

---

## 附件：“土木工程学院纤维复合材料结构力学有限元仿真模拟采购”测试服务采购具体要求

现因科研课题进展的需求，采购人需委托相关企业进行“土木工程学院纤维复合材料结构力学有限元仿真模拟采购”测试服务。

### 一、测试内容、方式和要求：

#### 1、测试加工内容：

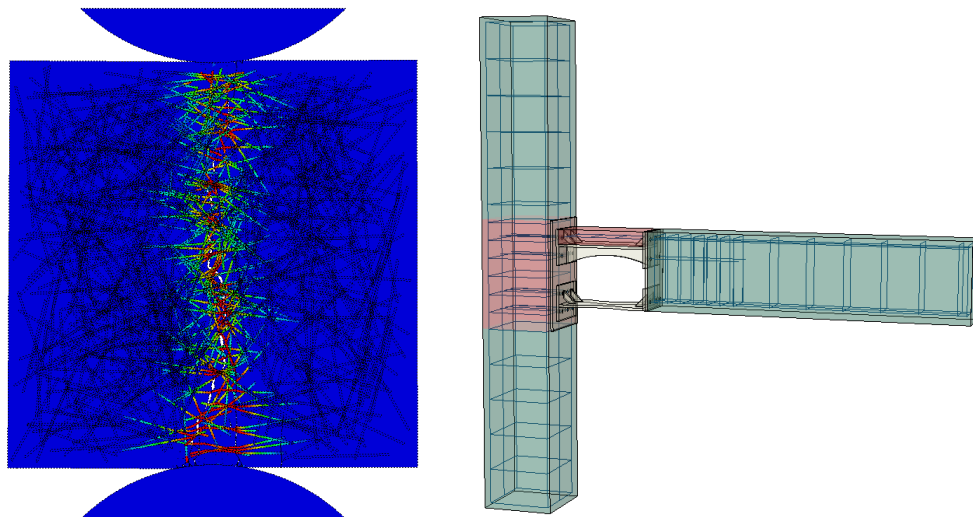
- 1) SFRC/UHPC 加固预应力叠合梁细观仿真模拟（详见附件 1）
- 2) 带人工铰装配式梁柱节点滞回性能仿真模拟（详见附件 2）
- 3) 纤维增强复合材料与混凝土材料界面性能仿真模拟（详见附件 3）
- 4) 纤维布/板加固混凝土结构断裂破坏仿真模拟（详见附件 4）

#### 2、测试方式和要求：

采购人提供上述方案的具体要求，并提供初始试验数据资料（包含试验参数、试验结果等）。供应商负责相应数值测试模型的优化和测试。供应商需对测试结果的可靠性进行论证。

#### 模拟方法概述及简介：

本次模拟测试主要采用细观结合宏观的方式进行模拟，模型中详细考虑混凝土骨料及混凝土内部纤维，会产生巨大的网格量和计算量，且由于采用内插界面单元法表征结构断裂破坏，计算过程会出现高度的非线性。除此之外，本次研究还运用了蒙特卡洛法进行模拟，需要对大规模的随机模型进行计算分析，以获取足够多的模拟样本数据。因此需要调动大量的计算资源，如利用服务器集群进行并行计算。模型主要采用有限元结合二次开发自程序（如自定义接触、自定义单元、自定义材料等）进行计算，部分计算模型示意图如下图所示：



(a) 钢纤维混凝土细观模型（100 万以上网格量，样本数 40+）  
(b) 带人工铰装配式梁柱节点滞回性能仿真模拟（100 万以上网格，考虑内部粘结滑移）

图 1 典型模拟案例

## 二、验收标准和方式：

供应商在规定时间内，完成测试全部内容，测试内容主要包含测试对象的荷载、变形、应变、裂缝、延性、耗能能力等关键技术指标，并出具测试报告电子版、测试报告纸质版、测试结果电子版、测试模型电子版以及测试结果可靠性报告。供应商需提供测试结果的可靠性报告。

可靠性报告中主要包含模型测试结果与试验结果的对比验证，包含荷载-位移曲线、荷载-应变曲线、裂缝宽度等关键技术指标，各项指标的测试误差需在 10% 以内，具体试验资料如下：

- 1) 40 片 FRP 布/FRP 板与钢纤维混凝土/超高性能混凝土粘结滑移试验数据；
- 2) 40 片 FRP 布/FRP 板加固钢纤维混凝土/超高性能混凝土梁静力学/疲劳力学性能试验数据；
- 3) 3 个复杂装配式超高性能混凝土梁柱节点的低周反复加载试验数据；
- 4) 40 个普通钢筋/纤维钢筋与钢纤维混凝土/超高性能混凝土的拔出试验数据。

# 附件 1 SFRC/UHPC 加固预应力叠合梁细观仿真模拟

## 1 研究目的

装配式混凝土结构是建筑工业化发展的主要方向之一，是公认实现建筑业低能耗、低排放的有效发展途径，拟开发一种高耐久性 SFRC 加固的预应力叠合梁，欲探索其力学性能，本次模拟采用 ABAQUS 有限元软件，为模拟出复杂受力下梁的受力以及破坏形式，从而做出更好的改进。测试内容主要包含测试对象的荷载、变形、应变、裂缝、延性等关键技术指标。

## 2 模型详情

模型由三部分构成：普通混凝土、钢纤维混凝土、两种混凝土间的压型钢板。因是模拟复杂受力下混凝土与压型钢板之间，压型钢板与纤维混凝土之间，预应力筋与两种混凝土之间的滑移关系以及钢纤维与混凝土细观的滑移。本次模拟中变量较多，有混凝土类型（钢纤维混凝土、超高性能混凝土、素混凝土）、G 钢纤维类型（端勾型、波浪型、镀铜钢丝）、钢纤维体积掺量（0、0.5%、1%、1.5%、2%）尺寸阐述，详图见图 1 和图 2。

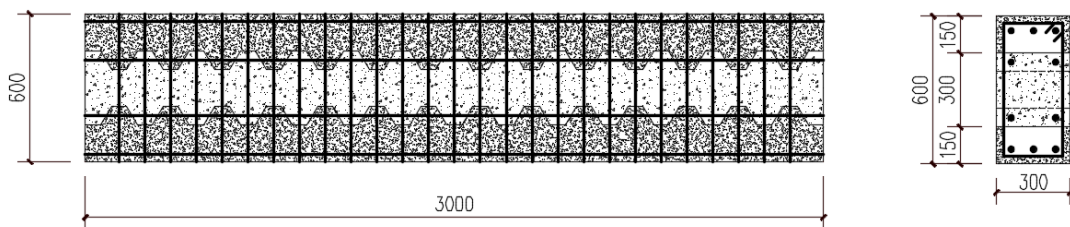


图 1 模型尺寸图（单位：m）

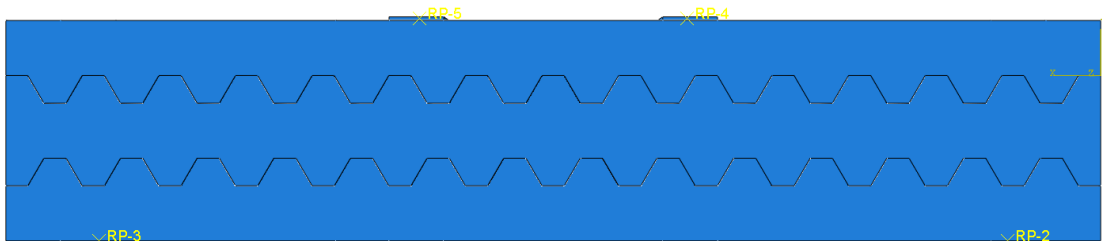


图 2 模型构造图

需模拟的模型尺寸参数详情如下：

---

1.上层混凝土类型为 0%钢纤维体积掺量、0.5%钢纤维体积掺量、1%钢纤维体积掺量、1.5%钢纤维体积掺量、UHPC 五种；

2.下层混凝土类型为 0%钢纤维体积掺量、0.5%钢纤维体积掺量、1%钢纤维体积掺量、1.5%钢纤维体积掺量、UHPC 五种；

3.中间层混凝土类型为 0%钢纤维体积掺量、0.5%钢纤维体积掺量、1%钢纤维体积掺量、1.5%钢纤维体积掺量、UHPC 五种；

4.压型钢板类型为 YX 35-115-690、YX 35-175-700、YX 75-210-840、YX 75-230-690 四种；

5.钢纤维类型为 0.75\*35、0.75\*50、0.75\*60。

参数类型	参数个数
上层混凝土类型	5
下层混凝土类型	5
中间层混凝土类型	5
压型钢板种类	4
钢纤维类型	3

通过控制变量法，总仿真模型数为  $5*5*5*4*3=1500$ （个）

---

## 附件 2 带人工铰装配式梁柱节点滞回性能仿真模拟

### 1 研究目的

随着近年来建筑工业化的大力推广，装配式建筑的应用也愈渐普及。但普通的装配式结构延性不够好导致结构整体性较差，特别是在大地震或余震作用下，会出现严重的次生灾害。这种现象主要是由于梁与柱之间的耦合及转动能力不足所导致的。因此，为了进一步提高装配式梁柱节点的性能，推进装配式结构应用。本文提出在梁上设置可替换人工塑性铰，该塑性铰为 UHPC 与钢的组合结构，在地震过程中优先屈服耗能，从而保护构件不受破坏或减少破坏程度。该节点能保证正常使用状态下的承载能力和变形需求，同时保证该人工铰在极限使用状态下的正常工作，且方便替换，有利于震后快速修复。本次模拟采用 ABAQUS 有限元软件，为模拟出在低周往复荷载作用下装配式梁柱节点的受力情况，以此分析该类型装配式节点的滞回性能。测试内容主要包含测试对象的荷载、变形、应变、裂缝、延性、耗能等关键技术指标。

### 2 模型详情

本次模拟共 5 种材料，分别为 C35、UHPC、HRB400、10.9 级高强螺栓及 Q235 钢板。图 1 为梁柱节点整体尺寸示意图，图 2 为人工铰钢板尺寸示意图。需模拟的模型参数详情见表 1。

采购人会提供 3 个梁柱节点的试验数据，测试模拟的准确性需要与试验进行对比。

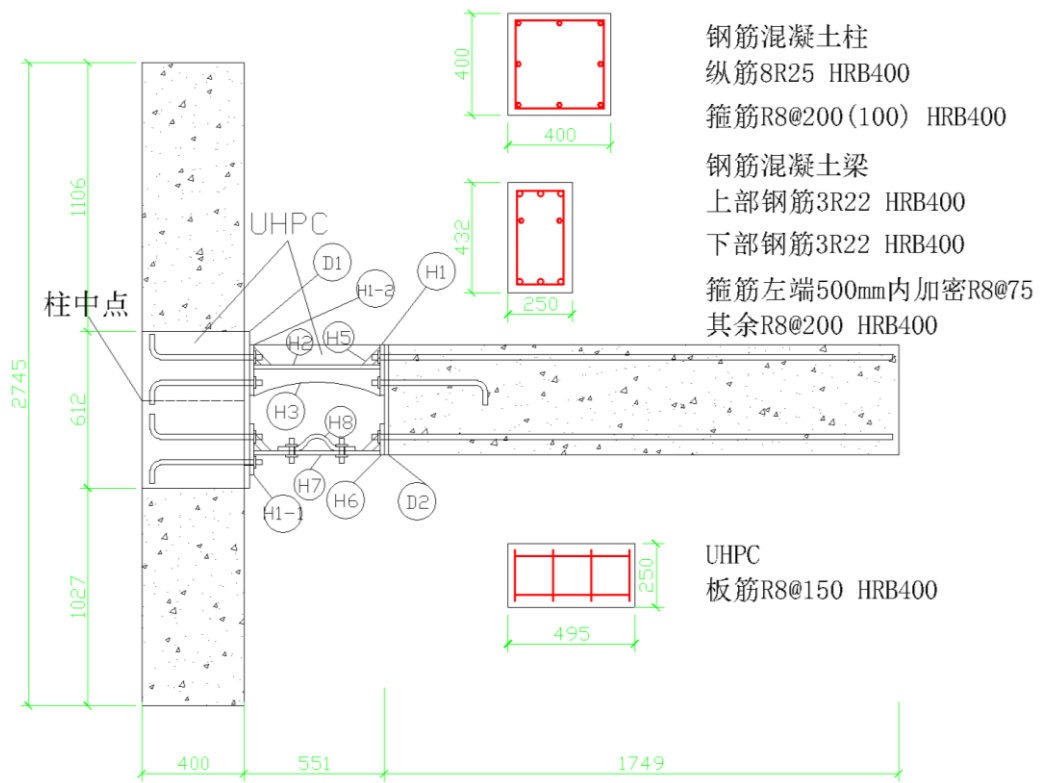
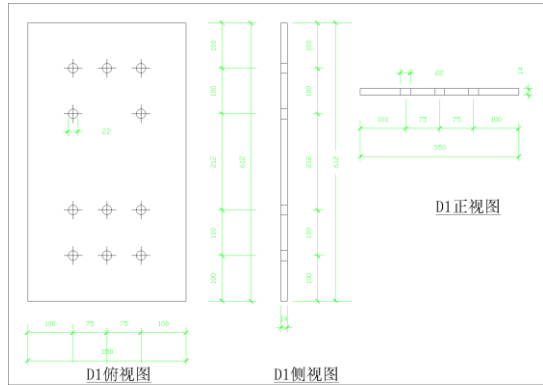
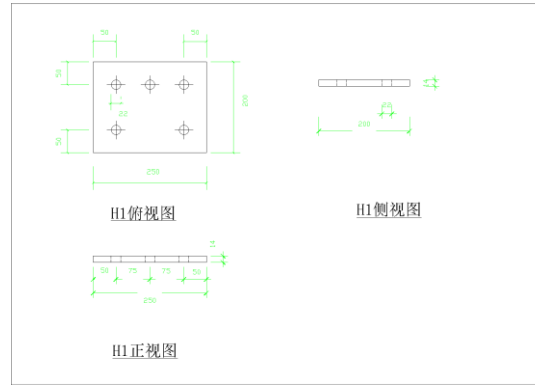


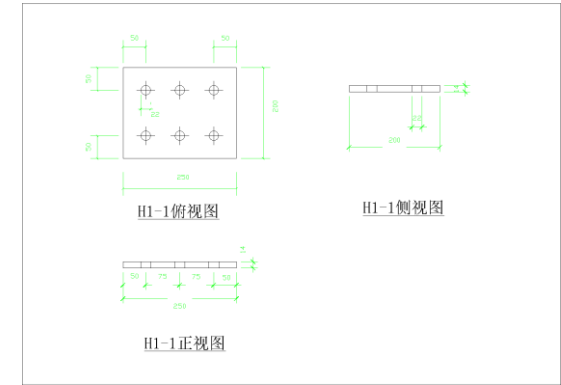
图 1 节点整体尺寸图 (单位: mm)



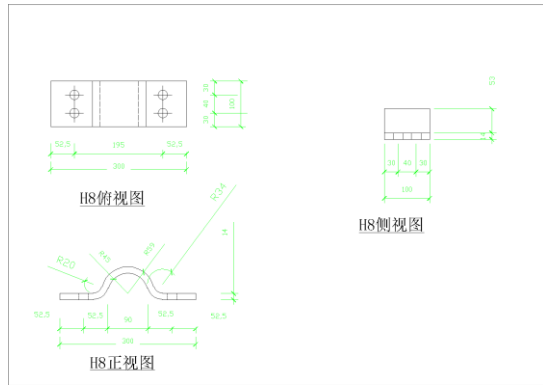
(a) D1



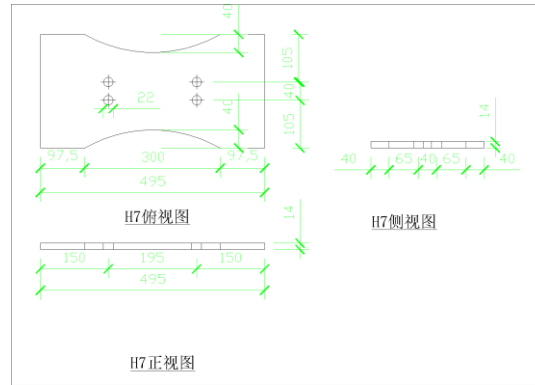
(b) H1



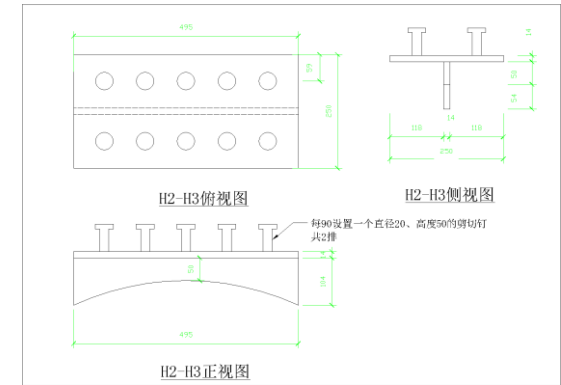
(c) H1-1



(d) H8



(e) H7



(f) H2-H3

图2 人工铰尺寸示意图

表 1 计算参数

模型编号	类型	梁配筋	柱配筋	钢板厚度	人工铰长度	耗能板形式
CJ-1	现浇梁柱节点	纵筋：8Φ25 箍筋：8@200（100）	纵筋：6Φ22 箍筋：8@200（75）	/	/	/
PJ-1	装配式梁柱节点	纵筋：8Φ25 箍筋：8@200（100）	纵筋：6Φ22 箍筋：8@200（75）	14	495	U型板
PJ-2	装配式梁柱节点	纵筋：8Φ25 箍筋：8@200（100）	纵筋：6Φ22 箍筋：8@200（75）	18	495	U型板
PJ-3	装配式梁柱节点	纵筋：8Φ25 箍筋：8@200（100）	纵筋：6Φ22 箍筋：8@200（75）	22	495	U型板
PJ-4	装配式梁柱节点	纵筋：8Φ25 箍筋：8@200（100）	纵筋：6Φ22 箍筋：8@200（75）	14	545	U型板
PJ-5	装配式梁柱节点	纵筋：8Φ25	纵筋：6Φ22	14	595	U型板



		箍筋：8@200（100）	箍筋：8@200（75）			
PJ-6	装配式梁柱节点	纵筋：8Φ25 箍筋：8@200（100）	纵筋：6Φ22 箍筋：8@200（75）	14	495	/
PJ-7	装配式梁柱节点	纵筋：8Φ25 箍筋：8@200（100）	纵筋：6Φ22 箍筋：8@200（75）	14	495	T型板

# 附件 3 纤维增强复合材料与混凝土材料界面性能仿真模拟

## 1 研究目的

纤维增强复合材料(Fiber Reinforced Polymer, 或 Fiber Reinforced Plastic, 简称 FRP)是由增强纤维材料, 如玻璃纤维、碳纤维、芳纶纤维等, 与基体材料经过缠绕, 模压或拉挤等成型工艺而形成的复合材料。因其具有较好的抗腐蚀性能和抗拉性能, 且对建筑结构本身自重影响较小被广泛用于建筑工程中。因此, 对 FRP 于混凝土间的性能研究十分重要, 目前现已有众多学者对其进行了各项研究。本次模拟采用 ABAQUS 有限元软件, 为模拟出复杂受力下 FRP 在混凝土上整个测脱粘过程, 以此分析 FRP 与混凝土的界面性能。测试内容主要包含测试对象的荷载、变形、应变、裂缝等关键技术指标。

## 2 模型详情

模型由两部分构成: 混凝土、FRP。因是模拟复杂受力下 FRP 与混凝土间的粘结性能, 因此混凝土有两部分, 一部分为等截面, 一部分为变截面。本次模拟中变量较多, 有混凝土类型(钢纤维混凝土、超高性能混凝土、素混凝土)、FRP 类型(CFRP 布、CFRP 板)、倾斜角( $0^\circ$ 、 $3^\circ$ 、 $5^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $15^\circ$ )、未粘结区域(20mm、40mm、80mm)、钢纤维混凝土中的钢纤维类型(波浪型钢纤维、端构型钢纤维)。其各自的尺寸不再一一赘述, 仅以倾斜角  $10^\circ$ 、未粘结区域为 80mm 的模型为例进行尺寸阐述, 详图见图 1 和图 2。需模拟的模型参数详情, 见表 1 至表 4。我方会提供试验数据, 测试模拟的准确性需要与试验进行对比。

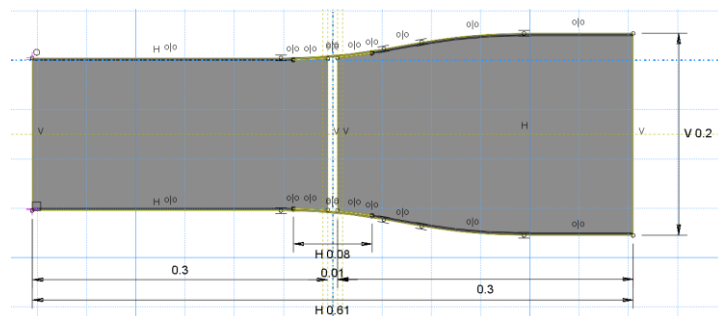


图2 模型尺寸图 (单位: m)

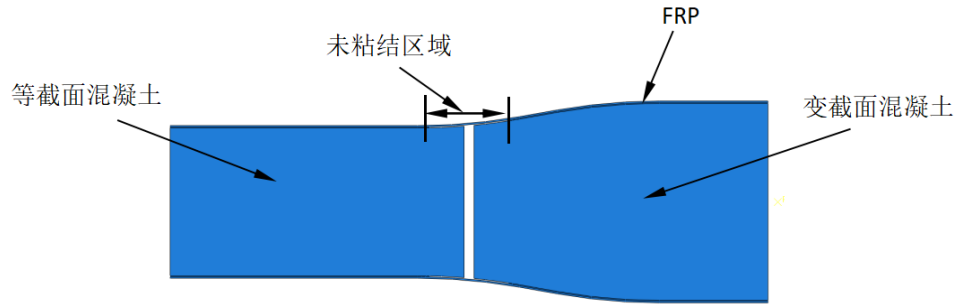


图2 模型构造图

表 1 计算参数一

模型编号	混凝土类型	设计初始角度	钢纤维类型	纤维掺量 (体积%)	纤维直径/ 长度 (mm)	FRP 类型	FRP 长度 (mm)	FRP 宽度(mm)	未粘结区域 长度 (mm)
SFRC-EHT-0-BAN	钢纤维混凝土	0	端钩型 (End hook type)	1%	0.75/35	CFRP 板	610	50	20
SFRC-EHT-3-BAN	钢纤维混凝土	3	端钩型 (End hook type)	1%	0.75/35	CFRP 板	610	50	20
SFRC-EHT-5-BAN	钢纤维混凝土	5	端钩型 (End hook type)	1%	0.75/35	CFRP 板	610	50	20
SFRC-EHT-10-BAN	钢纤维混凝土	10	端钩型 (End hook type)	1%	0.75/35	CFRP 板	610	50	20
SFRC-EHT-15-BAN	钢纤维混凝土	15	端钩型 (End hook type)	1%	0.75/35	CFRP 板	610	50	20
SFRC-EHT-0-BU	钢纤维混凝土	0	端钩型 (End hook type)	1%	0.75/35	CFRP 布	610	50	20
SFRC-EHT-3-BU	钢纤维混凝土	3	端钩型 (End hook type)	1%	0.75/35	CFRP 布	610	50	20

SFRC-EHT-5-BU	钢纤维混凝土	5	端钩型 (End hook type)	1%	0.75/35	CFRP 布	610	50	20
SFRC-EHT-10-BU	钢纤维混凝土	10	端钩型 (End hook type)	1%	0.75/35	CFRP 布	610	50	20
SFRC-EHT-15-BU	钢纤维混凝土	15	端钩型 (End hook type)	1%	0.75/35	CFRP 布	610	50	20

注：表 1 控制混凝土为钢纤维混凝土，钢纤维类型为端钩型钢纤维，角度为  $0^\circ$ 、 $3^\circ$ 、 $5^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $15^\circ$ ，FRP 类型为 CFRP 板和 CFRP 布。此上述有 10 个模型。控制变量为未粘结区域，根据控制变量法仍需 40 个模型，共计 50 个模型。

表 2 计算参数二

模型编号	混凝土类型	设计初始角度	钢纤维类型	纤维掺量 (体积%)	纤维直径/ 长度 (mm)	FRP 类型	FRP 长度 (mm)	FRP 宽度(mm)	未粘结区域 长度 (mm)
SFRC-WT-0-BAN	钢纤维混凝土	0	波浪型 (Wave type)	1%	0.75/35	CFRP 板	610	50	20
SFRC-WT-3-BAN	钢纤维混凝土	3	波浪型 (Wave type)	1%	0.75/35	CFRP 板	610	50	20
SFRC-WT-5-BAN	钢纤维混凝土	5	波浪型 (Wave type)	1%	0.75/35	CFRP 板	610	50	20
SFRC-WT-10-BAN	钢纤维混凝土	10	波浪型 (Wave type)	1%	0.75/35	CFRP 板	610	50	20
SFRC-WT-15-BAN	钢纤维混凝土	15	波浪型 (Wave type)	1%	0.75/35	CFRP 板	610	50	20
SFRC-WT-0-BU	钢纤维混凝土	0	波浪型 (Wave type)	1%	0.75/35	CFRP 布	610	50	20
SFRC-WT-3-BU	钢纤维混凝土	3	波浪型 (Wave type)	1%	0.75/35	CFRP 布	610	50	20

SFRC-WT-5-BU	钢纤维混凝土	5	波浪型 (Wave type)	1%	0.75/35	CFRP 布	610	50	20
SFRC-WT-10-BU	钢纤维混凝土	10	波浪型 (Wave type)	1%	0.75/35	CFRP 布	610	50	20
SFRC-WT-15-BU	钢纤维混凝土	15	波浪型 (Wave type)	1%	0.75/35	CFRP 布	610	50	20

注：表 2 控制混凝土为钢纤维混凝土，钢纤维类型为波浪型钢纤维，角度为 0°、3°、5°、10°、15°，FRP 类型为 CFRP 板和 CFRP 布。此上述有 10 个模型。控制变量为未粘结区域，根据控制变量法仍需 40 个模型，共计 50 个模型。

表 3 计算参数三

试件编号	混凝土类型	设计初始 角度	FRP 类型	FRP 长度 (mm)	FRP 宽度 (mm)	未粘结区域长度 (mm)
UHPC-0-BAN	超高性能混凝土	0	CFRP 板	610	50	20
UHPC-3-BAN	超高性能混凝土	3	CFRP 板	610	50	20
UHPC-5-BAN	超高性能混凝土	5	CFRP 板	610	50	20
UHPC-10-BAN	超高性能混凝土	10	CFRP 板	610	50	20
UHPC-15-BAN	超高性能混凝土	15	CFRP 板	610	50	20
UHPC-0-BU	超高性能混凝土	0	CFRP 布	610	50	20
UHPC-3-BU	超高性能混凝土	3	CFRP 布	610	50	20
UHPC-5-BU	超高性能混凝土	5	CFRP 布	610	50	20
UHPC-10-BU	超高性能混凝土	10	CFRP 布	610	50	20
UHPC-15-BU	超高性能混凝土	15	CFRP 布	610	50	20

注：表 2 控制混凝土为超高性能混凝土，角度为  $0^\circ$ 、 $3^\circ$ 、 $5^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $15^\circ$ ，FRP 类型为 CFRP 板和 CFRP 布。此上述有 10 个模型。控制变量为未粘结区域，根据控制变量法仍需 40 个模型，共计 50 个模型。



表 4 计算参数四

试件编号	混凝土类型	设计初始 角度	FRP 类型	FRP 长度 (mm)	FRP 宽度 (mm)	未粘结区域长度 (mm)
C35-0-BAN	素混凝土	0	CFRP 板	610	50	20
C35-3-BAN	素混凝土	3	CFRP 板	610	50	20
C35-5-BAN	素混凝土	5	CFRP 板	610	50	20
C35-10-BAN	素混凝土	10	CFRP 板	610	50	20
C35-15-BAN	素混凝土	15	CFRP 板	610	50	20
C35-0-BU	素混凝土	0	CFRP 布	610	50	20
C35-3-BU	素混凝土	3	CFRP 布	610	50	20
C35-5-BU	素混凝土	5	CFRP 布	610	50	20
C35-10-BU	素混凝土	10	CFRP 布	610	50	20
C35-15-BU	素混凝土	15	CFRP 布	610	50	20

注：表 4 控制混凝土为标准设计强度为 35MPa 的素混凝土，角度为 0°、3°、5°、10°、15°，FRP 类型为 CFRP 板和 CFRP 布。此上述有 10 个模型。控制变量为未粘结区域，根据控制变量法仍需 40 个模型，共计 50 个模型。

## 附件 4 纤维布/板加固混凝土结构断裂破坏仿真模拟

### 1 研究目的

纤维增强复合材料(Fiber Reinforced Polymer, 或 Fiber Reinforced Plastic, 简称 FRP)是由增强纤维材料, 如玻璃纤维、碳纤维、芳纶纤维等, 与基体材料经过缠绕, 模压或拉挤等成型工艺而形成的复合材料。因其具有较好的抗腐蚀性能和抗拉性能, 且对建筑结构本身自重影响较小被广泛用于建筑工程中。因此, 对 FRP 于混凝土间的性能研究十分重要, 目前现已有众多学者对其进行了各项研究。本次模拟采用 ABAQUS 有限元软件, 基于 FORTRAN 语言编制二次开发材料本构自程序, 模拟复杂受力下 FRP 加固混凝土构件结构(如柱、素梁、叠合梁、节点等)的断裂破坏全过程, 分析并研究其内部的断裂破坏机理。测试内容主要包含测试对象的荷载、变形、应变、裂缝、延性等关键技术指标。

### 2 模型详情

本次模型采用内聚力模型进行建模, 模型由以下部分构成: 混凝土、钢筋和 FRP 实体, 以及混凝土-混凝土界面、钢筋-混凝土界面、FRP-混凝土界面。由于内聚力模型需要大量内插界面单元, 因此每个模型需要较大的计算量。本次模拟中, 分为二维和三维模型。模拟中主要考虑如下变量: 1.混凝土类型(纤维混凝土 SFRC、超高性能混凝土 UHPC、普通混凝土); 2.FRPP 种类(CFRP 布、CFRP 板、BFRP 布); 3.钢纤维类型(波浪型钢纤维、端钩型钢纤维、镀铜纤维)。模拟试验采用正交试验设计, 模型图详见图 1 和图 2。模拟的大致参数内容见表 1~表 4。我方会提供试验数据, 测试模拟的准确性需要与试验进行对比。

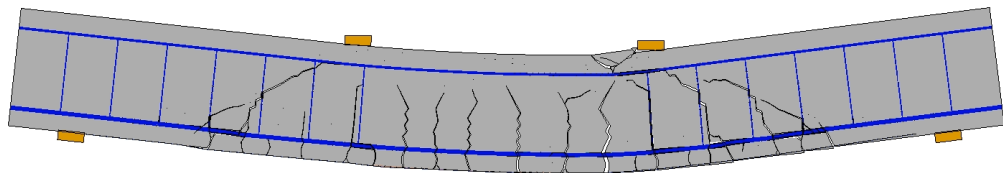


图 1 二维模型计算效果(变形放大)

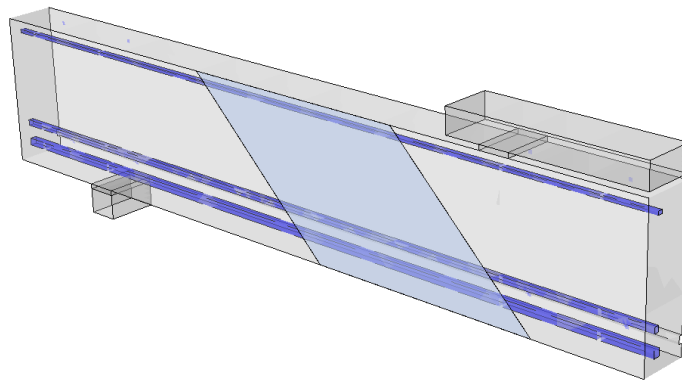


图 2 三维模型构造图 (1/4 模型)

表 1 计算参数一

模型编号	混凝土类型	构件类型	钢纤维类型	纤维掺量 (体积%)	纤维直径/ 长度 (mm)	FRP 类型	FRP 长度 (mm)	FRP 宽 度(mm)	粘结区域长 度 (mm)
SFRC-EHT-0.5-Bending	钢纤维混凝土	梁	端钩型 (End hook type)	0.5%	0.75/35	CFRP 板	610	50	20
SFRC-EHT-1-Bending	钢纤维混凝土	梁	端钩型 (End hook type)	1%	0.75/35	CFRP 板	610	50	20
SFRC-EHT-1.5-Bending	钢纤维混凝土	梁	端钩型 (End hook type)	1.5%	0.75/35	CFRP 板	610	50	20
SFRC-WT-0.5-Bending	钢纤维混凝土	梁	波浪型 (wave type)	0.5%	0.75/35	CFRP 板	610	50	20
SFRC-WT-1-Bending	钢纤维混凝土	梁	波浪型 (wave type)	1%	0.75/35	CFRP 板	610	50	20
SFRC-WT-1.5-Bending	钢纤维混凝土	梁	波浪型 (wave type)	1.5%	0.75/35	CFRP 布	610	50	20
SFRC-CPT-0.5-Bending	钢纤维混凝土	梁	镀铜 (Copper plated type)	0.5%	0.75/35	CFRP 布	610	50	20

SFRC-CPT-1-Bending	钢纤维混凝土	梁	镀铜 (Copper plated type)	1%	0.75/35	CFRP 布	610	50	20
SFRC-CPT-1.5-Bending	钢纤维混凝土	梁	镀铜 (Copper plated type)	1.5%	0.75/35	CFRP 布	610	50	20

注：表 1 混凝土为钢纤维混凝土，试验方式受弯，混凝土梁底部粘贴 FRP，钢纤维类型分别为端构型钢纤维、波浪型纤维以及镀铜纤维。上述有 9 个模型。此外，研究变量还有 FRP 类型（分别为 CFRP 板、CFRP 布、BFRP 布以及不粘贴 FRP），筋材类型（钢筋、纤维筋），根据控制变量法本组研究共需要 72 个模型。

表 2 计算参数二

模型编号	混凝土类型	构件类型	钢纤维类型	纤维掺量 (体积%)	纤维直径/ 长度 (mm)	FRP 类型	FRP 长度 (mm)	FRP 宽度 (mm)	粘结区域长 度 (mm)
C35- Bending	钢纤维混凝土	梁	—	—	—	CFRP 板	610	50	20
C35-SFRC-EHT-0.3-Bending	钢纤维混凝土	梁	端钩型 (End hook type)	1%	0.75/35	CFRP 板	610	50	20
C35-SFRC-EHT-0.5-Bending	钢纤维混凝土	梁	端钩型 (End hook type)	1%	0.75/35	CFRP 板	610	50	20
C35-SFRC-EHT-0.7-Bending	钢纤维混凝土	梁	端钩型 (End hook type)	1%	0.75/35	CFRP 板	610	50	20
C35-SFRC-WT-0.3-Bending	钢纤维混凝土	梁	波浪型 (wave type)	1%	0.75/35	CFRP 板	610	50	20
C35-SFRC-WT-0.5-Bending	钢纤维混凝土	梁	波浪型 (wave type)	1%	0.75/35	CFRP 板	610	50	20
C35-SFRC-WT-0.7-Bending	钢纤维混凝土	梁	波浪型 (wave type)	1%	0.75/35	CFRP 板	610	50	20
C35-SFRC-WT-0.3-Bending	钢纤维混凝土	梁	镀铜 (Copper	1%	0.75/35	CFRP 布	610	50	20

			plated type)						
C35-SFRC-WT-0.5-Bending	钢纤维混凝土	梁	镀铜 (Copper plated type)	1%	0.75/35	CFRP 布	610	50	20
C35-SFRC-WT-0.7-Bending	钢纤维混凝土	梁	镀铜 (Copper plated type)	1%	0.75/35	CFRP 布	610	50	20

注：表 2 控制混凝土为钢纤维混凝土-混凝土，试验方式受弯，本组试验对象为叠合梁，模型编号中的比例值为 SFRC/C35，SFRC 位于下部，除表中控制量之外，其余控制变量还有 FRP 类型（分别为 CFRP 板、CFRP 布、BFRP 布以及不粘贴 FRP），筋材类型（钢筋、纤维筋），根据控制变量法本组研究共需要 80 个模型。

表 3 计算参数三

模型编号	混凝土类型	构件类型	钢纤维类型	纤维掺量 (体积%)	纤维直径/长度 (mm)	FRP 类型
SFRC-EHT-0.5-shear	钢纤维混凝土	梁	端钩型 (End hook type)	0.5%	0.75/35	CFRP 板
SFRC-EHT-1- shear	钢纤维混凝土	梁	端钩型 (End hook type)	1%	0.75/35	CFRP 板
SFRC-EHT-1.5- shear	钢纤维混凝土	梁	端钩型 (End hook type)	1.5%	0.75/35	CFRP 板
SFRC-WT-0.5- shear	钢纤维混凝土	梁	波浪型 (wave type)	0.5%	0.75/35	CFRP 板
SFRC-WT-1- shear	钢纤维混凝土	梁	波浪型 (wave type)	1%	0.75/35	CFRP 板
SFRC-WT-1.5- shear	钢纤维混凝土	梁	波浪型 (wave type)	1.5%	0.75/35	CFRP 布
SFRC-CPT-0.5- shear	钢纤维混凝土	梁	镀铜 (Copper plated type)	0.5%	0.75/35	CFRP 布
SFRC-CPT-1- shear	钢纤维混凝土	梁	镀铜 (Copper plated type)	1%	0.75/35	CFRP 布
SFRC-CPT-1.5- shear	钢纤维混凝土	梁	镀铜 (Copper plated type)	1.5%	0.75/35	CFRP 布
模型编号	混凝土类型	构件类型	钢纤维类型	纤维掺量 (体积%)	纤维直径/长度 (mm)	FRP 类型

注：表 1 混凝土为钢纤维混凝土，试验方式受剪，混凝土梁底部粘贴 FRP，钢纤维类型分别为端钩型钢纤维、波浪型纤维以及镀铜纤



---

维。上述有 9 个模型。此外，研究变量还有 FRP 类型（分别为 CFRP 板、CFRP 布、BFRP 布以及不粘贴 FRP），筋材类型（钢筋、纤维筋），根据控制变量法本组研究共需要 72 个模型。

表 4 计算参数四

模型编号	混凝土类型	构件类型	钢纤维类型	纤维掺量 (体 积%)	纤维直径/ 长度 (mm)	FRP 类型
C35- shear	钢纤维混凝土	梁	—	—	—	CFRP 板
C35-SFRC-EHT-0.3- shear	钢纤维混凝土	梁	端钩型 (End hook type)	1%	0.75/35	CFRP 板
C35-SFRC-EHT-0.5- shear	钢纤维混凝土	梁	端钩型 (End hook type)	1%	0.75/35	CFRP 板
C35-SFRC-EHT-0.7- shear	钢纤维混凝土	梁	端钩型 (End hook type)	1%	0.75/35	CFRP 板
C35-SFRC-WT-0.3- shear	钢纤维混凝土	梁	波浪型 (wave type)	1%	0.75/35	CFRP 板
C35-SFRC-WT-0.5- shear	钢纤维混凝土	梁	波浪型 (wave type)	1%	0.75/35	CFRP 板
C35-SFRC-WT-0.7- shear	钢纤维混凝土	梁	波浪型 (wave type e)	1%	0.75/35	CFRP 板
C35-SFRC-WT-0.3- shear	钢纤维混凝土	梁	镀铜 (Copper plated type)	1%	0.75/35	CFRP 布
C35-SFRC-WT-0.5- shear	钢纤维混凝土	梁	镀铜 (Copper plated type)	1%	0.75/35	CFRP 布
C35-SFRC-WT-0.7- shear	钢纤维混凝土	梁	镀铜 (Copper plated type)	1%	0.75/35	CFRP 布

注：表 2 控制混凝土为钢纤维混凝土-混凝土，试验方式受剪，本组试验对象为叠合梁，模型编号中的比例值为 SFRC/C35，SFRC 位于下部，除表中控制量之外，其余控制变量还有 FRP 类型（分别为 CFRP 板、CFRP 布、BFRP 布以及不粘贴 FRP），筋材类型（钢筋、纤维筋），根据控制变量法本组研究共需要 80 个模型。