



南京工业大学土木工程学院

2022年土木学院科学报告会

# 高精度结构压剪试验方法研究

汇报人：万里

E-Mail: wanli@njtech.edu.cn

2022年12月28日

# 汇报提纲

一

**国内外压剪试验现状**

二

**结构传感一体的压剪试验方法**

三

**试验样机的设计与制造**

四

**压剪验证试验及结果分析**

# 国内外压剪试验现状

## 1、悬臂梁式加载系统

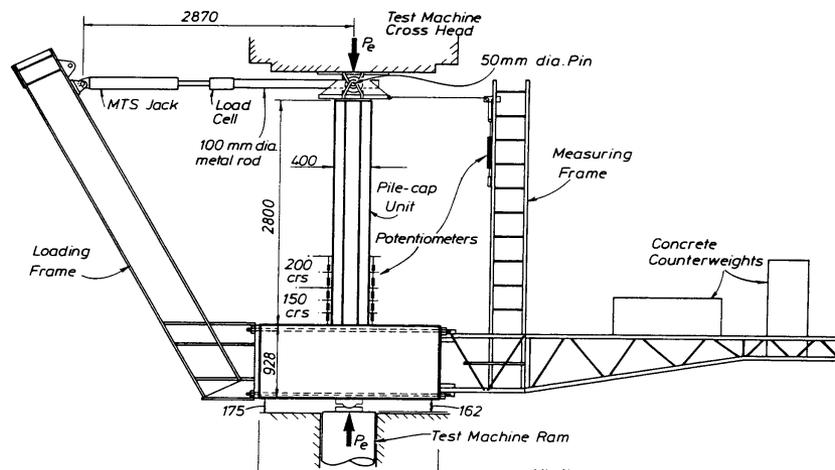
悬臂梁式加载系统可分为悬臂

柱加铰接作动器轴力加载系统、

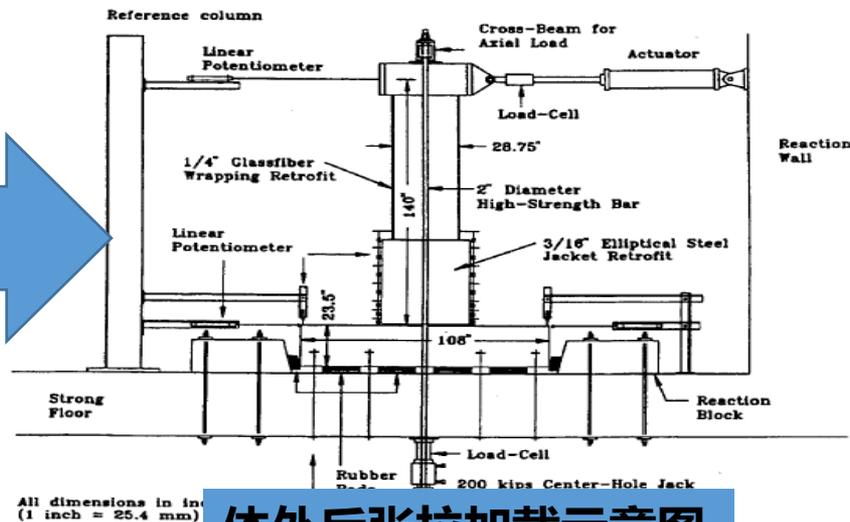
悬臂柱加后张拉轴力加载系统、

悬臂柱加滑动轴力加载系统。

我院实验室目前采用的方案



铰接作动器加载示意图

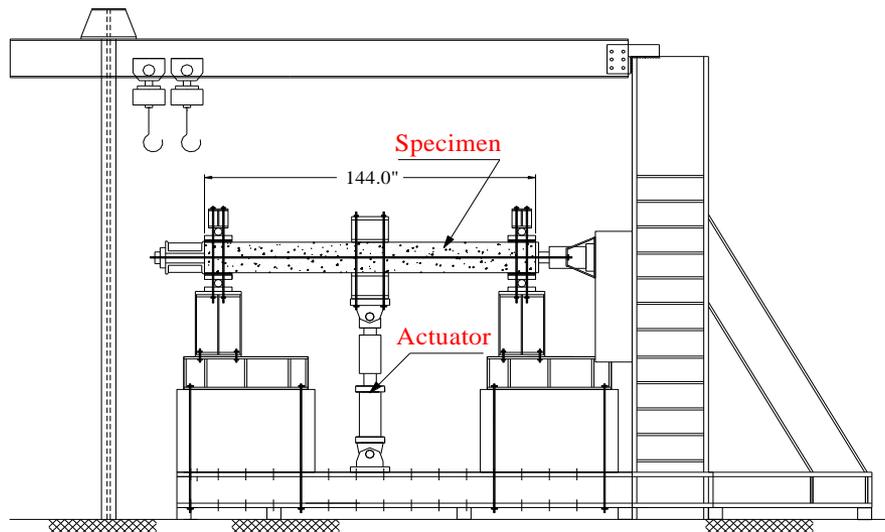


体外后张拉加载示意图

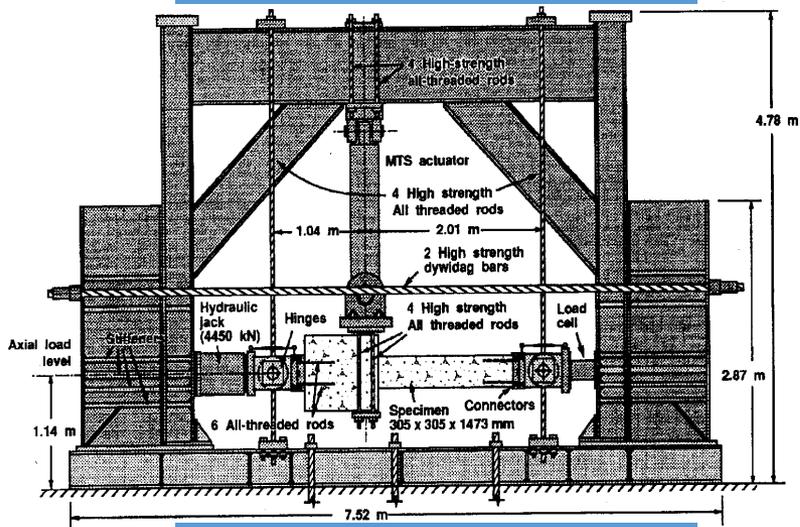
# 国内外压剪试验现状

## 2、简支梁加载

- 可模拟地震作用下柱端支承点与跨中弯矩反弯点之间的受力状态，**中轴向力可以保持与侧向力垂直。**
- 除了每次试验需要实际加工一对柱模型外，采用简支梁式加载系统进行地震模拟试验，测得的试验数据对于结构柱抗震性能评估较接近真实情况。



简支梁加载系统示意图

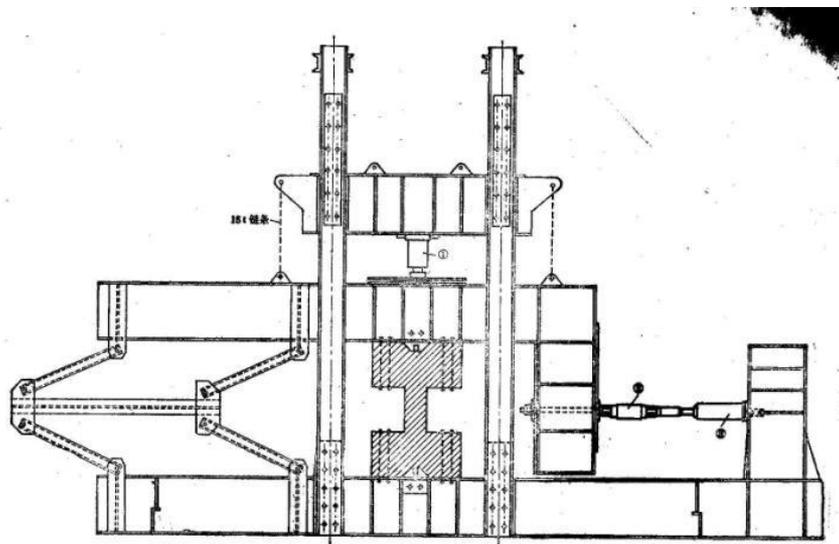


简支梁加载系统示意图

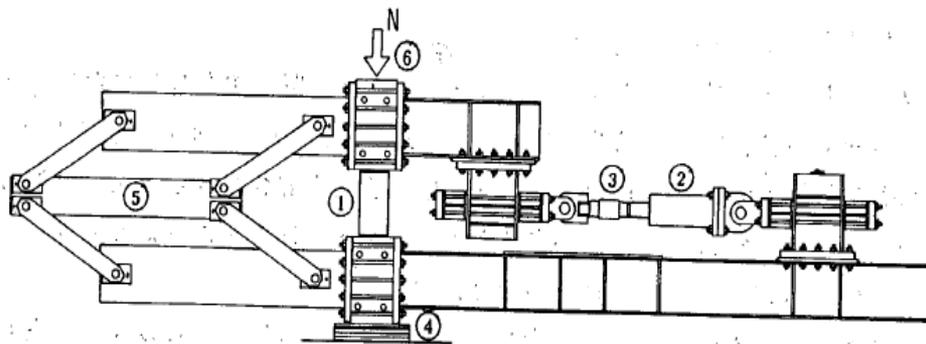
# 国内外压剪试验现状

## 3、四连杆机构加载

- 最早由日本建筑研究所提出，被称之为“**建研式**”加载，国内也称之为**四连杆机构加载系统**。
- 用于模拟**重力荷载及地面运动作用**，测试结构柱的抗震性能。**水平作动器**作用于**L型加载钢臂** $H/2$ 处，而**竖向荷载**采用手动控制**液压千斤顶**施加，**液压千斤顶与L型加载钢臂之间通过光滑的圆柱型滚轴传递竖向荷载**。
- 该装置允许加载钢臂发生水平和竖向位移，并能**防止加载钢臂发生转动或者平面外运动**。



四连杆加载示意图

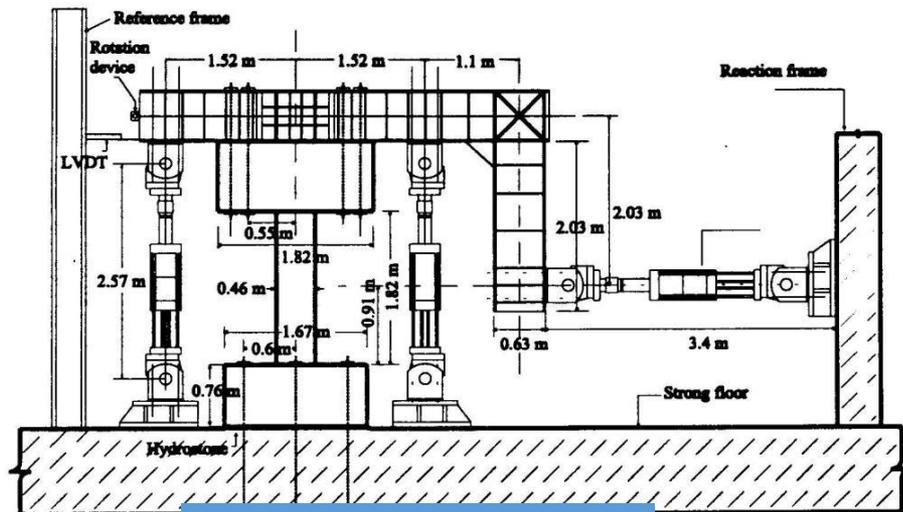


四连杆水平部分示意图

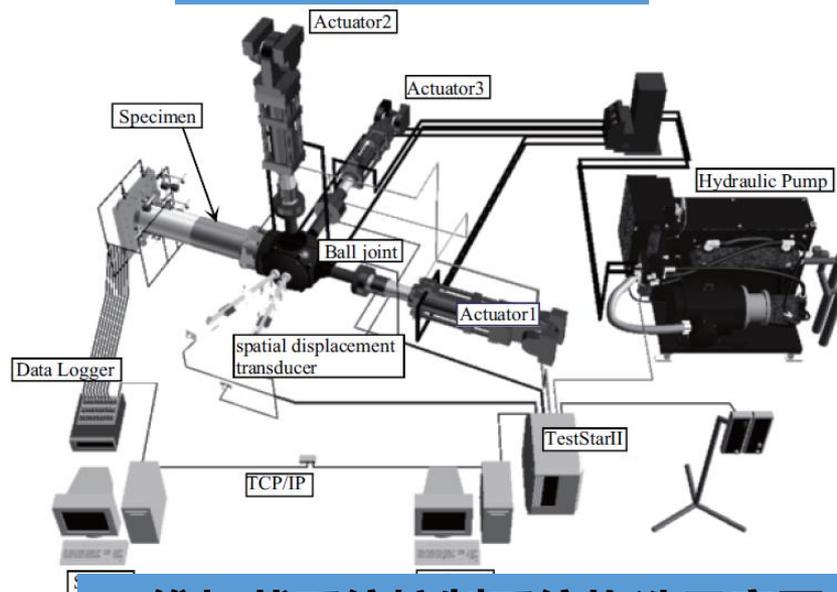
# 国内外压剪试验现状

## 4、二维加载

- 利用**两只作动器施加柱轴向力**，可以实现柱的偏心加载
- 水平作动器通过L形钢梁将水平力施加柱1/2高处或其它高度



二维加载装置示意图



二维加载系统控制系统构造示意图

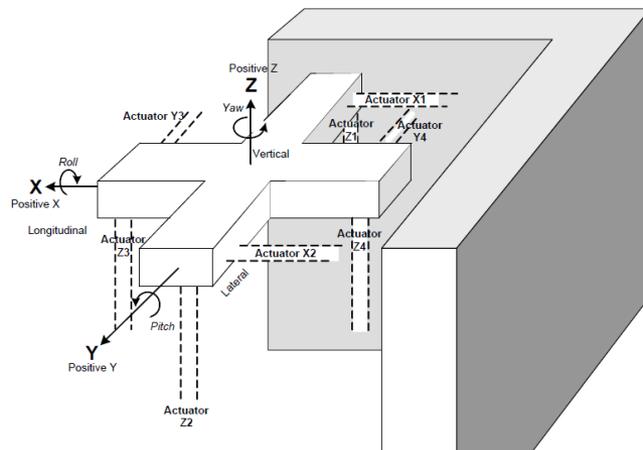
# 国内外压剪试验现状

## 5、多向加载

- 明尼苏达大学的多轴构件测试系统 (MAST)
- 竖向：594吨，水平：405吨
- 试验空间：最大平面尺寸  
6.1x6.1m，高8.7米



NEES MAST

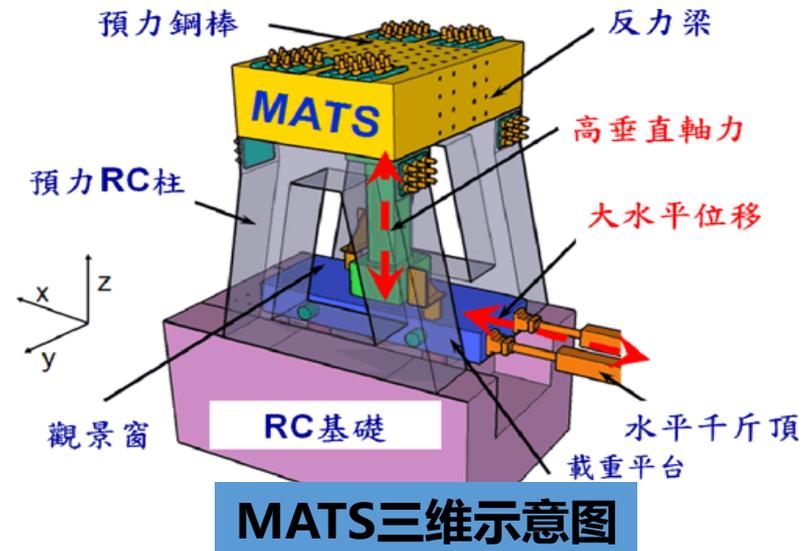


多项加载示意图

# 国内外压剪试验现状

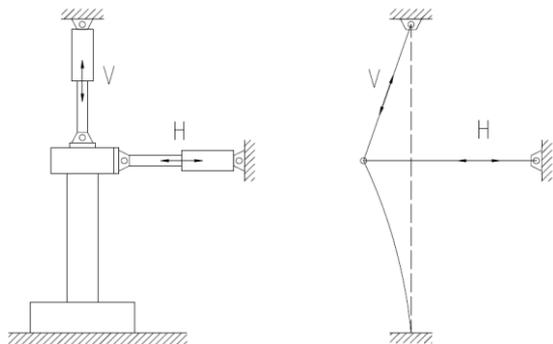
## 6、试验系统 (MATS)

- MTS在2008年为台湾大学工程研究中心(NCREE) 研制了多种工况试验系统(MATS),
- **该试验机系统可以实现垂向, 水平X向, Y向以及转动方向共六个方向的加载**, 该试验机系统可以满足大型橡胶支座, 大型结构件以及大型阻尼器件等大型试验件的试验要求。
- 由13套液压作动器组成, 其中垂直方向布置有7套液压作动器, **加载能力超过 60MN**; 水平方向布置有 4套液压作动器, **最大加载能力为4MN**; 垂向还布置了2套以保持系统稳定的 holddown作动器, 其**最大出力为 2MN**。



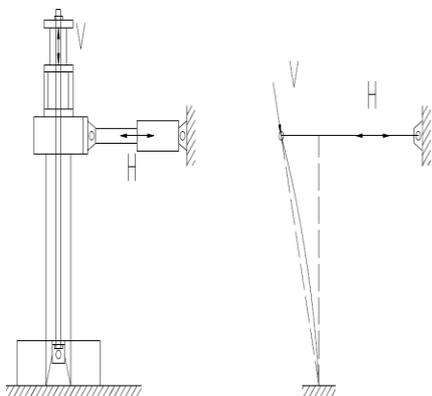
# 日常压剪试验中的常见问题

## 立柱加载的常见问题



铰接作动器轴力加载系统

➤ 水平作动推动试件发生水平位移后，**竖向力发生偏转**；

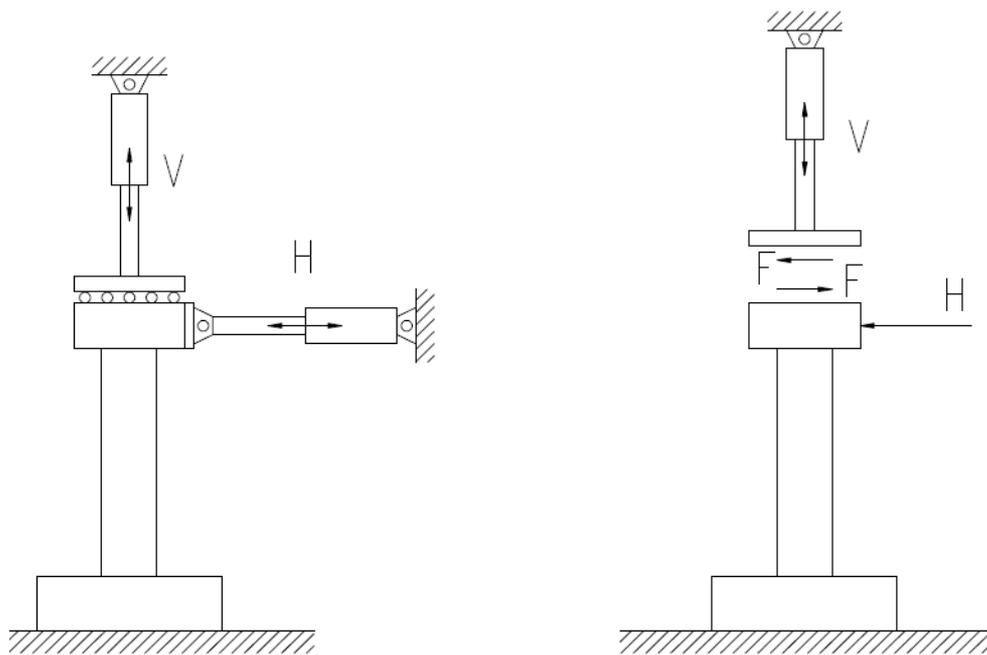


后张拉轴力加载系统

➤ 竖向力偏转影响了试件上的水平力、竖向力的准确性，可以参照水平位移进行角度修正。

# 日常压剪试验中的常见问题

## 立柱加载的常见问题



滑动轴力加载系统

➤ 水平作动推动试件发生水平位移后，**竖向力会产生偏心**，**试件内部产生了附加弯矩**；

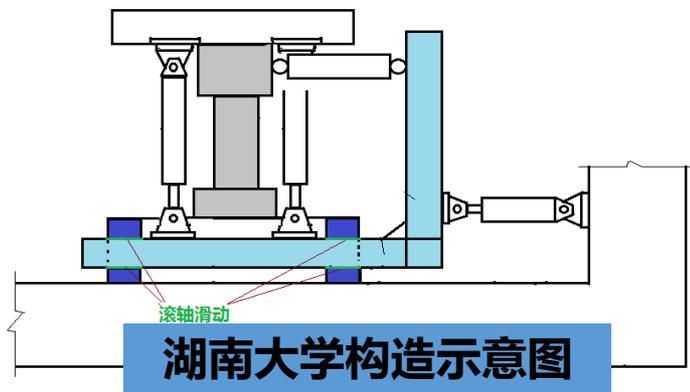
➤ 水平力可以**采用摩擦系数进行粗略修正**，计算精度不高（竖向力非均匀加载于试件表面的滑板/滑轨）。

# 国内外压剪试验现状

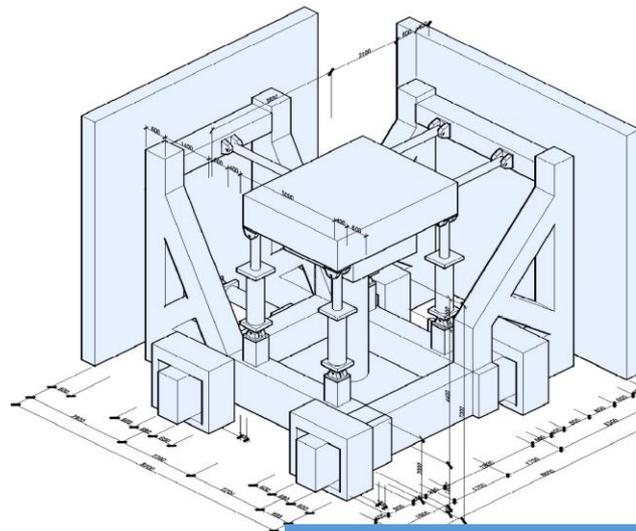
## 7、南京工业大学MUST



HNU-MUST

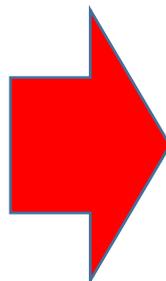


湖南大学构造示意图



竖直1000吨  
X向：400吨  
Y向：200吨

南工大 XY-MUST



三维加载地震加载系统

- 水平**单向**升级为**水平双向**加载
- 通过附加传感器扣除摩擦力

# 汇报提纲

一

国内外压剪试验现状

二

结构传感一体的压剪试验方法

三

试验样机的设计与制造

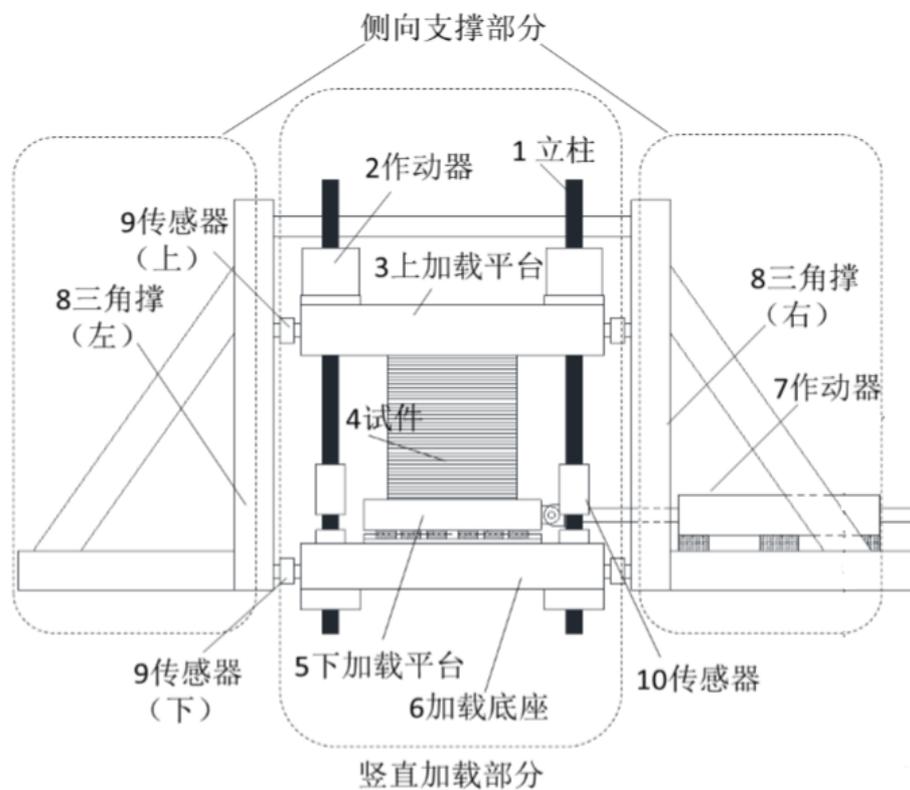
四

压剪验证试验及结果分析

# 结构传感一体压剪机的基本思路

## 1、结构体系设计思路

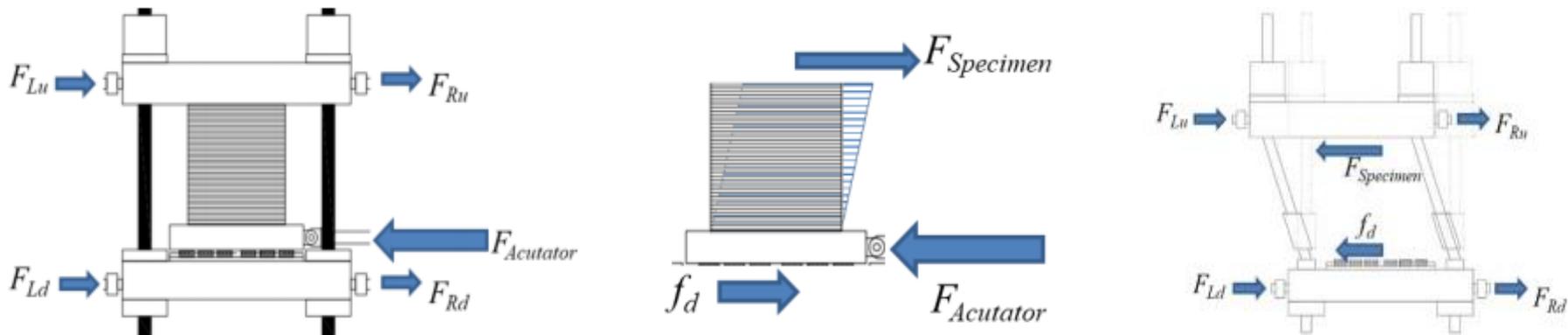
- 由三部分组成：**竖直加载部分、水平加载部分和侧向支撑部分**，整体属**自平衡体系**。
- 采用四立柱框架体系，在四根立柱上安置油缸，利用油缸推动上加载板进行力的加载；左右两侧布置有斜向三角支撑，左右三角撑中间连接；试验机右侧安装水平加载作动器进行水平力的加载。



多功能大吨位压剪试验机构造示意图

# 结构传感一体压剪机的基本思路

## 2、“无摩擦”实现思路



将隔离出来的竖直部分再次隔离，得到如图两个简化后的力学模型。

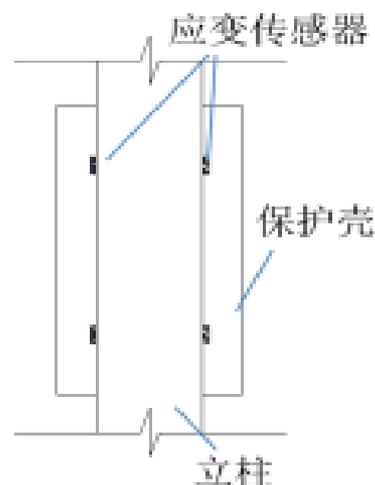
从力学模型中我们可以看出，在其余力大小均可测得的情况下，试件所受

**剪力**与存在于**下加载板**和**加载底座间摩擦力大小**有关。

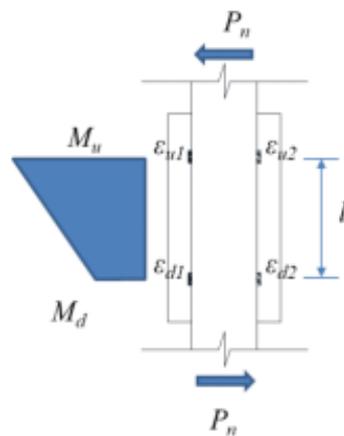
# 结构传感一体压剪机的基本思路

## 3、结构传感一体化设计思路

- 在四根立柱上布置应变传感器，将结构与传感进行融合
- 精确测量立柱所受竖向力
- 将立柱两侧的竖向弯曲应变，再经过计算处理，从而得到立柱所受水平剪力



立柱上的传感布置图

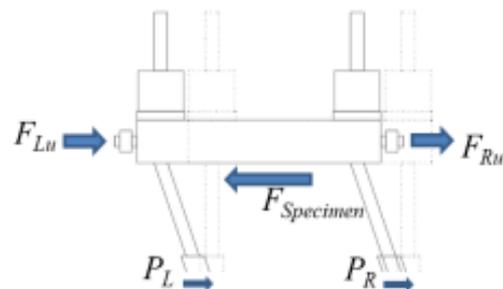


立柱受力分面与传感示意图

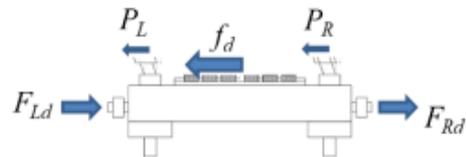
# 结构传感一体压剪机的基本思路

## 4、测控系统工作策略

- 上平台平行竖向加载作用逻辑
- 偏压构件竖向加载作用逻辑
- 作动器 **力传感器** 与 **立柱应变** 相互校核
- 四立柱弯曲变形控制保护等



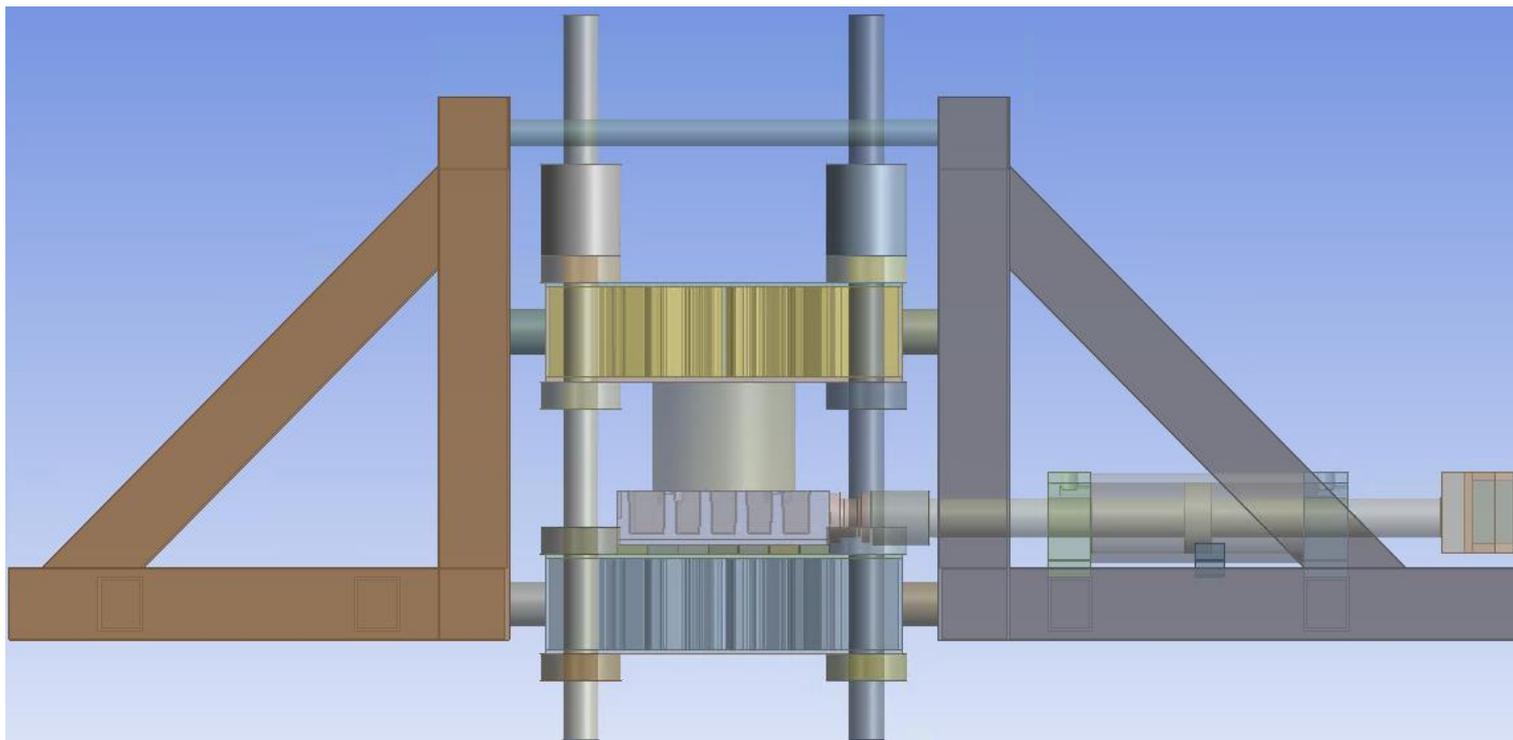
竖直框架上部受力图



竖直框架下部受力图

# 4000吨压剪试验机概念图

## 关键部件信息



**上下平台：**长4mx宽4mx厚500mm，41吨x2

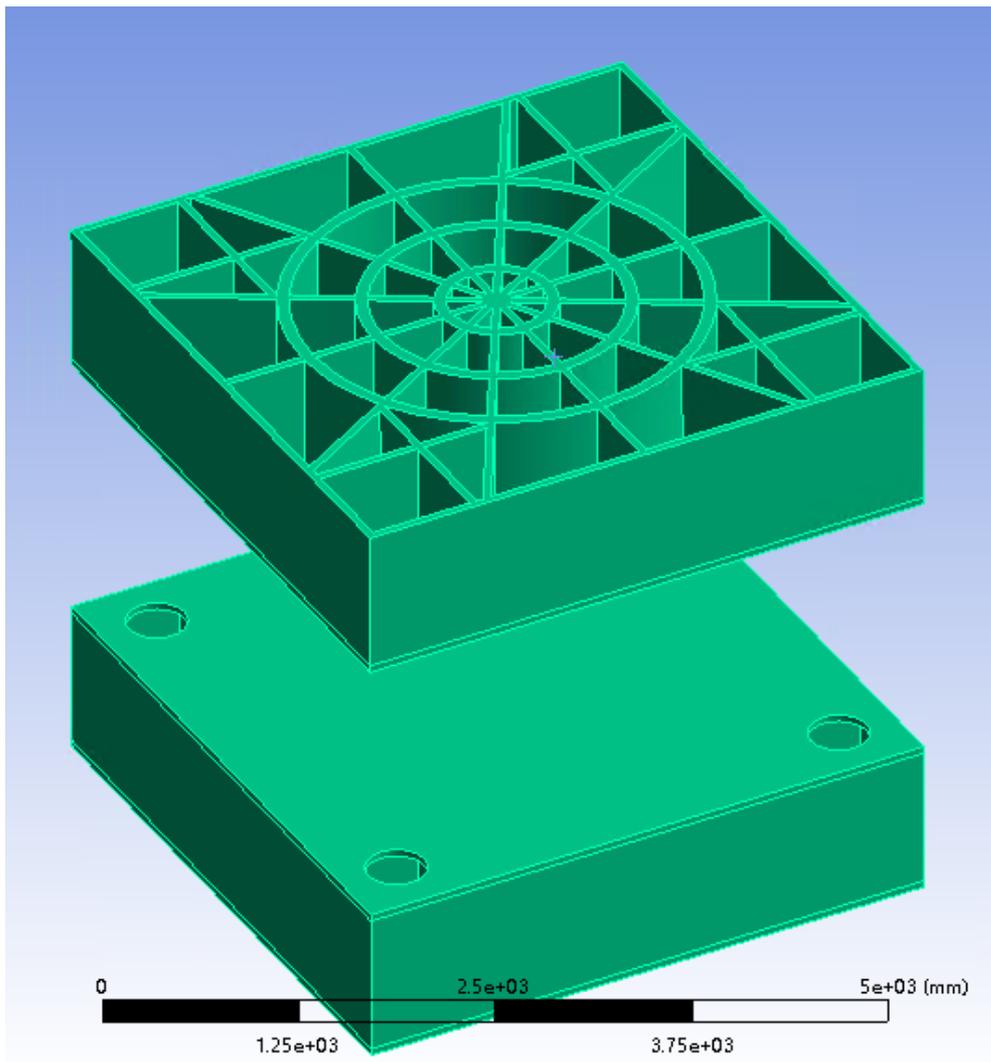
**四根立柱：**直径400mm，长度8000mm，62吨

**左右三角撑：**宽5.6m，高6m，19.5吨x2

**结构总重：262吨**

# 4000吨压剪试验机概念图

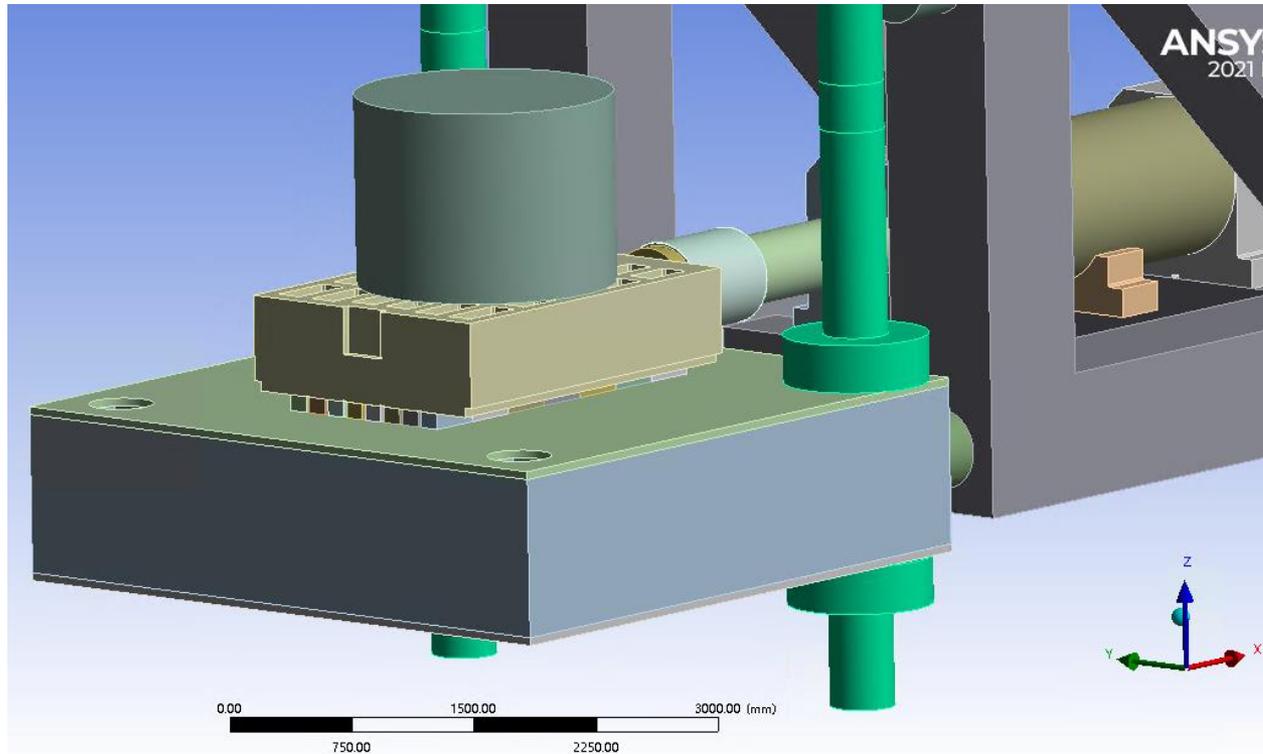
## 上下平台



上下板厚50mm  
中间肋厚80mm  
放射状肋条  
并设置双向加强肋条

# 4000吨压剪试验机概念图

## 下加载滑台



下加载滑台与下平台通过 **滑块/滑轨**连接

# 汇报提纲

一

国内外压剪试验现状

二

结构传感一体的压剪试验方法

三

试验样机的设计与制造

四

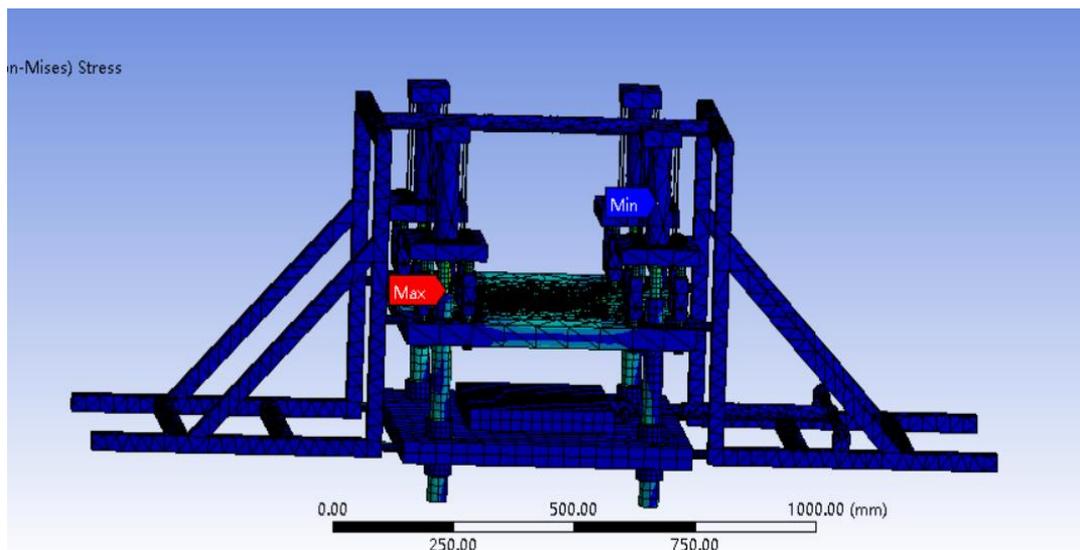
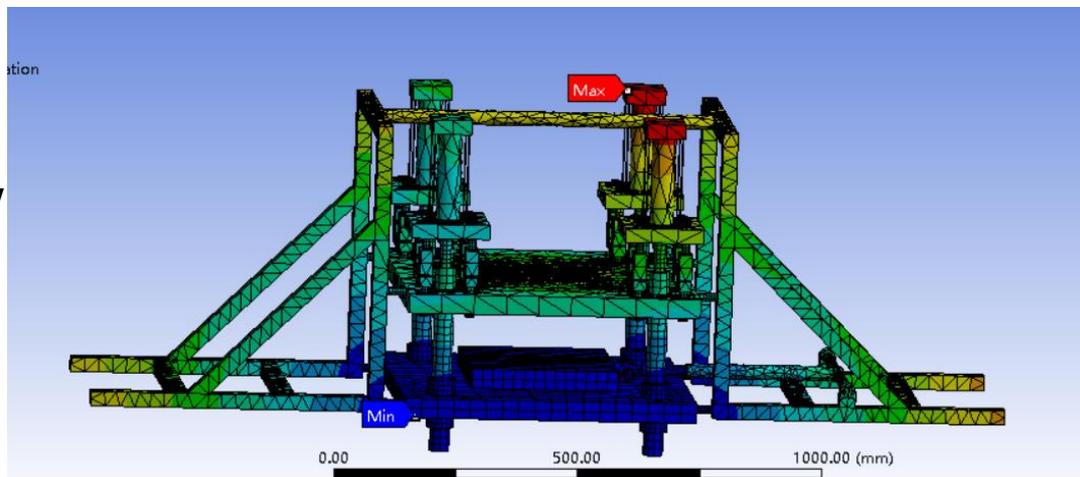
压剪验证试验及结果分析

# 样机设计及制造进展

## 1、模型机有限元分析

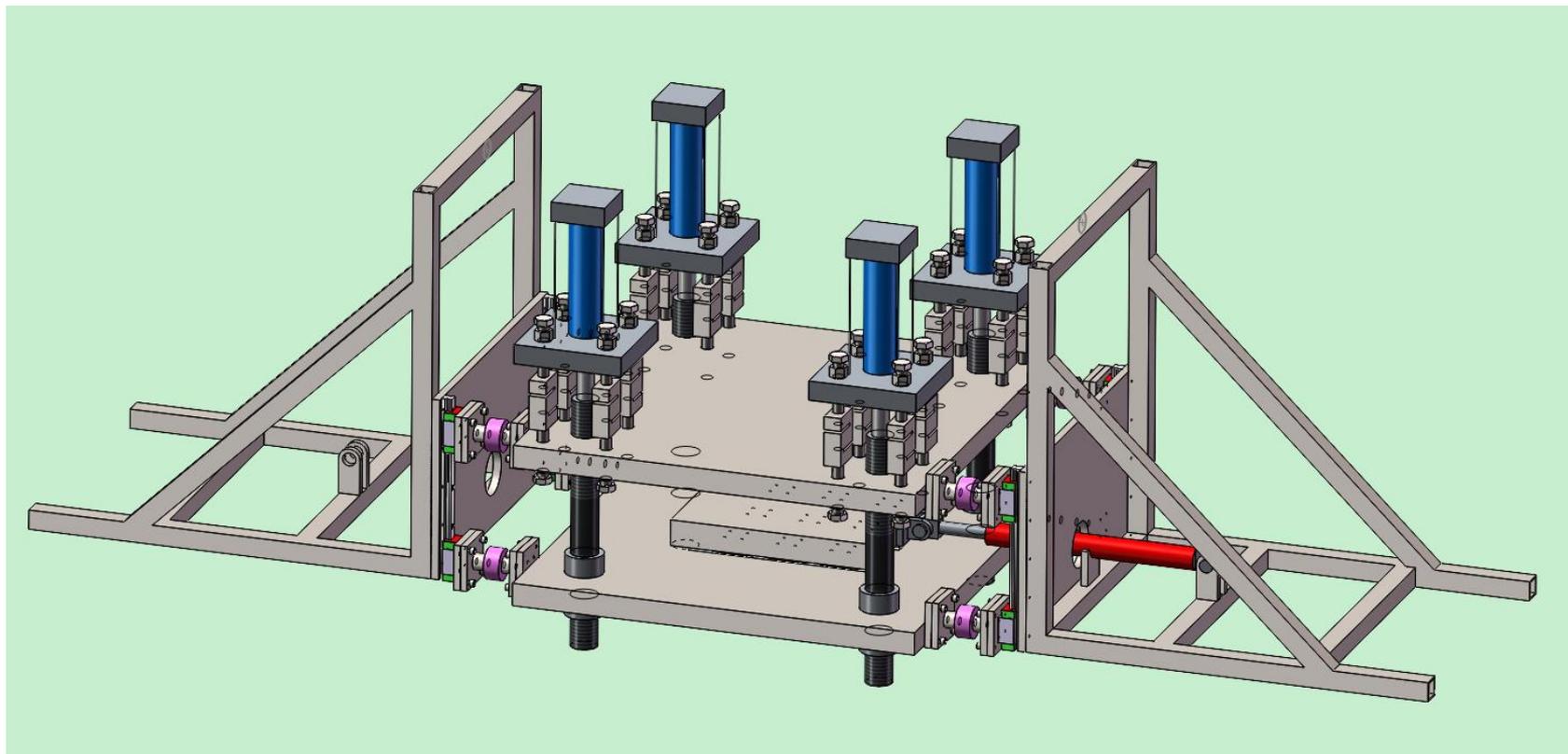
在经过多次不同数据的模拟下，虽然数值大小不同，但是其应力分布以及变形情况如图，且均在试验机工作要求范围内（竖向4吨）。

试验机具体工作表现情况还需要在表中数据完全填写后，对数据进行分析整理，并得出最终结论。



# 样机设计及制造进展

## 2、样机结构设计



4吨样机模型

# 样机设计及制造进展

## 3、样机制作相关构件



# 样机设计及制造进展

## 4、试验机模型

上下板：600\*600\*40mm

圆钢柱H：360mm  
D：40mm

油缸：行程100mm  
吨位2t

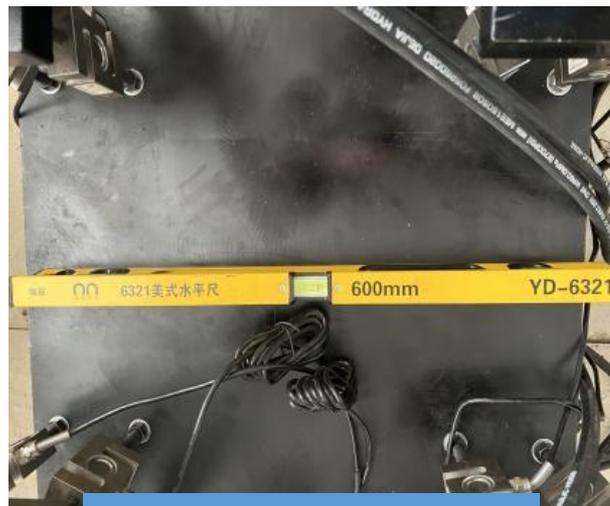


模型机照片

# 模型机调平



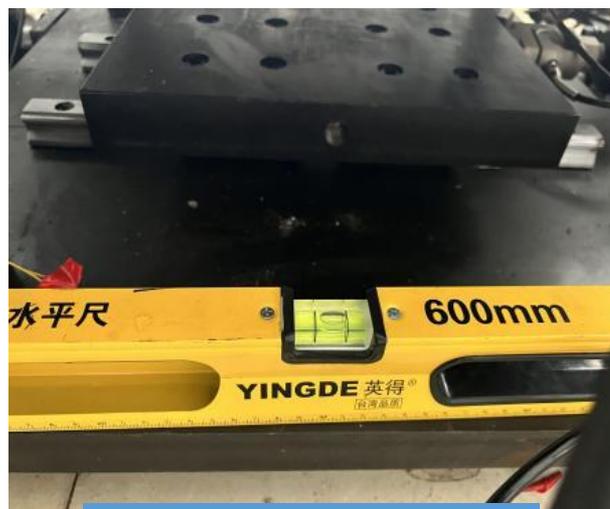
油缸水平示意图



上加载板水平示意图



下加载板水平示意图



下底板水平示意图

# 汇报提纲

一

国内外压剪试验现状

二

结构传感一体的压剪试验方法

三

试验样机的设计与制造

四

压剪验证试验及结果分析

# 试验方案

## 试验机试验方案

- **试件材料：** 橡胶
- **试件尺寸：** 圆柱体 150\*150mm,  
150\*100mm,  
150\*50mm



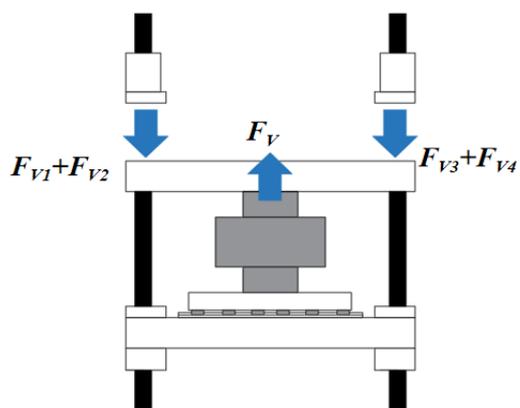
橡胶试件

- 工况：**
- (1) 在同一高度下改变的竖向力大小，测得试验机关键节点部位位移与应力
  - (2) 在其他条件不变的情况下，改变水平力大小，测得试验机关键节点部位位移与应力
  - (3) 在同一高度下先施加竖向力，保持竖向力恒定后再改变水平力大小，测得试验机关键节点部位位移与应力

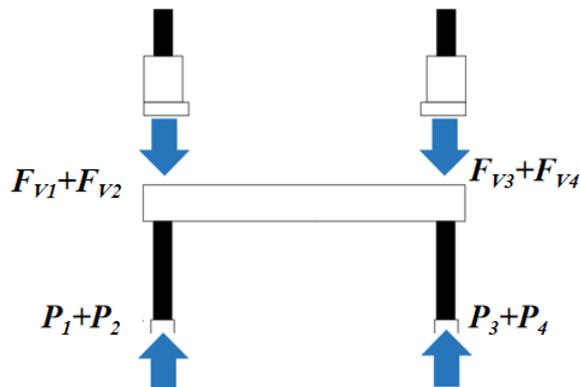
**关键考虑因素：** 力传感与结构应变的自动校核

# 竖向加载

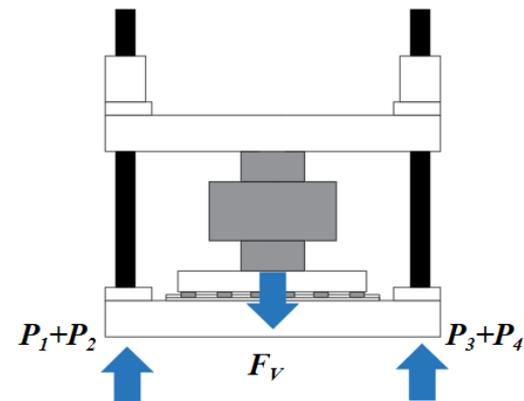
## 工况一：仅受竖向加载



竖直框架上加载板部分  
竖向关系



竖直框架立柱与油缸  
竖向关系图



竖直框架下底板部分  
竖向关系图

➤ 当  $F_H=0$  时

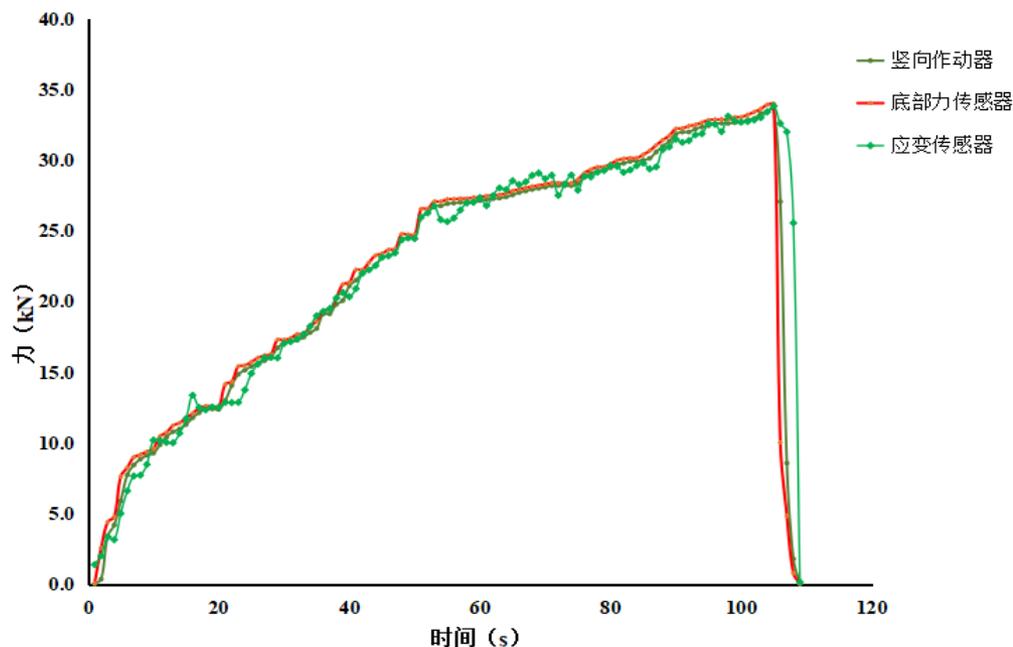
➤ 竖向：  $F_{V1}+F_{V2}+F_{V3}+F_{V4}=F_V$ ；

$$F_{V1}+F_{V2}+F_{V3}+F_{V4}=P_1+P_2+P_3+P_4；$$

$$F_V=P_1+P_2+P_3+P_4$$

注：  $F_V$  —— 被压力传感器读数；  
 $F_{V1}$ 、  $F_{V2}$ 、  $F_{V3}$ 、  $F_{V4}$  —— 竖向作  
动器力传感器读数；  
 $P_1$ 、  $P_2$ 、  $P_3$ 、  $P_4$  —— 立柱拉力；  
 $F_H$  —— 水平作动器力传感器读数

# 竖向加载

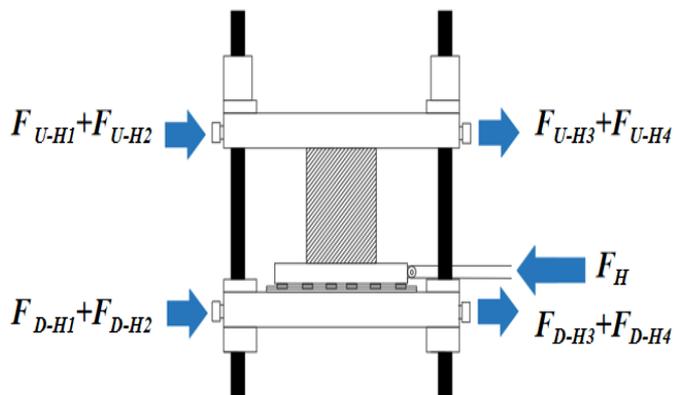


竖向加载框架受力曲线图

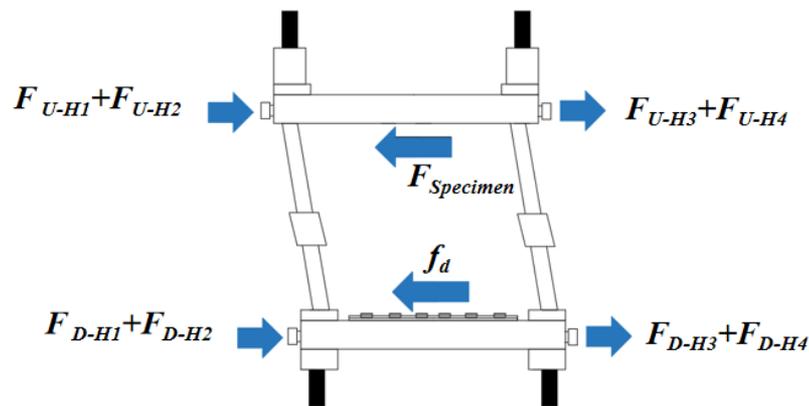
- 在仅保持竖向加载时，**竖向作动器** ( $F_{V1}+F_{V2}+F_{V3}+F_{V4}$ ) 读数与**底部传感器值** ( $F_v$ ) **及四立柱拉力之和** ( $P_1+P_2+P_3+P_4$ ) **几乎一致**
- 此工况实现了**框架竖向力与竖向传感器**的对比校准，**作动器上的力可以与传感器上的力**的相互校准。验证了试验机的自校准体系

# 水平加载

## 工况二：仅受水平加载



压剪试验机构造原理图



竖向加载框架受力示意图

➤ 当  $F_{V1}+F_{V2}+F_{V3}+F_{V4}=0$  时

➤ 水平:  $F_H = F_{U-H1} + F_{U-H2} + F_{U-H3} + F_{U-H4} + F_{D-H1} + F_{D-H2} + F_{D-H3} + F_{D-H4}$  ;

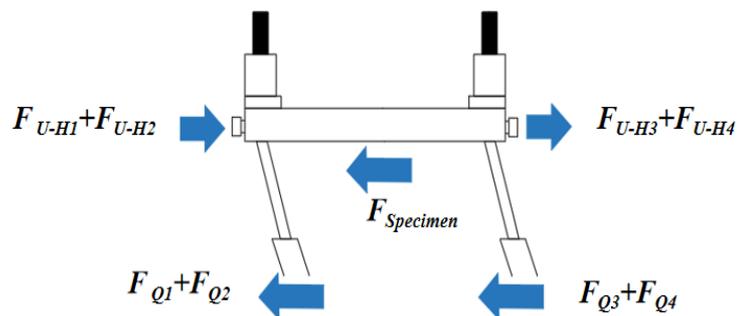
$$F_{U-H1} + F_{U-H2} + F_{U-H3} + F_{U-H4} + F_{D-H1} + F_{D-H2} + F_{D-H3} + F_{D-H4} = F_{Specimen} + f_d ;$$

注:  $F_{U-H1}$ 、 $F_{U-H2}$ 、 $F_{U-H3}$ 、 $F_{U-H4}$ …… ——水平力传感器读数

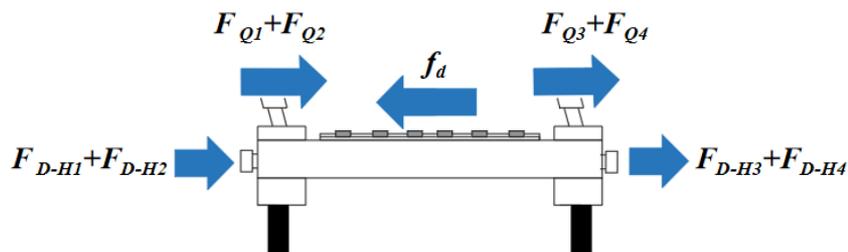
$F_{Specimen}$  ——试件受到的水平力, “无摩擦”的关键;

$f_d$  ——下加载平台与加载底座之间的摩擦力。

# 水平加载



上半部分竖直框架水平力关系图



下半部分竖直框架水平力关系图

➤ **水平:**  $F_{Specimen} = F_{U-H1} + F_{U-H2} + F_{U-H3} + F_{U-H4} + F_{Q1} + F_{Q2} + F_{Q3} + F_{Q4}$  ;

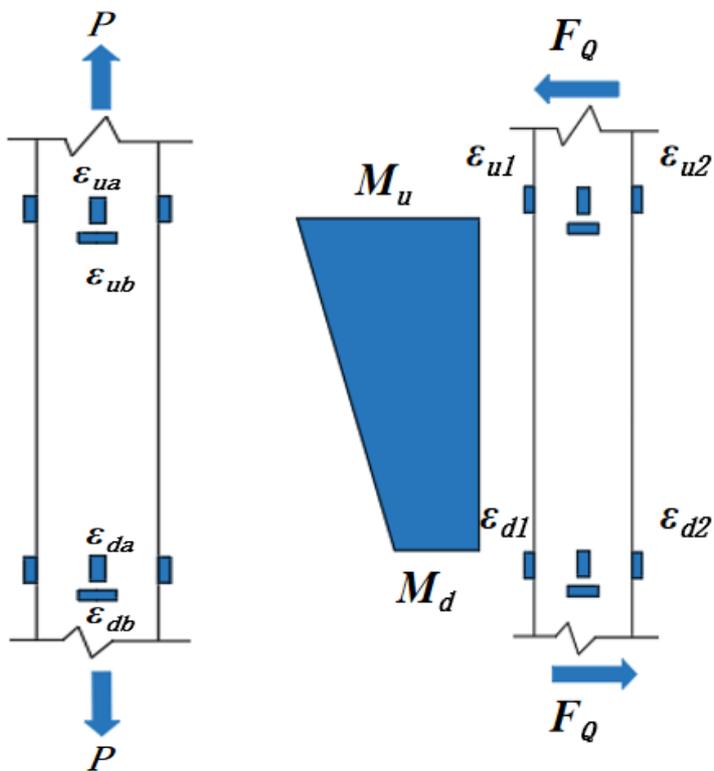
$$f_d = F_{D-H1} + F_{D-H2} + F_{D-H3} + F_{D-H4} - (F_{Q1} + F_{Q2} + F_{Q3} + F_{Q4});$$

$$f_d = F_{Rd} + F_{Ld} - (P_L + P_R) = 0;$$

$$F_{Rd} + F_{Ld} = P_L + P_R$$

**注:**  $F_{Q1}$ 、 $F_{Q2}$ 、 $F_{Q3}$ 、 $F_{Q4}$  ——立柱水平剪力

# 水平加载



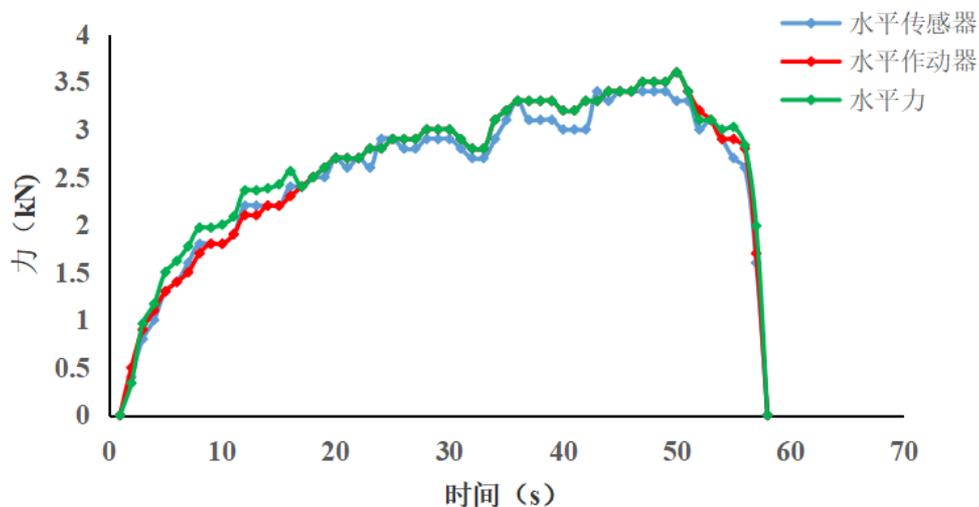
应变传感器受拉与受弯  
原理图

➤ 拉力:  $P = E(\epsilon_{ua} - \epsilon_{ub}) / (1 + \mu) A = E(\epsilon_{da} - \epsilon_{db}) / (1 + \mu) A$

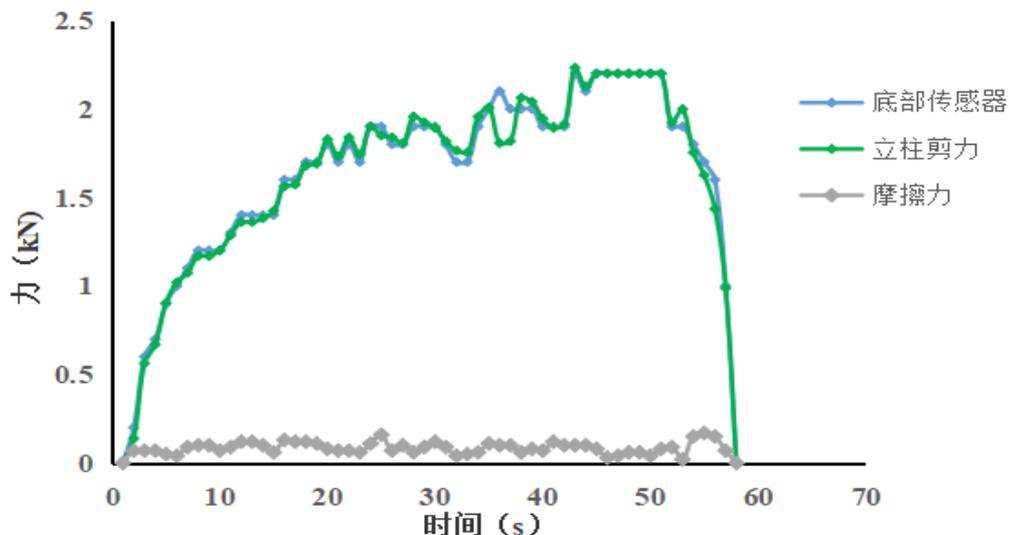
➤ 剪力:  $EW ((\epsilon_{u1} - \epsilon_{d1}) - (\epsilon_{u2} - \epsilon_{d2})) / 2 = M_u - M_d = F_Q \times l$

$$F_Q = EW ((\epsilon_{u1} - \epsilon_{d1}) - (\epsilon_{u2} - \epsilon_{d2})) / (2l)$$

# 水平加载



竖向加载框架受力曲线图

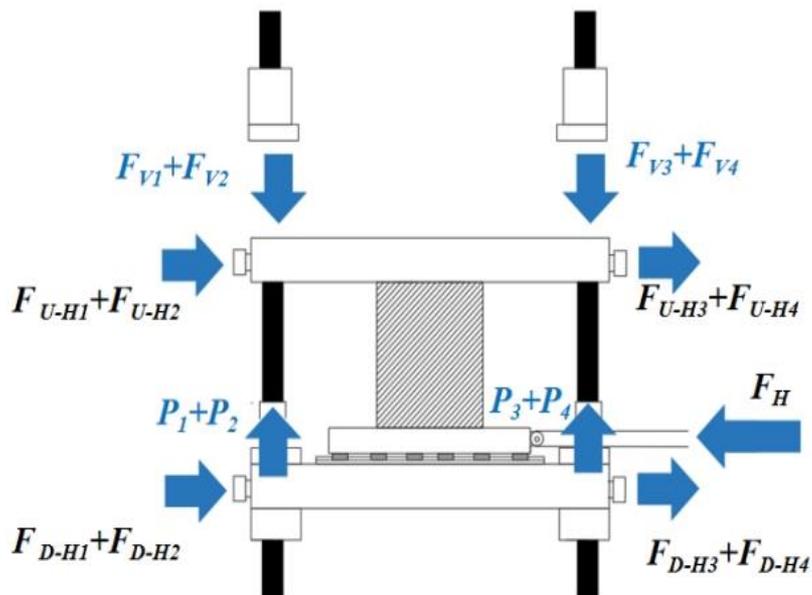


立柱剪力与底部传感器曲线图

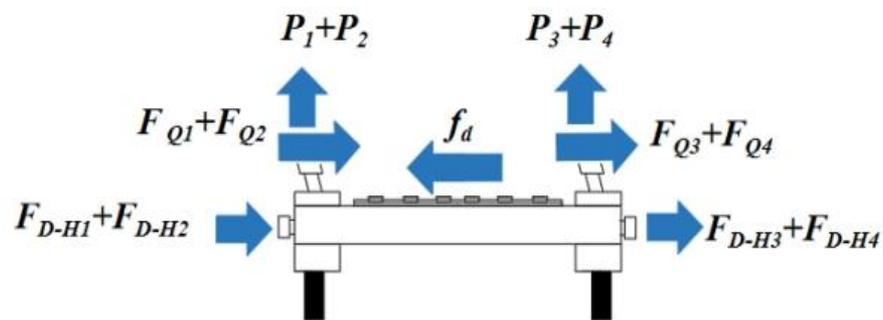
- 在仅保持水平加载时，**水平作动器 ( $F_H$ ) 读数等于上加载板和下底板上力传感器值之和** ( $F_{U-H1} + F_{U-H2} + F_{U-H3} + F_{U-H4} + F_{D-H1} + F_{D-H2} + F_{D-H3} + F_{D-H4}$ )
- 下加载平台与加载底座之间的**摩擦力 ( $f_d$ ) 的值与底部力传感器之和** ( $F_{D-H1} + F_{D-H2} + F_{D-H3} + F_{D-H4}$ ) **的比值小于1%**，即**底部力传感器的数值等于四立柱剪力之和** ( $F_{Q1} + F_{Q2} + F_{Q3} + F_{Q4}$ )。
- 此工况实现了**框架水平力与水平力传感器的对比校准**，**作动器上的力可以与传感器上的力的相互校准**。验证了试验机的自校准体系

# 双向加载

## 工况三：双向力加载



竖向框架压剪受力分析示意图



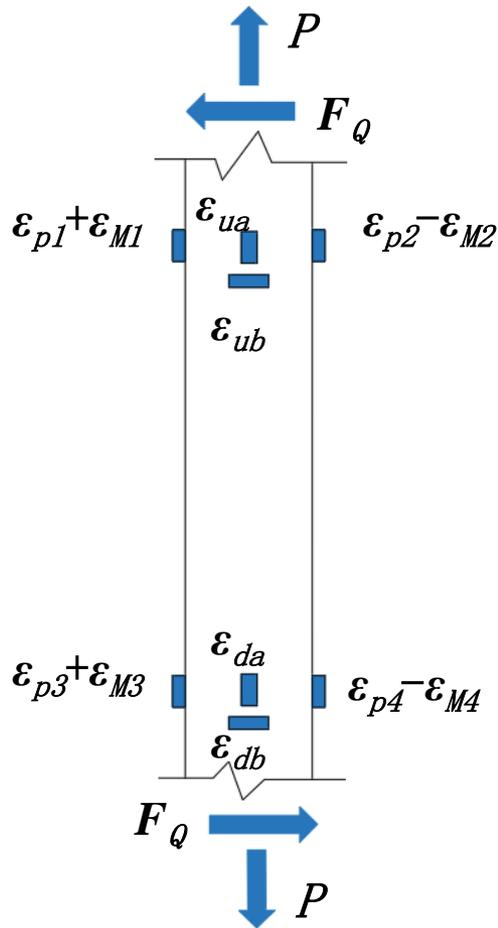
双向力加载下半部分竖向框架  
受力图

当  $F_{V1}+F_{V2}+F_{V3}+F_{V4}$  为定值时

➤ 竖向:  $F_{V1}+F_{V2}+F_{V3}+F_{V4}=P_1+P_2+P_3+P_4$ ;

➤ 水平:  $F_H = F_{U-H1} + F_{U-H2} + F_{U-H3} + F_{U-H4} + F_{D-H1} + F_{D-H2} + F_{D-H3} + F_{D-H4}$

# 双向加载

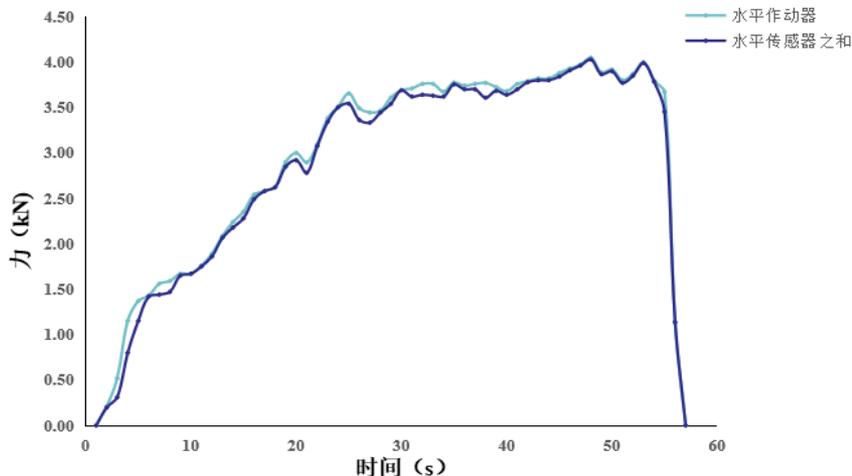


➤ **拉力:**  $P = E(\varepsilon_{ua} - \varepsilon_{ub}) / (1 + \mu) A = E(\varepsilon_{da} - \varepsilon_{db}) / (1 + \mu) A$

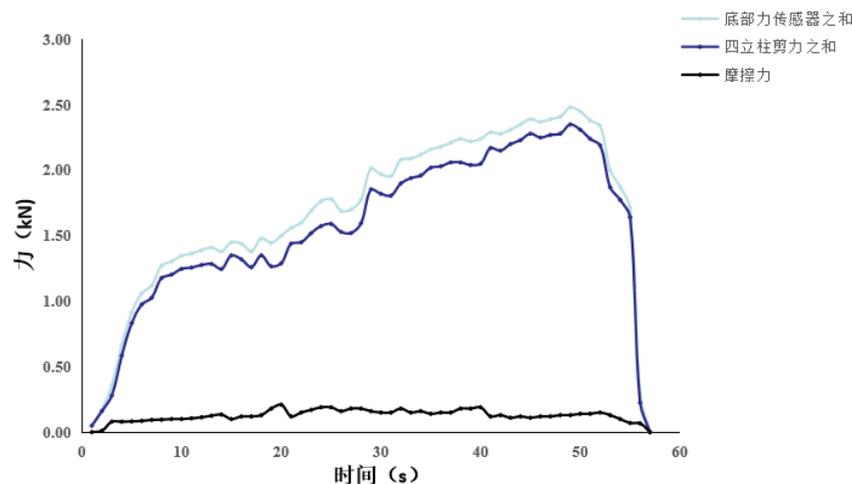
➤ **剪力:**  $EW [((\varepsilon_{p1} + \varepsilon_{M1}) - (\varepsilon_{p2} - \varepsilon_{M2})) - ((\varepsilon_{p3} + \varepsilon_{M3}) - (\varepsilon_{p4} - \varepsilon_{M4}))] / 2 = Mu - Md = F_Q \times l$

立柱受力分析示意图

# 双向加载



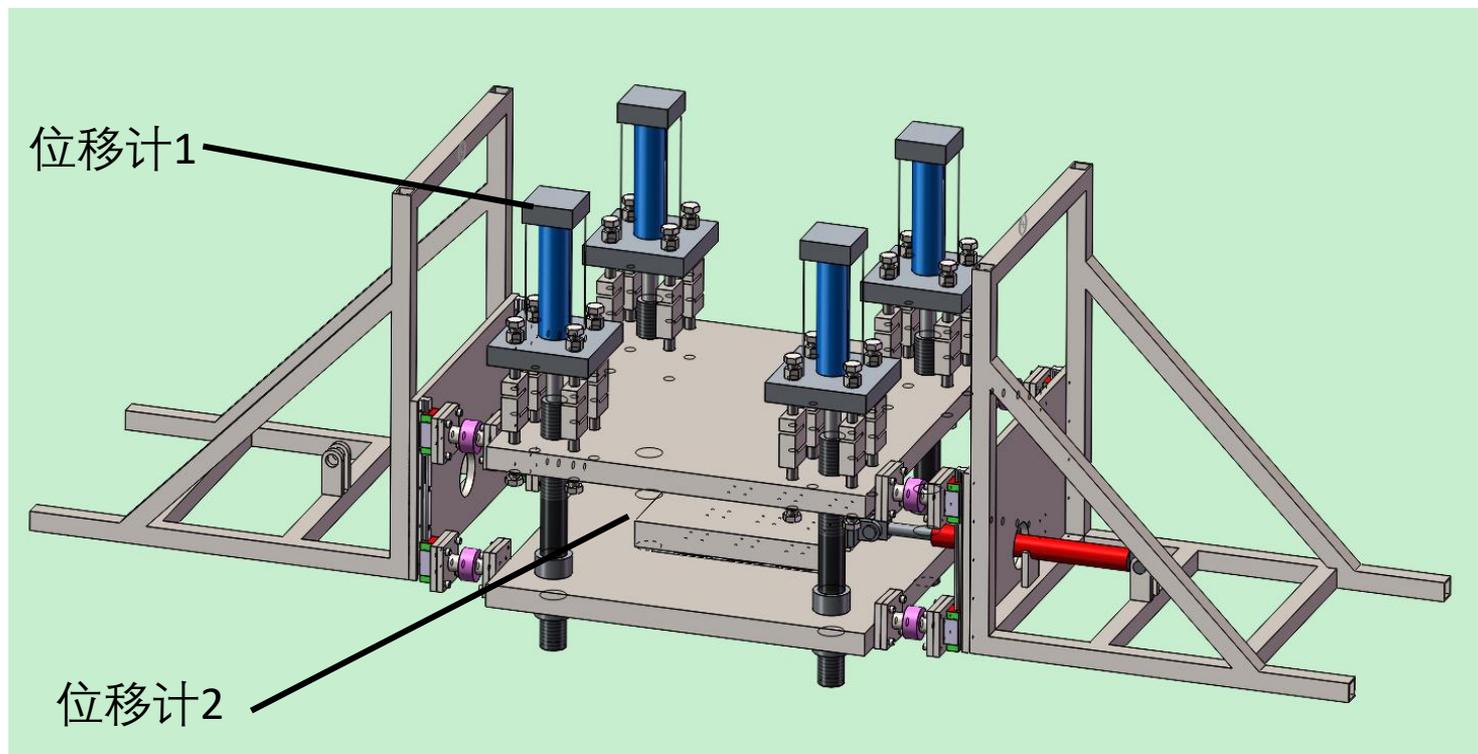
竖向加载框架受力曲线图



下半部分框架受力曲线图

- 当竖向加载值恒定，仅改变水平力大小时，**水平作动器** ( $F_H$ ) 读数依旧与**上加载板和下底板上力传感器值之和** ( $F_{U-H1} + F_{U-H2} + F_{U-H3} + F_{U-H4} + F_{D-H1} + F_{D-H2} + F_{D-H3} + F_{D-H4}$ ) 基本保持一致。
- 下加载平台与加载底座之间的**摩擦力** ( $f_d$ ) 的值约占到**底部力传感之和** ( $F_{D-H1} + F_{D-H2} + F_{D-H3} + F_{D-H4}$ ) 数值的**2~5%**，远小于其值；即**底部力传感器的数值**可近似与**四立柱剪力之和** ( $F_{Q1} + F_{Q2} + F_{Q3} + F_{Q4}$ ) 相等。
- 此工况实现了**框架水平力与水平力传感器的对比校准**，**作动器上的力可以与传感器上的力的相互校准**。验证了试验机的自校准体系

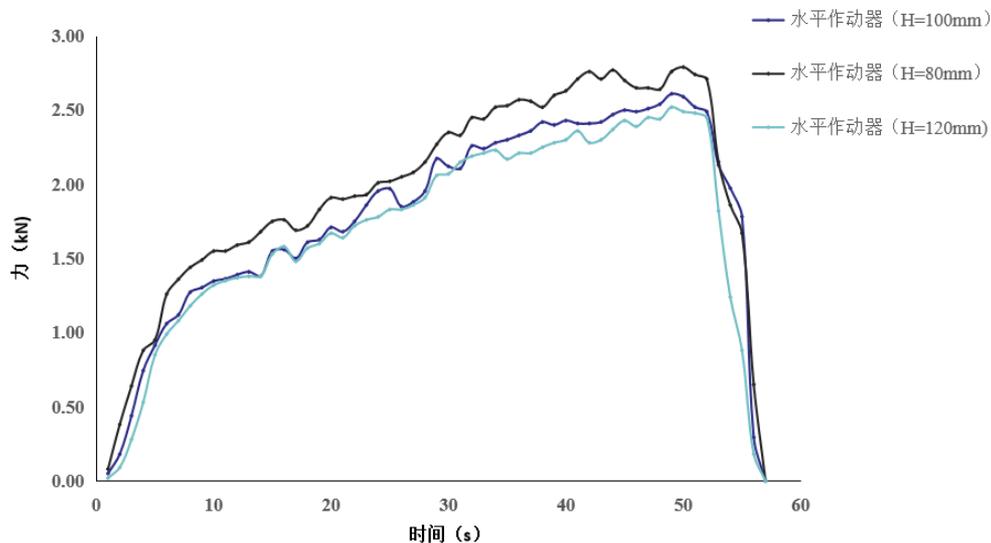
# 试件高度对试验机结构的影响



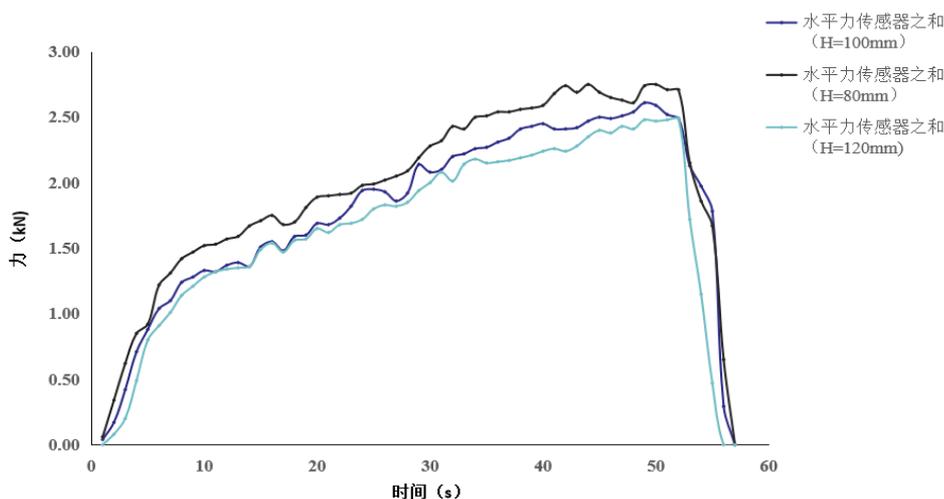
4吨模型机示意图

- 选用120mm、100mm、80mm三种高度的圆柱体试件
- 施加相同大小的竖向力，通过控制不同水平力将试件推动150mm的横向位移

# 试件高度对试验机结构的影响



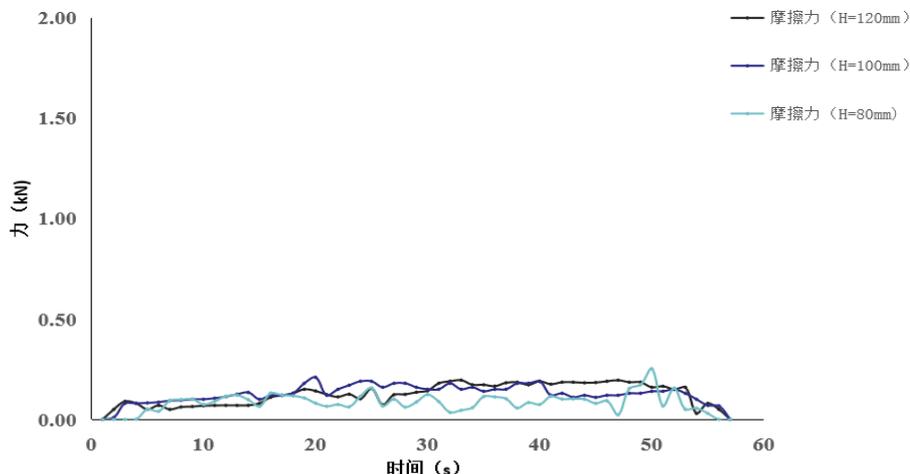
不同试件高度下水平作动器受力对比图



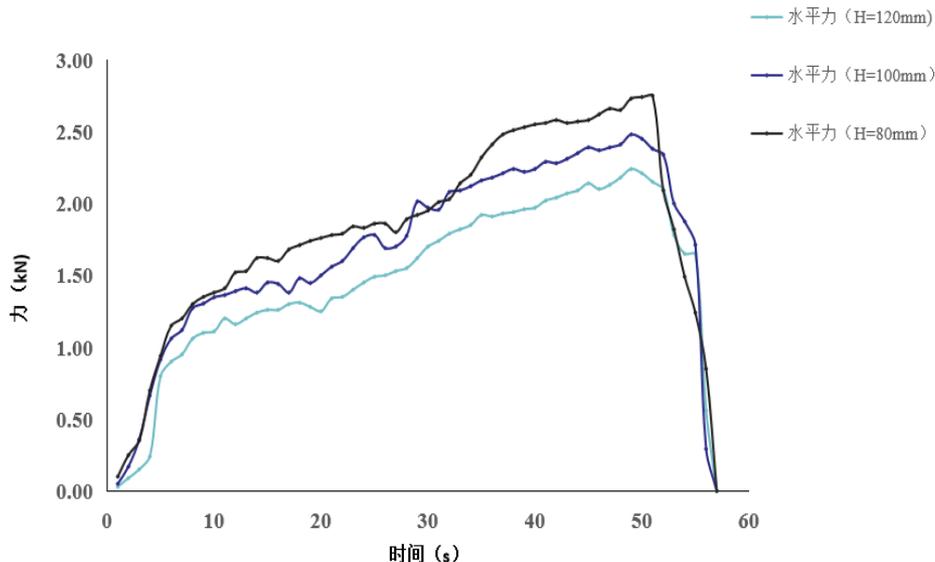
不同试件高度下水平力传感器之和受力对比图

➤ 在竖向力相同，水平位移相同的情况下，改变试件高度，由水平作动器和水平力传感器之和的对比曲线得之，试件**高度越低**，**水平作动器 ( $F_H$ ) 与水平力传感器之和 ( $F_{U-H1} + F_{U-H2} + F_{U-H3} + F_{U-H4} + F_{D-H1} + F_{D-H2} + F_{D-H3} + F_{D-H4}$ ) 的受力越大。**

# 试件高度对试验机结构的影响



不同试件高度下摩擦力受力对比图

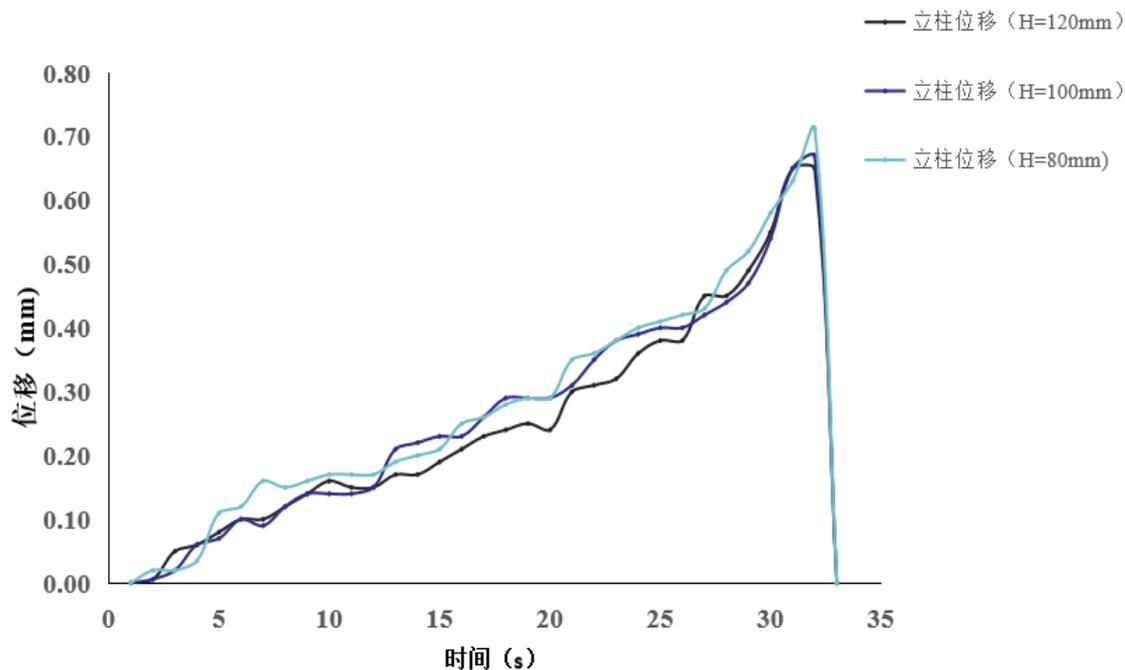


不同试件高度下试件受到水平力对

➤ 在不同试件高度下的摩擦力大小都相等，表明在此工况下对摩擦力的影响不大，摩擦力大小 ( $f_d$ ) 与下底板受力 ( $F_{D-H1} + F_{D-H2} + F_{D-H3} + F_{D-H4}$ ) 数值比值小于**5%**，远小于其值；即底部力传感器的数值可近似与四立柱剪力之和 ( $F_{Q1} + F_{Q2} + F_{Q3} + F_{Q4}$ ) 相等。

➤ 由上面水平力对比图可得之**试件高度越高，试件上受到的水平力越小**，表明在不同试件高度的工况下，可以将框架水平力与水平力传感器进行对比校准。同时，作动器上的力可以与传感器上的四个力进行相互校准，满足试验机**结构的自校准功能**。

# 试件高度对测控点位移影响



不同试件高度下立柱顶端水平位移对比图

- 由立柱上一点水平方向上，试件高度越低，施加相同大小的竖向力，通过控制不同水平力将试件推动150mm的横向位移。可以发现，**立柱顶点随着试件高度的降低，变形越来越大。**



**请各位专家提出宝贵意见!**

**谢谢!**

汇报人： 万 里

E-Mail: [wanli@njtech.edu.cn](mailto:wanli@njtech.edu.cn)