



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 112049457 B

(45) 授权公告日 2021.09.17

(21) 申请号 202010938167.8

G06F 30/13 (2020.01)

(22) 申请日 2020.09.08

G06F 119/14 (2020.01)

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 112049457 A

(56) 对比文件

CN 102704704 A, 2012.10.03

CN 102704698 A, 2012.10.03

(43) 申请公布日 2020.12.08

CN 104196258 A, 2014.12.10

(73) 专利权人 中国航空规划设计研究总院有限公司

CN 105155866 A, 2015.12.16

CN 1760486 A, 2006.04.19

地址 100120 北京市西城区德外大街12号

US 2005028477 A1, 2005.02.10

JP 2002213085 A, 2002.07.31

(72) 发明人 葛家琪 刘鑫刚 马伯涛 刘金泰

审查员 吴志衡

(74) 专利代理机构 北京中建联合知识产权代理事务所(普通合伙) 11004

代理人 李丹

(51) Int. Cl.

E04G 23/02 (2006.01)

E04H 9/02 (2006.01)

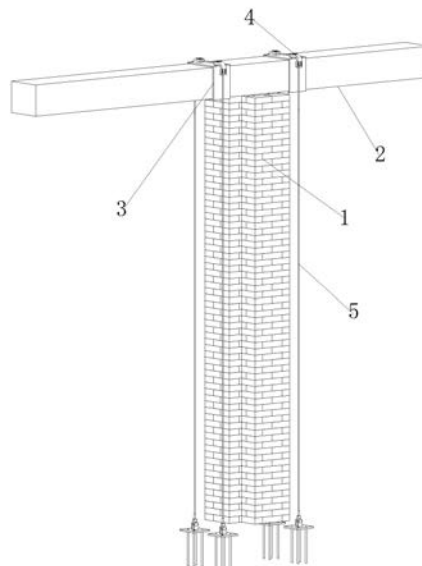
权利要求书2页 说明书7页 附图3页

(54) 发明名称

用于古建筑砌体柱的防震拉索的选取方法及防震拉索系统

(57) 摘要

本发明涉及建筑施工技术领域,公开了用于古建筑砌体柱的防震拉索的选取方法及防震拉索系统。通过先根据设计经验选取拉索,然后建立包含拉索在内的砌体柱的三维实体离散元分析模型并用有限元方法进行求解,判断设置在砌体柱顶部的拉索所需的横截面积以及应加载的预应力的值是否达标。填补了该领域的空白,使拉索能够强化砌体柱的抗震能力的同时保留砌体柱的延性性能,应用于古建筑加固可在符合建筑修缮保护最小干预且可逆原则的前提下完成加固。



1. 用于古建筑砌体柱的防震拉索的选取方法,所述拉索对砌体柱产生附加压应力;其特征在于:包括以下步骤:

步骤一:建立包含拉索(5)在内的砌体柱(1)的分析模型;

步骤二:设定分析模型中拉索(5)的横截面积以及预应力;

步骤三:在分析模型中的砌体柱(1)顶部从零开始施加水平荷载直至砌体柱(1)被破坏,若水平荷载增加过程中砌体柱(1)中的砌块承受的压应力一直不超过砌块的抗压强度,则进入步骤四;否则返回步骤二;

步骤四:根据施工工艺对拉索(5)强度余量的要求分别判断拉索(5)在水平荷载增加过程中横截面积是否达标,若达标,则进入步骤五,否则返回步骤二;

步骤五:在分析模型中的砌体柱(1)底部施加水平的地震加速度时程,得出砌体柱(1)在地震作用下受到的最大剪力、以及最大水平变形量与砌体柱(1)高度的比值;

步骤六:根据步骤四、步骤五的计算结果,从水平承载力安全度和水平变形量延性控制方面判定步骤二中设置的预应力值是否达标,若达标,则记录横截面积以及预应力,否则返回步骤二。

2. 根据权利要求1所述的用于古建筑砌体柱的防震拉索的选取方法,其特征在于:步骤一中,建立包含拉索(5)在内的砌体柱(1)的三维实体离散元分析模型,建模时计入砌体柱(1)自重及砌体柱(1)所承载的上层结构的重量;建立的分析模型中砌块与砌块之间的连接单元包括砌块间的粘结强度和摩擦力参数。

3. 根据权利要求1所述的用于古建筑砌体柱的防震拉索的选取方法,其特征在于:步骤二中,采用初应变或施加负温度的方法对拉索(5)施加预应力,采用改变拉索(5)的横截面积及弹性模量的方式改变拉索(5)的抗拉强度,每根拉索(5)中的预应力 $\sigma \leq 0.2\sigma_u$ , $\sigma_u$ 为拉索(5)的抗拉强度;拉索(5)对砌体柱(1)产生的附加压应力值 $\sigma_z \leq 0.15\text{Mpa}$ 。

4. 根据权利要求1所述的用于古建筑砌体柱的防震拉索的选取方法,其特征在于:步骤三中,采用荷载增量法进行砌体柱(1)结构全过程材料弹塑性和几何非线性仿真分析,求解过程中计入结构体系的几何非线性影响。

5. 根据权利要求1所述的用于古建筑砌体柱的防震拉索的选取方法,其特征在于:步骤四包括以下分步骤:

步骤4.1:以砌体柱(1)的水平变形量 $S$ 为自变量,水平荷载 $F$ 为因变量,绘制分析模型中的 $F-S$ 函数曲线,并得出 $F-S$ 函数曲线上线性区间里水平荷载的最大值 $F_k$ ,砌体柱(1)开始屈服时的水平荷载 $F_y$ 及水平变形量 $S_y$ ,砌体柱(1)被破坏时的水平荷载 $F_u$ 及水平变形量 $S_u$ ;

步骤4.2:根据施工工艺对拉索(5)强度余量的要求分别判断拉索(5)在水平荷载 $F=F_k$ 、 $F=F_y$ 、以及 $F=F_u$ 时横截面积是否达标,若达标,则进入步骤五,否则返回步骤二。

6. 根据权利要求5所述的用于古建筑砌体柱的防震拉索的选取方法,其特征在于:分步骤4.1中,采用如下方法得出 $F_k$ 、 $F_y$ 、 $S_y$ 、 $F_u$ 以及 $S_u$ :

记 $X$ 点为 $F-S$ 函数曲线上任意一点, $X$ 点的横坐标水平变形量值为 $s$ ,将原点 $O$ 和 $X$ 的连线、过 $X$ 点与 $S$ 轴的垂线及 $S$ 轴围合成的三角形面积定义为 $f_1(s)$ ,将原点 $O$ 和 $X$ 点间的曲线、过 $X$ 点与 $S$ 轴的垂线及 $S$ 轴围合成的面积定义为 $f_2(s)$ ,设 $\gamma = f_1(s)/f_2(s)$ ;记 $F-S$ 函数曲线上纵坐标水平荷载峰值点 $F_{\max}$ 对应的横坐标水平变形量值为 $S_1$ ,设点 $\{A_1, A_2, \dots, A_i, \dots, A_n\}$ 为 $F-S$ 曲线上的点, $n > i$ ,其横坐标为 $\{1/n, 2/n, \dots, i/n, \dots, n/n\} \times S_1$ ,计算点 $\{A_1, A_2, \dots,$

$A_1, \dots, A_n$  的  $\gamma$  值分别为  $\{\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_i, \dots, \gamma_n\}$ , 若  $\{\gamma_i, \dots, \gamma_n\}$  均  $< \theta$ , 且  $\gamma_{i-1} \geq \theta$ , 则  $A_{i-1}$  点的纵坐标即为  $F_k$ ; 其中,  $n \geq 50$ , 参数  $\theta$  取值范围为  $0.96 \leq \theta \leq 0.98$ ;

在 F-S 函数上取  $F_u$  的最大值点 M, M 点的横坐标即为  $S_u$ , 纵坐标即为  $F_u$ ;

连接原点 O 和  $A_{i-1}$  点并延长, 与过 M 的水平线交于 B 点, 过 B 点向横坐标轴作垂线与 F-S 函数曲线交于 Y 点, Y 点的横坐标即为  $S_y$ , 纵坐标即为  $F_y$ ;

分步骤 4.2 中, 若在水平荷载  $F=F_k$  时, 拉索 (5) 承受的拉应力不超过拉索 (5) 的抗拉强度  $\sigma_u$  的 0.4 倍, 水平荷载  $F=F_y$  时, 拉索 (5) 承受的拉应力不超过拉索 (5) 的抗拉强度  $\sigma_u$  的 0.6 倍, 且水平荷载  $F=F_u$  时, 拉索 (5) 承受的拉应力不超过拉索 (5) 的抗拉强度  $\sigma_u$  的 0.8 倍; 则判定  $\sigma_u$  达标, 否则判定  $\sigma_u$  不达标。

7. 根据权利要求 5 所述的用于古建筑砌体柱的防震拉索的选取方法, 其特征在于: 步骤五中, 地震加速度时程的方向沿砌体柱 (1) 所承载的上层结构的跨度方向设置, 并根据地震等级求取以下数据:

砌体柱 (1) 在多遇地震作用下受到的最大剪力  $V_k$ 、最大水平变形量与砌体柱 (1) 高度 H 的比值  $\Delta k/H$ , 在设防地震作用下最大水平变形量与砌体柱 (1) 高度 H 的比值  $\Delta y/H$ , 在罕遇地震作用下最大水平变形量与砌体柱 (1) 高度 H 的比值  $\Delta u/H$ ; 求解时计入结构体系的几何非线性影响。

8. 根据权利要求 7 所述的用于古建筑砌体柱的防震拉索的选取方法, 其特征在于: 步骤六中, 若  $F_u/F_y \geq 1.3$ ,  $S_u/S_y \geq 1.5$ ,  $F_k/V_k \geq 1.0$ ,  $\Delta k/H \leq 1/500$ ,  $\Delta y/H \leq 1/300$ , 且  $\Delta u/H \leq 1/200$ , 则判定预应力值达标, 否则判定预应力值不达标。

9. 根据权利要求 1 所述的用于古建筑砌体柱的防震拉索的选取方法, 其特征在于: 所述选取方法还包括以下步骤:

步骤七: 反复进行步骤二到步骤六, 得到多组达标的预应力值, 并确定达标的预应力值的取值范围。

10. 防震拉索系统, 用于古建筑中砌体柱 (1) 的防震加固, 所述砌体柱 (1) 为顶梁柱, 其特征在于: 所述防震拉索系统包括开口向下卡在砌体柱 (1) 上方的横梁 (2) 上的 U 形垫板 (3)、中部挂在 U 形垫板 (3) 上表面且两端锚固在固定基础上的拉索 (5);

所述拉索 (5) 通过扣件 (4) 与 U 形垫板 (3) 连接, 且在扣件 (4) 松弛时与 U 形垫板 (3) 滑动连接, 在扣件 (4) 锁紧时与 U 形垫板 (3) 固定连接;

所述拉索 (5) 的横截面积以及加载的预应力采用如权利要求 1-9 任一项所述的选取方法来选取。

## 用于古建筑砌体柱的防震拉索的选取方法及防震拉索系统

### 技术领域

[0001] 本发明涉及建筑施工技术领域,特别是涉及用于古建筑砌体柱的防震拉索的选取方法及防震拉索系统。

### 背景技术

[0002] 用预应力拉索对建筑进行加固是一种新兴的加固方案,该加固方案特别适合古建筑。

[0003] 目前我国砖石质古建筑的加固主要采用结构补强的方式进行,在建筑本体中嵌入加固装置对建筑进行补强。该方法存在严重缺陷,其虽可增强古建筑在正常使用荷载及小震下的安全性能,却限制了其在非正常自然灾害,如大震发生时原本固有的耗能能力,近年发生的历次地震中均出现古建筑加固后,震损程度加大的案例。此外,古建筑这样的不可移动文物的修缮、加固、维护应尽量保持其的原有风貌,以确保历史信息的原真性,而现行加固装置及方法均需嵌入文物本体,难以实现最小干预文物本体的原则,且不能保证文物安全。

[0004] 用预应力拉索对古建筑进行加固不会对建筑造成破坏,不影响建筑原貌。施加了合理的预应力的拉索既能保证古建筑的结构强度,又能使古建筑结构具有一定的延性耗能能力。但施加的预应力的值需要严格计算,若预应力的值选择不当的话,不仅起不到加强效果,而且可能会对建筑本体造成损害。

[0005] 但目前的预应力拉索施加的预应力的计算方法是针对钢筋混凝土的,需要根据钢筋的数量及型号来进行计算,没有供砌体结构使用的计算方法。而古建筑中没有钢筋混凝土,只有木结构以及砌体结构,用预应力拉索对古建筑进行强化改造,主要体现在对古建筑中的砌体结构进行加固,因此有必要开发一种可应用于砌体结构的计算方法。

### 发明内容

[0006] 本发明提供用于古建筑砌体柱的防震拉索的选取方法及防震拉索系统。

[0007] 解决的技术问题是:目前的预应力拉索中需要加载的预应力的计算方法是针对钢筋混凝土的,没有供砌体结构使用的计算方法。

[0008] 为解决上述技术问题,本发明采用如下技术方案:用于古建筑砌体柱的防震拉索的选取方法,包括以下步骤:

[0009] 步骤一:建立包含拉索在内的砌体柱的分析模型;

[0010] 步骤二:设定分析模型中拉索的横截面积以及预应力;

[0011] 步骤三:在分析模型中的砌体柱顶部从零开始施加水平荷载直至砌体柱被破坏,若水平荷载增加过程中砌体柱中的砌块承受的压应力一直不超过砌块的抗压强度,则进入步骤四;否则返回步骤二;

[0012] 步骤四:根据施工工艺对拉索强度余量的要求分别判断拉索在水平荷载增加过程中横截面积是否达标,若达标,则进入步骤五,否则返回步骤二;

[0013] 步骤五:在分析模型中的砌体柱底部施加水平的地震加速度时程,得出砌体柱在地震作用下受到的最大剪力、以及最大水平变形量与砌体柱高度的比值;

[0014] 步骤六:根据步骤四、步骤五的计算结果,从水平承载力安全度和水平变形量延性控制方面判定步骤二中设置的预应力值是否达标,若达标,则记录横截面积以及预应力,否则返回步骤二。

[0015] 进一步,步骤一中,建立包含拉索在内的砌体柱的三维实体离散元分析模型,建模时计入砌体柱自重及砌体柱所承载的上层结构的重量;建立的分析模型中砌块与砌块之间的连接单元包括砌块间的粘结强度和摩擦力参数。

[0016] 进一步,步骤二中,采用初应变或施加负温度的方法对拉索施加预应力,采用改变拉索的横截面积及弹性模量的方式改变拉索的抗拉强度,每根拉索中的预应力 $\sigma \leq 0.2\sigma_u$ , $\sigma_u$ 为拉索的抗拉强度;拉索对砌体柱产生的附加压应力值 $\sigma_z \leq 0.15\text{Mpa}$ 。

[0017] 进一步,步骤三中,采用荷载增量法进行砌体柱结构全过程材料弹塑性和几何非线性仿真分析,求解过程中计入结构体系的几何非线性影响。

[0018] 进一步,步骤四包括以下分步骤:

[0019] 步骤4.1:以砌体柱的水平变形量 $S$ 为自变量,水平荷载 $F$ 为因变量,绘制分析模型中的 $F$ - $S$ 函数曲线,并得出 $F$ - $S$ 函数曲线上线性区间里水平荷载的最大值 $F_k$ ,砌体柱开始屈服时的水平荷载 $F_y$ 及水平变形量 $S_y$ ,砌体柱被破坏时的水平荷载 $F_u$ 及水平变形量 $S_u$ ;

[0020] 步骤4.2:根据施工工艺对拉索强度余量的要求分别判断拉索在水平荷载 $F=F_k$ 、 $F=F_y$ 、以及 $F=F_u$ 时横截面积是否达标,若达标,则进入步骤五,否则返回步骤二。

[0021] 进一步,分步骤4.1中,采用如下方法得出 $F_k$ 、 $F_y$ 、 $S_y$ 、 $F_u$ 以及 $S_u$ :

[0022] 记 $X$ 点为 $F$ - $S$ 函数曲线上任意一点, $X$ 点的横坐标水平变形量值为 $s$ ,将原点 $O$ 和 $X$ 的连线、过 $X$ 点与 $S$ 轴的垂线及 $S$ 轴围合成的三角形面积定义为 $f_1(s)$ ,将原点 $O$ 和 $X$ 点间的曲线、过 $X$ 点与 $S$ 轴的垂线及 $S$ 轴围合成的面积定义为 $f_2(s)$ ,设 $\gamma = f_1(s)/f_2(s)$ ;记 $F$ - $S$ 函数曲线上纵坐标水平荷载峰值点 $F_{\max}$ 对应的横坐标水平变形量值为 $S_1$ ,设点 $\{A_1, A_2, \dots, A_i, \dots, A_n\}$ 为 $F$ - $S$ 曲线上的点, $n > i$ ,其横坐标为 $\{1/n, 2/n, \dots, i/n, \dots, n/n\} \times S_1$ ,计算点 $\{A_1, A_2, \dots, A_i, \dots, A_n\}$ 的 $\gamma$ 值分别为 $\{\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_i, \dots, \gamma_n\}$ ,若 $\{\gamma_i, \dots, \gamma_n\}$ 均 $< \theta$ ,且 $\gamma_{i-1} \geq \theta$ ,则 $A_{i-1}$ 点的纵坐标即为 $F_k$ ;其中, $n \geq 50$ ,参数 $\theta$ 取值范围为 $0.96 \leq \theta \leq 0.98$ ;

[0023] 在 $F$ - $S$ 函数上取 $F_u$ 的最大值点 $M$ , $M$ 点的横坐标即为 $S_u$ ,纵坐标即为 $F_u$ ;

[0024] 连接原点 $O$ 和 $A_{i-1}$ 点并延长,与过 $M$ 的水平线交于 $B$ 点,过 $B$ 点向横坐标轴作垂线与 $F$ - $S$ 函数曲线交于 $Y$ 点, $Y$ 点的横坐标即为 $S_y$ ,纵坐标即为 $F_y$ ;

[0025] 分步骤4.2中,若在水平荷载 $F=F_k$ 时,拉索承受的拉应力不超过拉索的抗拉强度 $\sigma_u$ 的0.4倍,水平荷载 $F=F_y$ 时,拉索承受的拉应力不超过拉索的抗拉强度 $\sigma_u$ 的0.6倍,且水平荷载 $F=F_u$ 时,拉索承受的拉应力不超过拉索的抗拉强度 $\sigma_u$ 的0.8倍;则判定 $\sigma_u$ 达标,否则判定 $\sigma_u$ 不达标。

[0026] 进一步,步骤五中,地震加速度时程的方向沿砌体柱所承载的上层结构的跨度方向设置,并根据地震等级求取以下数据:

[0027] 砌体柱在多遇地震作用下受到的最大剪力 $V_k$ 、最大水平变形量与砌体柱高度 $H$ 的比值 $\Delta k/H$ ,在设防地震作用下最大水平变形量与砌体柱高度 $H$ 的比值 $\Delta y/H$ ,在罕遇地震作用下最大水平变形量与砌体柱高度 $H$ 的比值 $\Delta u/H$ ;求解时计入结构体系的几何非线性影

响。

[0028] 进一步,步骤六中,若 $F_u/F_y \geq 1.3$ , $S_u/S_y \geq 1.5$ , $F_k/V_k \geq 1.0$ , $\Delta k/H \leq 1/500$ , $\Delta y/H \leq 1/300$ ,且 $\Delta u/H \leq 1/200$ ,则判定预应力值达标,否则判定预应力值不达标。

[0029] 进一步,所述选取方法还包括以下步骤:

[0030] 步骤七:反复进行步骤二到步骤六,得到多组达标的预应力值,并确定达标的预应力值的取值范围。

[0031] 防震拉索系统,用于古建筑中砌体柱的防震加固,所述砌体柱为顶梁柱,所述防震拉索系统包括开口向下卡在砌体柱上方的横梁上的U形垫板、中部挂设在U形垫板上表面且两端锚固在固定基础上的拉索;

[0032] 所述拉索通过扣件与U形垫板连接,且在扣件松弛时与U形垫板滑动连接,在扣件锁紧时与U形垫板固定连接;

[0033] 所述拉索的横截面积以及加载的预应力采用上述的选取方法来选取。

[0034] 本发明用于古建筑砌体柱的防震拉索的选取方法及防震拉索系统与现有技术相比,具有如下有益效果:

[0035] 本发明中,通过建立包含拉索在内的砌体柱的三维实体离散元分析模型,而非将砌体柱作为一个整体来分析受力状况,分析了砌体柱中的砌块在水平负载作用下的受力情况,并要求选择的拉索能够使砌块承受的压应力一直不超过砌块的抗压强度,避免了拉索加入后对砌体柱造成破坏,且避免了像现有的古建筑加固装置那样使古建筑在地震中受到的破坏加重。

[0036] 本发明中,选择拉索过程中,不仅考量强度,而且将 $F_u/F_y$ , $S_u/S_y$ 等与延性相关的量纳入考量,考量了拉索加入后,砌体柱延性的变化,使拉索既能保证砌体柱的结构强度,又能使砌体柱具有一定的延性耗能能力。

[0037] 本发明中,选择拉索过程中,考量了拉索加入后在不同等级的地震作用下砌体柱的变形状况,使砌体柱能够在不同等级的地震作用下,不出现失稳或破坏。

[0038] 本发明提出用于古建筑砌体柱的防震拉索的选取方法及防震拉索系统,能够用来选取设置在砌体柱顶部的拉索所需的横截面积以及应加载的预应力的值,填补了该领域的空白,使拉索能够强化砌体柱的抗震能力的同时保留砌体柱的延性性能,应用于古建筑加固可在符合建筑修缮保护最小干预且可逆原则的前提下完成加固。

## 附图说明

[0039] 图1为防震拉索系统的结构示意图;

[0040] 图2为砌体柱的横截面示意图;

[0041] 图3为F-S函数曲线图;

[0042] 图4为1952Taft Lincoln School地震加速度时程曲线

[0043] 其中,1-砌体柱,2-横梁,3-U形垫板,4-扣件,5-拉索。

## 具体实施方式

[0044] 如图1所示,防震拉索系统,用于古建筑中砌体柱1的防震加固,砌体柱1为顶梁柱,防震拉索系统包括开口向下卡在砌体柱1上方的横梁2上的U形垫板3、中部挂设在U形垫板3

上表面且两端锚固在固定基础上的拉索5;U形垫板3内侧应加工为糙面,以免在梁上打滑,此外U形垫板3内侧应垫一些软垫,以免压坏横梁2;

[0045] 本实施例中,拉索5两端通过带锚筋的预埋板锚固在混凝土基础中,拉索5通过耳板及销轴与带锚筋的预埋板铰接连接;

[0046] 拉索5通过扣件4与U形垫板3连接,且在扣件4松弛时与U形垫板3滑动连接,在扣件4锁紧时与U形垫板3固定连接;这种结构的好处在于便于在安装时使整根拉索5中预应力均匀。

[0047] 本实施例中的扣件4为设置在U形垫板3的棱上的夹板,U形垫板3每个棱上设置一对夹板,每对夹板通过螺栓扣合,拉索5被夹在夹板中,且夹板上开设有在夹板夹紧后与拉索5过盈配合的凹槽;每对夹板中的一块板焊在U形垫板3上;

[0048] 本实施例中U形垫板3、扣件4、螺栓、耳板、以及销轴为Q345B级钢材;带锚筋的预埋板中,顶板材质为材质Q345B级钢材,锚筋材质为HRB400级钢筋;拉索5材质为锌-5%铝-稀土合金镀层高强钢索。

[0049] 拉索5的横截面积以及加载的预应力采用下述的选取方法来选取:

[0050] 步骤一,选取一榀古建筑砌体柱1及上部木屋架结构,利用ABAQUS软件建立三维实体离散分析模型。砌体柱1高度 $H=4.08\text{m}$ ,砌体柱1截面如图2。砌块的弹性模量 $E_1=2\times 10^4\text{MPa}$ 、抗压强度 $f_{k_1}=5\text{MPa}$ ,材料容重为 $18\text{KN/m}^3$ ,砌筑砂浆的弹性模量 $E_2=6\times 10^3\text{MPa}$ 、抗压强度 $f_{k_2}=1.2\text{MPa}$ ,材料容重为 $16\text{KN/m}^3$ ,砌块与砌筑砂浆间摩擦系数 $\mu_1=0.7$ 以及粘结强度 $c=0.5\text{MPa}$ 。带锚筋的预埋板中的顶板采用Q345B级钢材相关参数,拉索5横截面为圆形,抗拉强度 $\sigma_u=1670\text{MPa}$ 、弹性模量 $E_3=1.6\times 10^5\text{MPa}$ ,U形垫板3与横梁2间摩擦系数 $\mu_2=0.35$ 。步骤二,根据设计经验选取一组或几组拉索5的横截面积以及预应力的值,这里对步骤一分析模型中的拉索5以满足对砌体柱1产生的附加压应力值 $\sigma_z\leq 0.25\text{MPa}$ ,拉索5承受的拉应力 $\sigma\leq 0.2\sigma_u$  ( $\sigma_u$ 为拉索5抗拉强度极限值)为条件,采用初应变的方法分别施加预应力,施加的应变值及选取拉索5直径如下表所示,形成4个分析模型。

[0051] 表1四个模型的概况

模型编号	拉索5直径 (mm)	预应力值 (KN)	应变值 $\epsilon$	对砌体柱1产生的附加压应力值 $\sigma_z$ (MPa)	预应力 $\sigma$ (MPa)
[0052] m <sub>1</sub>	16	20	0.00062172	0.057	99.5
m <sub>2</sub>	20	40	0.00079580	0.114	127.4
m <sub>3</sub>	24	60	0.00082896	0.171	132.7
m <sub>4</sub>	28	80	0.00081204	0.228	130.0

[0053] 步骤三,根据步骤一、二建立的4个模型,分别在砌体柱1顶部施加水平荷载,采用荷载增量法进行砌体柱1结构全过程材料弹塑性和几何非线性仿真分析,水平荷载从零逐步增加至砌体柱1被破坏。分析采用Newton-Raphson非线性迭代方法求解,计入结构体系的几何非线性影响,砌块采用素混凝土Drucker-Prager弹塑性模型。在加载全过程中,4个分析模型中,砌块承受的最大压应力 $f_q$ 分别为 $2.0\text{MPa}$ 、 $2.8\text{MPa}$ 、 $3.5\text{MPa}$ 、 $4.6\text{MPa}$ ,满足 $f_q < f_{k_1} = 5\text{MPa}$ , $f_{k_1}$ 为砌体的抗压强度。古建筑采用的烧结砖的参数与素混凝土砖相近,且目前还没有烧结砖的模型,因此本实施例中选用成熟的素混凝土Drucker-Prager弹塑性模型来模拟砌块。

[0054] 步骤四,根据步骤三分析计算结果,绘制4个模型中砌体柱1顶部水平荷载 $F$ 与砌体柱1顶部水平变形量 $S$ 的函数曲线,如图3所示。砌体柱1被破坏时的水平荷载 $F_u$ 及水平变形量 $S_u$ ;

[0055] 称 $F-S$ 函数曲线上水平荷载为 $F_k$ 的点为最大线性水平承载力性能点,称 $F-S$ 函数曲线上水平荷载为 $F_y$ 的点为水平承载力屈服点,称 $F-S$ 函数曲线上水平荷载为 $F_u$ 的点为水平承载力极值点。采用如下方法得出: $F_k$ 、 $F_y$ 、 $S_y$ 、 $F_u$ 以及 $S_u$

[0056] 记 $X$ 点为 $F-S$ 函数曲线上任意一点, $X$ 点的横坐标水平变形量值为 $s$ ,将原点 $O$ 和 $X$ 的连线、过 $X$ 点与 $S$ 轴的垂线及 $S$ 轴围合成的三角形面积定义为 $f_1(s)$ ,将原点 $O$ 和 $X$ 点间的曲线、过 $X$ 点与 $S$ 轴的垂线及 $S$ 轴围合成的面积定义为 $f_2(s)$ ,设 $\gamma = f_1(s)/f_2(s)$ ;记 $F-S$ 函数曲线上纵坐标水平荷载峰值点 $F_{\max}$ 对应的横坐标水平变形量值为 $S_1$ ,设点 $\{A_1, A_2, \dots, A_i, \dots, A_n\}$ 为 $F-S$ 曲线上的点, $n > i$ ,其横坐标为 $\{1/n, 2/n, \dots, i/n, \dots, n/n\} \times S_1$ ,计算点 $\{A_1, A_2, \dots, A_i, \dots, A_n\}$ 的 $\gamma$ 值分别为 $\{\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_i, \dots, \gamma_n\}$ ,若 $\{\gamma_i, \dots, \gamma_n\}$ 均 $< \theta$ ,且 $\gamma_{i-1} \geq \theta$ ,则 $A_{i-1}$ 点的纵坐标即为 $F_k$ ;其中, $n \geq 50$ ,参数 $\theta$ 取值范围为 $0.96 \leq \theta \leq 0.98$ ;

[0057] 设置参数 $\theta$ 的目的是避开 $F-S$ 函数曲线上的波动区域,本实施例中 $\theta$ 取 $0.97$ , $n$ 取 $100$ 。模型1的 $F-S$ 函数曲线,经计算, $\{\gamma_{21}, \dots, \gamma_{100}\}$ 最大值为 $0.969 < 0.97$ , $\gamma_{20} = 0.973 \geq 0.97$ ,将 $A_{20}$ 点作为砌体柱1的最大线性水平承载力性能点;将原点 $O$ 和 $A_{20}$ 点连线的延长线与过水平承载力极值点 $M_1$ 的水平线交于 $B_1$ 点,再过 $B_1$ 点向横坐标轴作垂线与 $F-S$ 函数曲线交于 $Y_1$ 点,将 $Y_1$ 点作为砌体柱1的水平承载力屈服点;水平承载力极值点 $M_1$ 作为砌体柱1的破坏点。

[0058] 模型2的 $F-S$ 函数曲线,经计算, $\{\gamma_{26}, \dots, \gamma_{100}\}$ 最大值为 $0.967 < 0.97$ , $\gamma_{25} = 0.971 \geq 0.97$ ,将 $A_{25}$ 点作为砌体柱1的最大线性水平承载力性能点;将原点 $O$ 和 $A_{24}$ 点连线的延长线与过水平承载力极值点 $M_2$ 的水平线交于 $B_2$ 点,再过 $B_2$ 点向横坐标轴作垂线与 $F-S$ 函数曲线交于 $Y_2$ 点,将 $Y_2$ 点作为砌体柱1的水平承载力屈服点;水平承载力极值点 $M_2$ 作为砌体柱1的破坏点。

[0059] 模型3的 $F-S$ 函数曲线,经计算, $\{\gamma_{29}, \dots, \gamma_{100}\}$ 最大值为 $0.968 < 0.97$ , $\gamma_{28} = 0.972 \geq 0.97$ ,将 $A_{28}$ 点作为砌体柱1的最大线性水平承载力性能点;将原点 $O$ 和 $A_{28}$ 点连线的延长线与过水平承载力极值点 $M_3$ 的水平线交于 $B_3$ 点,再过 $B_3$ 点向横坐标轴作垂线与 $F-S$ 函数曲线交于 $Y_3$ 点,将 $Y_3$ 点作为砌体柱1的水平承载力屈服点;水平承载力极值点 $M_3$ 作为砌体柱1的破坏点。

[0060] 模型4的 $F-S$ 函数曲线,经计算, $\{\gamma_{35}, \dots, \gamma_{100}\}$ 最大值为 $0.969 < 0.97$ , $\gamma_{34} = 0.971 \geq 0.97$ ,将 $A_{34}$ 点作为砌体柱1的最大线性水平承载力性能点;将原点 $O$ 和 $A_{34}$ 点连线的延长线与过水平承载力极值点 $M_4$ 的水平线交于 $B_4$ 点,再过 $B_4$ 点向横坐标轴作垂线与 $F-S$ 函数曲线交于 $Y_4$ 点,将 $Y_4$ 点作为砌体柱1的水平承载力屈服点;水平承载力极值点 $M_4$ 作为砌体柱1的破坏点。

[0061] 本实施例中,拉索5施加4个预应力值模型中砌体柱1的最大线性水平承载力 $\{F_{k1} = 4.12\text{KN}, F_{k2} = 6.41\text{KN}, F_{k3} = 10.32\text{KN}, F_{k4} = 12.91\text{KN}\}$ 、屈服水平承载力 $\{F_{y1} = 6.68\text{KN}, F_{y2} = 9.28\text{KN}, F_{y3} = 12.59\text{KN}, F_{y4} = 15.91\text{KN}\}$ 、屈服水平变形量值 $\{S_{y1} = 9.47\text{mm}, S_{y2} = 8.42\text{mm}, S_{y3} = 7.17\text{mm}, S_{y4} = 5.72\text{mm}\}$ 、极限水平承载力 $\{F_{u1} = 9.51\text{KN}, F_{u2} = 12.47\text{KN}, F_{u3} = 16.5\text{KN}, F_{u4} = 19.74\text{KN}\}$ 及极限水平变形量值 $\{S_{u1} = 20.25\text{mm}, S_{u2} = 16.32\text{mm}, S_{u3} = 13.96\text{mm}, S_{u4} = 10.92\text{mm}\}$ 。



[0062] 得出三个性能点后,校核拉索5横截面积是否达标,标准为:水平荷载 $F=F_k$ 时,拉索5承受的拉应力不超过拉索5的抗拉强度 $\sigma_u$ 的0.4倍,水平荷载 $F=F_y$ 时,拉索5承受的拉应力不超过拉索5的抗拉强度 $\sigma_u$ 的0.6倍,且水平荷载 $F=F_u$ 时,拉索5承受的拉应力不超过拉索5的抗拉强度 $\sigma_u$ 的0.8倍。

[0063] 表2 拉索5在三个性能点处承受的拉应力(MPa)

模型编号	最大线性水平承载力性能点处	水平承载力屈服点处	破坏点处
[0064] m <sub>1</sub>	394	690	905
m <sub>2</sub>	468	758	1050
m <sub>3</sub>	489	821	1168
m <sub>4</sub>	502	833	1154

[0065] 4个分析模型中拉索5在三个性能点处承受的拉应力如表2所示,可见其满足下列要求:①最大线性水平承载力性能点处,拉索5承受的拉应力 $\sigma$ 应 $0 < \sigma \leq 0.4\sigma_u = 668\text{MPa}$ , $\sigma_u$ 为拉索5抗拉强度极限值为1670MPa;②水平承载力屈服点处,拉索5承受的拉应力 $\sigma$ 应 $0 < \sigma \leq 0.6\sigma_u = 1002\text{MPa}$ ;③破坏点处,拉索5承受的拉应力 $\sigma$ 应 $0 < \sigma \leq 0.8\sigma_u = 1336\text{MPa}$ 。

[0066] 步骤五,根据步骤一、二建立的4个分析模型,按抗震设防烈度为8度0.2g,选取1952Taft Lincoln School地震加速度时程,如图4所示,在砌体柱1底面沿上部木屋盖结构跨度方向施加水平地震加速度时程进行时程分析。将1952 Taft Lincoln School地震加速度时程峰值调整为如下数值:①多遇地震作用地震时程加速度峰值 $70\text{cm/s}^2$ ;②设防地震作用地震时程加速度峰值 $200\text{cm/s}^2$ ;③罕遇地震作用地震时程加速度峰值 $400\text{cm/s}^2$ 。非峰值点加速度应按照上述三种情况设定的加速度峰值与原1952 Taft Lincoln School地震时程加速度峰值的比值同比例调整。分析采用Newton-Raphson非线性迭代方法求解,计入结构体系的几何非线性影响,砌块采用素混凝土Drucker-Prager弹塑性模型。

[0067] 本实施例中,4个分析模型中砌体柱1在多遇地震作用下最大剪力 $\{V_{k1}=5.62\text{KN}, V_{k2}=6.24\text{KN}, V_{k3}=6.85\text{KN}, V_{k4}=7.42\text{KN}\}$ 、最大水平变形量与砌体柱1高度H的比值 $\{\Delta k_1/H=1/535, \Delta k_2/H=1/656, \Delta k_3/H=1/708, \Delta k_4/H=1/741\}$ ,在设防地震作用下最大水平变形量与砌体柱1高度H的比值 $\{\Delta y_1/H=1/253, \Delta y_2/H=1/318, \Delta y_3/H=1/365, \Delta y_4/H=1/402\}$ ,在罕遇地震作用下最大水平变形量与砌体柱1高度H的比值 $\{\Delta u_1/H=1/193, \Delta u_2/H=1/263, \Delta u_3/H=1/301, \Delta u_4/H=1/353\}$ , $H=4.08\text{m}$ 。

[0068] 步骤六,根据步骤四、五的计算结果,从水平承载力安全度和水平变形量延性控制方面判定,从对拉索5施加不同预应力值的m个分析模型中挑选出满足指标控制要求的模型:

[0069]  $\{F_{u1}/F_{y1}=1.42, F_{u2}/F_{y2}=1.34, F_{u3}/F_{y3}=1.31, F_{u4}/F_{y4}=1.24\}$

[0070]  $\{S_{u1}/S_{y1}=2.14, S_{u2}/S_{y2}=1.94, S_{u3}/S_{y3}=1.95, S_{u4}/S_{y4}=1.91\}$

[0071]  $\{F_{k1}/V_{k1}=0.73, F_{k2}/V_{k2}=1.03, F_{k3}/V_{k3}=1.51, F_{k4}/V_{k4}=1.74\}$

[0072]  $\{\Delta k_1/H=1/535, \Delta k_2/H=1/656, \Delta k_3/H=1/708, \Delta k_4/H=1/741\}$

[0073]  $\{\Delta y_1/H=1/253, \Delta y_2/H=1/318, \Delta y_3/H=1/365, \Delta y_4/H=1/402\}$

[0074]  $\{\Delta u_1/H=1/193, \Delta u_2/H=1/263, \Delta u_3/H=1/301, \Delta u_4/H=1/353\}$

[0075] 以 $F_{um}/F_{ym} \geq 1.3$ ,  $S_{um}/S_{ym} \geq 1.5$ 为控制目标,模型 $m_1$ 、 $m_2$ 、 $m_3$ 中拉索5施加预应力值取20KN、40KN、60KN的砌体柱1满足控制目标要求,模型 $m_4$ 不满足要求。判定模型 $m_1$ 、 $m_2$ 、 $m_3$ 中拉索5施加预应力值取20KN、40KN、60KN合理,模型 $m_4$ 中拉索5施加预应力值取80KN不合理。

[0076] 以 $F_{km}/V_{km} \geq 1.0$ ,  $\Delta k_m/H \leq 1/500$ ,  $\Delta y_m/H \leq 1/300$ ,  $\Delta u_m/H \leq 1/200$ 为控制目标,模型 $m_2$ 、 $m_3$ 、 $m_4$ 中拉索5施加预应力值取40KN、60KN、80KN的砌体柱1满足控制目标要求,模型 $m_1$ 不满足要求。判定模型 $m_2$ 、 $m_3$ 、 $m_4$ 中拉索5施加预应力值取40KN、60KN、80KN合理,模型 $m_1$ 中拉索5施加预应力值取20KN不合理。

[0077] 步骤七,根据步骤六的结果,本实施例对拉索5施加预应力值的合理范围为40KN~60KN。此外,绝大多数时候U形垫板3与横梁2间摩擦系数能够使U形垫板3在使用中不打滑,但若横梁2上表面十分光滑,U形垫板3依然存在打滑的可能,此时需通过U形垫板3的位移状况校验U形垫板3与横梁2间摩擦系数,以本实施例为例,方法如下:

[0078] 记录步骤四中U形垫板3与横梁2间相对位移,4个模型中U形垫板3与横梁2间相对位移在三个性能点处如表3所示:

[0079] 表3 U形垫板3与横梁2间相对位移 (mm)

模型编号	最大线性水平承载力性能点处	水平承载力屈服点处	破坏点处
[0080] $m_1$	0	4.5	8.6
$m_2$	0	3.2	6.9
$m_3$	0	2.6	5.7
[0081] $m_4$	0	2.4	5.3

[0082] U形垫板3与横梁2间相对位移应满足下列要求:①最大线性水平承载力性能点处,U形垫板3与横梁2间不能发生相对位移;②水平承载力屈服点处,U形垫板3与横梁2间发生相对位移 $u \leq 5\text{mm}$ ;③破坏点处,U形垫板3与横梁2间发生相对位移 $u \leq 10\text{mm}$ 。

[0083] 可见本实施例中U形垫板3与横梁2间摩擦系数满足要求,但若不满足,则需返回步骤一,更改U形垫板3与横梁2间摩擦系数(施工时也要同步增加U形垫板3内侧的粗糙度),重新建模。

[0084] 以上所述的实施例仅仅是对本发明的优选实施方式进行了描述,并非对本发明的范围进行限定,在不脱离本发明设计精神的前提下,本领域普通技术人员对本发明的技术方案作出的各种变形和改进,均应落入本发明权利要求书确定的保护范围内。

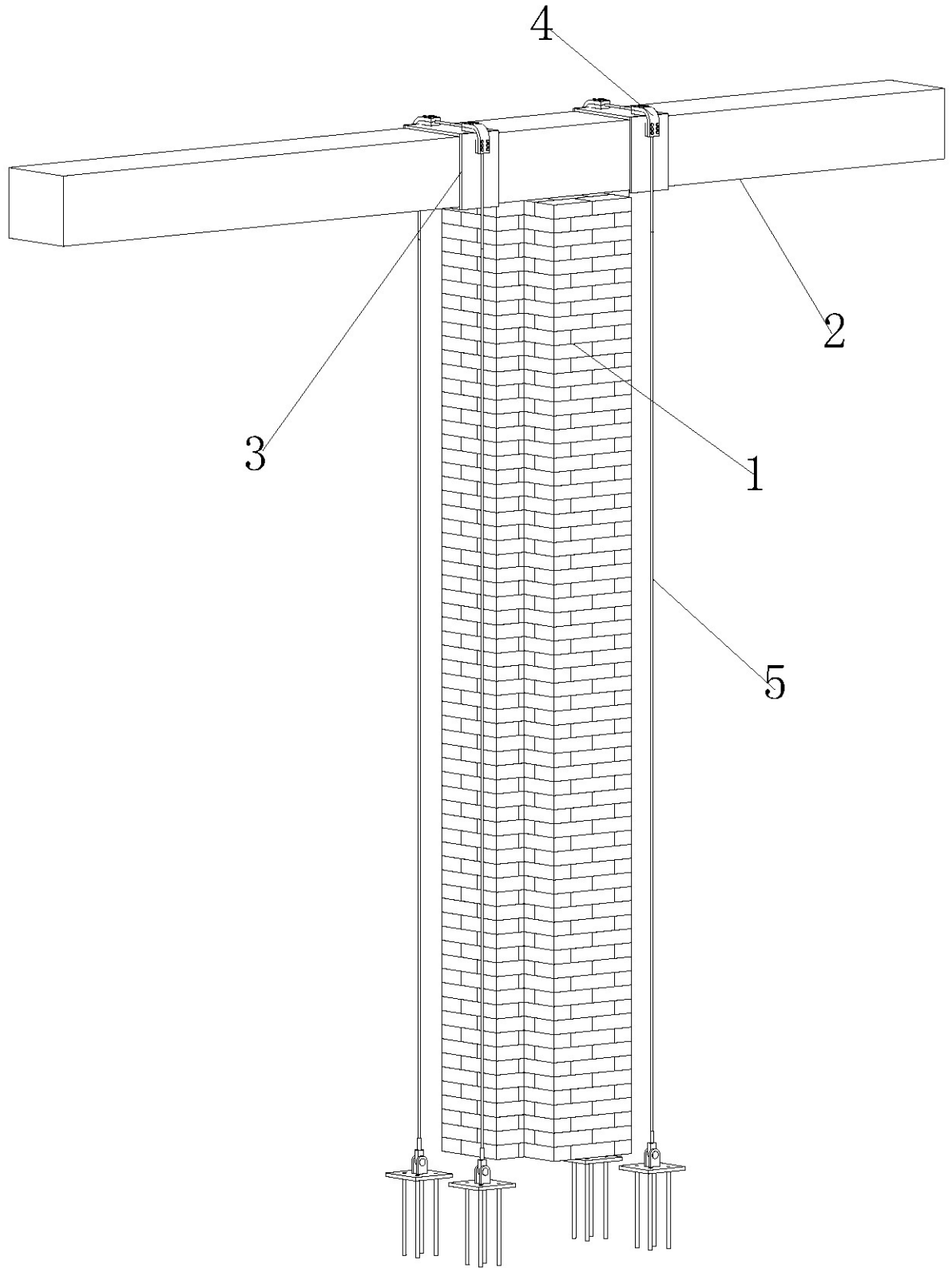


图 1

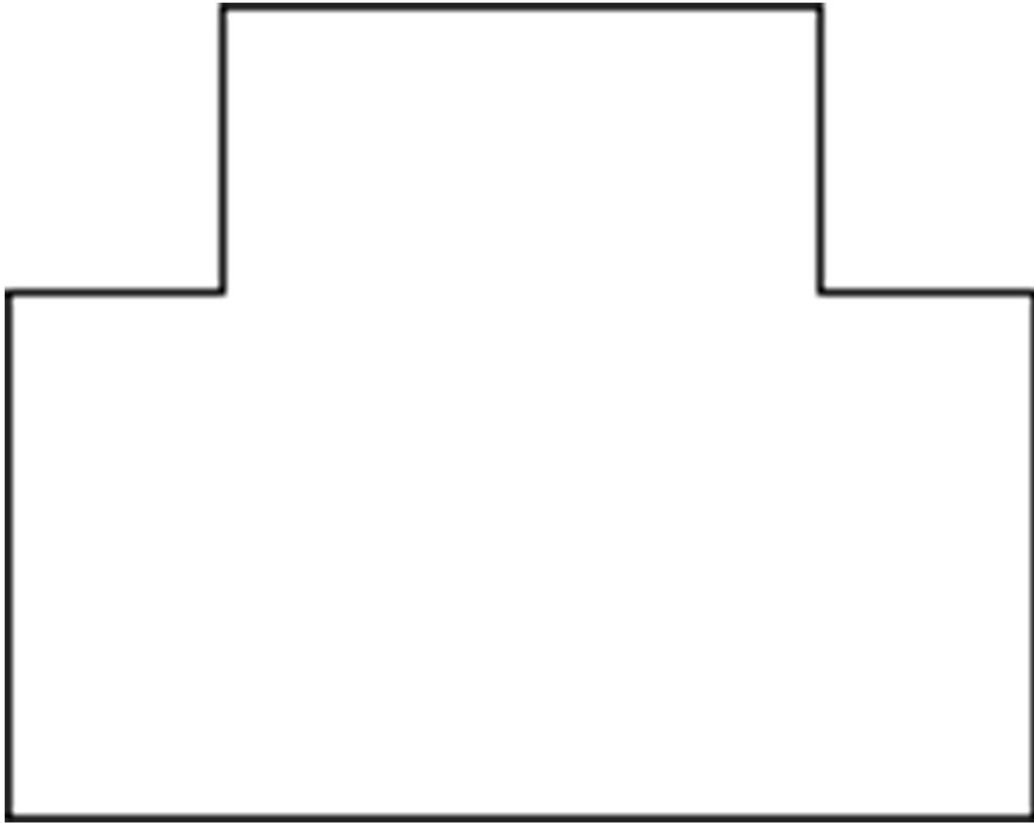


图 2

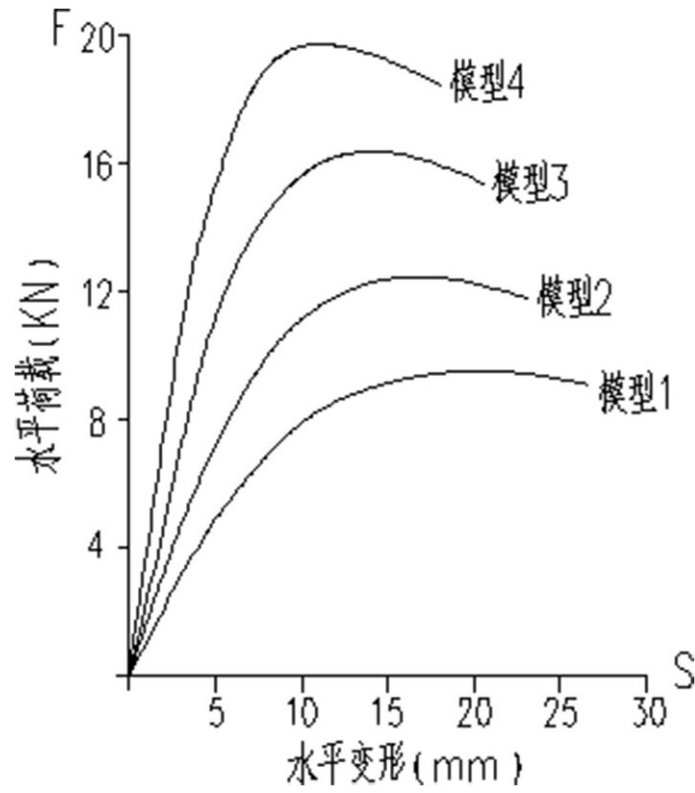


图 3

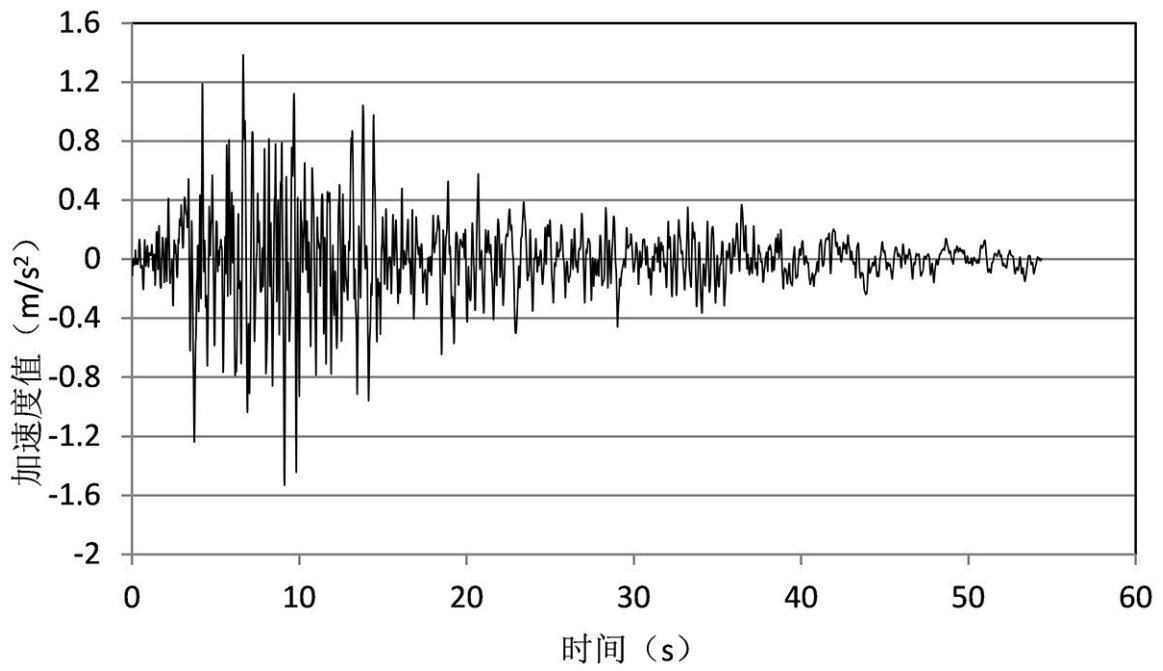


图 4