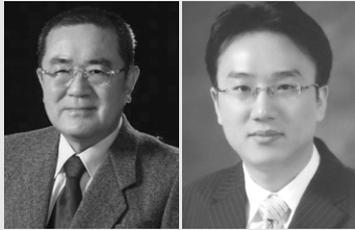


프리스트레스트 구조물에 적용된 FRP 텐던용 쐐기형 앵커시스템

Wedge-type Anchorage System for Fiber Reinforced Plastic Tendon used to Prestressed Structures



장석윤(Suk-Yoon Chang) 회장 | 서울시립대학교 토목공학과 명예교수, ㈜이산 상임고문 | 공학박사 | changsy@uos.ac.kr
박대용(Dae-Yong Park) 정회원 | 대림산업 기술연구소 특수교량팀 과장 | 공학박사 | dypark@daelim.co.kr

1. 서론

FRP(Fiber reinforced plastics)는 현재 토목분야 및 다른 여러 분야에 있어 다양하게 사용되며 각광 받고 있는 신소재이다. 이 FRP는 주로 Carbon, Glass, Aramide fiber와 Epoxy, Polyester, Vinylester 등의 matrix와 함께 접착되어 만들어진다. 이렇게 만들어진 FRP는 높은 비강성, 강도, 낮은 자중, 뛰어난 부식저항성, 자기저항성 등의 장점 때문에 특히 프리스트레스 구조물에 사용되는 강재 텐던을 대체할 수 있는 FRP 텐던으로 각광 받고 있으며 특히 염기성 환경에서 강재 텐던의 부식에 대한 문제를 원천적으로 제거할 수 있는 장점이 있다.

FRP 텐던을 사용한 프리스트레스 콘크리트 구조물의 적용예를 살펴보면 주로 유럽과 일본에서 시공되었으며 1986년 세계 최초로 독일에서 GFRP를 사용한 47m 길이의 프리스트레스 교량을 시공하였으며 여기에 사용된 인발성형된 GFRP 텐던의 직경은 7.5mm이고 polymer-mortar 형태의 앵커시스템(Ballinger, 1991)

을 사용하였다. 또 다른 교량거더로는 Ulenbergstrasse Bridge(1986, Germany), Schiessbergstrasse Bridge(1991, Germany), Notsch Bridge(1991, Austria)이 있으며 보도육교로는 Lunen'sche Gasse Bridge(1980, Germany), Marienfelde Bridge(1988, Germany), Adolf Kiepert Bridge(1991, Germany) 등에 적용되었다.

현재 사용되고 있는 FRP 종류로는 CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastics), AFRP(Aramid Fiber Reinforced Plastics), GFRP(Glass Fiber Reinforced Plastics) 등이 주로 사용되고 있으며 이에 대한 재료적인 특성은 표 1에 나타내었다(Antonio et al., 1996 ; Benmokrane et al., 1997 ; Ezzeldin et al., 1998). 표 1에서 알 수 있듯이 FRP의 장점으로 기존의 강재 텐던에 비해 대부분의 FRP 텐던은 자중이 약 4배 작으며 종방향 인장강도도 CFRP인 경우 약 1.37배 크며 종방향 온도변화에 대한 계수 또한 현저히 낮다. 또한 표에 나타나 있지는 않지만 CFRP의 경우 뛰어난 피로강도(Rostasy et al., 1993), 매우 낮은 릴락세이션(Rao,

1992 ; Santoh et al., 1993)의 특징이 있다. 그러나, FRP 텐던의 단점은 강재 텐던에 비해 가격이 비싸며 연직방향 및 전단탄성계수가 약 1/10이하로 작기 때문에 지점부의 연직방향 하중과 전단응력에 의한 파괴가 쉽게 일어날 수 있다. 특히 FRP 텐던은 강재 텐던과 같지 않게 소성영역이 없어 연성이 부족하다. 즉, 텐던의 파단시 변형률이 강재 텐던에 비해 현저히 작은 단점이 있다(그림 1). 이 문제점이 FRP 텐던을 강재 텐던으로 대체하는데 있어 가장 큰 걸림돌이 되고 있다. 그러나, 이러한 단점들은 FRP 텐던에 맞는 적절한 앵커시스템을 도입함으로써 해결될 수 있으며 본 연구에서 또한 적절한 앵커시스템을 제시하고자 하는데 그 목적이 있다.

이러한 FRP 텐던을 사용하기 위해 개발된 앵커시스템으로는 Clamp 형태(Sippel, 1992 ; Malvar & Bish, 1995 ; Scheibe & Rostasy, 1995), Plug & Cone 형태(Burgoyne, 1993), Resin Sleeve 형태(Sippel, 1992 ; Reda et al., 1994), Resin Potted 형태(Holte et al., 1993), Expansive cement 형태(sayed-Ahmed et al., 1998), Metal overlay 형태(Erki & Rizkalla, 1993), Split wedge 형태(Hodhod & Uomoto, 1992 ; Reda et al., 1994 ; Nanni et al., 1996, Sayed-ahmed et al., 1998) 등이 있다. 이들 형태에 대한 개략적인 형상은 그림 2-1에 나타나 있다.

이러한 여러 가지 앵커 시스템중 split wedge형태의 앵커는 단순함, 설치의 용이성, 재사용 가능, 텐던의 고정능력의 우수성 등의 장점 때문에 가장 많이 사용되고 있다. 이 앵커의 구성 매커니즘을 살펴보면 2, 4, 6개의 썸기(wedge)가 콘 형태의 소켓내에 삽입되어 썸기와 콘 형태의 소켓과 FRP 텐던과의 마찰력과 clamping력으로 앵커시스템을 구성하고 있다. 썸기의 경사진 각도가 작을수록 연직방향 응력분포가 썸기의 길이에 대해 균등해지며 응력집중이 완화된다. 이 앵커시스템의 주요 단점은 연직방향 및 전단강도가 강재 텐던에 비해 매우

낮은 FRP 텐던을 사용하는 경우에 기존 강재 텐던에 사용되는 앵커시스템은 썸기의 직경이 작은 부분에서 큰 전단응력집중을 발생시켜 텐던의 파괴를 유발한다.

본 연구의 주요 목적은 FRP 텐던용 split wedge 형태의 앵커시스템에서 문제시 되는 썸기의 직경이 작은 부분에서 발생하는 응력집중 현상을 완화시키고 앵커 전체에 걸쳐 균등한 응력분포를 형성하여 텐던이 앵커내부에서 파단되지 않도록 하기 위해 여러 가지 대안을 제시하고 이에 대한 다양한 매개변수 변화를 유한요소법에 의한 수치해석을 수행하여 구조적인 거동을 살펴보고자 한다.

Wedge-type 앵커에 있어 그 거동에 영향을 미치는 중요한 매개변수는 그림 2-2와 같으며 그 항목은 다음과 같다.

- ① 앵커 길이
- ② 웨지의 각도
- ③ 웨지의 곡률 각도
- ④ 웨지 시작부 반지름
- ⑤ 웨지 또는 앵커의 탄성계수
- ⑥ 웨지 Soft zone의 길이와 탄성계수

상기 6가지 매개변수 중 본 연구에서는 wedge-type 앵커리지 거동 개선에 가장 크게 영향을 줄 수 있는 웨지의 각도와 Soft zone의 영향을 주로 분석하였다.

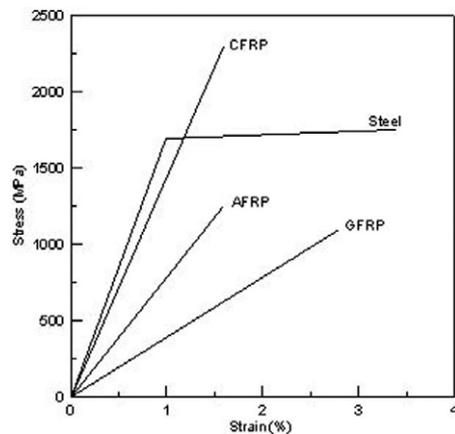


그림 1. 프리스트레스트 구조에 사용되는 FRP 텐던의 응력-변형률 곡선

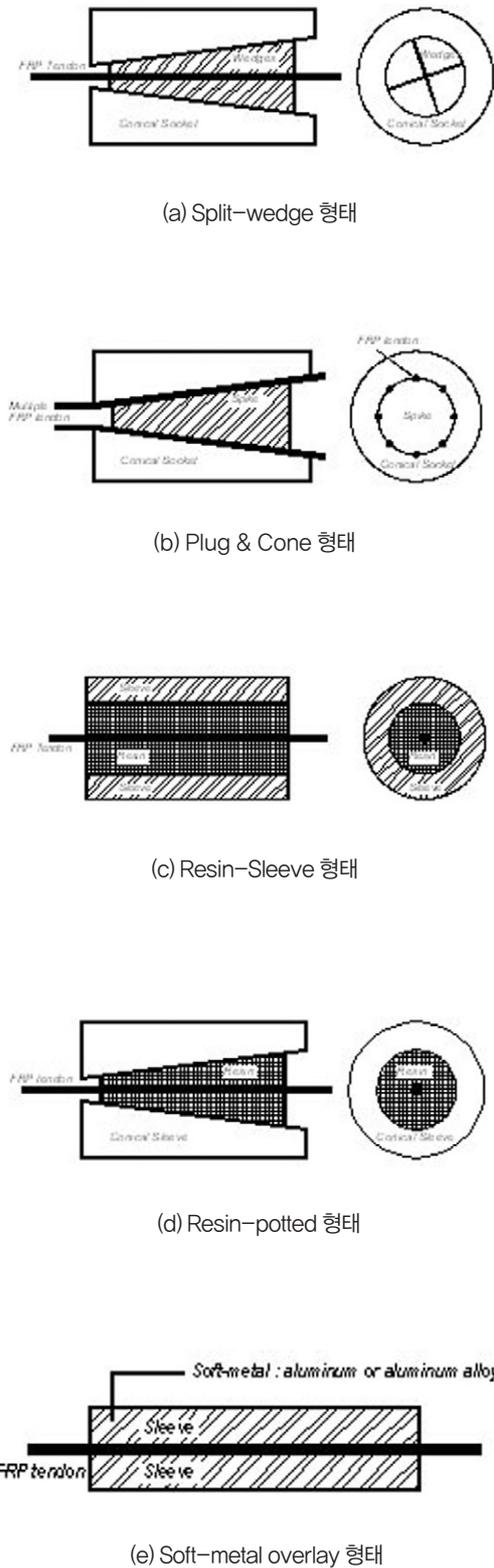


그림 2-1. 여러 형태의 FRP 텐던용 앵커시스템

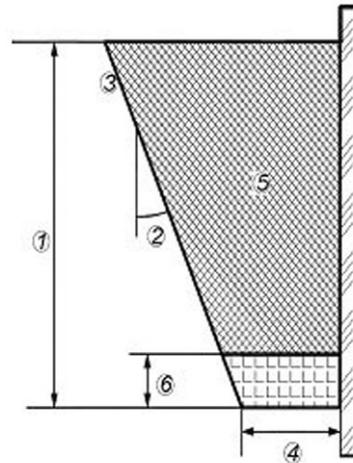


그림 2-2. Wedge-type 앵커에 있어 중요한 여러가지 매개변수

2. 해석모델 매개변수 선정

본 연구에서 해석하고자 하는 프리스트레스트 구조물에 사용된 새로운 FRP 텐던용 썬기형 앵커시스템은 기존에 다른 연구자들이 제시한 썬기형 앵커시스템에서 문제시 되는 썬기의 직경이 작은 쪽에서 발생하는 응력 집중현상을 완화하기 위해 여러 가지 다른 형태의 모델을 선정하여 앵커시스템에서의 응력분포를 살펴보았다.

먼저 기존에 다른 연구자들이(Sayed-Ahmed and Shrive, 1998 ; Al-Mayah et al., 2001) 제시한 CFRP 텐던용 썬기형 앵커는 그림 3과 같으며 이것을 기초로 하여 본 연구에서는 썬기에 대해 여러 가지 매개변수를 설정하였다. 이에 대한 매개변수는 다음과 같으며 그림 4에 설명하였다.

① 썬기의 직경이 작은 쪽 끝부분에서 경사도가 거의 0이 되도록 하며 경사도가 거의 0인 부분의 폭(A_1)을 매개변수로 설정

② 기존의 썬기는 Stainless steel 등으로 구성되는 반면 본 연구에서는 Soft Zone을 도입하였으며 Soft Zone의 폭(S_2), 설치되는 각도(θ_2)를 매개변수로 설정

③ ②에서 제시된 Soft Zone을 여러 개의 조각으로

표 1. GFRP, AFRP, CFRP와 프리스트레싱 강재 텐던과의 재료 특성치 비교

Property	GFRP			AFRP		CFRP			Pre-stressing steel
	E-glass	S-galss	Arapree	FIBRA	Technora	Parafil	Leadline	CFCC	
Fibre/resin	Glass/epoxy	Glass/poyimide	Twaron/epoxy	Keviar49/epoxy	Technora/vinylester		Carbon/epoxy	Carbon/epoxy	
Anchorage system	Resinanchor	Resinanchor	Grouted wedge	Resinpotted orwedge	Wedgeresinpotted	Barrel/spike	Wedge/soft metal	Resinanchor	
Minimum fibre/volume ratio	0.55	0.5	0.45	0.65	0.65		0.65	0.65	-
Density(g/cm3)	2.1	2	1.258	1.28	1.3	1.44	1.53	1.5	7.85
Longitudinaltensile strength (GPa)	1.08	1.28	1.2~1.5	1.25~1.4	1.7~2.1	1.21	2.25~2.55	1.8~2.1	1.86
Transversetensile strength (Mpa)	39	49		30			57		1860
Longitudinalmodulus (GPa)	39	43	62~64	65~70	54	120	142~150		190
Transversemodulus (GPa)	8.6	8.9		5.5			10.3		190
In-plane shear strength (MPa)	89	69		49			71		
In-plane shear modulus (GPa)	3.8	4.5		2.2			7.2		73.1
Major Poissons's ratio	0.28	0.27	0.39	0.34~0.6	0.35		0.27		0.3
Bond strength (MPa)			7.7		12.2		9.7~13		6.6~7.1
Maximumlongitudinal strain (%)	2.8	2.9	2.4	2	3.7	1.5	1.3~1.5	1.57	4
Maximumtransverse strain (%)	0.5	0.6					0.6		4
Longitudinalcompressivestrength (Mpa)	620	690		335			1440		1860
Transversecompressivestrength (Mpa)	128	158		158			228		1860
Longitudinalthermalexpansion coefficient(/°C)	7×10^{-6}	5×10^{-6}	-2×10^{-6}	-2×10^{-6}	-3×10^{-6}		-0.9×10^{-6}	-0.5×10^{-6}	11.7×10^{-6}
Transverse thermalexpansion coefficient(/°C)	21×10^{-6}	26×10^{-6}	50×10^{-6}	60×10^{-6}			27×10^{-6}		11.7×10^{-6}
Relaxation ratio (%)at room temperature				11~14%		6~9%	2~3%	1%	8%

분리하였으며 각 Soft Zone의 재료 물성을 다르게 한 것을 매개변수로 설정 하였다.

이렇게 매개변수를 설정한 이유는 첫 번째 썬기의 직경이 작은 쪽 끝부분의 경사도가 거의 0이 되도록 하면 썬기 끝단의 직경은 아주 약간 증가하고 반대로 Barrel의 직경은 약간 감소하는 형태를 띄게 되고 이로 인해 응력집중의 완화 정도를 살펴보기 위함이며 두 번째 강성이 약한 Soft Zone을 설치함으로써 썬기의 끝단에 집

중되는 응력을 썬기 전체에 걸쳐 균등하게 분포하도록 하기 위함이며 Soft Zone의 배치각도를 변경함으로써 Soft Zone과 FRP 텐던과의 접촉면적을 변화시켜 이에 대한 응력분포를 살펴보기 위함이다. 또한 썬기의 직경이 작은 쪽부터 탄성계수가 작은 여러 조각의 Soft Zone으로 만듦으로써 하나의 탄성계수로 형성된 Soft Zone에 비해 어느 정도 더 응력집중을 완화 할 수 있는지를 파악하기 위함이다.

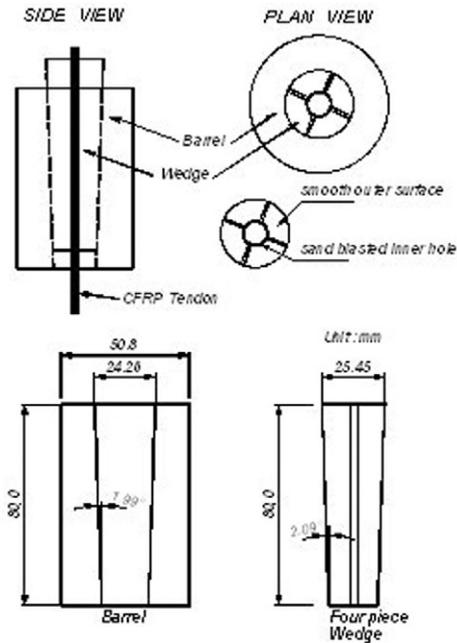


그림 3. CFRP 텐던용 쐐기형 앵커시스템

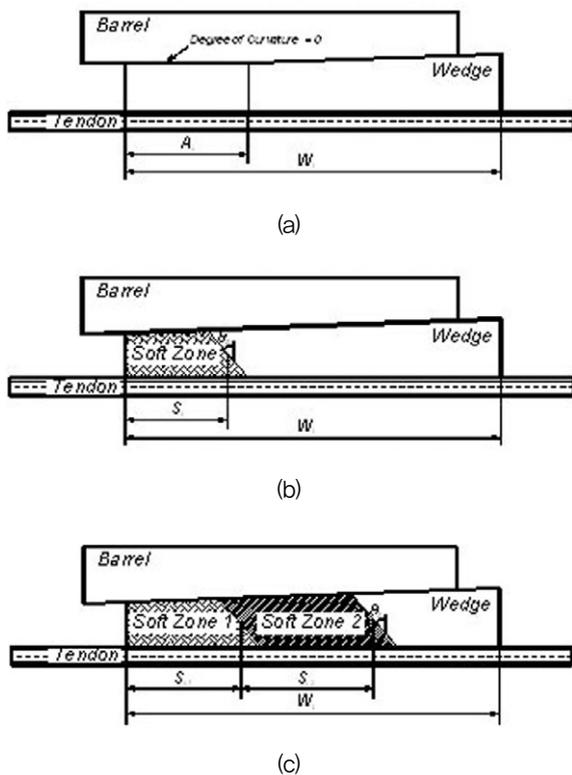


그림 4. 쐐기형 앵커 해석 매개변수 : (a) 곡률각도 변화 (b) Soft Zone 길이와 각도 변화 (c) Soft Zone의 개수 변화

3. 유한요소해석 및 결과분석

본 연구에서 제시된 FRP 텐던용 쐐기형 앵커시스템에 대한 여러 가지 매개변수변화에 따른 응력변화를 분석하고 기존의 연구자들이 제시한 앵커시스템과의 비교 분석을 하기 위해 범용 유한요소해석 프로그램인 LUSAS(FEA, Ltd., 2004)를 사용하였다. 해석에 적용된 요소는 추가 변형률(Enhanced Assumed Strain)을 사용한 4절점 Axisymmetric solid 요소(QAX4M)를 사용하였다. 이 요소는 추가 변형률을 사용하고 hybrid/mixed 응력법에 기초하여 stress recovery과정을 적용하였기 때문에 적은 요소수에서도 정확한 처짐 및 응력 결과를 나타낸다.

해석에 사용된 기하학적 조건, 경계조건, 하중조건, 유한요소해석 모델은 그림 5에 나타내었다. 또한 Barrel과 Wedge 및 CFRP Leadline 텐던(직경 7.9mm, 파단하중 104kN)에 대한 재료 물성치는 현재 사용되고 있는 것으로 표 2에 나타내었다. 그림 5b의 해석경계조건에서 AB선상은 x 축에 대한 대칭 경계조건 (y, θ_x, θ_z , 고정)이며 CD선상은 y 방향 변위 고정, DE선상은 방향 고정이며 가해진 인장하중은 100KN이다.

표 2. 쐐기형 앵커 재료 물성치

Property	FRP Tendon	Wedge & Barrel
Material	CFRP	Stainless steel
Elastic Modulus		
→ longitudinal direction, GPa	147	200
→ transversal direction, GPa	10.3	200
Shear Modulus		
→ longitudinal direction, GPa	7.2	77
→ transversal direction, GPa	7.2	77
Major Poisson's ratio	0.27	0.33
Minor Poisson's ratio	0.02	0.33

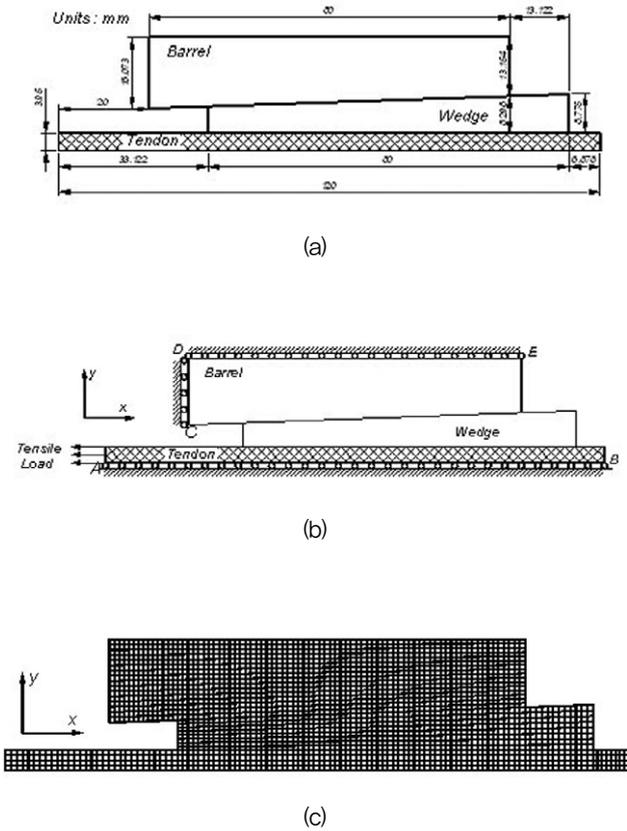


그림 5. 썬기형 앵커 유한요소해석 모델: (a) 모델링 치수 (b) 경계조건 및 하중조건 (c) 유한요소분할형태

3.1 썬기 곡률의 영향

썬기의 직경이 작은 부분에 집중된 전단응력(S_{xy}) 분포를 완화하고자 썬기 직경이 작은 부분의 경사도를 0으로 하고 경사도가 0인 부분의 길이(A_L) 변화에 따른 전단응력 분포를 살펴보았다.

그림 6은 기존의 연구자들(Sayed-Ahmed & Shrive, 1998 ; Al-Mayah et al., 2001)에 의해 제시된 앵커시스템의 전단응력 분포를 나타낸 것이다. 그림 5에서 알 수 있듯이 썬기 직경이 작은 부분에 전단응력이 집중된다. 본 연구에서는 앞서 설명한 바와 같이 경사도를 0으로 했을 경우 응력집중부 근처의 전단응력 변화를 그림 6에 나타내었다.

그림 7은 전단응력 집중부 근처의 썬기와 FRP 텐던

의 접촉면에서의 전단응력 분포를 나타낸 것으로 A_L 이 증가함에 따라 응력집중부 근처의 전단응력이 전체적으로 감소하는 경향을 보였으며 A_L 이 0일 때와 $0.5W_L$ 일 때를 비교해 보면 최대전단응력값은 약 8%의 감소를 보였다. 이는 응력집중부 근처의 썬기와 barrel의 경사각을 0으로 만듦으로써 전단응력이 집중되는 것을 완화할 수 있음을 보여준다.

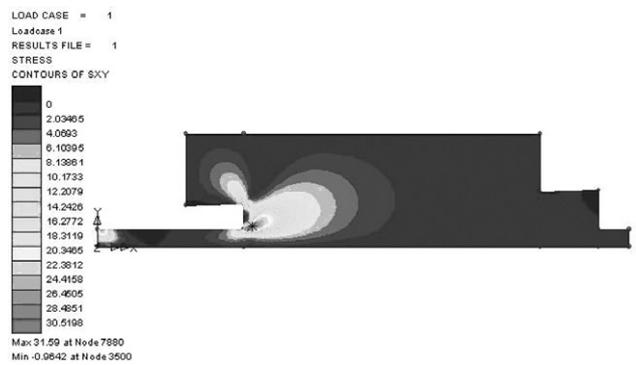


그림 6. 기존의 앵커시스템 전단응력(S_{xy}) Contour

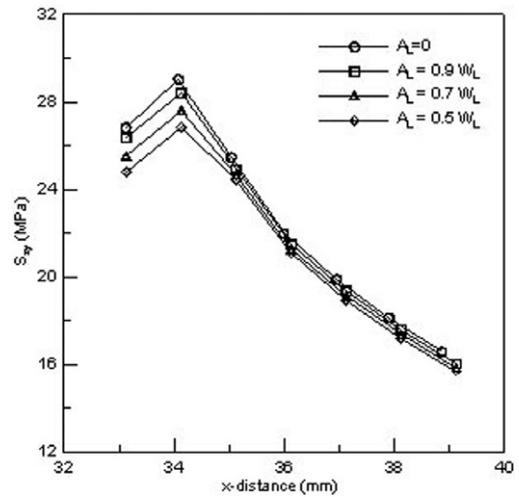


그림 7. 앵커 응력집중부 전단응력(S_{xy}) 분포

3.2 Soft Zone의 영향

일반적으로 복합 적층 구조는 Fiber(Glass, Carbon,

Ployaramid 등)와 Matrix로 구성된다. 본 연구에서 제시한 Soft Zone을 구성하기 위해 Matrix 재료에 사용되는 Resin을 사용하고자 한다. Resin 재료로는 Epoxy, Polymide, Ployester, Vinylester, Thermoplastic Resin 등이 있다. 이들 중 Epoxy Resin은 뛰어난 강도와 creep 저항성, fiber와의 뛰어난 접착성, 뛰어난 전기 및 화학저항능력, 낮은 shrinkage 등의 장점 때문에 아주 유용하게 널리 사용되고 있다. 대표적인 Epoxy, Vinylester Resin의 재료 특성은 표 3에 나타나 있다(Benmokrane et al., 1997).

표 3에서 알 수 있듯이 Epoxy의 탄성계수는 강재에 비해 약 1/70~ 1/50이다. 이렇게 탄성계수가 낮은 재료를 썬기의 응력집중부에 배치함으로써 집중된 응력을 썬기 전체로 분산시킬 수 있는 장점이 있다. 따라서 본 절에서는 Epoxy 등을 사용한 Soft Zone의 길이를 매개 변수로 하여 응력집중의 완화 정도를 살펴보고자 한다.

표 3. Epoxy, Vinylester Resin의 재료 특성

Property	Epoxy	Vinylester
Tensile Strength (MPa)	55~130	73~81
Tensile Modulus (GPa)	2.75~4.10	3.0~3.5
Ultimate Strain (%)	1~9	3.5~5.5
Poisson's ratio	0.20~0.33	0.37
Coefficient of thermal expansion($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	50~80	-
Cure Shrinkage (%)	1~5	5.4~10.3
Density (g/cm ³)	1.2~1.3	1.12~1.32

그림 8은 Soft Zone이 $0.5W_L$ 만큼 배치된 경우의 전단응력(S_{xy})의 분포를 나타낸 것이다. 기존의 앵커의 전단응력분포(그림 5)와는 다르게 전단응력의 집중부는 Soft Zone과 강재가 만나는 부분으로 응력집중부가 전이됨을 알 수 있다. 이에 대해 Soft Zone의 길이변화에

따른 썬기와 FRP 텐던의 접촉면에서의 종방향응력, 전단응력 분포를 각각 그림 9, 10에 나타내었다.

그림 9, 10에서 알 수 있듯이 Soft Zone이 배치된 경우 최대종방향응력은 썬기의 끝단에서 발생하며 최대전단응력은 Soft Zone과 강재 썬기가 만나는 경계선에서 발생한다. 또한 종방향응력 분포는 Soft Zone과 강재 썬기의 경계선에서 정점이 다시 한번 형성된다. 이러한 응력분포는 Soft Zone의 길이가 길어짐에 따라 전체적으로 감소하며 S_L 이 0 인 경우와 $0.5W_L$ 인 경우를 비교해 보면 최대종방향응력은 약 1/2배 감소되며 최대전단응력은 1/8배 감소되었다.

이와 같이 썬기에 Soft Zone을 삽입하는 것이 종방향 및 전단응력감소에 매우 큰 역할을 하고 있음을 알 수 있다. 그러나 Soft Zone 썬기는 강재 썬기에 비해 비용이 많이 소요되므로 설계자의 목적에 따라 적절한 Soft Zone의 길이를 산정하여 배치하는 것이 경제적이다.



그림 8. Soft Zone이 배치된 경우 전단응력(S_{xy}) Contour($S_L=0.5W_L$)

3.3 Soft Zone 배치 각도의 영향

본 절에서는 3.2절의 Soft Zone의 길이 변화에 따른 응력분포를 기초로 Soft Zone의 배치 각도를 변화시켰을 경우 응력분포가 어떻게 변화하는지를 살펴보고자 한다. Soft Zone의 배치각도(θ_3)는 0° , 30° , 60° 변화시켰으며 이에 대한 Soft Zone의 길이(S_L)는 $0.1W_L$,

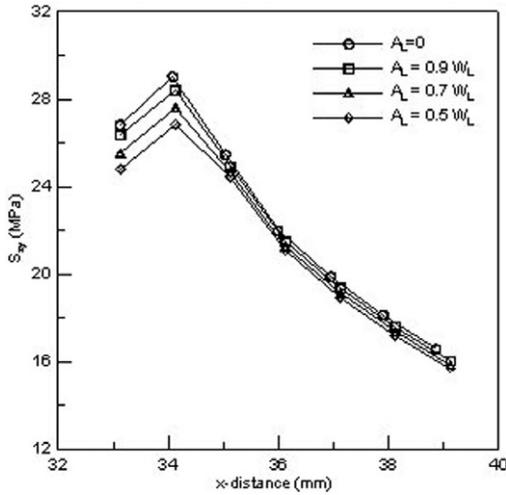


그림 9. Soft Zone 길이 변화에 따른 썬기와 텐던 접촉면 종방향 응력(S_{xy}) 분포($\theta_S = 0^\circ$)

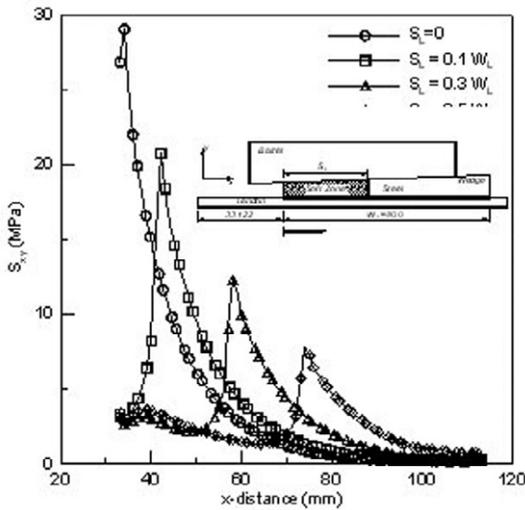


그림 10. Soft Zone 길이 변화에 따른 썬기와 텐던 접촉면 전단응력(S_{xy}) 분포($\theta_S = 0^\circ$)

0.5 W_L 인 경우에 썬기와 텐던 접촉면에서의 종방향 및 전단응력 분포를 그림 11 ~ 14에 나타내었다.

Soft zone의 각도가 변화함에 따라 종방향 응력분포는 감소하였으나 전단응력분포는 약간 증가하는 경향을 보였다. 그 수치를 비교해보면 0.1 W_L 인 경우 두 번째 정점에서의 종방향 응력은 약 37% 감소하였고 최대 전단 응력은 약 3% 증가하였다. S_L 이 0.5 W_L 인 경우에 두 번

째 정점에서의 종방향 응력은 약 24% 감소하였고 최대 전단응력은 약 17% 증가하였다. 즉, Soft Zone의 각도가 변화함에 따라 썬기와 텐던사이의 접촉면이 더욱 증가하기 때문에 전단응력의 큰 증가없이 종방향응력이 감소하게 된다. 이러한 종방향 응력감소는 Soft Zone의 길이가 짧은 경우에 더욱 더 크게 기여한다(장석운 등, 2005).

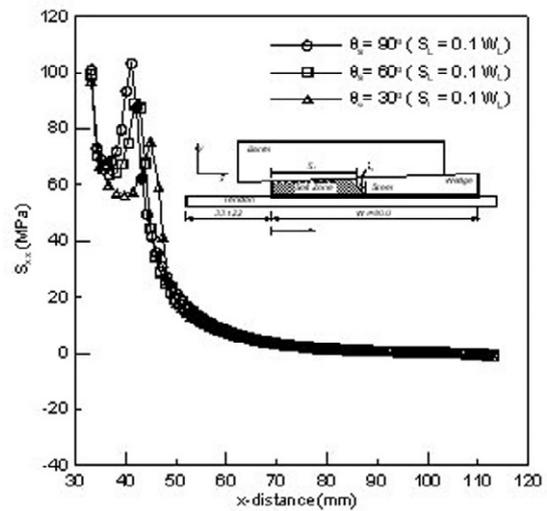


그림 11. Soft Zone 각도 변화에 따른 썬기와 텐던 접촉면 종방향 응력(S_{xx}) 분포($S_L = 0.1W_L$)

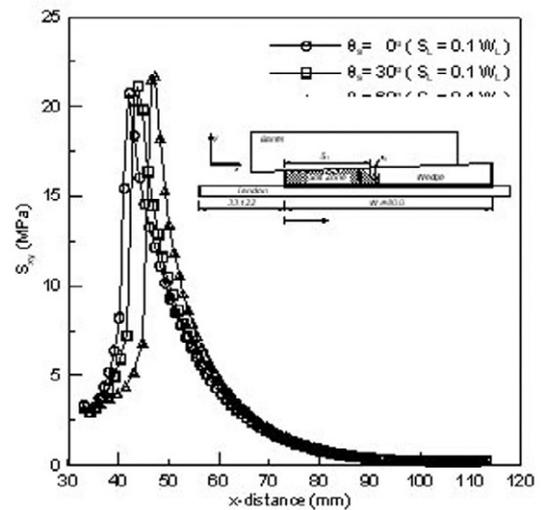


그림 12. Soft Zone 각도 변화에 따른 썬기와 텐던 접촉면 전단응력(S_{xy}) 분포($S_L = 0.1W_L$)

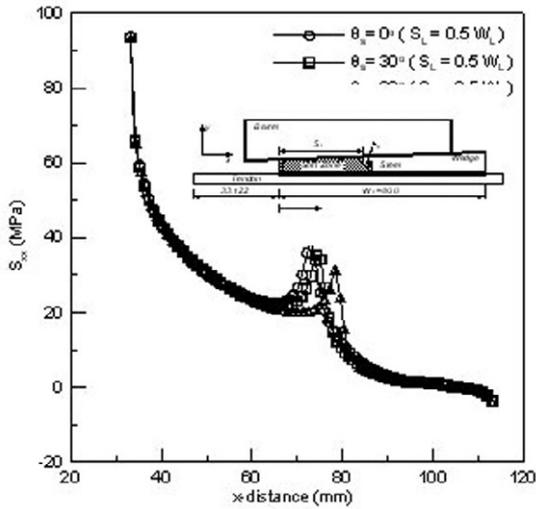


그림 13. Soft Zone 각도 변화에 따른 썬기와 텐던 접촉면 종방향 응력(S_{xx}) 분포($S_L=0.5W_L$)

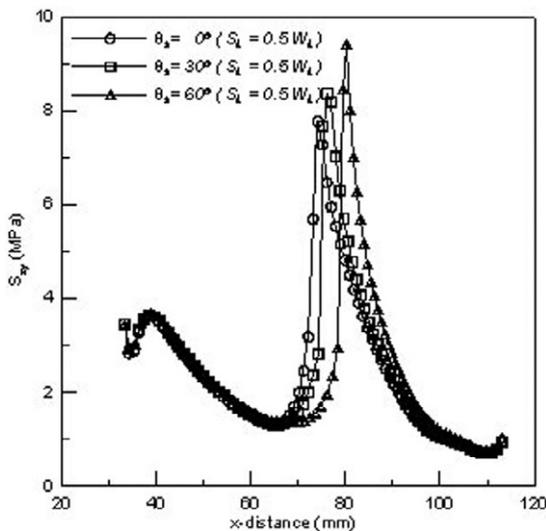


그림 14. Soft Zone 각도 변화에 따른 썬기와 텐던 접촉면 전단응력(S_{xy}) 분포($S_L=0.5W_L$)

3.4 탄성계수가 다른 여러 조각의 Soft Zone 배치의 영향

그림 9~14에 나타나있듯이 Soft Zone과 강재가 만나는 경계선에서 응력이 정점을 나타낸다. 만약 이러한 경계선 없이 썬기가 점진적으로 탄성계수가 변하는 재료로 만들 수만 있다면 경계선에서 응력이 집중되는 현상은 나타나지 않을 것이다. 그러나 썬기의 길이방향으로

탄성계수가 점진적으로 변화하는 재료를 만든다는 것은 현실상 불가능하다. 따라서 본 절에서는 탄성계수가 점진적으로 변화하진 않지만 썬기를 탄성계수가 서로 다른 몇 개의 조각으로 분리(그림 3c 참조)하여 만드는 것은 가능하며 이러한 경우 앵커시스템의 응력분포를 살펴보고자 한다.

그러나 썬기가 탄성계수가 다른 몇 개의 조각으로 형성될 때 썬기 조각 각각의 길이, 탄성계수, soft zone 배치각도 등의 많은 변수를 가지기 때문에 본 절에서는 3.2에서 제시한 soft zone의 길이(S_L)가 $0.5W_L$ 일 때 분할한 길이 $S_{L1}=S_{L2}=0.25W_L$ (그림 3c 참조)이고 배치각도(θ_s)가 0° 경우에 대해 탄성계수를 다르게 한 것에 국한하여 응력분포 경향을 그림 13, 14에 나타내었다. Soft Zone 1과 Soft Zone 2는 Epoxy를 사용하였으며 탄성계수는 각각 3.0GPa, 4.0GPa로 하였다.

그림 15와 16은 각각 썬기와 텐던 접촉면의 종방향응력 및 전단응력 분포를 나타낸 것인데 Soft Zone 1의 탄성계수가 Soft Zone 2의 탄성계수보다 작은 경우 종방향응력은 썬기 끝단에서 약 4%의 작은 감소를 보이고 접촉면 전체에 걸쳐 큰 변화를 보이지 않았다. 그러나 전단응력은 Soft Zone 1이 설치된 부분까지 감소하는 경향을 나타내었으며 이 부분의 정점에서의 값은 약 27% 감소하였다.

이러한 경향으로 볼 때 썬기를 탄성계수가 다른 여러 개의 조각으로 형성할 경우 탄성계수가 작은 것부터 점차 큰 탄성계수로 구성하면 탄성계수가 작은 썬기에서 전단응력의 감소효과를 얻을 수 있다.

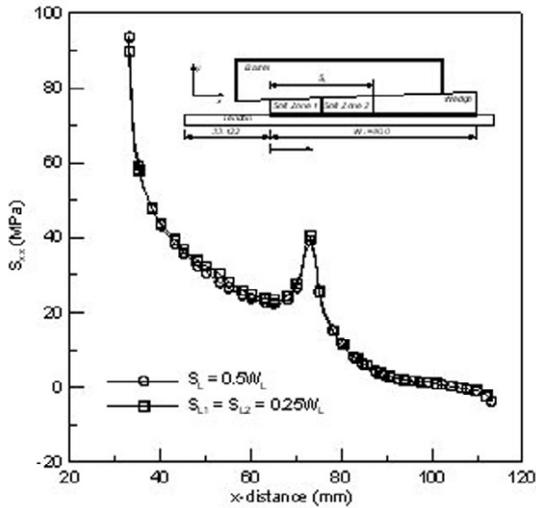


그림 15. 3조각 썬기로 형성된 앵커의 썬기와 텐던 접촉면 종방향응력(S_{xx}) 분포

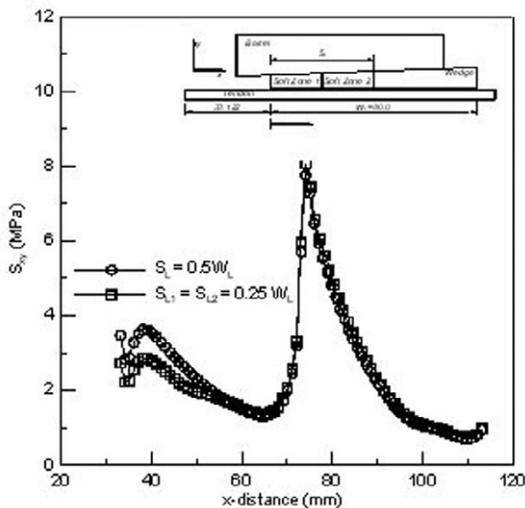


그림 16. 3조각 썬기로 형성된 앵커의 썬기와 텐던 접촉면 전단응력(S_{xy}) 분포

4. 결론

FRP 텐던은 부식방지 및 높은 강도등의 많은 장점을 가지고 있으나 연신율이 강재 텐던에 비해 매우 부족하여 적절한 앵커시스템을 개발하지 않고는 실제 주요 구조물에 적용시 큰 문제가 된다. 따라서 본 연구에서는 현재 사용되고 있는 FRP 텐던용 앵커시스템에 대한 전반적인 소개를 하였고 가장 널리 사용되고 있는 썬기형

앵커시스템의 응력집중 문제를 개선하기 위한 여러가지 수치해석을 수행하였다. 앵커시스템의 국부적인 응력집중부 썬기 곡률변화, 응력집중부 Soft Zone 배치, 여러개의 다른 탄성계수로 구성된 썬기의 매개변수해석을 통해 각 매개변수에 대한 응력분포를 살펴보았으며 응력 집중을 완화할 수 있는 여러가지 방법을 찾아보았다. 이 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 썬기의 직경이 작은 쪽 응력집중부의 썬기 경사도를 0으로 할 경우 기존의 경사를 가진 썬기보다 전단응력은 감소하였으며 경사도가 0인 부분이 길어질수록 전단응력은 점차 감소하였다.

(2) 썬기의 직경이 작은 쪽 응력집중부에 Soft Zone을 배치함으로써 경사도를 0으로 하는 것보다 종방향 및 전단응력에 대해 매우 큰 감소효과를 얻을 수 있다. 그러나 Soft Zone에 사용되는 epoxy 등의 재료는 강재에 비해 가격이 비싸기 때문에 설계자의 목적에 맞게 Soft Zone의 길이를 적절히 배치하여야 한다.

(3) Soft Zone의 설치 각도를 변경하여 텐던과의 접촉면적을 넓혀주면 전단응력의 큰 증가없이 종방향 응력을 줄일 수 있으며 이러한 경향은 Soft Zone의 길이가 작을수록 더욱 크게 나타난다. 따라서 Soft Zone의 길이를 줄이고 설치 각도를 변경하는 것이 더욱 경제적이다.

(4) 썬기의 직경이 작은 쪽 응력집중부부터 썬기 직경이 큰 방향으로 탄성계수를 점진적으로 크게하여 여러개의 조각으로 썬기를 형성하면 단순히 하나의 Soft Zone을 배치하는 것 보다 전단응력의 감소에 유리하다.

(5) 더 큰 종방향 및 전단응력 감소를 위해 응력집중부의 썬기 경사도를 0으로 하는 방법과 Soft Zone을 설치하는 방법의 혼용도 가능하다.

(6) 본 연구에서 제시한 다양한 매개변수 변화를 통해 FRP 텐던을 위한 새로운 앵커시스템에 대한 응력분포를 살펴본 결과 기존에 사용되는 앵커시스템에 비해 종방향 및 전단응력의 큰 감소효과를 기대할 수 있다.

(7) 종방향 및 전단응력 분포의 집중을 줄이기 위한 본

연구에서 제시한 다양한 방법은 FRP 텐던을 위한 앵커 구조를 설계하는데 있어 많은 참고자료가 되리라 생각되며 실험을 통한 검증이 또한 필요하다.

(8) 본 연구에서는 종방향 및 전단응력 분포를 파악하기 위해 선형해석에 국한하였지만 실험을 통한 검증 및 비교시에는 웨지와 텐던사이의 접촉면에 대한 영향을 고려한 비선형 해석이 또한 필요하다.

(9) 본 연구에서는 썬기형 앵커시스템의 몇가지 중요한 매개변수 변화를 통해 앵커시스템의 응력집중을 완화할 수 있는 방법을 제시하였다. FRP 텐던을 위한 적절한 앵커시스템을 개발한다면 FRP 텐던의 가장 큰 문제점인 연신율이 낮은 재료적인 특성을 극복할 수 있으며 강재 텐던을 대체하여 원천적으로 부식방지가 가능한 구조부재를 만들 수 있을 것이다.

참고문헌

1. 장석윤, 임성순, 박대용 (2005) 프리스트레스트 구조물을 위한 새로운 FRP 텐던용 썬기형 앵커시스템의 구조거동, 대한토목학회 논문집, Vol. 25, No. 1A, pp 233-240
2. Al-Mayah, A., Soudki, K., and Plumtree, A. (2001) Mechanical behavior of CFRP rod anchors under tensile loading, J. of Composites for Construction, Vol. 5, pp. 128-135
3. Al-Mayah, A. (1999) Experimental and analytical investigation of wedge anchor for CFRP rod under load, MSc thesis, Dept. of Civ. Engrg., University of Waterloo, Ontario, 127
4. Antonio, N, Charles, E. B., Edward, F. O., and Troy, O. D. (1996) Performance of FRP tendon-anchor systems for prestressed concrete structures, PCI Journal, pp. 34-43
5. Antonio, N, Charles, E. B., Edward, F. O., and Troy, O. D. (1996) Short-term sustained loading of FRP tendon-anchor systems, Construction and Building Materials, Vol. 10, pp. 255-266
6. Ballinger, C. A. (1991) Development of composites for civil engineering, In Advanced composite materials in civil engineering structures, Edited by S.L. Iyer and R. Sen. American Society of Civil Engineers, New York, pp. 288-301
7. Benmokrane, B., Zhang, B., and Chennouf, A. (2000) Tensile properties and pullout behaviour of AFRP and CFRP rods for grouted anchor applications, Construction and Building Materials, Vol. 14, pp. 157-170
8. Benmokrane, B., Xu, H., and Nishizaki, I. (1997) Aramid and carbon fibre-reinforced plastic prestressed ground anchors and their field applications, Can. J. Civ. Engng., Vol. 24, pp. 968-985
9. Erki, M. A., and Rizkalla, S. H. (1993) FRP reinforcements for concrete structures, Concrete International, Vol. 15, pp. 48-53
10. Erki, M. A., and Rizkalla, S. H. (1993) Anchorages for FRP reinforcement, Concrete International, Vol. 15, pp. 89-94
11. Harada, T., Matsuda, H., Khin, M., Tokumitsu, S., Enomoto, T., and Idemitsu, T. (1995) Development of non-metallic anchorage devices for FRP tendons, In Non-metallic (FRP) reinforcement for concrete structures, Edited by L. Taerwe. E & FN Spon, London, United Kingdom, pp. 41-48
12. Harada, T., Idemitsu, T., Watanabe, A., Myo Khin, Soeda, K. (1993) New FRP tendon anchorage system using highly expansive material for anchoring, FIP symposium '93 Modern Prestressing techniques and their applications, Kyoto, Proceedings Vol. 11, pp.

711-718

13. Holte, L. E., Dolan, C. W., and Schmidt, R. J. (1993) Epoxy socketed anchors for non-metallic prestressing tendons, In Proc. International Symposium on FRP reinforcement for concrete structures, eds. A. Nanni and C. W. Dolan, ACI SP 138-24, pp. 381-400
14. Japan Society of Civil Engineers (1993) State-of-the-art report on continuous fiber reinforcing materials, ed. A. Machida, Concrete Engineering Series 3, JSCE, pp. 26-38
15. LUSAS 13.5 (2004), Finite element Analysis System, FEA, Ltd., London
16. Maravegias, S., and Triantafillou, T. C. (1996) Numerical study of anchors for composite prestressing straps, Composite Structures, Vol. 35, pp. 323-330
17. Mitamura, T., Okukawa, A., Sugii, K., and Tanaka, Y. (1992) Fatigue strength of parallel wire strands in anchorage, Length effect on fatigue of wires and strands, IABSE, Madrid, 66, 179-189
18. Mitsubishi Chemical Corporation (1996) CFRP Leadline. Corporate Report, Mitsubishi Chemical Corporation, Tokyo, Japan
19. Rao, S. S. (1992) Reliability-based design, McGraw-Hill, New York
20. Reda, M. M., Sayed-Ahmed, E. Y., and Shrive, N. G. (1997) Towards a new non-metallic anchorage system for post-tensioned applications with carbon fibre reinforced plastic tendons, 42nd International SAMPE Symposium, pp. 288-297
21. Rostasy, F. S. and Budelmann, H. (1993) Principles of design of FRP tendons and anchorages for post-tensioned concrete, Fibre-reinforced-plastic Reinforcement for Concrete Structures, International Symposium, SP-138, American Concrete Institute, Detroit, Mich., pp. 633-649
22. Sayed-Ahmed, E. Y., and Shrive, N. G. (1998) A new steel anchorage system for post-tensioned applications using carbon fibre reinforced plastic tendons, Can. J. Civ. Engng., Ottawa, Vol. 25, pp. 113-127
23. Scheibe, M., and Rostasy, F. S. (1995) Aspects of laboratory testing to determine mechanical properties of FRP, Proc. 2nd Int. RILEM Symp. FRPRCS-2, Ghent, E & FN, London, pp. 116-123
24. Sippel, T. M. (1992) Design, testing, and modeling of an anchorage system for resin bonded fiberglass rods used as prestressing tendons, Advanced composite materials and structures, Canadian Soc. For Civ. Engng., Montreal, pp. 363-372
25. Tokyo Rope Manufacturing Company, Ltd. (1990) Carbon fibre composite cable, Corporate Report, Tokyo Rope Manufacturing Company, Ltd., Tokyo, Japan
26. Walton, J. M., and Yeung, Y. C. T. (1986) The fatigue performance of structural strands of pultruded composite rods, J. Inst. Mech. Engrs., London, C286/86, pp. 315-320
27. ASM International (1987) Composites, Engineered Materials Handbook, Vol. 1