

파괴역학 기반 초고성능 콘크리트에서의 강섬유 기여분 규명

Investigation on contributions of steel fibers in ultra-high-performance concrete based on fracture mechanics

목차

1.연구개요



2.강섬유 기여분 모델

3.모델 개발 위한 시작품 제작

4.코딩을 통한 파괴에너지 산정

서울시립대학교 건축공학과

연구책임자 : 이 석 인 석사과정

연구참여자 : 이 건 호 학부 4학년
지 성 우 학부 4학년
이 동 현 학부 3학년

지도교수 : 김 강 수

산업체 멘토: 최 석 동 (주)연우건축구조기술사 사무소

1. 연구 개요 _ X-TWICE

연구개요

-XTWICE

강섬유 기여분

모델

모델 개발 위한

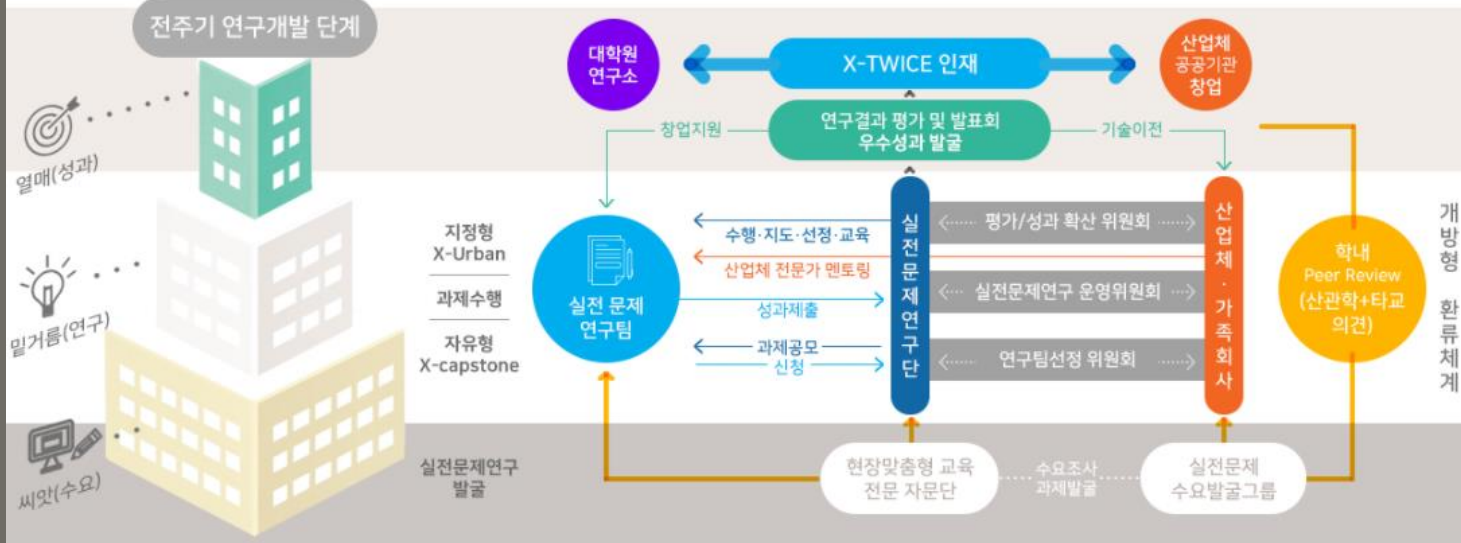
시작품 제작

코딩을 통한

파괴에너지 산정

실전문제연구단 사업 추진체계

X-TWICE 인재양성을 목표로 전주기 연구개발단계, 개방형 환류체계, 3대 산학공동위원회 체계를 갖추었다.



X-TWICE 실전문제 연구단 비전

- X-mind를 갖춘 전문가로 기술(Technology)과 지식(Knowledge)뿐만 아니라 혁신과(Innovation), 도전 정신(Challenge), 탁월성(Excellence)을 갖춘 인재양성

X-Urban (특화발전형)

- 이공학부문에서 연구단이 산업계 수요조사와 특성화 발전계획 바탕으로 도출된 연구주제
- ➔ 산업계 수요조사를 통해 초고성능 콘크리트의 강섬유 기여분에 대한 연구주제 도출

연구개요

-필요성 및 목표

강섬유 기여분

모델

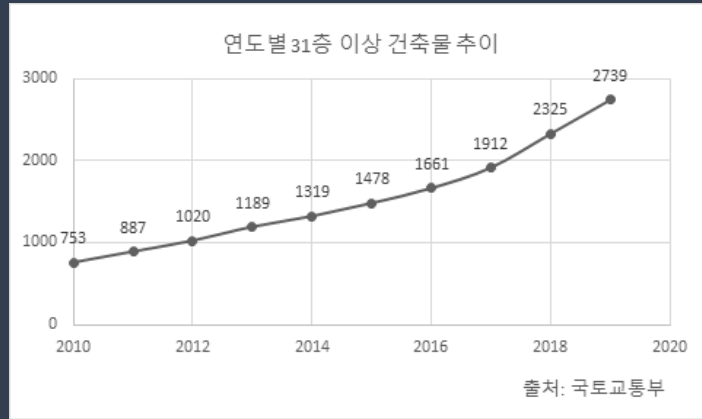
모델 개발 위한

시작품 제작

코딩을 통한

파괴에너지 산정

건설 산업의 변화



<연도별 고층건물 추이 >

“고층 건축물에 대한 수요 점차 증가”

고층 및 비정형 건축물의 수요가 증가함에 따라 우수한 재료특성을 갖는 초고성능 콘크리트(UHPC) 개발됨.

강섬유 종류



<Corrugated>

<Smooth>

<Hooked>

<강섬유 종류>

“기성품인 강섬유의 다양한 종류 ”

기성품으로 제작되는 다양한 강섬유 및 혼입률에 따라 변화하는 초고성능 콘크리트(UHPC)의 인장 성능

1. 연구 개요 _ 필요성 및 목표

◆ 목표: 초고성능 콘크리트의 강섬유 기여분 정량화

연구개요

-필요성 및 목표

강섬유 기여분

모델

모델 개발 위한 시

작품 제작

코딩을 통한

파괴에너지 산정

강섬유 (Steel fiber)

강섬유에 따라 변화하는 초고성능 콘크리트의 인장 특성 규명.

세부 목표 1

강섬유와 UHPC의 파괴에너지의 상관관계를 규명

세부 목표 2

파괴에너지를 통한 UHPC 평가 모델 개발

파괴역학 (Fracture mechanics)

UHPC의 합리적인 평가를 위해, 파괴역학의 파괴에너지 (G_F, G_f)를 통해 분석.

개발 모델 기반 간략식 도출

구조 실무 적용 가능성 극대화

제시한 모델 기반의 구조 실무 적용을 할 수 있는 간략식 도출.

세부 목표 4

UHPC의 강섬유 기여분 정량화

UHPC

UHPC의 인장 특성을 정량적으로 규명.

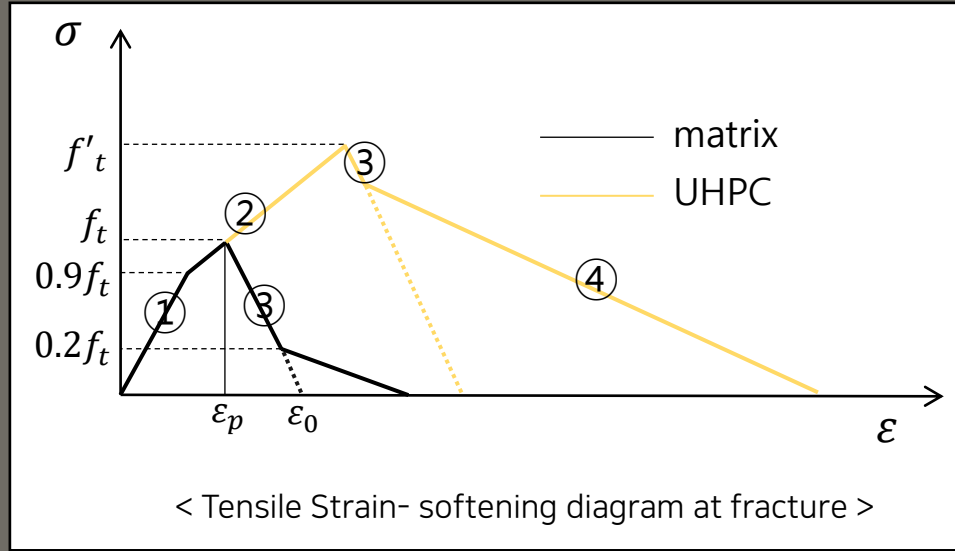
세부 목표 3

연구개요

강섬유 기여분 모델
- UHPC 인장거동 가정

모델 개발 위한 시
작품 제작

코딩을 통한
파괴에너지 산정



- ① : Crack formation
- ② : Multiple crack formation
- ③ : Crack localization
→ Cohesive stress
- ④ : Crack localization
→ Bridge stress

가정

1. Matrix($v_f = 0\%$)와 UHPC의 파괴에너지의 변화는 강섬유 영향
2. Matrix에 따라 강섬유의 부착강도 변화 (Matrix 배합비 고정)
3. Matrix, UHPC Softening, Hardening behavior : bilinear
 - Hardening mechanism : Formation of the Line Crack → Formation of the Multiple Crack (FPZ_ Fracture Process Zone)
 - Softening mechanism : Crack localization($\approx crack\ coalesce$) → Cohesive stress (Matrix \approx concrete) , Cohesive stress + Bridge stress (UHPC)

2. 강섬유 기여분 모델 - $\eta_1(G_f)$

연구개요

강섬유 기여분 모델

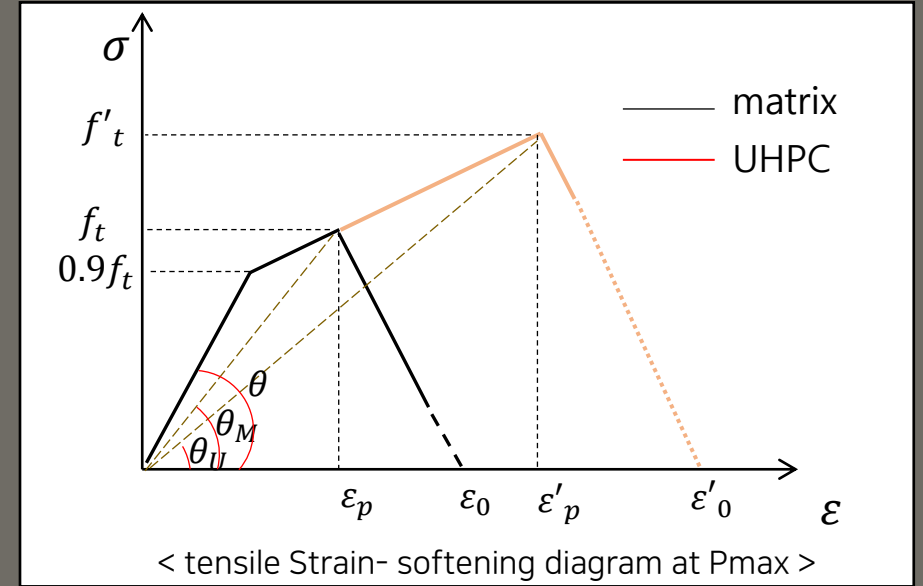
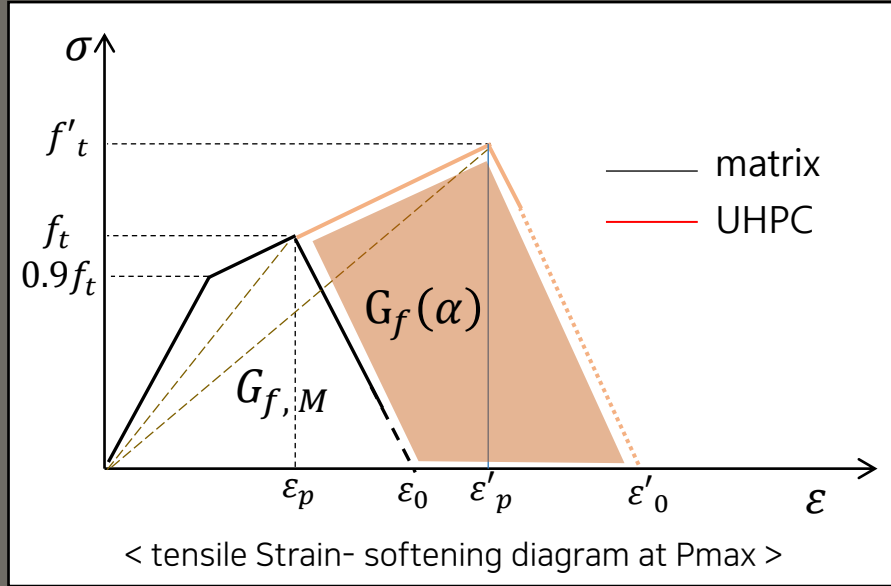
$\eta_1(G_f)$

모델 개발 위한

시작품 제작

코딩을 통한

파괴에너지 산정



1step. Changes of Initial fracture energy due to steel fiber_ $G_f(\alpha)$

$$G_f(\alpha) = G_{f,U} - G_{f,M}$$

2step. Initial fracture energy of Matrix ($v_f = 0\%$) - $G_{f,M}$

$$G_{f,M} = \left\{ \frac{1}{2} \varepsilon_0 f_t + \frac{1}{2} \frac{0.9f_t}{\sin\theta} \frac{\varepsilon_p}{\cos\theta_M} \sin(\theta - \theta_M) \right\} w_c$$

$$= \left\{ \frac{1}{2} \varepsilon_0 f_t + \frac{1}{2} 0.9f_t \left(1 - \frac{f_t}{E \varepsilon_p}\right) \right\} w_c$$

3step. Initial fracture energy of UHPC - $G_{f,U}$

$$- G_{f,U} = \left\{ \frac{1}{2} \varepsilon'_0 f'_t + \frac{1}{2} \frac{0.9f_t}{\sin\theta} \frac{\varepsilon'_p}{\cos\theta_U} \sin(\theta - \theta_U) \right\} w'_c$$

$$= \left\{ \frac{1}{2} f_2 f_3 \varepsilon_0 f_t + \frac{1}{2} 0.9f_t \left(1 - \frac{f_3 f_t}{f_1 E \varepsilon_p}\right) \right\} f_4 w_c$$

◇ UHPC 계수

- $\varepsilon'_p = f_1 \varepsilon_p$
- $\varepsilon'_0 = f_2 \varepsilon_0$
- $f'_t = f_3 f_t$
- $w'_c = f_4 w_c$

2. 강섬유 기여분 모델 - $\eta_1(G_f)$

4step. Definition of contribution coefficient of steel fiber (η_1)

$$- G_{f,U} = \eta_1 G_{f,M}$$

$$- \eta_1 = \frac{\left\{ f_2 f_3 \varepsilon_0 f_t + 0.9 f_t \left(1 - \frac{f_3}{f_1} \frac{f_t}{E \varepsilon_p} \right) \right\} f_4}{\left\{ \varepsilon_0 f_t + 0.9 f_t \left(1 - \frac{f_t}{E \varepsilon_p} \right) \right\}}$$

연구개요

5step. Simplification of Matrix term (f_{ck})

- fib model code

$$- E = 21.5 * 10^3 \left(\frac{f_{ck}+8}{10} \right)^{1/3} \text{ or } 21.5 * 10^3 \left(\frac{f_{ck}}{10} \right)^{1/3}$$

$$- \varepsilon_p = 0.00015$$

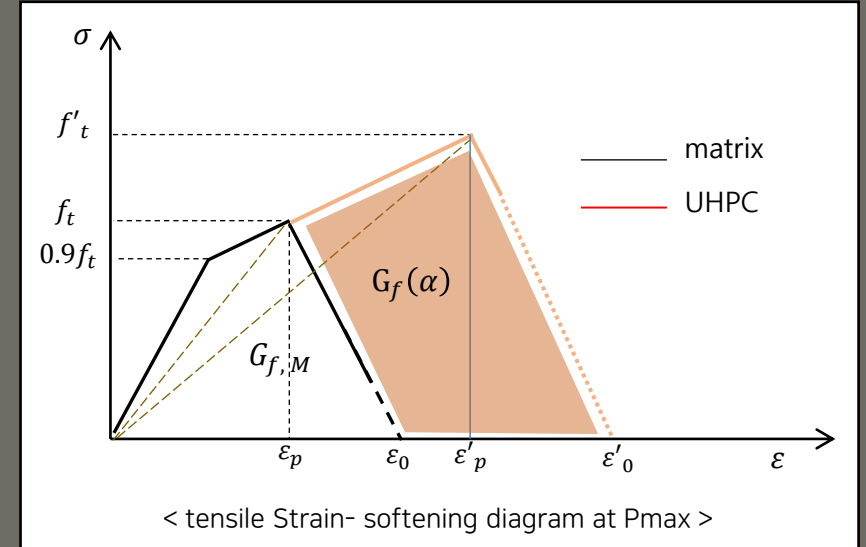
$$- f_t = 0.3 (f_{ck})^{2/3} \text{ or } 2.12 \ln(1 + 0.1(f_{ck} + 8))$$

- Crack band theory for fracture of concrete

$$- E_t \cong - \frac{0.482 E}{56.7 + f_t} (\text{MPa})$$

$$- \varepsilon_0 = \frac{f_t(56.7 + f_t)}{0.482 E} + 0.00015$$

$$\rightarrow \eta_1 = K_A(f_{ck}, \text{Steel fiber})$$



◇ UHPC 계수

$$- \varepsilon'_p = f_1 \varepsilon_p$$

$$- \varepsilon'_0 = f_2 \varepsilon_0$$

$$- f'_t = f_3 f_t$$

$$- w'_c = f_4 w_c$$

2. 강섬유 기여분 모델 - $\eta_2(G_F)$

1step. Changes of Initial fracture energy due to steel fiber_ $G_f(\alpha)$
 Changes of total fracture energy due to steel fiber_ $G_F(\alpha)$

$$G_f(\alpha) = G_{f,U} - G_{f,M}$$

$$G_F(\alpha) = G_{F,U} - G_{F,M}$$

연구개요

2step. Total fracture energy of Matrix ($v_f = 0\%$) - $G_{F,M}$

$$- G_{F,M} = G_{f,M} + 0.1f_t * (\varepsilon_u - \varepsilon_0) * w_c$$

$$= G_{f,M} + G'_{F,M}$$

강섬유 기여분 모델

- $\eta_2(G_F)$

3step. Total fracture energy of UHPC - $G_{F,U}$

$$- G_{F,U} = G_{f,U} + \frac{\sigma}{2}(\varepsilon'_u - \varepsilon'_0) * w'_c$$

$$= G_{f,U} + 0.1f_t(f_4f_5f_6\varepsilon_u - f_2f_4f_5\varepsilon_0) * w_c$$

$$= G_{f,U} + G'_{F,U}$$

모델 개발 위한

시작품 제작

코딩을 통한

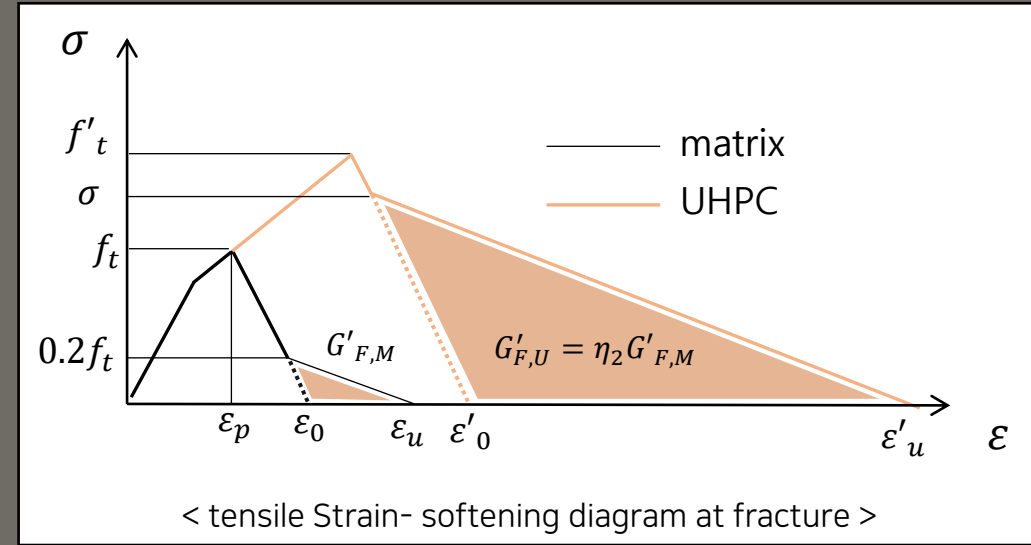
파괴에너지 산정

4step. Definition of contribution coefficient of steel fiber (η_2) & Simplification

$$- G'_{F,U} = \eta_2 G'_{F,M}$$

$$\rightarrow 0.1f_t(f_4f_5f_6\varepsilon_u - f_2f_4f_5\varepsilon_0) * w_c = \eta_2 0.1f_t * (\varepsilon_u - \varepsilon_0) * w_c$$

$$- \eta_2 = \frac{f_4f_5f_6\varepsilon_u - f_2f_4f_5\varepsilon_0}{\varepsilon_u - \varepsilon_0} = K_B(f_{ck}, fiber factor)$$



◆ UHPC 계수

- $\varepsilon'_p = f_1 \varepsilon_p$
- $\varepsilon'_0 = f_2 \varepsilon_0$
- $f'_t = f_3 f_t$
- $w'_c = f_4 w_c$
- $\sigma = f_5 0.2f_t$
- $\varepsilon'_u = f_6 \varepsilon_u$

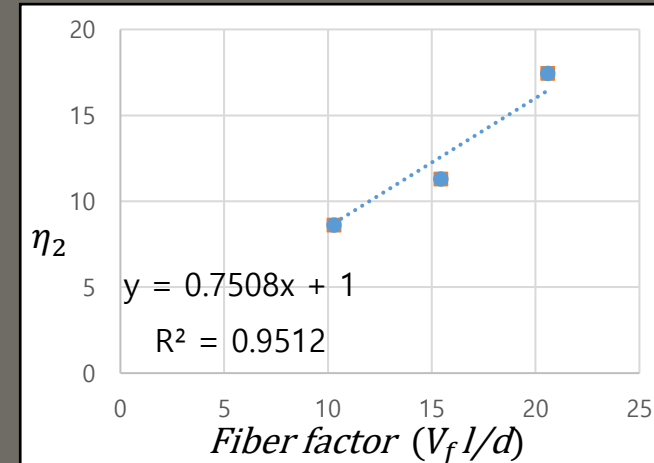
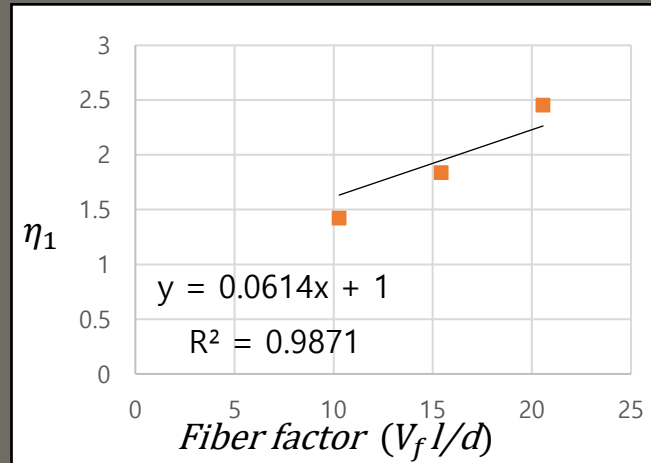
2. 강섬유 기여분 모델 _ 간략식 도출 방안

참고 문헌의 실험결과를 바탕으로 강섬유 영향 계수 (η_1, η_2) 산출

: 강섬유의 부피비 ($V_f = 0.2 \sim 0.4\%$)를 변수로 실험. \rightarrow Matrix term = constant.

$$\rightarrow \eta_1 = \frac{\left\{ f_2 f_3 \varepsilon_0 f_t + 0.9 f_t \left(1 - \frac{f_3}{f_1} \frac{f_t}{E \varepsilon_p} \right) \right\} f_4}{\left\{ \varepsilon_0 f_t + 0.9 f_t \left(1 - \frac{f_t}{E \varepsilon_p} \right) \right\}} = \frac{G_f(\alpha)}{G_{f,M}} + 1 = K_A (f_{ck}, \text{ fiber factor}) = 0.0614x + 1$$

$$\rightarrow \eta_2 = \frac{f_4 f_5 f_6 \varepsilon_u - f_2 f_4 f_5 \varepsilon_0}{\varepsilon_u - \varepsilon_0} = \frac{G_F(\alpha) - G_f(\alpha)}{G'_{F,M}} + 1 = K_B (f_{ck}, \text{ fiber factor}) = 0.7508x + 1$$



\rightarrow M.T. Kazemi (2017) Fracture properties of steel fiber reinforced high strength concrete using work of fracture and size effect methods. Construction and building material 142, 482-489

3. 강섬유 기여분 모델 개발 시작품 제작 _배합비 선정

1. 목표

- 제안한 모델 바탕의 Micro fiber(S65)의 혼입률에 따른 강섬유 영향계수 (η_1, η_2) 산출.
- Matrix term을 제거 하기위해 적절한 플로우를 갖는 배합비 선정.

2. 배합비 선정 기준

- Compressive strength of Matrix ($v_f = 0\%$) > 120MPa (28일 강도)
- 강섬유 혼입률에 따라 적절한 플로우를 갖는 배합 선정

3. 계획

- 유동화제를 변수로 예비 실험 진행
- 압축공시체 제작
- Slum test
- Mini flow table test



강섬유 (S65)



Flow table



Slump

연구개요

강섬유 기여분

모델

모델 개발 위한 시작품 제작
- 배합비 선정

코딩을 통한

파괴에너지 산정

3. 강섬유 기여분 모델 개발 시작품 제작 _ 배합비 선정

- 유동화제 2% : zero slump (관측 불가)
- 강섬유 혼입률에 따라 천천히 감소하는 유동화제 6%를 Matrix 배합비로 선정
- 또한 7일 강도가 100 MPa 임에 따라 28일 강도는 배합비 선정기준인 120 MPa 를 만족할 것으로 판단.

연구개요

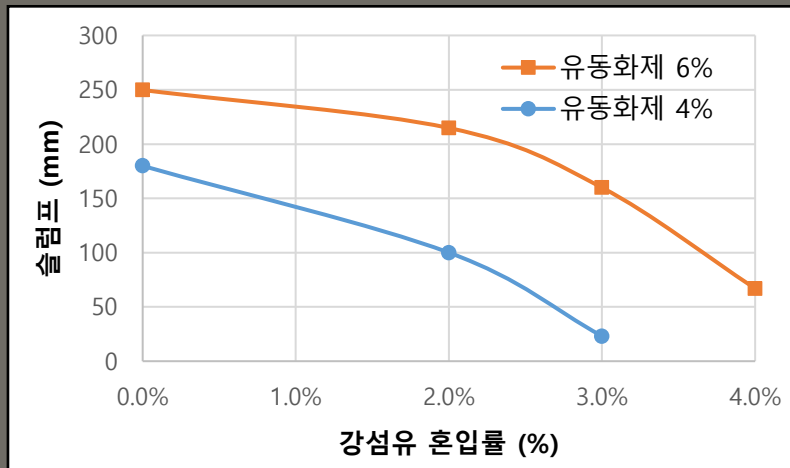
강섬유 기여분

모델

	Cement	Silica fume	Silica flour	Fine sand		Superplasticizer	Water	w/c	w/b	Compressive strength (7days)
				6호사(60%)	7호사(40%)					
1번 배합	1	0.25	0.25	0.552	0.368	0.02	0.2	0.2	0.16	-
2번 배합	1	0.25	0.25	0.552	0.368	0.04	0.2	0.2	0.16	-
3번 배합	1	0.25	0.25	0.552	0.368	0.06	0.2	0.2	0.16	100MPa
참고 배합비	1	0.25	0.25	0.552	0.368	0.036	0.19	0.19	0.152	160MPa

모델 개발 위한 시작품 제작

- 배합비 선정



코딩을 통한

파괴에너지 산정



$v_f = 0\%$



$v_f = 2\%$



$v_f = 3\%$



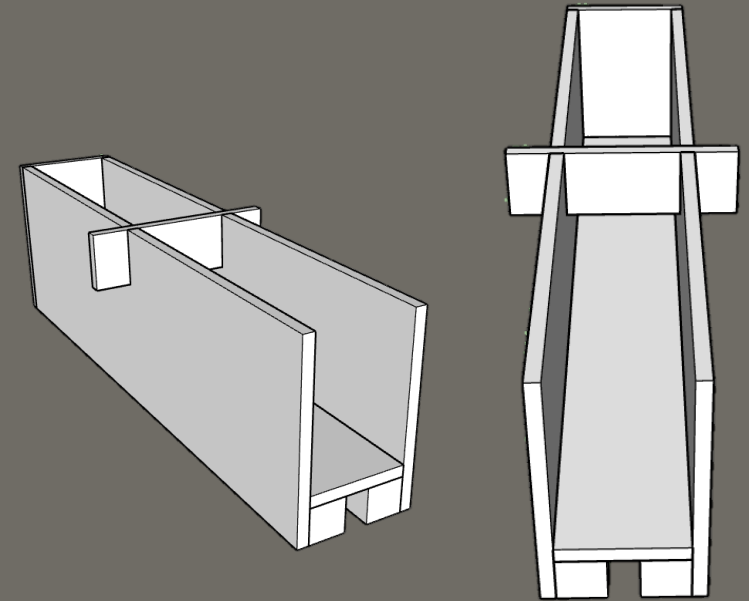
$v_f = 4\%$

3. 강섬유 기여분 모델 개발 시작품 제작 _ 시작품 및 배합 계획

연구개요

a/d	s/d	b	$\frac{d_n}{d_1}$ (n=1,2,3)	d	S	a	L (1.1S)	Name
0.4	4	100	1	75	300	30	330	Small
			2	150	600	60	660	Medium
			4	300	1200	120	1320	large

< 시작품 설계 >



강섬유 기여분

모델

1. 시작품

- RILEM recommendation을 참고하여 실험체 설계
- Size effect를 반영하기 위해(G_f) 형상비(a/d, s/d, b = constant) 고정

2. 배합계획

: 강섬유의 혼입률을 제외한 다른 변수를 제어하기 위해 배합 시간 고정.

- 건배합 : 6min
- Water(70%) : 2 min
- Superplasticizer + Water (30%) : 13 min
- Steel fiber : 6 min



< 거푸집 >

모델 개발 위한 시작품 제작

- 시작품 및 배합 계획

코딩을 통한

파괴에너지 산정

3. UHPC 강섬유 기여분 모델 개발 시작품 제작 및 실험 _ 타설 및 양생

1. 타설 계획

- 기존 문헌을 참고하여 강섬유의 방향성을 동일하게 하기위해 시작품 중앙부터 양쪽으로 흘러 보내며 타설.

2. 양생 계획

- 타설 후 대기양생 : 1day
- 탈형 및 증기양생 : 3days
- 강섬유 기여분 측정 이 전까지 수중양생

연구개요

강섬유 기여분

모델

모델 개발 위한 시작품 제작
- 타설 및 양생

코딩을 통한

파괴에너지 산정



< 탈형 >



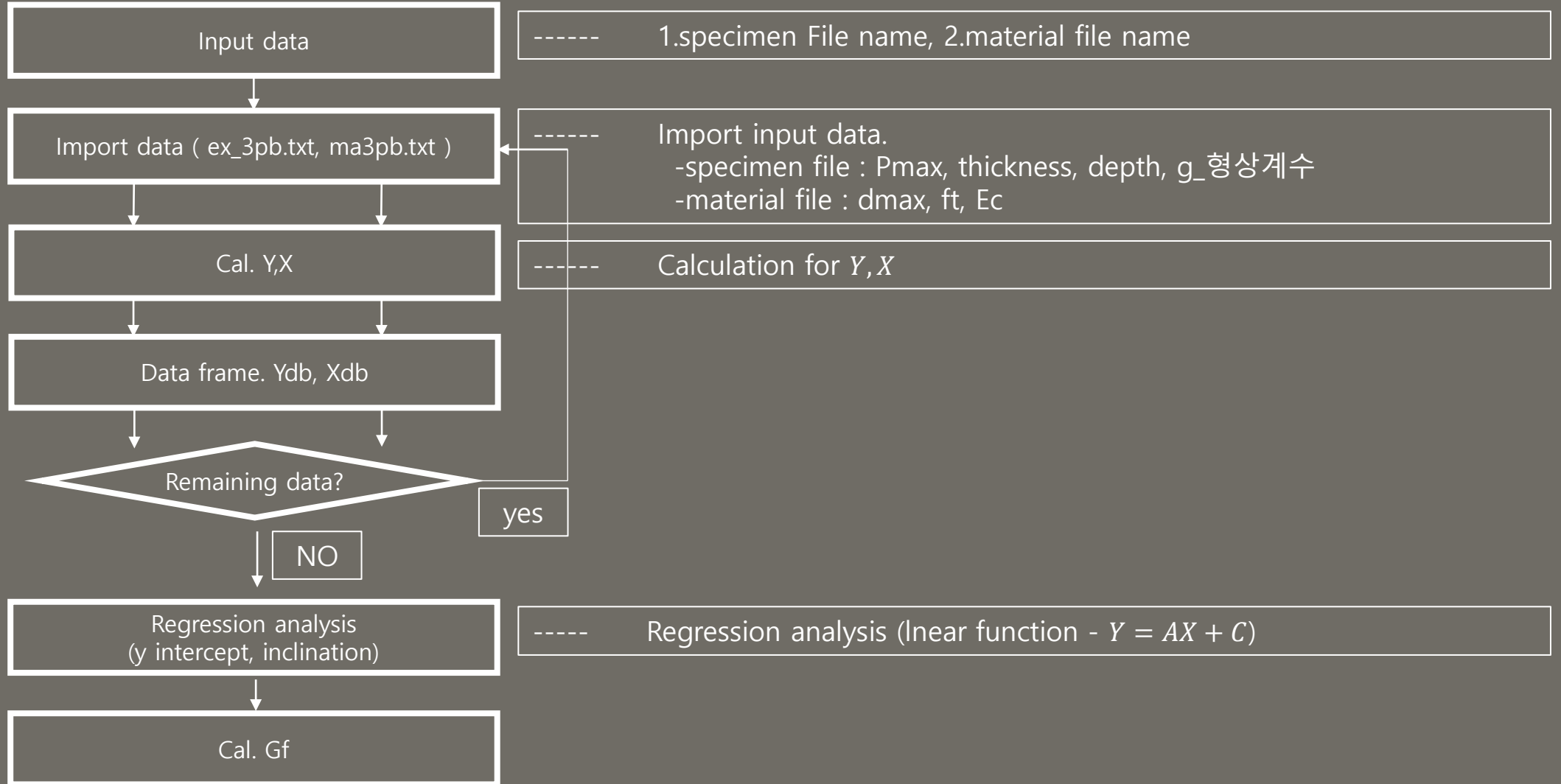
< 증기 양생 >



< 수중 양생 >

➔ *Doo-Yeol Yoo, Effect of fiber length and placement method on flexural behavior, tension-softening curve and fiber distribution characteristics of UHPFRC, 2014*

4. 코딩을 통한 파괴에너지 산정 $\eta_1(G_f)$



연구개요

강섬유 기여분

모델

모델 개발 위한

시작품 제작

코딩을 통한 파괴에너지 산정

연구의 필요성

연구목표

연구내용 및 방법

-연구 진행 방안

- 파괴 에너지

기대효과 및 활용

연구성과

- 인재양성 : 학부생 (이건호, 지성우) 석사 입학(2021.03.01)
- 2020 한국콘크리트학회 가을 학술대회 발표
- 참여기업(연우건축구조기술사사무소) 연구성과물 활용계획서

추가 연구계획

- 제안한 모델에 근거한 강섬유 (S65)의 간략식 도출 진행중.
- 실무에 흔히 쓰이는 갈고리형 강섬유의 기여분 대한 연구.
- UHPC의 파괴에너지 관련 구조기준 개정자료로 활용.

감사합니다.
