

## 단일텐던 및 복수텐던이 설치된 프리스트레스트 콘크리트 부재의 정착부 거동 연구

### Mechanical Behavior of Anchorage Zones in Prestressed Concrete Members with Single and Closely-Spaced Anchorages

오병환\* · 임동환\*\* · 유승운\*\*\*

Oh, Byung Hwan · Lim, Dong Hwan · Yoo, Seung Woon

#### Abstract

The purpose of present study is to explore the mechanical behavior of anchorage zones in prestressed concrete members with single and closely-spaced multiple tendon anchorages. The cracking loads and local stress distributions at these anchorage zones are studied. To this end, a series of experiments have been conducted. From this study, it is found that the failure of anchorage zones of the closely-spaced multiple tendon members is initiated by crackings along the tendon path and that the tensile stresses arising in the vicinity of anchorage zone of the first tendon are reduced due to additional compression of the second tendon. This results in the increase of cracking capacity of the member. The effects of multiple tendons are presented in the form of strain distribution and cracking load comparisons.

#### 요 지

본 논문은 복수 정착구가 서로 인접하여 설치되었을 경우의 정착부 거동 및 국부응력 분포특성을 규명함에 목적이 있으며, 이를 위하여 단일텐던 및 복수텐던이 설치된 프리스트레스트 콘크리트부재에 대한 실험연구가 수행되었다. 위의 실험연구 결과 정착부 파괴는 단일 및 복수텐던 설치부재 모두 텐던을 따라가는 균열에 의해 시작되며, 먼저 정착된 텐던 정착부 주변의 인장응력은 인접해서 긴장되는 텐던의 압축응력 발생효과로 인하여 균열하중에 대한 저항성이 개선됨이 밝혀졌다. 본 논문에서는 복수텐던 부재의 정착부 주위의 변형도 분포와 균열하중 등을 단일텐던 부재의 경우와 비교분석하여 제시하였으며, 복수텐던부재의 파괴기구도 규명하였다.

\* 정희원 · 서울대학교 토목공학과 교수

\*\* 정희원 · 동국대 강사, 공학박사

\*\*\* 정희원 · 삼성건설(주)기술연구소 선임연구원

# 1. 서론

최근에 건설되는 교량은 교량의 대형화 추세에 따라 장대교량으로 건설되고 있으며, 특히 도시고속화도로 등은 경제적, 환경적 요인 등에 의해 프리스트레스트 콘크리트 박스거더 교량으로 건설되는 추세이다. 프리스트레스트 콘크리트 박스거더 교량은 콘크리트와 PC강재의 역학적 장점들을 이용하여 구조거동상 효율이 높은 단면을 구성할 수 있는 장점이 있으며, 이는 프리스트레스트 콘크리트 박스거더의 제작방식 및 시공방법에 따라 현장타설공법과 프리캐스트공법으로 대별되고, 현장조건, 경제성 및 시공성 등에 근거하여 선택적으로 사용되고 있다.

이러한 프리스트레스트 콘크리트 구조물에 프리스트레스 힘을 도입할때 정착부에 과다한 집중하중이 작용하기 때문에 국부집중응력의 발생으로 인하여 균열이 발생할 수 있다. 특히 외부 프리스트레싱(External prestressing) 공법으로 프리스트레스트 콘크리트 박스거더 교량을 설계·시공할 때에는 지점부의 다이어프램 세그먼트에 다발의 정착구가 서로 인접하여 설치되기 때문에 과다한 프리스트레스 힘이 도입되며, 내부 프리스트레싱(Internal prestressing) 공법에서도 역시 상부 플랜지 현치부에 복수텐던 정착구가 설치될수 있다. 이런경우 과다한 집중하중으로 인하여 인장응력이 크게 발생할 수 있으며, 이러한 내부인장응력의 발생상태 및 역학적 거동은 매우 복잡하다. 그리고 최근 과다한 프리스트레스 힘의 도입으로 인한 균열의 발생사태가 여러곳에서 보고되고 있다.

그러나 AASHTO, ACI 및 PCI 등의 프리스트레스 정착부 설계규준은 비교적 큰 정착부를 갖는 직선텐던 콘크리트 구조물에 있어서는 그 적용이 가능하지만 얇은 복부에 포스트 텐션을 가할경우, 또한 텐던의 편심 및 경사가 많은 경우에는 기존의 설계규준은 미흡함이 여러 연구에서 나타났으며, 최근 많은 현장경험 및 연구를 토대로 기존의 설계규준이 개정·보완 되어야할 필요가 있음이 밝혀졌다.

따라서 본 연구에서는 복수 정착구가 서로 인접하여 설치되었을 경우의 정착부 거동 및 국부응력 분포특성을 규명함에 그 근본 목적이 있으며, 이를 위하여 단일텐던 및 복수텐던이 설치된 프리스트레스트 콘크리트부재에 대한 실험크기의 실험연구가 수

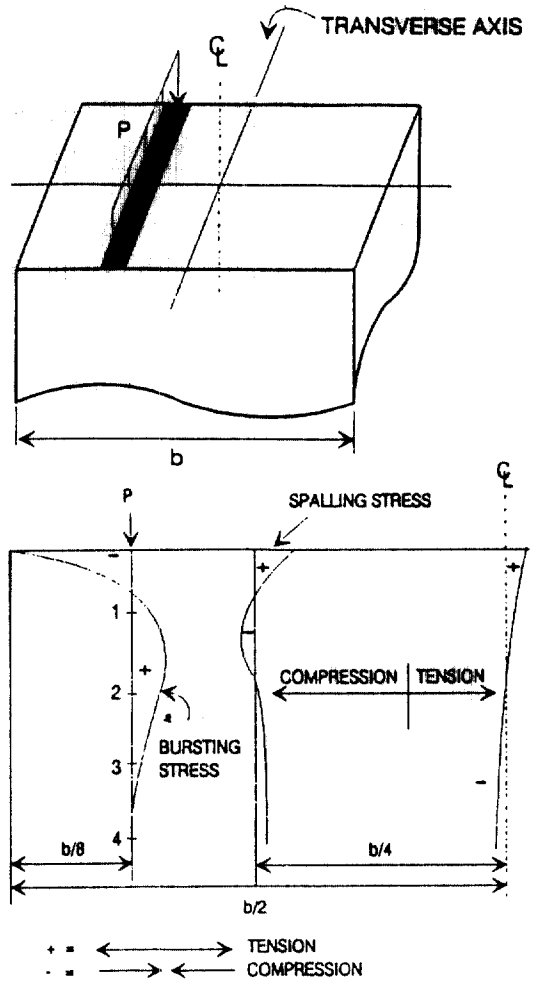


그림 1. 집중하중이 직사각형평면에 작용하는 경우의 응력발생상태

행되었다. 또한 단일 및 복수텐던의 비교연구가 수행되었으며, 본 논문에서는 위의 여러 연구를 토대로 프리스트레스트콘크리트 교량부재의 진보된 설계 및 시공의 토대를 구축하고자 한다.

## 2. 정착부의 역학적 응력상태

### 2.1 정착부의 응력상태

집중하중이 유한 직사각형평면에 작용하는 경우, 하중재하 직각방향으로 압축응력과 인장응력이 발생한다. 그림 1은 위의 응력발생상태를 도시한 것으로서, 이 그림에서 알수 있듯이 크게 두가지의

인장응력이 발생함을 알 수 있다. 그 하나는 하중 재하 방향으로 부재내부에서 하중의 직각방향으로 발생하는 인장응력이고, 또다른 하나는 하중재하면 상에서 하중재하점으로부터 떨어진 위치에서 하중 재하면에 평행하게 발생하는 인장응력이다. 일반적으로 전자를 파열(bursting)응력, 후자를 박리(spalling)응력이라고 부른다. 또한 프리스트레스 정착부에서는 하중이 유한면적상에 분포되어 작용하므로 이때 정착구 바로 아래 지압응력(bearing stress)이 발생하며, 이러한 지압응력은 하중을 순수지압면적으로 나눈 값이 된다.

프리캐스트 프리스트레스 콘크리트 구조물의 정착부에서는 이 세가지 응력이 내부 응력의 분포 및 균열의 발생에 주요한 역할을 하게 되지만 아직까지도 이들 응력의 상호관계 및 그 역학적 기구가 정확히 알려지지 않고 있으며 따라서 정착부에서의 철근 보강 설계기준도 미비한 상태이다.

## 2.2 파열응력(bursting stress)

프리스트레스힘이 정착판에 도입되면 정착판 선단에서는 높은 압축응력이 유발되며, 부재내부로 들어가면서 인장응력이 발생한다. 이와같이 재하방향을 따라서 이 재하방향에 직각으로 작용하는 응력의 분포를 '파열응력'이라 부른다. 이러한 파열응력은 텐던의 반경방향으로 발생하는 응력과 텐던 반경방향의 직각방향으로 발생하는 응력으로 구분할 수 있으며, 본 연구에서는 전자를 반경방향 파열응력(Radial bursting stress), 후자를 접선방향 파열응력(Tangential bursting stress)로 정의하였다. 그림 2는 이들의 응력의 분포상태를 도시한 것으로서 지금까지의 대부분의 연구자들은 반경방향 파열응력에 관심을 가져 접선방향 파열응력을 전혀 고려하지 못하였으며, 따라서 정착부의 역학적 기구 등을 명확히 설명할 수가 없었다.

## 2.3 박리응력(spalling stress)

프리스트레스 정착부에 높은 프리스트레스 힘이 도입되면, 재하방향에 직각으로 콘크리트의 단부에서 인장응력이 발생하며, 이러한 인장응력을 박리응력이라 부른다. 이 박리인장응력은 하중재하면에서 최대이고, 재하면에서 내부로 들어갈수록 급격히 감소하는 경향이 있다. 이러한 박리 인장응력 크기의

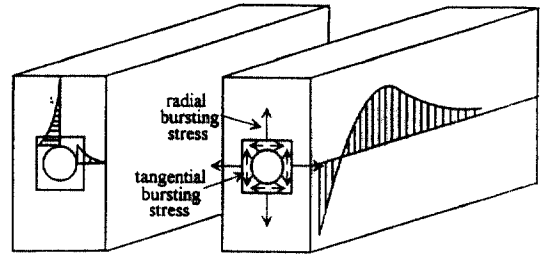


그림 2. 반경방향 파열응력(Radial bursting stress)과 접선방향 파열응력(Tangential bursting stress)

합은 파열 인장응력에 비해 상대적으로 작고 국부적으로 발생하기에 정착부설계에서 종종 무시되어 왔다. 그러나 최대 박리응력 값은 파열응력에 비해 상대적으로 클 수 있으며 박리응력은 파열응력과 조합하여 또다른 형태의 균열을 유발할 수도 있다.

## 2.4 지압응력(bearing stress)

정착부에서의 최대압축응력은 정착판 아래에서 발생하며, 평균지압응력은 하중을 정착판의 순간면적으로 나누면 되고, 이때 순간면적은 지압판의 면적에서 텐던덕트의 면적을 뺀 면적이다.

미국이나 우리나라 시방서에서는 파열인장응력이나 박리인장응력에 대해서는이들을 검토해볼 필요가 있다고 하는 정도로만 막연한 규정을 두고 있으나, 지압응력에 대해서는 허용지압응력을 설정하여 엄격히 규제하고 있다. 또한 미국시방서는 대부분의 유럽시방서에 비해 허용지압응력값이 상당히 낮은데, 우리나라의 경우도 미국과 같은 규정을 두고 있다. 따라서, 앞으로 이 부분에 대해서도 심층적 연구가 요망된다.

## 3. 단일텐던과 복수텐던의 정착부 거동실험

### 3.1 개요

본 연구에서는 단일 프리스트레스 정착구가 설치된 경우 및 정착구가 인접하여 복수로 설치된 경우의 국부응력 분포특성 및 여러가지 제반 효과등을 규명하기 위하여, 직선단일텐던부재 및 복수직선텐던부재 그리고 곡선단일 및 복수텐던부재를 제작하여 다양한 실험이 수행되었다. 본 실험에서 채택된 부재는 실제 교량을 모사하기 위하여 일반적인 프리

표 1. 실험변수 및 부재기호

Identification of Test Member	Tendon Shape Reinforcement	Type of Anchorage Reinforcement	Arrangement of Structural Reinforcement	Number of Tendon
W-SC-A0-R0	Straight	Spiral	Ordinary	Single
W-SS-A2-R1	Straight	Spiral	Ordinary	Single
W-SC-A2-R1	Curved	Spiral	Ordinary	Single
W-MS-A2-R1	Straight	Spiral	Ordinary	Multiple
W-MC-A2-R1	Curved	Spiral	Ordinary	Multiple

스트레스드 콘크리트 박스거더 교량의 포스트 텐션 링 정착부위를 적절히 모델링하여 실험부재를 제작하였다. 프리캐스트 프리스트레스트 박스(box)형태 교량의 정착부위는 내부 프리스트레싱 (Internal prestressing)공법의 경우 상판 플랜지(flange)와 웨브(web)가 만나는 헌치(hunch)부분 및 하부 버트레스이며, 외부 프리스트레싱 (External prestressing) 공법인 경우에는 지점부 다이아프램 세그먼트이다. 이들 정착구는 필요에 따라 헌치부 양단에 복수로 설치되며, 지점부 다이아프램 세그먼트에는 여러개의 정착구가 설치된다. 따라서 본 연구에서는 인접하여 복수텐던이 설치된 경우의 균열 및 극한하중의 변화, 내부 변형도의 분포특성 및 단일 및 복수텐던의 효과등을 고찰하고자 한다.

### 3.2 실험변수 및 시험체의 제작

본 연구에서는 텐던의 형상(직선 및 곡선텐던) 및 단일, 복수 텐던등을 실험변수로 채택하여, 직선단일텐던 및 복수직선텐던 그리고 곡선단일 및 복수 곡선텐던 부재를 제작하여 다양한 실험을 수행하였다. 위의 실험변수 및 부재의 기호는 표 1과 같다.

본 실험부재는 박스거더 프리캐스트 세그먼트의 상부 플랜지 정착부위를 실제 크기로 모델링 하였으며, 상부 정착부위 즉 헌치부의 폭을 실제교량의 표준세그먼트(segment)와 같은 치수 40 cm로 하였고, 그 높이는 정착부의 집중하중이 영향을 미치지 않는 부위 즉 단일 및 복수직선텐던이 설치된 부재의 경우에는 120 cm, 복수곡선텐던이 설치된 경우에는 160 cm로 제작하였고, 길이는 정착부위 양단(dead end, live end)의 영향이 서로 교차되지 않게 하기 위하여 단일 및 복수직선텐던 부재의 경우 2.43 m로,

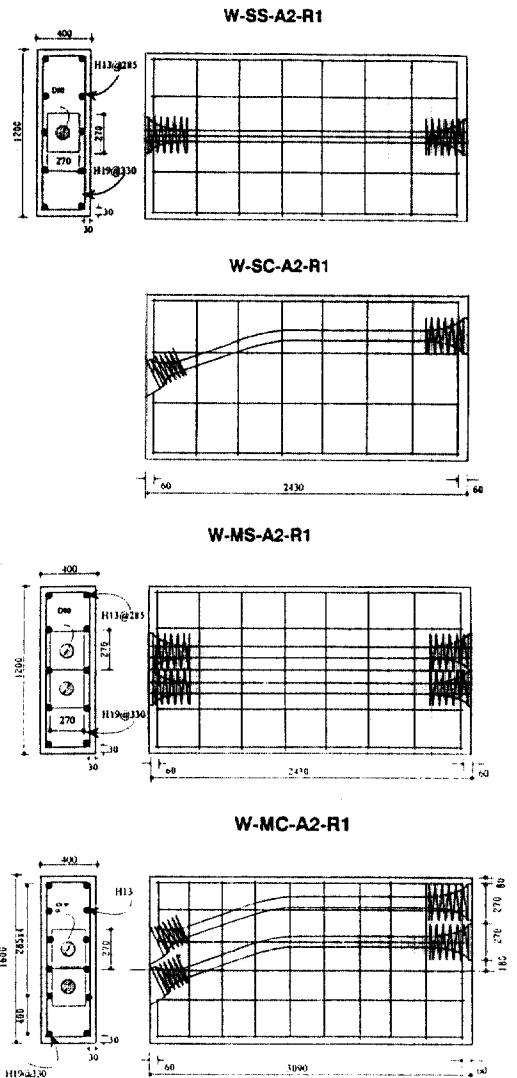


그림 3. 실험부재의 형상

복수곡선텐던 부재의 경우에는 3.09 m로 결정하였다. 위의 구체적인 부재도면은 그림 3과 같다.

또한 본 연구에서는 콘크리트내부에서 발생하는 파열 변형도 및 박리 변형도를 명확히 규명하기 위하여, 그림 4에서 보는 바와 같이 매설 게이지를 파열 응력이 가장 크게 발생하는 부위 즉 텐던을 따라가며 설치하였고, 특히 반경 방향 및 법선방향 파열응력을 동시에 측정하여 초기균열 발생의 절대적 인자를 고찰하고자 파열인장응력 측정을 위한 매설게이지를 그림에서와 같이 반경방향파열변형도를 측정하기 위해서 텐던상단부에 반경방향으로 게이지를 매설하였으며, 텐던측면부에 접선방향파열변형도를 측정하기 위해 반경방향에 직각방향으로 게이지를 매설하였다. 그리고 매설게이지를 정확한 위치에 고정하기 위하여 게이지의 모서리 부분에 0.2 mm의 구멍을 뚫어 여기에 0.1~0.2 mm 직경의 고강도 철사를 묶고 주변의 철근에 고정하였으며, 이는 예비시험을 통해 고정철사의 영향이 콘크리트 내부 변형도에 전혀 영향이 없음을 확인한 후 수행되었다. 따라서 본 게이지는 타설등의 작업에도 불구하고 원하는 위치에 고정될수 있었다. 또한 복수곡선텐던의 경우에는 그림에서 볼수 있듯이 상하부 텐던 부근에 다량의 매설게이지를 교대로 설치하여 하나의 텐던을 정착시키고 난 이후에 인접텐던을 긴장할때의 내부 변형도의 변화를 정확히 파악하고자 하였다. 그리고 프리스트레스 도입 힘에 직각방향으로 단부에서 발생하는 박리응력을 측정하기 위하여 그림에서 보는 바와 같이 매설게이지를 설치하였다. 또한 프리스트레스 도입힘에 주철근으로 작용하는 도입하중에 직각방향의 철근에 철근 게이지를 부착하여 균열이 발생하기 전 뿐 아니라, 균열 이후에 철근이 부담하는 응력의 정도를 측정하였고, 위에서 측정된 응력을 기초하여, 균열 및 파괴하중을 규명하고자 하였다.

### 3.3 실험 재료

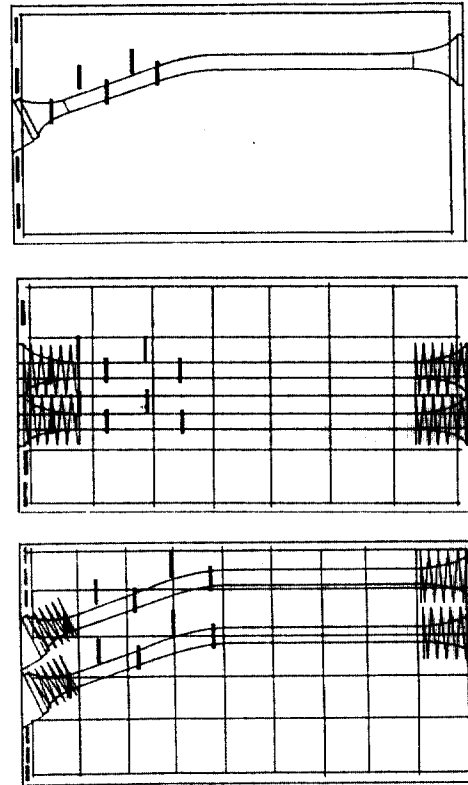


그림 4. 매설게이지 설치도

(1) 콘크리트-콘크리트의 압축강도는 최근에 건설되고 있는 박스거더 교량의 강도범위로서 설계기준강도 450 kg/cm<sup>2</sup>, 배합강도 520 kg/cm<sup>2</sup>로 하였으며, 시멘트는 3종시멘트를 사용하였다. 그 구체적인 배합비는 표 2와 같다.

(2) Post Tensioning Anchors-본 실험에서 사용된 정착구는 VSL에서 시판 사용되는 EC type을 사용하였고 한개의 텐던에 19개의 seven-wire strand가 들어가는 19다발 텐던을 사용하였다. 쉬스는 직경 9 cm인 철재금속쉬스를 사용하였다. 또한 anchor head는 직경 180 mm인 VSL 제품을 사용하였다.

표 2. 콘크리트 배합표

Water-Cement ratio(%)	Water (kg/m <sup>3</sup> )	Cement (kg/m <sup>3</sup> )	Sand (kg/m <sup>3</sup> )	Aggregate (kg/m <sup>3</sup> )	Mighty-150 (kg/m <sup>3</sup> )
38	196	516	612	1,082	5.16

(3) PC 강연선—본 실험에서 사용된 강선은 seven wire strand로서 인장강도는 18.6 t, 직경 1.27 cm이며, ASTM A-416 규정에 일치하는 것을 사용하였다.

(4) 구조철근—본 부재에서 사용된 철근은 H13, H19, H25의 high bar를 사용하였고 그 인장강도는 400 N/mm<sup>2</sup>이다.

(5) 정착부 국부 보강철근—정착부의 보강을 위하여 나선철근이 사용되었으며 이것 역시 구조보강 철근과 같이 인장강도 400 N/mm<sup>2</sup>인 high bar를 사용하였고 직경은 13 mm이다.

### 3.4 실험방법 및 측정

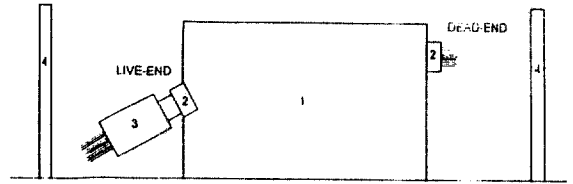
#### 3.4.1 실험방법

실험방법은 VSL ZPE-460/31 인장기로 하중을 단계별로 증진시켜가며 콘크리트 내부의 응력 및 철근의 응력을 Data Aquisition System을 통하여 조사하였으며, 균열의 양상 및 균열폭, 균열 간격을 단계별로 조사하였다. 단일텐던 부재의 경우 프리스트레스 힘의 도입은 균열이 발생하기 전 약 180 t까지는 20 t씩 단계적으로 증진시키다가, 균열 발생 이후 8 t씩 증가시켜 극한 상태까지 가함으로써, 프리스트레스 국부 집중하중으로 인한 정착부의 파괴 거동을 고찰하였다. 그리고 복수텐던의 경우 직선 텐던이 설치된 부재는 상부텐던을 먼저 균열이 발생하지 않는 허용 긴장력 200 t으로 긴장 정착시키고 하부텐던을 위의 단일텐던과 같은 방식으로 프리스트레스 힘을 도입하였다. 그리고 복수곡선텐던이 설치된 부재는 실험의 효율성을 위해서 하부텐던을 먼저 허용 긴장력 200 t으로 긴장 정착시키고 다음으로 상부텐던을 같은 방식으로 프리스트레스 힘을 도입하였다.

재하 System 및 재하방식은 그림 5에 나타난 바와 같이 고정단(dead end)부분은 정착머리(Anchor Head)에 쐐기(Wedge)를 꼽아 장치하고, 긴장단(live end)에서 위에서 서술한 바와 같이 단계적으로 하중을 증진시켰으며, 정확한 프리스트레스 힘의 도입을 점검하기 위하여, 실험 실시전에 dead end부와 live end부에 인장기를 설치하여 dial gage로 하중을 측정하여 점검하였다.

#### 3.4.2 측정

본 연구에서는 콘크리트 내부에서 발생하는 파열 변형도 및 박리 변형도를 명확히 규명하기 위하여,



1. FULL SCALE CURVED TENDON SPECIMEN  
2. 19 STRAND ANCHOR HEAD  
3. 460 TON CENTER HOLE RAM  
4. TENDON BACKSTOP

그림 5. 재하 System 및 재하방식

전술한 바와 같이 매설 게이지를, 파열 응력이 가장 크게 발생하는 부위 즉 텐던을 따라가며 설치하였고, 프리스트레스 도입 힘에 직각방향으로 단부에서 발생하는 박리응력을 측정하기 위하여 설치하였다.

또한 프리스트레스 도입힘에 주철근으로 작용하는 도입하중에 직각방향의 철근에 철근 게이지를 부착하여 균열이 발생하기 전 뿐 아니라, 균열 이후에 철근이 부담하는 응력의 정도를 측정하였고, 위에서 측정된 응력을 기초하여, 균열 및 파괴하중을 규명하고자 하였다.

또한 표면의 파열부와 박리부에 콘크리트 게이지를 부착하고, 콘크리트의 내부 게이지로부터 얻어지는 변형도와 비교 분석하여, 내·외부간의 응력 및 변형도차이를 검토하였다. 이렇게 함으로서 균열의 내·외부전파 양상을 규명할 수 있다.

본 실험부재에 단계적으로 프리스트레스 힘을 도입하면 균열이 발생하며, 일단 균열이 발생하게 되면 1/100광학 아이 게이지(Eye Gage)로 균열폭을 측정하여 도입힘에 따른 균열 폭의 증진 상황을 조사하였다. 각 도입 힘에 따른 균열양상을 트레이싱지에 옮겨 균열의 형상 및 파괴의 거동을 규명하였다. 위의 스트레인 게이지로 읽어지는 저항의 차이는 Data Aquisition System을 통해 내부에서 증폭되어 변형도의 단위로 읽혀지고 프린트되어진다.

### 4. 단일텐던 및 복수텐던 부재의 실험결과 및 비교분석

#### 4.1 정착부의 파괴 양상

본 실험으로부터 배근이 되지 않은 프리스트레스 정착부의 파괴는 다음과 같은 양상으로 발생됨을 알 수 있었다. 먼저 정착판의 폭 만큼 떨어진 곳에서

초기 균열이 발생하고 프리스트레스 힘의 증가에 따라 균열은 재하면과 그 반대 방향으로 텐던의 경로를 따라 진전한다. 다음으로 정착판의 모서리 부분에서 경사균열이 발생하며 이것이 측면부로 진전하여 마침내 갑작스런 콘크리트의 취성과파 혹은 텐던이 끊어지면서 극한파괴상태에 도달하게 된다.

본 실험에서는 철근보강이 되지 않은 W-SC-A0-R0 부재의 경우, 경사균열(Diagonal Crack)의 발생이 명확히 발생하였으나, 대부분의 경우에는 경사균열이 발생하지 않고 텐던의 경로를 따라 균열이

급격히 전파되고 있음을 볼 수 있다.

구조 철근 및 국부 보강 철근이 전혀 배근되지 않은 W-SC-A0-R0 부재의 파괴양상을 보면 초기균열은 거의 정착판의 폭 만큼 떨어진 곳에서 발생하며, 텐던의 경로를 따라 급격하게 균열이 전파되고 경사 균열이 크게 발생하며, 정착판부근에서 콘 형태로 콘크리트가 파괴되면서 폭발하였다. 그러나 보강이 충분한 다른 부재의 경우 이러한 취성과파는 발생하지 않았다. 그림 6(a)는 단일 직선 및 곡선 텐던이 배치된 부재의 파괴양상을 보이고 있는 그림으로서 초기균열은 거의 정착판의 폭 만큼 떨어진 곳에서 발생하고 텐던의 경로를 따라서 균열은 점진적으로 발생하여 파괴됨을 알 수 있다.

그림 6(b)는 복수텐던 부재의 파괴 양상을 도시한 그림으로서, 단일텐던의 경우와 비슷한 균열의 형상을 보이고 있다.

#### 4.2 균열하중

프리스트레스 콘크리트 부재에 복수텐던을 인접하게 설치할 경우에는 전술한 바와 같이 정착부의 응력상태가 복잡하며, 이에 대한 응력의 분포특성 및 그 효과를 명확하게 규명할 필요가 있다. 일반적으로 복수텐던이 설치될 경우 먼저 하나의 텐던을 설계허용 프리스트레스 하중으로 긴장시키고, 그 인접텐던을 설계 긴장력으로 긴장시킨다. 본 연구에서는 이러한 실제 긴장순서를 그대로 모사하여 실험을 수행하였으며, 긴장순서는 직선복수텐던부재의 경우 먼저 하부텐던을 200t으로—이는 긴장력으로 인하여 균열이 발생하지 않는 최대 프리스트레스 힘이다.—정착하고 상부텐던을 파괴시까지 단계적으로 프리스트레스 힘을 도입하였다. 그리고 복수곡선텐던부재의 경우에는 상부텐던을 200t으로 정착시키고, 하부텐던을 파괴시까지 단계적으로 긴장하였다.

표 3은 단일정착구가 설치되었을 경우와 복수인접텐던이 설치되었을 경우의 균열하중의 변화를 보이고 있는 것으로서, 복수직선텐던이 설치된 경우에 실제로 프리스트레스 부재에 힘이 504 ton으로 도입되었을 때 초기균열이 발생하고 있음을 알 수 있으며, 복수곡선 텐던의 경우에도 440 ton의 프리스트레스 힘이 도입되었을 때 비로소 균열이 발생하였다. 이는 단일텐던부재의 균열하중보다 훨씬

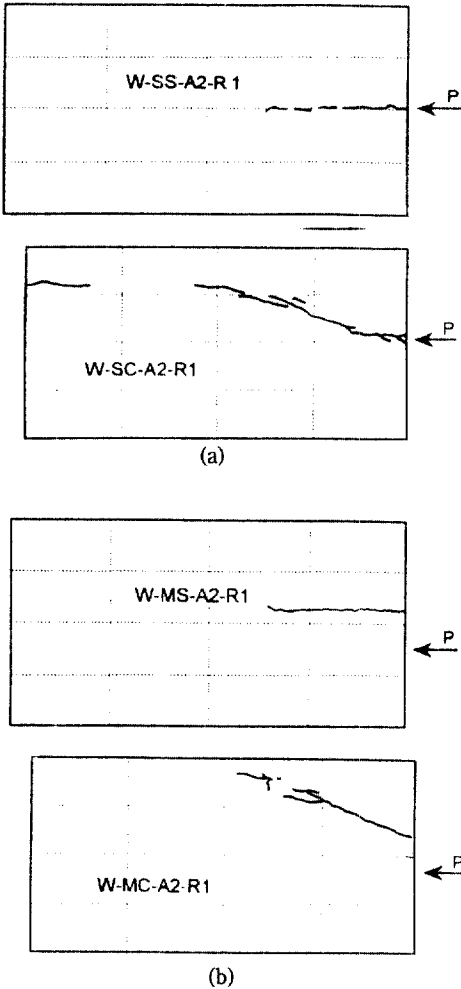


그림 6. (a) 단일 직선 및 곡선텐던이 배치된 부재의 파괴양상  
(b) 복수텐던 부재의 파괴 양상

표 3. 단일 및 복수텐던 설치시의 균열하중의 변화(ton)

텐던배치 형상	정착구의 개수	단일 정착구가 설치되었을 경우	복수인접 정착구가 설치되었을 경우
직선텐던 부재		300	304(200)
곡선텐던 부재		226	240(200)

\*( )는 초기 정착 프리스트레스 힘을 나타냄.

크며, 이러한 결과로부터 복수텐던이 설치되었을 경우 단일텐던 설치시보다 프리스트레스 부재는 균열에 대한 저항성이 매우 좋으며 따라서 복수로 인접하여 텐던을 설치하는 것이 균열의 제어에 유리함을 알 수 있다. 그러나 이러한 경우에 과도한 지압력으로 인한 지압파괴가 발생할 수 있으므로 이에 대한 주의가 필요하다. 또한 위의 실험결과로부터 직선텐던의 경우보다 곡선텐던의 경우에 복수텐던으로 인한 효과가 크게 나타남을 알 수 있다.

### 4.3 파열변형도의 변화

본절에서는 복수텐던이 순차적으로 긴장되었을 때의 내부 파열인장 변형도의 분포를 파악함으로써, 복수텐던 부재의 정착부 응력분포특성을 규명하고자 한다.

그림 7은 복수직선텐던부재(W-MS-A2-R1)의 상부텐던 접선방향 파열인장 변형도의 분포를 나타낸 것으로서, 이 부재의 실험방법은 전술한 바와 같이 상부텐던을 미리 200 ton으로 정착시키고 하부텐던을 부재의 파괴시까지 단계적으로 프리스트레스 힘을 도입하였다. 이 그림에서 알 수 있듯이 200 ton으로 상부텐던을 긴장시키고 난 이후에는 긴장단으로부터 약 15 cm 떨어진 곳에서 188  $\mu\epsilon$ 의 최대 인장변형도가 발생하고 부재내부로 들어가면서 점차 감소하고 있는 경향을 보이고 있다. 그러나 하부텐던을 단계적으로 긴장함에 따라 정착부 선단에서 발생하는 상부텐던 파열인장 변형도는 크게 감소하는 경향을 보이고 있으며, 이러한 영역은 장착단으로부터 약 30~40 cm 영역인 것으로 나타났다. 이러한 현상은 하부텐던 긴장시 발생하는 인장응력이 상부텐던 정착시 이미 발생한 인장응력에 압축응력의 효과를 나타내게 되어 인장응력의 감소효과가 나타나게 되는 것으로 사료된다. 정착부의 복수텐던으로 인한 인장응력의 감소는 균열 및 극한하중의

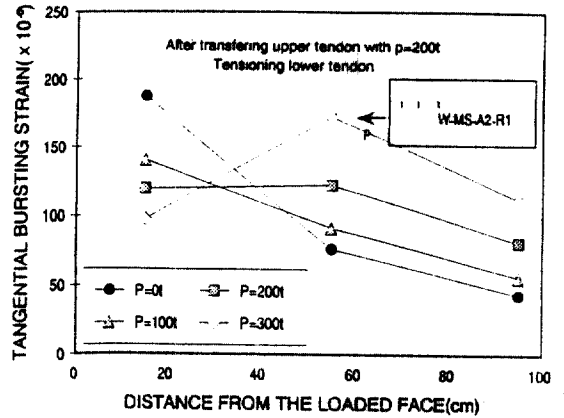


그림 7. 복수직선텐던부재(W-MS-A2-R1)의 상부텐던 접선방향 파열인장 변형도의 분포

증가에 직접적인 원인이 되는 것으로 판단된다.

그림 8은 복수직선텐던부재(W-MS-A2-R1)의 상부텐던 반경방향 파열인장 변형도의 분포를 나타낸 것으로서, 위 그림 7의 접선방향 파열인장 변형도의 분포와 비슷한 양상을 보이고 있으며, 프리스트레스 힘의 증가로 인한 인장 변형도의 감소영역은 약 40 cm까지 인 것으로 밝혀졌다.

그림 9는 복수곡선텐던부재(W-MC-A2-R1)의 하부텐던 접선방향 파열인장 변형도의 분포를 나타낸 것으로서, 이 부재의 실험방법은 전술한 바와 같이 하부텐던을 미리 200 ton으로 정착시키고 상부텐던을 부재의 파괴시까지 단계적으로 프리스트레스 힘을 도입하였다. 위 그림에서 알 수 있듯이 200 ton으로 하부텐던을 긴장시키고 난 이후에 상부텐던을 긴장함에 따라 내부인장 변형도가 정착부 선단에서 단일텐던의 경우보다 적게 나타나고 있다. 그리고 이러한 영역은 장착단으로부터 약 45 cm 이내의 영역인 것으로 실험결과 나타났으며, 이러한 결과는 다발텐던이 배치된 부재의 정착부 거동을 밝히는 데 유용한 자료로 활용될 수 있다. 또한 다발텐던의 설



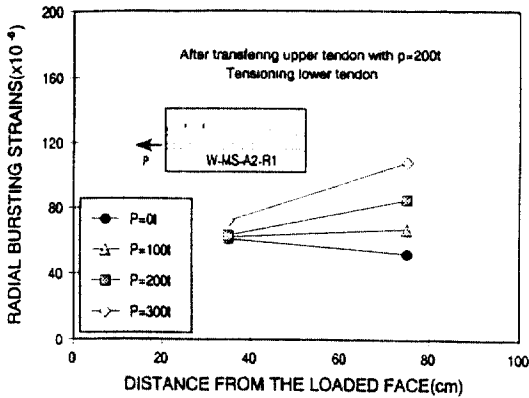


그림 8. 복수직선텐던부재(W-MS-A2-R1)의 상부텐던 반경방향 파열인장 변형도의 분포

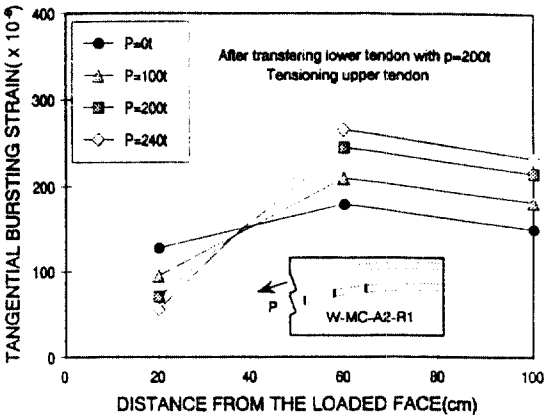


그림 9. 복수곡선텐던부재(W-MC-A2-R1)의 하부텐던 접선방향 파열인장 변형도의 분포

치시 긴장순서는 먼저 프리스트레스 부재 단면중심에 설치된 텐던을 먼저 긴장하여야 하며, 프리스트레스 힘이 항상 대칭이 되도록 하여 프리스트레싱을 하여야 한다.

#### 4.4 직선 및 곡선텐던부재의 비교

직선 및 곡선복수텐던 부재의 실험결과 최대인장 변형도는 단일텐던의 경우와 마찬가지로 직선텐던 부재의 경우 곡선텐던 부재보다 다소 크게 나타났다.

그림 10은 복수직선텐던부재(W-MS-A2-R1)와 복수곡선텐던부재(W-MC-A2-R1)의 접선방향 파열인장 변형도의 분포를 나타낸 것으로서, 최대인장 변형도는 긴장단으로부터 20~30 cm 부위에서 가장 크게 나타나며, 단면내부로 들어갈수록 점차 감소하는

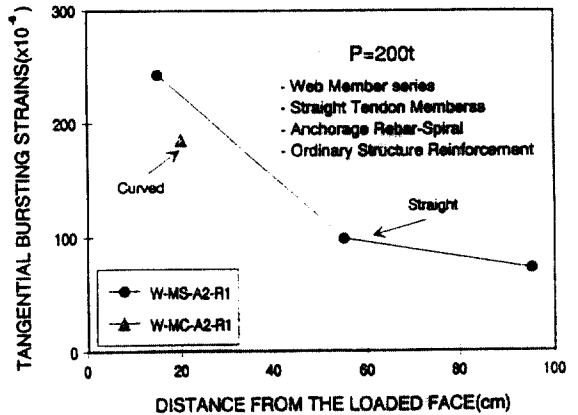


그림 10. 복수직선텐던부재(W-MS-A2-R1)와 복수곡선텐던부재(W-MC-A2-R1)의 접선방향 파열인장 변형도의 분포

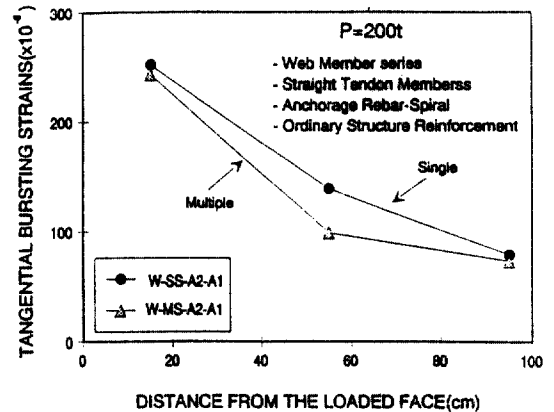


그림 11. 단일직선텐던부재(W-S-A2-R1)와 복수직선텐던부재(W-MS-A2-R1)의 접선방향 파열인장 변형도의 분포

경향을 보이고 있다. 또한 200 ton으로 정착되었을 때 복수직선텐던부재(W-MS-A2-R1)의 인장변형도는 243  $\mu\epsilon$ 으로 나타나 복수곡선텐던부재(W-MC-A2-R1)의 186  $\mu\epsilon$ 보다 높게 나타나고 있다. 그러나 실제로 균열하중은 곡선텐던부재가 직선텐던부재보다 적게 나타나는데 이것은 텐던의 곡률로 인한 곡률방향 힘의 발생에 기인된다.

#### 4.5 단일 및 복수텐던의 효과

본 연구에서는 단일텐던 및 복수텐던 설치시의 제반 효과를 규명하기 위하여 내부 인장 변형도가

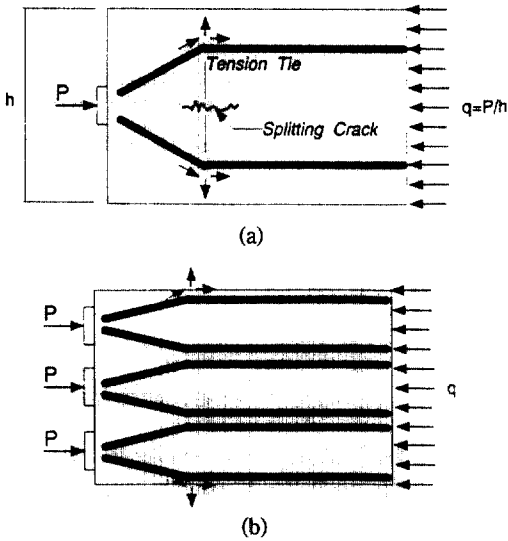


그림 12. (a) 단일텐던 정착부의 스트럿 타이 모델(Strut Tie Model)  
(b) 복수텐던 정착부의 스트럿 타이 모델(Strut Tie Model)

조사분석 되었다.

그림 11은 단일직선텐던부재(W-S-A2-R1)와 복수직선텐던부재(W-MS-A2-R1)의 경우에 대한 접선방향 파열인장 변형도의 분포를 나타낸 것으로서, 복수직선텐던부재(W-MS-A2-R1)의 파열인장 변형도가 단일직선텐던부재(W-S-A2-R1)의 파열인장 변형도보다 낮게 나타나며, 이것은 4.3절에서 기술한 인장응력이 압축응력 효과를 나타내는 현상 때문인 것으로 사료된다. 즉 이러한 인장변형도의 감소가 균열하중을 높이는 결과를 나타내게 된다.

이러한 현상은 정착부의 응력상태를 타이(Tie)로 구성하여 설명하는 스트럿 타이 모델(Strut Tie Model)로 설명할 수 있다. 그림 12(a)는 정착부의 응력흐름을 스트럿 타이 모델기법으로 설명하는 것으로서 국부집중하중으로 인하여 내부에 인장타이가 구성되며 인장력이 부재의 인장력을 초과하면 그림과 같이 균열이 발생한다. 그러나 인접 복수텐던이 설치되었을 경우에는 그림 12(b)와 같이 압축타이의 경사각이 줄어들며 따라서 인장응력이 감소하게 되어 실제로 복수텐던이 설치된 경우에 단일텐던 설치시 보다 더 높은 하중이 가해졌음에도 불구하고 낮은 파열인장응력이 발생하게 된다.

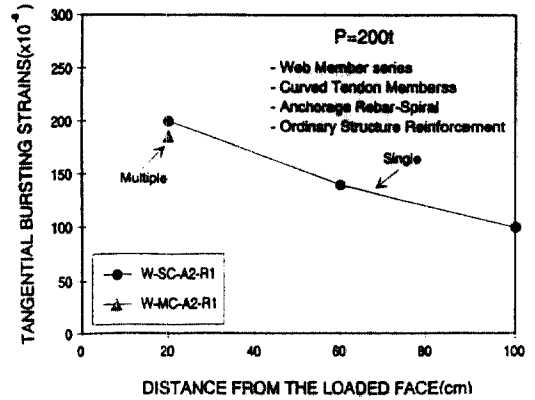


그림 13. 단일곡선텐던부재(W-S-A2-R1)와 복수곡선텐던부재(W-MS-A2-R1)의 경우에 대한 접선방향 파열인장 변형도의 분포

그림 13은 곡선텐던부재의 경우로서, 이 경우 역시 복수텐던부재가 단일텐던부재의 경우보다 균열의 제어에 용이함을 보여주고 있다. 그러나 복수텐던을 설치할 경우에는 단일텐던 설치시 보다 과다한 지압응력이 발생하여 지압파괴가 발생할 수 있으므로 이에 대한 면밀한 검토가 필요하다.

## 5. 결 론

본 논문은 프리스트레스트 콘크리트 구조물에 정착구가 서로 인접하여 복수로 설치되었을 경우의 정착부 거동 및 국부응력 분포특성을 규명함에 그 목적이 있다. 이를 위하여 단일텐던 및 복수텐던이 설치된 프리스트레스트 콘크리트부재에 대한 실험 크기의 실험연구가 수행되었으며, 단일 및 복수텐던의 비교연구가 수행되었다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 단일텐던 및 복수텐던이 설치된 프리스트레스트 정착부의 파괴는 먼저 정착관의 폭만큼 떨어진 위치에서 초기균열이 발생하며, 이는 접선방향 파열인장응력 때문인 것으로 나타났다. 또한 프리스트레스트 힘이 증가할 때 박리응력으로 인한 사인장균열이 발생하고 정착부 선단이 완전히 파괴되는 취성파괴임이 밝혀졌다.

2. 정착구가 인접하여 설치된 경우에는 부재의 저항능력이 단일정착구가 설치된 경우보다 크게 향상되는 것으로 나타났다. 이는 먼저 정착된 텐던

정착부 주변 인장응력이 다음으로 긴장되는 텐던의 압축응력 발생효과로 인하여 균열하중에 대한 저항성이 개선됨에 그 원인이 있는 것으로 사료되며, 이러한 효과를 스트럿 타이모델로 설명하였다.

3. 단일텐던 및 복수텐던이 설치된 부재의 비교연구가 수행되었으며, 복수텐던부재의 파열인장 변형도가 단일텐던부재의 파열인장 변형도보다 낮게 나타났다. 이러한 인장변형도의 감소가 균열하중을 높이는 결과를 나타내게 되는 것으로 사료된다.

4. 본 연구결과는 인접하여 여러 개의 정착구가 설치되는 프리스트레스트 콘크리트 부재의 설계를 위한 유용한 자료를 제시하는 것으로 사료된다.

## 사 사

본 논문은 1993년도 한국학술진흥재단의 자유공모 연구에 의해 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

## 참고문헌

1. Breen, J.E., Cooper, R.L., and Gallaway, T.M., "Minimising Construction Problems in Segmentally Precast Box Girder Bridges", Research Report 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 Web of Prestressed Concrete Bridges", *Journal of the Prestressed Concrete Institute*, Vol. 19, No. 4, July-August 1974.
3. Guyon, Y., *Prestressed Concrete*, John Willy and

- Sons Inc., New York, 1953.
4. Stone, W.C., and Breen, J.E., "Analysis of Post-Tensioned Girder Anchorage Zones", Research Report 208-1, Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin, August 1980.
5. Zielinski, T., and Rowe, R.E., "The Stress Distribution Associated with Groups of Anchorages in Post-Tensioned Concrete Members", Cement and Concrete Association, Research Report No. 13, London, October 1962; No. 9, London, September, 1960.
6. Zielinski, T., and Rowe, R.E., "Investigation of the Stress Distribution in the Anchorage Zones of Post-Tensioned Concrete Members", Cement and Concrete Association, London, Research Report No. 9, September, 1960.
7. Stone, W.C., and Breen, J.E., "Analysis of Post-tensioned Girder Anchorage Zones", Research Report 208-1, Center for Transportation Research, The University of Texas, Austin, April 1981.
8. Halvorsen, G.T., Burns, N.H., "Anchorage Zone Cracking of Post-Tensioned Bridge Decks with Closely Spaced Anchors", SP113-4, *Cracking in Prestressed Concrete Structures*, SP-113, ACI.
9. Lim, D.H., "Anchorage Zone Behavior and Analysis of Precast Prestressed Concrete Box-Girder Bridges", Ph.D Thesis, Seoul National University, March 1994.
10. Oh, B.H., and Lim, D.H., "Local Anchorage Stresses in Prestressed Concrete Box-Girder Bridges", EASEC-4, Vol. 1, pp. 1079-1084, Sep. 1993.
11. 오병환, 임동환, 프리스트레스트 콘크리트 부재의 정착부 균열하중 및 극한하중의 예측, **콘크리트학회 논문집**, 제 6권 제 5호, 1994. 10.

(接受: 1994. 9. 14)