9320	2981	9580	13867	6.104	5.146	1.19
PC3	3.31	4805	7520	2323	7243	12048	6.283	6.546	0.96
PC4	2.15	4439	5100	1840	4610	9049	9.065	9.673	0.94
PC5	3.76	4882	8020	2323	8264	13146	5.891	6.191	0.95
PC6	3.33	4009	7600	2323	7288	11297	6.685	6.347	1.05
PC7	2.5	5623	5720	2323	5404	11027	7.704	7.657	1.01
PC8	3.53	3912	8040	2494	7742	11654	6.402	7.021	0.91
PC9	3.26	5150	7520	2323	7129	12279	6.724	6.706	1.00
PC10	2.92	3961	6580	2152	6357	10318	5.352	6.033	0.89
PC11	2.54	4133	5820	1982	5495	9628	5.17	5.798	0.89

4) 균열 및 파괴형태

균열의 모습과 파괴형태를 아래 그림으로 나타내었다. PC보의 파괴형태의 경우 인장측에 균열이 먼저 발생한 후 압축부의 콘크리트가 파괴되는 형상을 보였다.

PC0



PC1



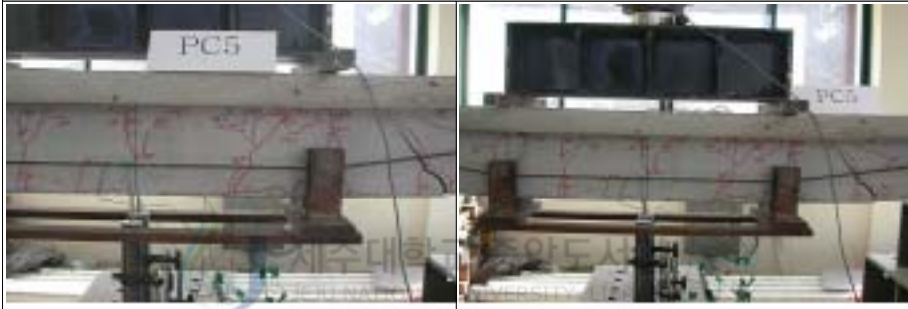
PC3



PC4



PC5



PC6



PC7

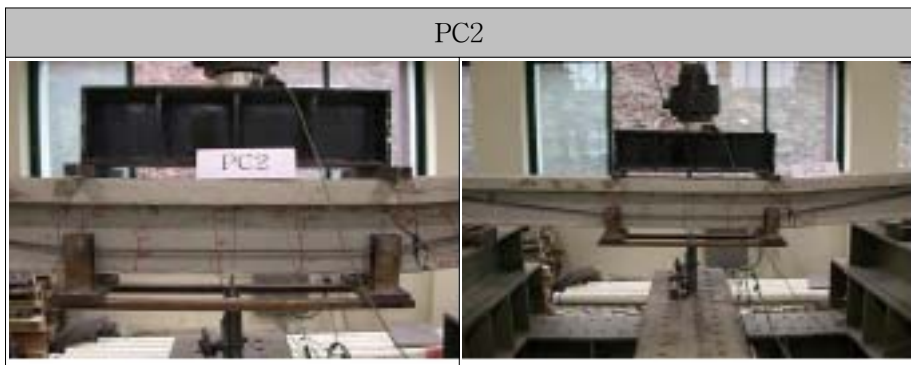
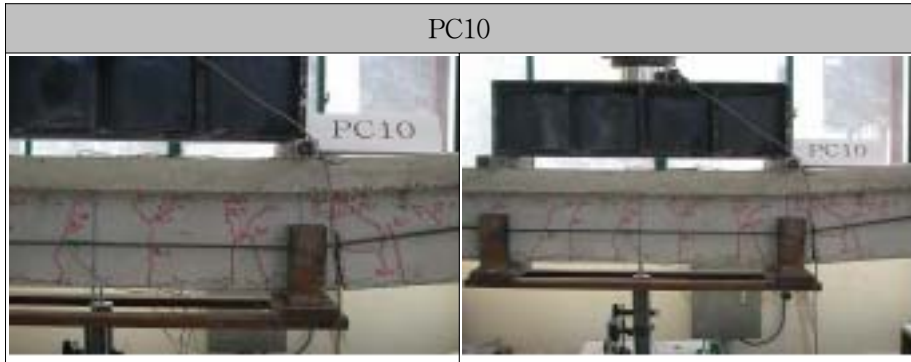


PC8



PC9





※ 실험변수 중 내부 PS강재비에서 RC2시험체도 실험을 행하였으나 205.20 강선의 모양이 원형철근과 비슷하여 강선 도입후 하중재하시에 콘크리트와 부착이 확실히 안되어 미끌어져서 내부 부착강선의 구실을 하지 못하게 되어 데이터로 쓰기에는 무리가 있어 제외하였다.

5) 변형률 비교

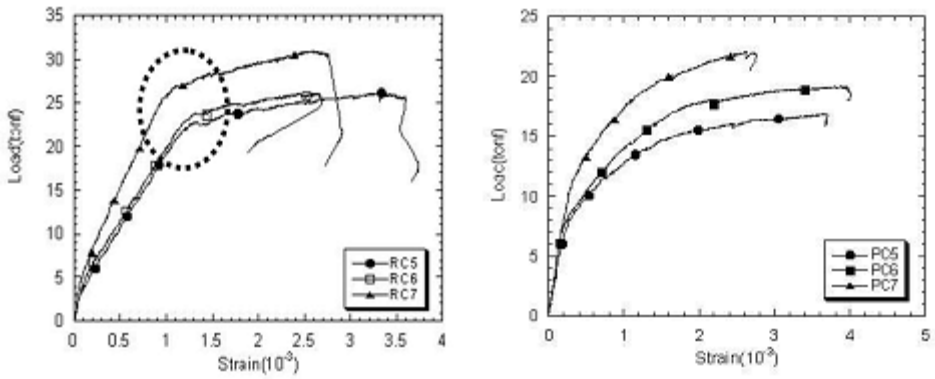


Fig.4.27 Comparison of strain RC beam and PC beam

실험 후 RC보와 PC보의 변형률 차이를 나타내 보았는데, Fig.27의 좌측 그림은 RC보를 나타내고 있고, 우측 그림은 PC보를 나타내고 있다. 그림을 보면(좌측그림의 원안) 확연하게 인장철근의 영향으로 인장철근이 항복할 때 외부 강선의 변형률이 변하는 것을 볼 수 있고, PC보에서는 내부 강선이 항복을 하지 않기 때문에 변형률이 RC보와는 다르게 차이가 남을 그래프로부터 확인할 수 있다.

V. 결론

외부 프리스트레싱으로 보강한 철근 콘크리트보와 프리스트레스트 콘크리트보의 휨 거동을 실험한 결과 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

1. 앞서 나열한 ACI시방식과 이를 준용하고 있는 우리나라 시방식의 경우 RC보에서는 내부 철근의 영향을, PC보에서는 내부 부착 프리스트레싱 강재의 영향을 고려하고 있지 못하고 있기 때문에 외부 프리스트레싱으로 보강한 RC, PC보의 극한응력 거동을 예측하지 못하고 있다.

2. 본 실험과 같이 외부 비부착 강선으로 보강한 RC보와 PC보의 경우 극한응력을 구하는 식을 ACI식으로 규정된 두 식만으로 표현하고 있기 때문에, 두 식의 합으로 표현하면 과대평가 혹은 변수별 조합에 따라 과소평가할 소지가 있기 때문에 시방서 개정이 필요하다.

3. 외부 비부착 강선을 갖는 RC보와 PC보에서 외부 프리스트레싱 강재의 극한응력은 RC보에서는 내부 철근비, PC보에서는 내부 PS강재비의 증가에 따라 감소함을 알 수 있다.

4. 외부 비부착 강선을 갖는 RC보와 PC보에서 외부 프리스트레싱 강재의 극한응력은 RC보와 PC보에서 모두 외부 PS강재비의 증가에 따라 감소함을 알 수 있다.

5. 외부 비부착 강선을 갖는 RC보와 PC보에서 외부 프리스트레싱 강재의 극한응력은 RC보와 PC보 모두 지간/유효높이비의 증가에 따라 감소함을 알 수 있다.

6. 외부 비부착 강선을 갖는 RC보와 PC보의 경우 외부 강선도입으로 인한 상연의 인장응력과 하중재하로 인한 압축응력을 번갈아서 받기 때문에 그 단면에 대한

피로연구가 필요할 것으로 사료된다.

7. 외부 비부착 강선을 갖는 RC보와 PC보에서 외부 프리스트레싱 강재의 극한 응력은 보의 처짐과 선형적으로 비례함을 알 수 있다.

8. PS 강재깊이와 중립축 깊이비로 나타낸 극한응력 제안식은 응력 평준화계수와 응력수정계수 등을 도입하여 나타낼 수 있고 실험값과 유사하게 예측할 수 있다.



VI. 참고문헌

1. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-95), " American Concrete Institute, Detroit, Michigan 1995.
2. Campbell, T. I. and Chouinard K. L. 1991, "Influence of Nonprestressed Reinforcement on the Strength of Unbonded Partially Prestressed Concrete Members", ACI Structural Journal, Vol. 88, No. 5, pp. 546-551.
3. Canadian Standards Association Can3-A23.3-M84), "Design of Concrete Structures for Buildings," Dec. 1984.
4. Du, G. and Tao, X., "Ultimate Stress in Unbonded Tendons of Partially Prestressed Concrete Beams," PCI Journal, Vol. 30, No. 6, Nov-Dec. 1985, pp. 72-91.
5. Harajli, M. H., "Strengthening of Concrete Beams by External Prestressing," PCI Journal, Vol. 38, No. 6, Nov-Dec. 1993, pp. 76-88.
6. Harajli, M. H. and Naaman, A. E., "Evaluation of the Ultimate Steel Stress in Partially Prestressed Flexural Members," Journal of the Prestressed Concrete Institute, Vol. 30, No. 5, Sept-Oct. 1985.
7. Mattock, A. H., "Modification of the ACI Equation for Stress in Bonded Prestressed Reinforcement at Flexural Ultimate," ACI Journal, Vol. 81, No. 4, July-Aug. 1984, pp. 331-339.
8. Mattock, A. H., Yamazaki, J., and Jattula, B. T., "Comparative Study of Prestressed Concrete Beams with and without Bond," ACI Journal, Vol. 68, No.3, Feb. 1971, pp. 116-125.
9. Naaman, A. E., "Ultimate Analysis of Prestressed and Partially Prestressed Section by Strain Compatibility," Journal of the Prestressed Concrete Institute, Vol. 22, Jan-Feb. 1977, pp. 32-51.
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, Nov-Dec. 1991, pp. 683-692.

11. Naaman, A. E., "A New Methodology for the Analysis of Beams Prestressed with External or Unbonded Tendons," ACI SP-120-16, pp. 339-354.

12. Naaman, A. E., "Partial Prestressing in the Rehabilitation of Concrete Bridge," Bridge Evaluation, Repair and Rehabilitation, Proceedings of the 1st Us-European Workshop, A. S. Npwak and E. Absi Editors, The University of Michigan, 1987, pp. 391-406

13. Naaman A. E., "External Prestressing for Rehabilitation: Analysis and Design Implications," 4th International Conference on Structural Failure, Durability and retrofitting," Singapore, July 1993.

14. Pannell, F. N., "The Ultimate Moment of Resistance of Unbonded Prestressed Concrete Beams," Magazine of Concrete Research, Vol. 21, No.66, March 1969, pp. 43-54.

15. Tom, A. and Pannell, F. N., "The Ultimate Moment of Resistance of Unbonded Partially Prestressed Reinforced Concrete Beams," Magazine of Concrete Research, Vol. 28, No. 97, Dec. 1976, pp. 203-208.

16. Virlogues, M., (1982), "External Prestressing," IABSE Proceeding, International Association for Bridge and Structural Engineering, P-62/82, Zurich, Switzerland, pp. 101-108.

17. 건설교통부 (1999), 콘크리트 구조 설계기준

18. 오병환, 유성원, "외부 프리스트레스트 콘크리트 부재의 극한상태에서의 강선 응력 예측식 제안," 콘크리트학회 논문집, 제11권 6호, 1999.12, pp. 12-24.

19. 오병환, 유성원, "외부 비부착 강선을 가진 PSC 교량의 휨거동 해석기법 및 해석 프로그램 개발," 대한 토목학회 논문집, Vol. 19, No. I-5, 1999.9, pp. 761-771.

20. 이종윤, 임재형, 문정호, 신경재, "비부착 긴장재를 갖는 프리스트레스트 콘크리트 보에서 긴장재 응력의 과대평가," 콘크리트학회 논문집, 제11권 4호, 1999.9, pp. 73-81.

21. 임재형, 문정호, 이리형, "비부착 긴장재의 응력산정을 위한 극한강도 설계식

의 평가,” 콘크리트학회 논문집, 제11권 3호, 1999.6, pp. 113-122.

22. 임재형, 문정호, 이리형, “비부착 긴장재의 응력을 평가하기 위해 제안된 설계식의 타당성 검증,” 콘크리트학회 논문집, 제11권 2호, 1999.4, pp. 127-137.

23. 임재형, 문정호, 이리형, “비부착 긴장재의 응력에 영향을 미치는 중요변수에 대한 실험연구,” 콘크리트학회 논문집, 제11권 1호, 1999.2, pp. 209-219.

24. 임재형, 문정호, 음성우, 이리형, “프리스트레스트 콘크리트 부재에서 비부착 긴장재의 극한응력에 관한 연구(II)-변형도 적합조건을 이용한 설계식의 제안,” 콘크리트학회지, 제9권 5호, 1997.10, pp. 105-113.

25. 임재형, 문정호, 음성우, 이리형, “프리스트레스트 콘크리트 부재에서 비부착 긴장재의 극한응력에 관한 연구(I)-기존연구 및 ACI 기준식의 고찰,” 콘크리트학회지, 제9권 4호, 1997.8, pp. 167-176.

26. 박상렬, “외부 프리스트레싱 텐던으로 보강된 콘크리트보의 극한 휨 거동” 목 적기초연구 최종보고서, 한국과학재단, 2002.8 과제번호 R05-2000-000-00374-0



감사의 글

먼저 본 논문이 완성되기까지 부족함이 많은 저를 깊은 애정과 관심으로, 그리고 많은 학문적 가르침으로 지도해주신 박상렬 교수님께 깊은 감사를 드립니다. 또한 부족한 논문을 완성시켜 주시기 위해 학문적 소양뿐만 아니라 세심하게 지도를 해주신 남정만 교수님, 김상진 교수님께 진심으로 감사를 드립니다. 그리고 학부과정에서부터 지금까지 언제나 자상한 가르침을 주신 양성기 교수님, 김남형 교수님, 이병걸 교수님께도 깊은 감사를 드립니다.

동고동락하면서 같이 고생해주신 창훈형, 태우형, 성욱, 영임, 현, 철영에게 말로 표현할 수 없는 고마움을 전합니다. 또한 대학원생들 영택, 지훈, 현우, 영웅, 현수형과 재관, 영범, 동일, 승희, 건, 순보, 성호에게도 깊은 감사를 드립니다.

그리고, 바쁜 와중에도 많은 가르침과 배려를 해주신 김두일 이사님, 이승우 차장님, 원종태 과장님, 이상승, 안효진님께도 무한한 고마움을 전하고, 추중팔, 김민영 사장님 이하 두우가족들에게도 고마움을 전합니다.

학업에 전념할 수 있도록 도와준 영훈, 대필, 상철, 성민, 유범, 현욱, 승현, 경표, 일룡, 광원, 광섭, 정현 등을 비롯한 벗들과 병현형, 객지에서 고생하는 하나밖에 없는 동생 용우, 궂은일들을 도와줬던 토목환경공학전공 학우들에게도 고마운 마음을 전합니다.

마지막으로 지금껏 묵묵히 지켜봐 주시고 자식들을 위해 온갖 고생들을 마다하지 않으신 아버지, 어머니께 이 작은 결실을 바칩니다.
감사합니다.

2004년 1월 1일 甲申年 새해 아침에...