



강섬유로 보강된 반응성 분체 콘크리트의 부착특성과 쪼갬인장강도

최현기¹⁾ · 배백일^{2)*} · 최창식³⁾

¹⁾경남대학교 소방방재공학과 ²⁾한양대학교 산업과학연구소 ³⁾한양대학교 건축공학부

Bond Characteristics and Splitting Bond Stress on Steel Fiber Reinforced Reactive Powder Concrete

Hyun-Ki Choi,¹⁾ Baek-II Bae,^{2)*} and Chang-Sik Choi³⁾

¹⁾Dept of Fire and Disaster Prevention Engineering, Kyungnam University, Changwon, 631-701, Korea

²⁾Research Institute of Industrial Science, Hanyang University, Seoul, 133-791, Korea

³⁾Dept of Architectural Engineering, Hanyang University, Seoul, 133-791, Korea

ABSTRACT Structural members using ultra high strength concrete which usually used with steel fiber is designed with guidelines based on several investigation of SF-RPC(steel fiber reinforced reactive powder concrete). However, there are not clear design method yet. Especially, SF-RPC member should be casted with steam(90 degree delicious) and members with SF-RPC usually used with precast members. Although the most important design parameter is development method between SF-RPC and steel reinforcement(rebar), there are no clear design method in the SF-RPC member design guidelines. There are many controversial problems on safety and economy. Therefore, in order to make design more optimum safe design, in this study, we investigated bond stress between steel rebar and SF-RPC according to test. Test results were compared with previously suggested analysis method. Test was carried out with direct pull out test using variables of compressive strength of concrete, concrete cover and inclusion ratio of steel fiber. According to test results, bond stress between steel rebar and SF-RPC increased with increase of compressive strength of concrete and concrete cover. Increasing rate of bond stress were decrease with increase of compressive strength of SF-RPC and concrete cover significantly. 1% volume fraction inclusion of steel fiber increase the bond stress between steel rebar and SF-RPC with two times but 2% volume fraction cannot affect the bond stress significantly. There are no exact or empirical equations for evaluation of SF-RPC bond stress. In order to make safe bond design of SF-RPC precast members, previously suggested analysis method for bond stress by Tepfers were evaluated. This method have shown good agreement with test results, especially for steel fiber reinforced RPC.

Keywords : steel fiber reinforced reactive powder concrete (SF-RPC), bond stress, stress analysis, direct pull out test

1. 서 론

최근 극한 환경에서의 구조물 건설 사례가 확대됨에 따라, 건설 재료의 고성능화가 이루어지고 있다. 콘크리트의 고성능화는 압축응력 하에서의 강도의 상승과 함께 가장 큰 문제점으로 지적되어온 인장 응력 하에서의 취성적 파괴특성을 극복하고자하는 연구개발이 이루어지고 있다. 초고강도 콘크리트는 100 MPa 이상의 압축강도 발현을 위한 콘크리트의 제조방법에서부터 실제 적용시의 설계 방법론 등에까지 다양한 방면으로 연구되고 있으며 이를 위

한 가이드라인^{1,2)}은 제시되고 있으나, 명확한 설계기준은 확립되지 않은 상태이다. 현재 초고강도 콘크리트의 제조법 중 널리 사용되고 있는 반응성 분체 콘크리트(Reactive Powder Concrete, RPC)는 국내 적용사례가 적으며, 개발자들에게도 익숙하지 않은 재료이다.

RPC는 프랑스에서 Richard와 Cheyrezy³⁾의 연구를 통해 1990년대부터 개발 되어온 재료로써, 단축 압축시험 시 압축강도 150 MPa이상과 파괴계수(Modulus of Rupture)를 25 MPa까지 확보할 수 있는 재료이다. RPC는 높은 압축강도의 확보를 위해 밀도를 극한까지 높인 재료로서 현재의 보통 콘크리트와 같은 골재를 사용하지 않아 균열의 발생시 골재의 맞물림 작용이 크게 일어나지 않는 특징을 보유하고 있다. 이는 결국 균열 발생시 극히 취성적인 파괴형태를 보여주기 때문에 이를 해결하기 위해 일

*Corresponding author E-mail : reise101@gmail.com

Received June 30, 2014, Revised Aug 5, 2014,

Accepted Aug 13, 2014

©2014 by Korea Concrete Institute

반적으로 강섬유를 혼입하여 사용하며 이를 통해 재료의 연성을 증진시킴과 동시에 압축강도의 상승도 기대할 수 있다. 일반적으로 이러한 재료를 섬유보강 RPC (Steel-Fiber reinforced Reactive Powder Concrete : SF-RPC)로 명명하여 사용하고 있다.

SF-RPC (Steel-Fiber reinforced Reactive Powder Concrete)는 일반적으로 고온(90°C)의 증기양생을 필요로 하므로 프리캐스트 부재 형태로 사용되고 있다. 프리캐스트 부재의 경우 부재간 접합 방법이 중요한 설계 요소로 간주된다. 따라서, SF-RPC의 프리캐스트 부재로서의 안전하고 경제적인 사용을 위해서는 해당 재료의 부착 거동에 대한 명확한 이해가 필요하다.

콘크리트와 철근 사이의 부착거동은 콘크리트의 압축강도 및 인장강도에 영향을 받게 된다. 콘크리트와 철근 사이의 부착강도는 부재 내에서의 복잡한 응력 상황에 의해 결정되는 바, 현재 사용중인 정착 설계식⁴⁾은 보통강도의 일반 콘크리트에 대한 실험 연구 결과⁵⁾에 의한 실용설계식에 의해 도출된 것이다. 따라서 현행 설계기준에 의거하여 SF-RPC 부재의 정착 설계를 수행할 경우 설계식의 도출에 사용되었던 실험체들의 특성을 벗어나게 되어 정착에 대한 안전성을 확보하기 어려울 수 있다. 따라서 본 연구에서는 직접 뽑힘 실험을 수행하여 SF-RPC와 철근 사이의 부착거동을 파악하고자 한다.

2. 콘크리트와 철근 사이의 부착강도

현행 설계기준들^{4,6,7,8)}은 정착 설계에 있어서 보통강도 콘크리트를 기반으로, 주요 설계인자에 대한 식, 계수 및 제한 사항을 규정하고 있다. 그러나 대부분의 설계인자들이 실험적 연구를 통해 규정된 경험식으로서 Fig. 1과 같이 새롭게 개발되는 재료에 대한 적용시 많은 제한이 따르게 된다. 실제로 국내의 현행 설계기준을 압축강도로 200 MPa인 SF-RPC에 적용하여 설계를 수행하기 위해 $\sqrt{f_{ck}}$ 가 8.4 MPa 이상일 경우 해당 값 이상의 강도를 적용할 수 없다는 제

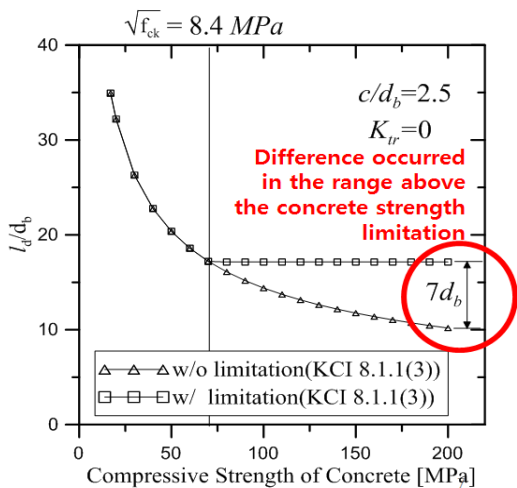


Fig. 1 Limitation of current code

한사항을 적용할 경우 설계식에 의해 도출되는 정착길이에 비해 사용된 철근 직경의 7배의 추가 정착길이를 요구하게 된다. 즉, 현행 설계기준을 적용할 경우 SF-RPC를 사용한 부재의 정착 설계는 비경제적으로 수행될 가능성이 있으며, 이는 고성능 재료의 개발 목적에 대치되는 것으로 볼 수 있을 것이다.

콘크리트와 철근 사이의 부착강도는 부착파괴의 형태에 의해 차이가 나게 되는데, 부착파괴의 형태는 리브의 높이와 간격의 비 및 리브의 각도로 결정된다. 리브 사이의 간격이 작고 리브의 높이가 큰 경우, 콘크리트 키와 주변 콘크리트 사이에 큰 전단응력이 발생하여 뽑힘파괴 (Pull-out failure)가 발생하게 되며, 반대의 경우 마디 앞 콘크리트의 압괴 이후 켜기작용에 의해 콘크리트에 발생하는 팽창력에 의한 쪼갬 파괴가 발생할 수 있다.⁹⁾

이에 대해 Tepfers¹⁰⁾는, 철근 마디의 경사각 α 에 따라 경사지압력이 발생하는 것으로 가정하였다. 이 경사지압력은 철근을 둘러싸고 있는 콘크리트를 방사방향(radial direction)으로 밀어내는 힘으로 전환될 수 있으며 Tepfers는 이 힘을 부착응력으로 정의하였다. 방사방향 응력은 모든 방향으로 같은 크기로 발생하여 Fig. 2와 같이 원주형 인장응력을 유발시키며, 구속효과의 증진 및 켜기의 발생에 대한 주요 변수는 피복두께와 콘크리트의 인장강도로 보았다. Tepfers¹⁰⁾의 부착강도 모델은 철근 주변 콘크리트가 탄성상태에 있을 때, 소성상태에 있을 때와 부분 균열 발생시의 탄성상태일 때의 세 가지로 나누어 표현되었다. 세 경우에 대한 부착응력은 다음 식과 같이 정리된다.

$$\tau_{el} = f_{ct} \frac{(c_y + d/2)^2 - (d/2)^2}{(c_y + d/2)^2 + (d/2)^2} \quad (1)$$

$$\tau_{pt} = f_{ct} \frac{2c_y}{d} \quad (2)$$

$$\tau_{pt,el} = f_{ct} \frac{c_y + d/2}{1.664d} \quad (3)$$

여기서, τ_{el} 은 탄성거동시의 부착강도, τ_{pt} 은 완전소성거동시의 부착강도, $\tau_{pt,el}$ 은 부분균열 탄성거동시의 부착강도를 의미하며, f_{ct} 는 콘크리트의 인장강도, c_y 는 최소피복두께, d 는 철근의 지름이다.

본 연구에서는 RPC가 보통강도 콘크리트와 달리 압축

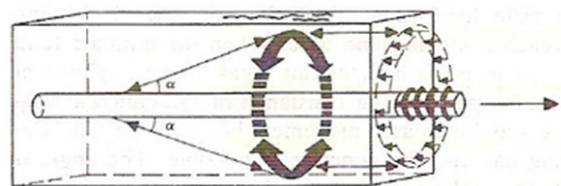


Fig. 2 Mechanical interaction between bar and concrete¹⁰⁾

응력하에서 넓은 탄성영역을 보유하고 있으며, 인장응력 하에서 큰 소성거동을 할수 있음에 따라 Tepfers¹⁰⁾의 부착응력 모델로 SF-RPC의 부착응력을 평가하였다.

3. 초고강도 강섬유보강콘크리트의 부착실험

3.1 실험계획

SF-RPC는 건설용 부재로 사용하기 위한 명확한 설계기준이 존재하고 있지 않다. 설계를 위한 가이드라인을 제공하는 SETRA,¹⁾ JSCE²⁾ 등에서는 세부적인 설계 변수에 대한 기술이 아닌 해석을 위한 모델을 제공하여 설계를 진행할 것을 권고하고 있다. 철근의 정착과 이음의 경우에는 실험을 통한 안전성의 검토가 선행되어야 사용이 가

능하다는 조항을 덧붙이고 있다. 이는 곧 SF-RPC를 사용하는 모든 경우에 대해 실험을 선행해야한다는 것으로 실험 수행을 위한 별도의 시간 및 경제적 부가 요소를 요구한다는 의미이며, 수행해야 하는 실험 방법에 대한 언급 또는 기준이 제시되어 있지 않아 실험을 수행하더라도 안전성에 대해서는 보장하기 힘들다는 것을 의미한다. 따라서 본 연구에서는 SF-RPC와 철근 사이의 부착강도의 발현에 대한 압축강도와 강섬유의 보강량이 미치는 영향을 검토하고자 하여 RPC의 설계 권고안이 발생시킬 수 있는 비경제적 문제와 안전성 확보 문제를 검토하고자 한다. 이를 위해 Table 1에 제시되어 있는 직접 뺄힘 실험체에 대한 실험을 Fig. 3과 4에 의해 수행하였다.

고강도 콘크리트는 압축강도에 대한 제품근에 따라 부착강도가 발현되지 않는 점을 반영하여 콘크리트의 압축

Table 1 Specimen properties and parameter

ID	Specimen	Fiber				Rebar		Concrete strength			Concrete cover	
		Type	L_f	d_f	V_f	ϕ	f_y	f_{cu}	f_{sp}	f_t	c_x	c_y
			[mm]	[mm]	[%]	[mm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[mm]	[mm]
1	100-0-1.5	-	-	-	-	12.7 (D13)	500	101	7.54	5.85	19.05	66.04
2	100-0-3.0	-	-	-	-						38.1	
3	100-0-5.2	-	-	-	-						66.04	
4	100-S1-1.5	Straight	13	0.5	1.0			104	8.25	6.52	19.05	
5	100-S2-1.5	Straight	13	0.5	2.0			113	9.14	7.17		
6	150-0-1.5	-	-	-	-			148	8.94	6.94	19.05	
7	150-0-3.0	-	-	-	-						38.1	
8	150-0-5.2	-	-	-	-						66.04	
9	150-S1-1.5	Straight	13	0.5	1.0			155	10.15	8.24	19.05	
10	150-S2-1.5	Straight	13	0.5	2.0			161	11.02	9.21		
11	200-0-1.5	-	-	-	-			196	11.55	8.11	19.05	
12	200-0-3.0	-	-	-	-						38.1	
13	200-0-5.2	-	-	-	-						66.04	
14	200-S1-1.5	Straight	13	0.5	1.0			207	12.74	9.55	19.05	
15	200-S2-1.5	Straight	13	0.5	2.0			215	14.35	10.27		

L_f : fiber length, d_f : fiber diameter, V_f : fiber volume fraction, ϕ : rebar diameter, f_y : yield strength
 f_{cu} : maximum compressive strength, f_{sp} : splitting tensile strength, f_t : direct tensile strength, c_x : cover thickness

Parameter		Characteristics
Compressive strength of concrete	100 [MPa]	Variation of tensile strength
	150 [MPa]	
	200 [MPa]	
Fiber contents	0 [%]	UHSC
	1 [%]	Variation of tensile strength
	2 [%]	Limitation of AFGC
Fiber type	Straight	AFGC recommendation
Concrete cover	1.5 [d_b]	Splitting investigation
	3.0 [d_b]	Cover thickness (40mm)
	5.20 [d_b]	Pull-out or yielding

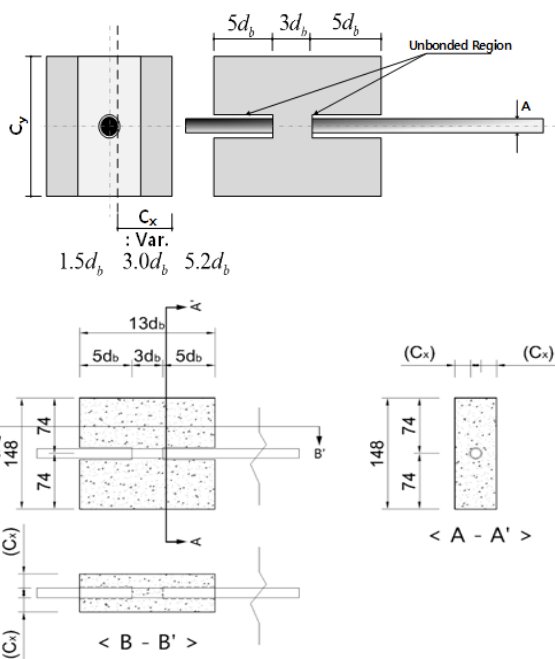


Fig. 3 Specimen details

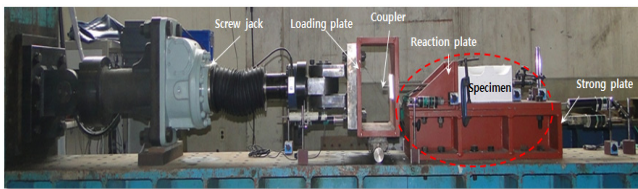


Fig. 4 Test setup

강도(100 MPa, 150 MPa, 200 MPa)를 변수로 설정하였다. 섬유 보강량에 따른 구속효과를 검토를 위해 섬유의 보강량 (V_f : 0, 1.0, 2.0)을 조절하였다.

철근의 직경은 고강도 콘크리트의 경우 큰 영향이 없었다는 연구 결과를 반영하여 철근의 직경(D13)은 한 가지로 설정하였다. 철근의 항복강도는 설계기준 항복강도로 500 MPa를 만족하는 철근을 사용하였다. 피복두께는 쪼개짐 파괴의 기준을 결정하는 주요 원인이 되므로 피복두께($1.5d_b, 3.5d_b, 5.2d_b$)를 변수로 설정하였다. 고강도 콘크리트 사용 시 응력의 분포가 크게 불균등하게 분포될 수 있으므로 짧은 부착 길이를 보유한 실험체를 제작하였다.

Table 2 Mix proportion

ID	w/b	Weight (kg/m ³)							f_{ck} [MPa]
		Cement	Water	Silica Fume	Sand	Filler	Steel Fiber	Super-Plasticizer	
100	0.25	809	222	80	1052	162	0	1	100
100 w/fiber	0.25	809	222	80	1052	162	74~147	1	100
150	0.20	820	190	112	918	186	0	1.04	150
150 w/fiber	0.20	820	190	112	918	186	74~147	1.04	150
200	0.17	830	176	207	912	246	0	1.08	200
200 w/fiber	0.17	830	176	207	912	246	74~147	1.08	200

3.2 실험방법

실험은 Fig. 4와 같이 재하용 철물과 철근에 이중 나선 커플러를 체결하였으며, 500 kN 용량의 스크류잭으로 철근을 인발하였다. Pull-out test에서 발생하는 실험체와 지압판 사이의 압축력에 의한 영향을 최대한 감소 시켰다. 실험체의 철근과 콘크리트의 미끄러짐 변위를 측정하기 위하여 자유단에 돌출되어 있는 철근과 자유단 콘크리트의 상대변위를 측정하여 미끄러짐 변위를 측정하였다. 하단에 2개의 LVDT를 설치하여 철근의 최소 미끄러짐 양을 계측하였으며, 실험 중 발생할 수 있는 편심을 측정하였다. 추가적으로 실험의 정확성을 확보하기 위하여 총 6개의 LVDT를 스크류잭 및 가력장치에 추가 설치하여 실험 중 발생할 수 있는 변위를 측정하여 실험값을 보정하였다. 가력속도는 KS F 244111)에 따라 0.6 mm/min의 속도로 변위제어를 실시하였으며, 실험체에 부착파괴가 발생하고 잔류부착응력이 확인될 때까지 하중을 가하였다. 실험을 통해 취득한 철근에 작용하는 하중은 다음 식 (4)를 통해 응력으로 변환하여 사용하였다.

$$\tau_{aver} = \frac{P}{\pi d l_d} \quad (4)$$

여기서, τ_{aver} 는 평균부착응력, P 는 하중단에 작용하는 작용하중, d 는 철근의 지름, l_d 는 철근과 콘크리트 사이의 부착길이이다.

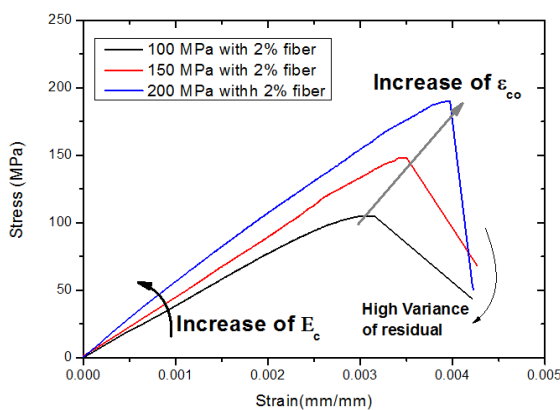
4. 실험결과

4.1 재료시험 및 결과

100 MPa의 높은 압축강도를 발현시키기 위해 본 연구에서는 전술한 바와 같이 실리카폼을 사용하고 굵은 골재를 배제한 RPC를 사용하였다. 낮은 물-결합재비와 강섬유의 혼입에 의해 저하되는 시공연도의 확보를 위해 고성능 감수제를 사용하였으며 본 연구에서 사용한 고성능 감수제는 폴리카르본산계열을 사용하였다. 섭씨 90도에서 타설 이후 6시간 동안 증기양생을 통해 해당 재료

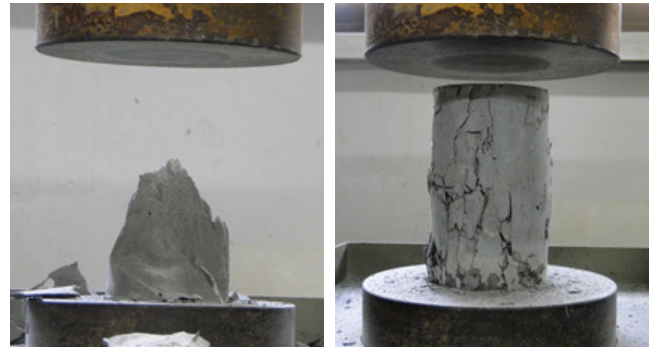
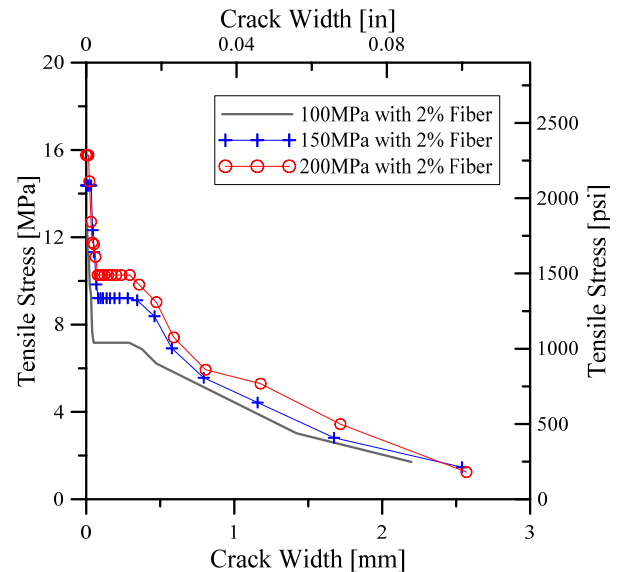
Table 3 Material properties of SF-RPC

ID	Ultimate Compressive strength [MPa]	Young's modulus [MPa]	Ultimate Strain [%]	Tensile Strength [MPa]
100-0-1.5	101	39305	2.52	11.70
100-0-3.0	101	39305	2.52	11.70
100-0-5.2	101	39305	2.52	11.70
100-S1-1.5	104	39738	2.55	13.04
100-S2-1.5	113	41112	2.64	14.34
150-0-1.5	148	45587	2.98	13.88
150-0-3.0	148	45587	2.98	13.88
150-0-5.2	148	45587	2.98	13.88
150-S1-1.5	155	47115	3.05	16.48
150-S2-1.5	161	47528	3.11	18.42
200-0-1.5	196	51575	3.41	16.22
200-0-3.0	196	51575	3.41	16.22
200-0-5.2	196	51575	3.41	16.22
200-S1-1.5	207	52434	3.51	19.10
200-S2-1.5	215	52769	3.58	20.54

**Fig. 5** Characteristics under compression

의 압축강도가 각각 200, 150, 100 MPa에 도달할 수 있도록 하였다. 100 MPa의 압축강도를 가진 RPC의 경우 증기양생 없이도 해당 강도를 발휘시킬 수 있으나, 모든 실험체를 같은 조건에서 검토할 수 있도록 증기양생을 통해 실험체 및 공 시체를 제작하였다. 본 연구에서 사용한 RPC의 배합비를 압축강도에 따라 구분하여 Table 2에 나타내었으며 표준공시체를 사용한 시험 결과를 Table 3에 나타내었다.

Fig. 5는 SF-RPC의 재료성질을 보여주기 위한 것으로, 강섬유 2%가 혼입된 공시체의 재료 시험결과이다. 본 연구에서 사용된 강섬유는 Table 1에 나타난 바와 같이, 길이는 13 mm, 섬유의 직경은 0.5 mm인 직선형 단섬유로써, 인장강도는 2600 MPa를 보유하고 있다. 후크형 강섬유를 사용할 경우 RPC의 낮은 물-결합재비에 의해 fiber-ball 현상이 나타날 수 있다. 이를 방지하기 위해 일반적으로 RPC

**Fig. 6** Failure pattern of RPC and SF-RPC**Fig. 7** Flexural Test Results for SF-RPC**Table 4** Material properties of steel

Materials	Yield strength (MPa)	Yield Strain (ϵ_y)	Tensile strength (MPa)	Elastic Modulus (GPa)
D13	576	0.0029	752	203

에서는 황동도막 처리된 직선형 단섬유를 사용하며 본 연구에서도 fiber-ball 현상을 방지하기 위해 직선형 단섬유를 사용하였다. 시험 결과 보통강도 콘크리트에 비해 높은 탄성계수와 최대 강도 발현시의 변형률 및 넓은 탄성 구간이 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 압축강도의 증가에 따라 최대강도의 발현 이후 급격한 하중지지능력 감소 경향이 더 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. Fig. 6는 강섬유의 보강에 의해 RPC의 부피 탈락현상이 방지됨을 보여주고 있다. 이 경우에도 하중 지지능력의 급감은 나타나고 있으나, 매트릭스 자체의 부피를 상실하지 않음으로써 구조부재 사용시의 급격한 안정성 상실을 1차적으로 방지할 수 있을 것으로 판단된다.

SF-RPC에 사용된 섬유는 전술한 바와 같은 압축응력하에서의 거동에 대한 차이를 나타낼 수도 있으나, 인장응력하에서의 거동을 변화시키는 효과가 있다. 사용된 SF-RPC

의 인장강도는 4점가력 휨 시험을 통해 산정하였다. Table 3에 정리된 바와 같이 인장강도는 압축강도의 10% 수준인 것으로 나타났으며, 시험결과는 SETRA의 정규화된 응력-변형률 관계를 통해 분석하였다. 시험을 통해 도출된 인장응력-균열폭 관계는 Fig. 7에 나타내었다.

실험에 사용된 철근은 500 MPa의 설계기준항복강도를 보유한 D13철근이었으며, 마디와 마디 사이의 거리는 9.1 mm, 마디의 높이는 0.7 mm로 KS 규격을 만족하는 철근을 사용하였다. 철근의 기계적 성질은 Table 4와 같다.

4.2 직접 뺄힘 실험체의 파괴 유형

계획된 실험에 의한 결과 파괴 유형은 크게 세 가지로 구분할 수 있다. 켜기작용에 의해 발생한 방사방향 응력을 지지하지 못하여 발생한 급작스러운 파괴, 쪼개짐 발생 이후 섬유가 구속 작용에 의해 발생하는 미끄러짐, 부분적 전단파괴에 따른 뺄힘 파괴로 구분되는 파괴 형태들은 실험체가 보유한 섬유 보강비 및 피복두께비에 의해 결정되었으며, 각 파괴를 유발시키는 응력의 크기는 콘크리트의 압축강도에 크게 영향을 받았다. 초기 균열은 콘크리트의 압축강도와 관계없이 유사한 파괴 패턴

을 보였으나 섬유보강 및 피복두께는 균열 확산 양상을 변화시키며 파괴유형을 결정하는 것으로 나타났다.

섬유가 혼입되지 않았으며 콘크리트 피복두께가 $1.5d_b$ 로 얇은 실험체의 경우, 최대하중 도달이전 철근의 수평 방향으로 균열이 발생하였으며 균열의 발생과 동시에 균열이 급속도로 진전되어 쪼개짐파괴로 최종파괴되는 경향을 보였다. 파괴면은 Fig. 8(a)와 같이 웨지 발생 지역이 부착영역 끝부분에 집중되어 있는 것으로 나타났으며, 균열 발생 각도는 $34\sim37^\circ$ 로 나타났다.

그러나 피복두께가 두꺼운 실험체의 경우($3.0d_b$, $5.2d_b$) Fig. 8(b)에 나타난 바와 같이 철근 마디에 의한 켜기작용이 부착영역 전 구간에서 걸쳐 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 피복두께가 $3.0d_b$ 이상인 경우 압축강도 150 MPa 이상에서는 뺄힘 파괴형태가 나타났다. 이는 초고강도콘크리트에서 압축강도 변화는 웨지의 발생에 의한 방사응력의 크기보다 인장강도를 증진시키는 효과가 커 철근의 부착강도 증진에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

강섬유가 혼입된 실험체의 경우 최대 부착응력의 발생 이후 급격한 하중지지능력감소 현상이 발생하지 않았으며 강섬유로 보강되지 않은 실험체에서 나타난 균열의 급격한 진전보다는 Fig. 8(c)와 같은 분산된 균열이 나타났

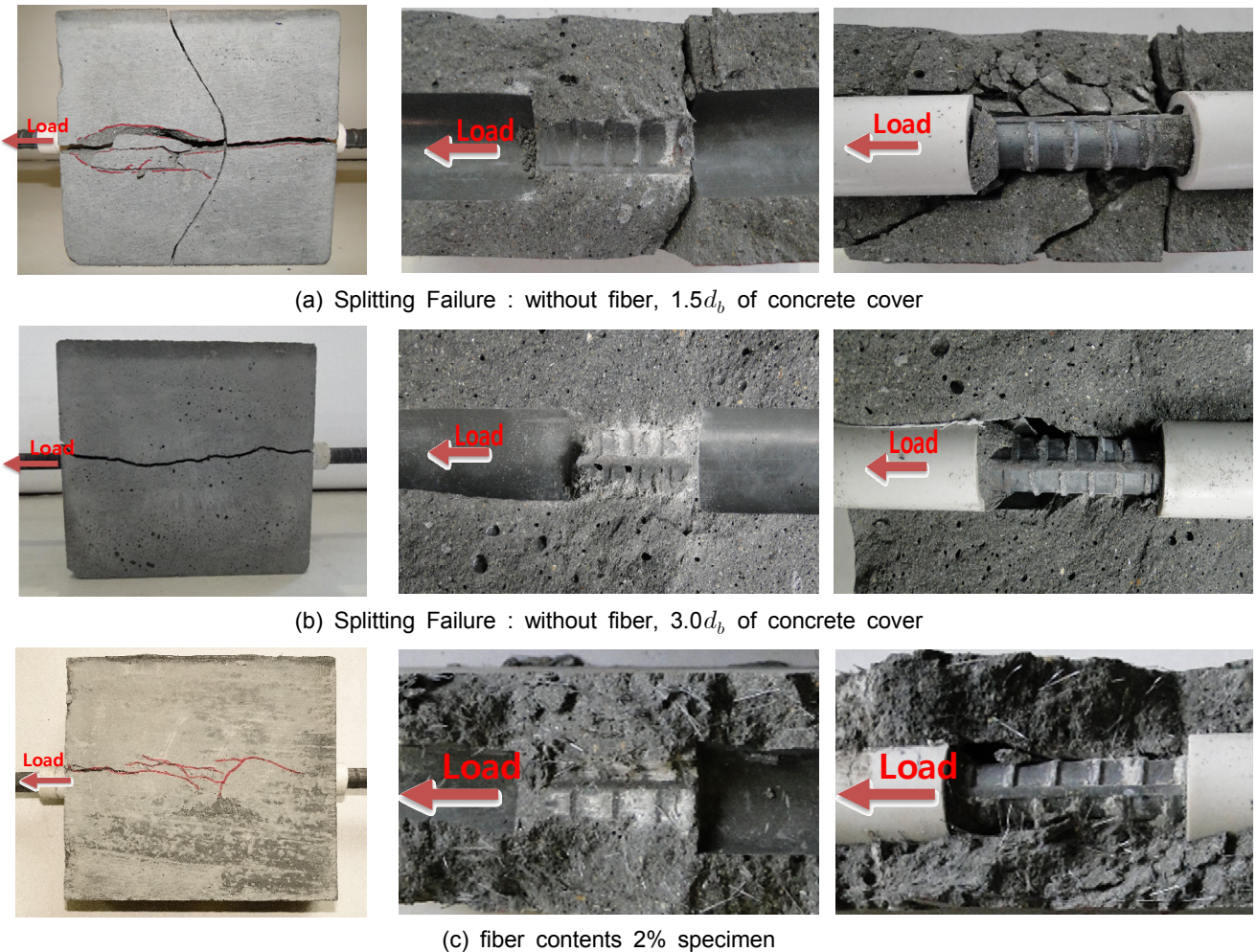


Fig. 8 Typical failure mode

다. 강섬유로 보강되어 있을 경우, 강섬유로 보강되지 않은 실험체의 파괴 패턴과 다른 파괴 형태를 보인 이유는 강섬유에 의해 균열이 열리는 속도가 상대적으로 느려져 부착영역 내의 모든 마디에서 켜기가 형성되었기 때문인 것으로 판단된다. 이 현상은 작용하중에 저항하는 면적을 증가시켜 부착응력 또한 강하게 나타나게 한다.

4.3 부착응력-미끄러짐 관계

SF-RPC가 구조부재에서의 적절한 안전성을 획득하기 위해서는 철근을 항복시키기 위한 정착길이, 피복두께 및 강섬유의 혼입량이 콘크리트의 인장강도와 같이 검토되어야 한다. 실험결과로부터 도출된 부착응력-미끄러짐 관계를 Fig. 9에 나타내었다. 부착응력은 작용단 철근에 작용하는 하중의 크기를 철근과 콘크리트 사이의 부착면적으로 나누어 산출하였으며, 미끄러짐량은 작용단 철근의 신장량이 미끄러짐량에 영향을 미치는 것을 방지하기 위해 자유단에서의 미끄러짐량을 측정하였다.

피복두께가 얇은 실험체들의 경우 콘크리트의 강도에 따라 최대 발현 부착응력의 크기에 차이가 있는 것으로 나타났다. 섬유로 보강되어 있지 않았을 때 피복두께가

커짐에 따라 부착강도가 커지는 것을 확인할 수 있었다. 피복두께가 $5.2d_b$ 인 경우 100 MPa의 압축강도를 가진 실험체는 뿔뿔히 파괴 형태의 부착응력-미끄러짐 관계가 나타났으나, 150 MPa 이상의 압축강도를 보유한 실험체는 철근이 항복하는 것으로 나타났다.

쪼갠인장강도의 뿔뿔히 파괴 형태로의 전환을 위해 본 연구에서는 강섬유의 영향을 확인하고자 하여 강섬유의 혼입량을 부피비로 0%, 1%, 2%로 결정하여 실험을 수행하였다. 쪼갠짐 부착파괴에의 영향을 확인하기 위해 피복두께 $1.5d_b$ 인 실험체를 제작하여 실험을 수행하였다.

Fig. 9(b)에 나타난 바와 같이 강섬유의 혼입은 부착강도의 증진에 직접적인 영향을 주는 것으로 나타났다. 그러나 부착강도의 증진에 있어서 2%의 부피비와 1%의 부피비의 혼입에 의해서는 부착강도의 증진에 큰 영향을 주지 않는 것으로 나타났다. 강섬유의 혼입이 영향을 미치는 부분은 최대 부착응력 발생 이후의 거동으로써, 균열의 확장을 방지하며 최대응력 발현이후 급작스러운 파괴가 나타나지 않도록 하는 것으로 나타났다. 같은 미끄러짐량에서 더 큰 부착응력이 나타나고 있는 것으로 Fig. 9(b)의 두 번째와 세 번째 그래프에서 확인할 수 있다.

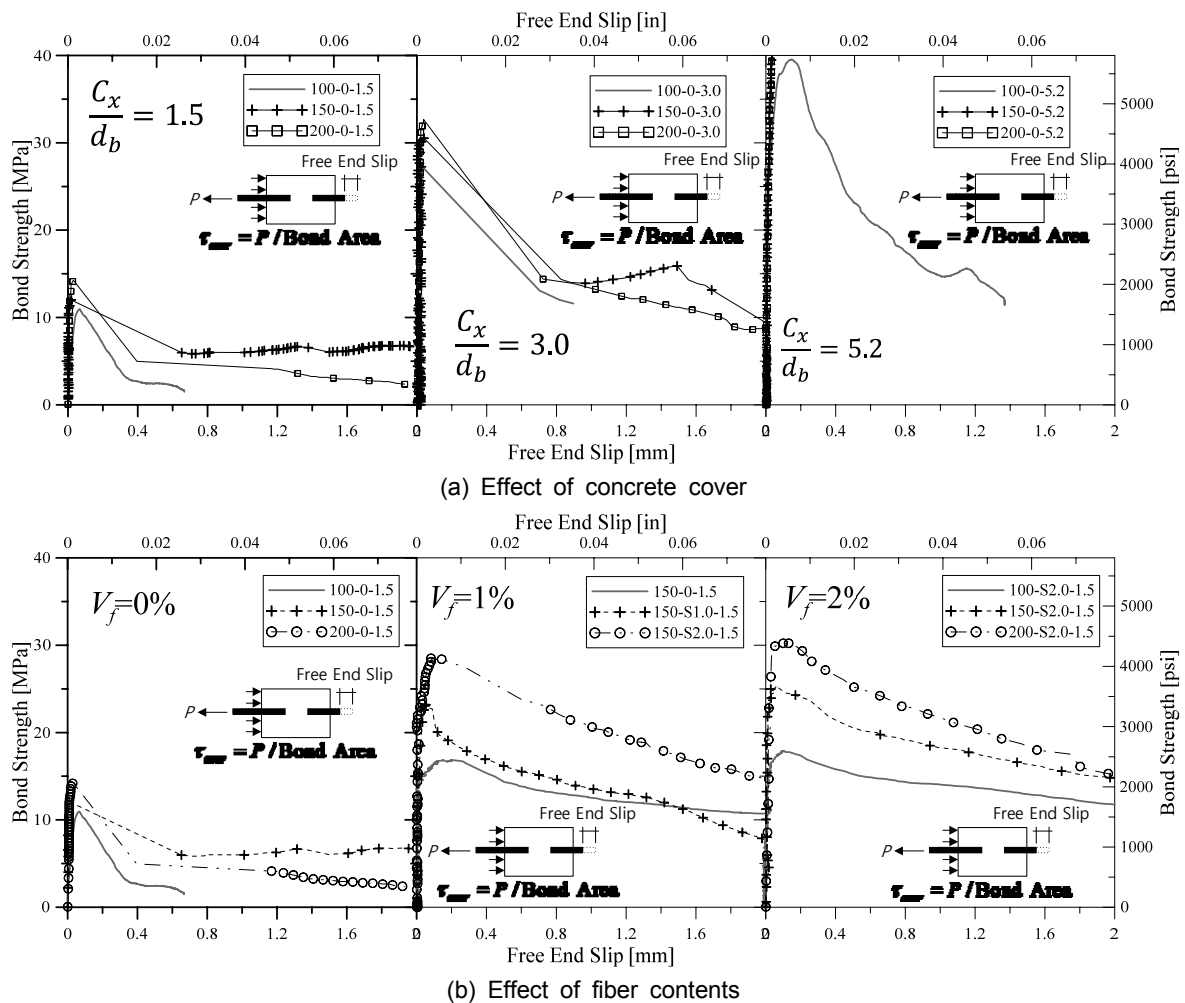


Fig. 9 Bond-slip relation

Table 5 Test results

Specimen	Failure mode	s_{max}	τ_{max}
		[mm]	[MPa]
100-0-1.5	Splitting	0.066	10.96
100-0-3.0	Splitting	0.031	27.25
100-0-5.2	Splitting	0.146	39.54
100-S1-1.5	Pullout	0.149	16.85
100-S2-1.5	Pullout	0.105	17.92
150-0-1.5	Splitting	0.018	12.00
150-0-3.0	Splitting	0.040	30.54
150-0-5.2	Yielding	0.519	58.07
150-S1-1.5	Pullout	0.055	23.24
150-S2-1.5	Pullout	0.058	25.32
200-0-1.5	Splitting	0.032	14.24
200-0-3.0	Splitting	0.039	32.67
200-0-5.2	Yielding	0.052	59.47
200-S1-1.5	Pullout	0.101	28.54
200-S2-1.5	Pullout	0.100	30.22

5. SF-RPC의 부착강도

SF-RPC와 철근 사이에서 발현 가능한 부착강도의 크기 및 변수의 영향을 확인하기 위해 최대 발현 부착강도를 Table 5에 정리하여 나타내었으며, 부착강도에 각 변수가 주는 영향에 대해 Fig. 10에 나타내었다.

실험결과 도출된 부착응력의 크기로부터 피복두께와 콘크리트의 강도, 그리고 섬유유의 보강량이 부착응력에 미치는 영향을 확인할 수 있었다. 섬유유의 혼입에 의한 영향을 파악하기 위해 섬유보강지수(Reinforcing Index : RI)를 사용하였으며, RI는 다음 식 (5)에 의해 결정하였다.

$$RI = \frac{L_f}{d_f} V_f \quad (5)$$

여기서, L_f 는 섬유의 길이, d_f 는 섬유의 직경 그리고 V_f 는 혼입된 섬유의 부피비를 의미한다.

5.1 실험변수에 따른 부착강도의 변화

$1.5d_b$ 의 피복두께를 가진 실험체에 비해 두 배인 $3.0d_b$ 의 피복두께를 보유한 실험체들은 평균적으로 2.7배의 높은 응력을 나타냄으로써 피복두께의 크기가 부착응력의 크기에 직접적인 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있었다. $1.5d_b$ 의 3.5배에 달하는 피복두께를 가진 실험체의 경우 100 MPa의 압축강도를 보유한 실험체만이 철근의 항복 이전 뽕힘과파괴가 발생하였다. 이 경우 부착응력 증가분은 $3.0d_b$ 의 부착강도를 가진 실험체의 1.6배로 나타나 부착강도의 증가율은 피복두께의 증가량에 비례하지 않는 것을 확인할 수 있었다. 압축강도에 따른 부착강도의 영향을 Fig. 10(b)에 나타내었다. 콘크리트 압축강도의 증가에 따라 부착응력의 크기는 섬유유의 보강량에 영향을 받지 않고 선형적으로 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 콘크리트 압축강도의 증가에 따라 부착강도의 증가비율이 감소하는 현상도 관찰할 수 있었다. 섬유유의 보강에 의한 부착강도 증진 효과를 검토하기 위해 섬유유의 보강량에 따른 부착강도 발현 정도를 Fig. 10(c)에 나타내었다. 섬유유의 보강에 의해 부착강도는 큰 폭으로 증가하는 것을 확인할 수 있어, 섬유유가 횡보강근과 같은 구속 효과를 발현할 수 있을 것으로 예상된다. 섬유유의 혼입 여부는 큰 폭의 부착강도의 증가를 유도할 수 있는 것으로 나타났으나, 섬유보강시 보강량의 증가는 직접적인 부착강도의 증진에 영향을 주지 못하는 것으로 나타났다. 이는 섬유유의 형태가 직선형태이며, 비교적 짧은 섬유유가 사용되었기에, 철근의 길이 방향의 쪼개짐 균열을 발생시키는 응력하에서 발생하는 급작스러운 균열의 확장에 제대로 저항하지 못하였기 때문인 것으로 판단된다.

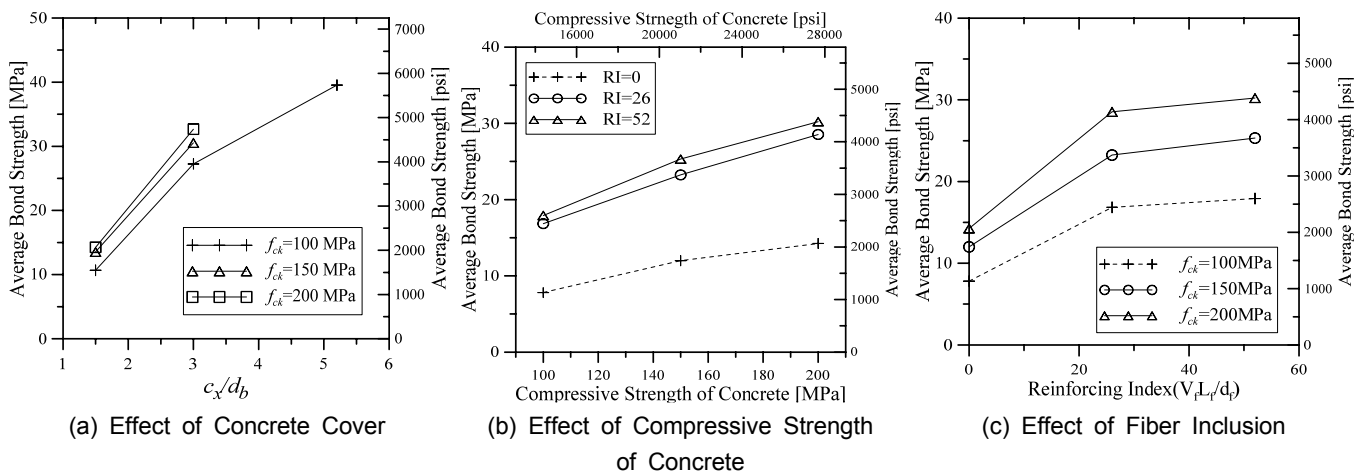


Fig. 10 Test Results - Bond Strength

5.2 Tepfers의 부착강도 모델¹⁰⁾에 따른 평가

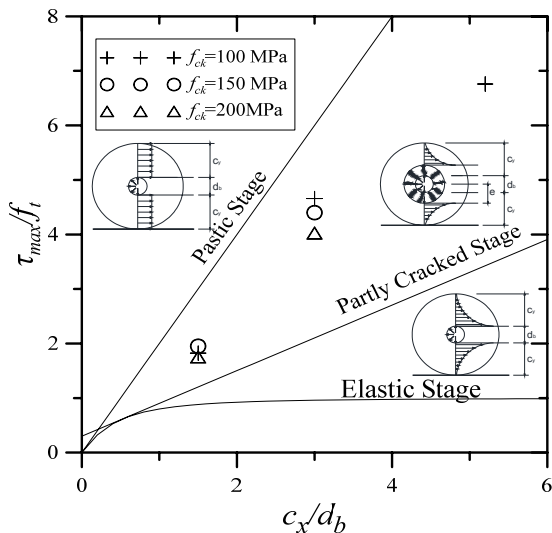
Tepfers의 부착모델은 탄성, 소성, 내부 균열 상태에 대한 응력 해석 방법을 적용하였으므로 SF-RPC의 쪼갬인장강도를 정의할 수 있을 것으로 예상된다. 본 연구에서 수행된 실험 결과를 Tepfers의 응력 해석 모델과 비교하여 Fig. 11에 나타내었다. 강섬유로 보강되지 않은 RPC로 제작된 실험체의 쪼갬부착강도를 비교한 결과 소성상태와 균열단면 탄성상태 사이에 분포하는 것을 확인할 수 있었다. 피복두께가 두꺼워짐에 따라 내부 균열과 잔존 비균열 콘크리트가 형성됨에 따라 균열 탄성 상태의 부착응력에 가까워지는 형태가 나타났다. 보통강도 콘크리트를 사용한 Tepfers의 기존 연구에서도 유사한 결과가 나타났으나, 초고강도 콘크리트가 사용되며 소성상태에 더 가깝게 나타난 이유는 RPC의 높은 인장강도에 의한

더 큰 소성화에 기인하는 것으로 판단된다. Fig. 11(b)에서 강섬유의 보강에 의한 파괴 거동의 변화를 확인할 수 있다. SF-RPC의 인장응력-변형률 관계를 통해 유추할 수 있는 바와 같이 넓은 소성영역을 보유함에 따라 소성상태의 부착응력에 가깝게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 1% 이상의 강섬유가 RPC에 보강될 경우 부착강도의 산정은 Tepfers의 응력 해석을 사용하여 평가할 수 있을 것으로 판단된다.

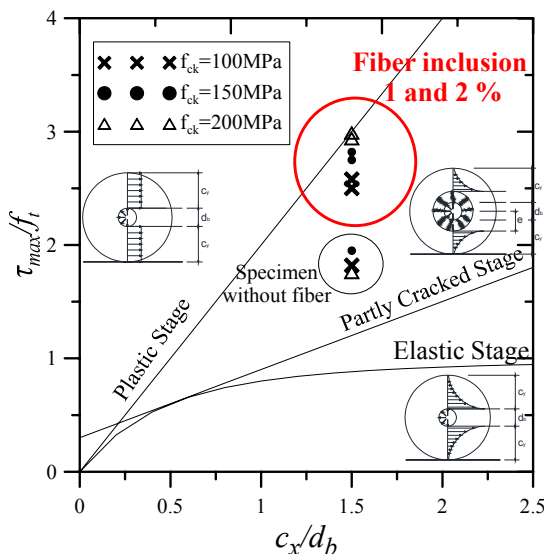
6. 결 론

본 연구에서는 강섬유로 보강된 RPC의 부착강도에 영향을 미치는 요인들을 검토하기 위해 직접뽑힘 실험을 수행하였으며, 각 변수별 영향에 대해 검토하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) RPC와 이형철근 사이의 부착강도에 대한 직접 뽑힘 실험 결과, 피복두께가 $1.5d_b$ 커짐에 따라 부착강도는 1.6배로 증가하며, 이후 부착강도의 증가율이 감소하여 피복두께가 $2.2d_b$ 증가했음에도 1.6배의 부착강도가 증가한 것을 확인할 수 있었다.
- 2) 콘크리트의 압축강도에 의한 부착강도의 증가분은 거의 직선적으로 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 작은 비율이지만 콘크리트 부착강도의 증가율이 압축강도의 증가와 함께 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 즉 높은 압축강도를 보유한 RPC의 경우에도 콘크리트 압축강도의 제공근에 따른 부착강도의 변화 경향이 나타날 수 있는 것으로 판단할 수 있었다.
- 3) 강섬유의 보강은 SF-RPC의 부착강도를 2배 이상으로 크게 증진시키는 것으로 나타났으며, 이는 인장강도의 증가분에 비례하는 것으로 나타났다. 그러나 섬유 혼입량이 많아지면서 그 증가량은 감소하며, 1% 이상에서는 쪼갬부착강도 증진률의 증가를 기대하기 어려울 것으로 판단된다.
- 4) SF-RPC의 부착강도는 Tepfers가 제안한 소성 상태의 부착강도 산정 방법에 매우 근접한 값을 나타내었으며 섬유로 보강되지 않았을 경우에는 보통강도 콘크리트의 추정 결과와 유사한 경향을 보이는 것을 확인할 수 있었다.
- 5) SF-RPC를 활용할 경우 보통강도 콘크리트의 복잡한 응력 상태를 고려하지 않고 탄성체 또는 완전소성체의 응력 해석 방법을 적용할 수 있는 것으로 나타났으며, 이를 사용하여 철근과 SF-RPC 사이의 부착력을 검토 및 부재를 설계할 수 있을 것으로 판단된다.
- 6) 본 연구의 결과는 초고강도 콘크리트와 섬유의 혼입이 부착강도에 미치는 영향을 파악하기 위한 것으로써, 부재의 설계에 직접적으로 미치는 영향을 파악하기 위해서는 부재단위의 부착응력 평가 실험이 추가적으로 수행되어야 할 것이다.



(a) Bond Strength Evaluation without Steel Fiber



(a) Bond Strength Evaluation with Steel Fiber

Fig. 11 Bond Strength Evaluation with Bond Strength model of Tepfers¹⁰⁾

감사의 글

이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부, 교육부)의 재원과 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. NRF-2014R1A1A1005444, NRF-2013R1A1A2010717).

References

1. AFGC Groupe de travail BFUP, "SETRA-AFGC Ultra High Performance Fiber-Reinforced Concretes : Interim Recommendation," 2002.
2. Japan Society of Civil Engineering, "Recommendations for design and construction of ultra high strength fiber reinforced concrete structures(Draft)," 2006.
3. Richard, P. and Cheyrezy, M. H., "Reactive Powder Concretes with High Ductility and 200~800MPa Compressive Strength," ACI SP 144, 1994, pp. 507-518.
4. Korea Concrete Institute, Concrete Design Code and Commentary, Kimoondang Publishing Company, Seoul, Korea, 2012, pp. 600.
5. Darwin et al., "Development length criteria for conventional and high relative rib area reinforcing bars," 1996, ACI Structural Journal, May-June, pp. 347-358.
6. ACI Committee 408, "Splice and Development Length of High Relative Rib Area Reinforcing Bars in Tension (408.3-01)," American Concrete Institute, 2001.
7. European Committee for Standardization, "Eurocode 2 (EC2) Design of Concrete Structures," 2004.
8. NewZealand Standard, "New Zealand Concrete Structures Standards (NZS 3101)," 1995.
9. R. Park, T. Paulay, "Reinforced Concrete Structures," John Wiley & Sons, 1975.
10. Ralejs Tepfers, "Cracking of concrete cover along anchored deformed reinforcing bars," Magazine of concrete research, Vol. 31, No. 106, March, 1979, pp. 3-12.
11. KS F 2441, "Standard test method for comparing concrete on the basis of the bond developed with reinforcing steel," Korean Agency for Technology and Standards, 2010. pp. 1-7.

요 약 강섬유로 보강되어 SF-RPC (Steel-Fiber reinforced Reactive Powder Concrete)로 불리는 초고성능 콘크리트의 설계는 이에 대한 연구결과를 기반으로 한 가이드라인을 통해 수행되고 있으나, 명확한 설계기준은 확립되지 않은 상태이다. 특히 SF-RPC 일반적으로 고온(90°C)의 증기양생을 필요로 하므로 프리캐스트 부재 형태로 사용되고 있어 부재간 접합 방법이 중요한 설계 요소로 간주됨에도 불구하고 명확한 설계기준이 존재하지 않음에 따라 현재 안전성 및 경제성 측면에서 많은 의문이 있는 상태이다. 본 연구에서는 SF-RPC의 명확한 정착 설계를 위한 기반으로 SF-RPC와 철근 사이의 부착강도를 실험적으로 파악하고, 기존에 사용하였던 평가 방법의 적용성을 검토하고자 한다. 이를 위해, 콘크리트의 압축강도, 피복두께, 섬유 혼입량을 변수로 가진 직접 뽑힘 실험을 계획 및 수행하였다. 실험 결과 SF-RPC의 부착강도는 압축강도의 증가량에 따라 증가하고 있으나 그 증가율은 크게 나타나지 않음을 확인할 수 있으며, 피복두께의 증가에 따라 부착강도가 증가하며 $5.2d_b$ 이상의 피복을 가질 경우 매우 짧은 매입깊이인 $3d_b$ 의 매입깊이에서도 철근을 항복시킬 수 있는 것을 확인하였다. 또한, 섬유의 보강에 의해 부착강도가 두 배 이상 증가하는 것을 확인하였다. 안전하고 경제적인 설계를 위해서는 SF-RPC의 부착강도를 추정할 수 있어야 하나, 현재까지는 이에 대한 추정식이 제시되고 있지 않으며, SF-RPC의 거동이 압축응력하에서는 큰 탄성 거동을 하며, 인장응력하에서는 소성 거동을 함에 기인하여 Tepfers의 응력 해석 방법을 적용한 결과 실험 결과와 유사한 추정치를 기대할 수 있는 것을 확인하였다.

핵심용어 : 섬유보강 초고강도 콘크리트, 부착강도, 응력 해석, 직접 뽑힘 실험