

文章编号: 1000-4750(2013)11-0202-05

往复荷载作用下自复位墙受力机理研究

胡晓斌, 贺慧高

(武汉大学土木建筑工程学院, 武汉 430072)

摘 要: 该文以自复位墙作为研究对象, 将其简化成一刚体, 分别仅考虑自重、考虑预应力筋影响及同时考虑预应力筋和阻尼器的影响, 通过理论推导得出了往复荷载作用下的水平力-转角曲线, 研究了其在往复荷载作用下的受力机理。研究表明: 自复位墙墙体自重和预应力筋共同提供自复位能力, 阻尼器提供耗能能力; 自复位墙的力学性能与墙体几何尺寸、预应力筋及阻尼器参数有关。

关键词: 自复位墙; 预应力筋; 阻尼器; 受力机理; 耗能

中图分类号: TU352 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2012.07.0558

STUDY ON THE MECHANICAL BEHAVIOR OF SELF-CENTERING WALL UNDER CYCLIC LOADING

HU Xiao-bin, HE Hui-gao

(School of Civil and Architecture Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The self-centering wall is simplified as a rigid body, while the horizontal load vs. rotation curve of the self-centering wall subjected to cyclic loading is obtained by theoretical derivation. Three cases are taken into account to investigate the mechanical behavior of the self-centering wall, i.e. only considering the self-weight of the self-centering wall, considering the effect of prestressed tendons, and considering both the influence of prestressed tendons and dampers. The study presented in this paper indicates that for the self-centering wall, the prestressed tendons provide the self-centering ability along with the gravity of the wall, while the dampers can dissipate energy. In addition, the mechanical performance of the self-centering wall depends on the dimensions of wall, the design parameters of prestressed tendons and dampers.

Key words: self-centering wall; prestressed tendon; damper; mechanical behavior; energy dissipation

近年来, 自复位结构引起了研究者和工程技术人员的高度重视。和传统的抗震结构相比, 自复位结构最为突出的特点在于卸载后变形能完全或基本恢复。在强震作用下, 自复位结构基本不产生残余变形, 震后不需或经少量的维修即可恢复正常使用^[1-7]。自复位结构体系可分为三种类型, 即自复位框架结构、自复位墙结构和自复位支撑框架结构, 其中自复位墙主要由三部分组成: 墙体、后张拉无粘结预应力筋和阻尼器。与普通的抗震墙不同, 自复位墙在墙底(或沿墙高)设置水平缝, 在水平荷载作用下, 墙体能绕墙底两端产生微小的转

动, 即所谓的摇摆响应。

为探明自复位墙的力学机理, 从而为自复位墙的设计提供依据, 部分研究者对其力学性能开展了深入的研究, 其研究思路基本上是将其简化成一个刚体, 然后利用理论或数值分析的手段进行分析。Armouti^[8]首先研究了自复位混凝土墙在水平荷载作用下的滞回性能, 在其分析模型中, 混凝土墙简化成一个刚体, 预应力筋采用弹簧来模拟, 墙底与基础之间的接触采用位于两端的只受压元件来考虑。在 Armouti 工作的基础上, Kurama^[9]进一步考虑了预应力筋的应变硬化和包辛格效应, 采用类似

收稿日期: 2012-07-30; 修改日期: 2012-10-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(51208386); 湖北省自然科学基金项目(2011CDB266); 武汉大学引进人才科研启动项目(273528)

通讯作者: 胡晓斌(1979—), 男, 湖北人, 副教授, 博士, 从事结构抗震研究(E-mail: newhxb@126.com).

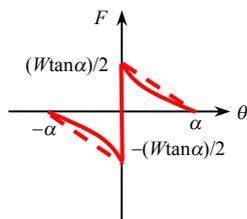
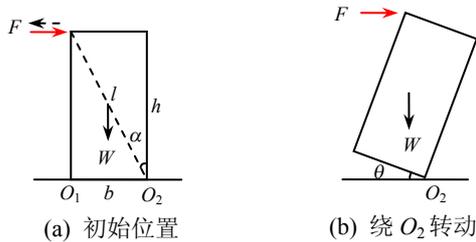
作者简介: 贺慧高(1989—), 男, 湖北人, 硕士生, 从事结构抗震研究(E-mail: 929469039@qq.com).

的分析模型得到了自复位混凝土墙的水平荷载-位移滞回曲线。Perez^[10-12]对自复位混凝土墙进行了单调水平荷载作用下的受力分析,给出了简化的三线型荷载-位移骨架曲线,并推导了相应特征点荷载及位移的表达式。

值得注意的是,以上的研究所涉及的自复位混凝土墙并未布置阻尼器,而阻尼器对于提高自复位墙的耗能能力具有重要意义。因此,本文借鉴前人的研究方法,同时考虑预应力筋和阻尼器的影响,研究往复荷载作用下自复位墙的受力机理,探讨各组成部分对其力学性能的影响,从而为相关的后续研究提供重要的理论基础。

1 仅考虑自重时自复位墙的力学性能

本节忽略预应力筋及阻尼器的影响,研究仅在自重作用下的自复位墙的力学性能。如图 1(a)所示,将自复位墙简化成一刚体进行分析,其中 F 、 W 分别表示水平力和墙体自重, l 、 b 及 h 分别表示墙体对角线长度、宽度及高度, α 表示墙体对角线与墙高的夹角。设水平力向右为正。



(c) 水平力-转角曲线

图 1 仅考虑自重时自复位墙的力学性能

Fig.1 Mechanical performance of self-centering wall only considering its self-weight

1.1 转动临界荷载

设 F 由零向右(如图 1 中实线箭头所示)增大至转动临界荷载 F_{cr} 时,墙体开始绕 O_2 点顺时针转动,该值由下式确定:

$$F_{cr}h = W \frac{b}{2} \quad (1)$$

可得:

$$F_{cr} = W \frac{b}{2h} = \frac{W}{2} \tan\alpha \quad (2)$$

式中, α 表示墙体对角线与墙高的夹角。

1.2 水平力-转角曲线

当 $F > F_{cr}$ 时,墙体绕 O_2 点转动,设其转角为 θ ,且逆时针为正,如图 1(b)所示。对 O_2 点由力矩平衡方程可得:

$$Fl \cos(\alpha - \theta) = W \frac{l}{2} \sin(\alpha - \theta) \quad (3)$$

可解出:

$$F = \frac{W}{2} \tan(\alpha - \theta) \quad (4)$$

由式(4)可得自复位墙水平力-转角曲线,如图 1(c)第一象限中实线所示。

当墙体处于临界倾覆状态时,即 $F=0$,代入式(4)可求得临界倾覆转角 θ_{cr} :

$$\theta_{cr} = \alpha \quad (5)$$

当 $(\alpha - \theta)$ 很小时,式(4)可简化为:

$$F = \frac{W}{2} (\alpha - \theta) \quad (6)$$

此时,水平力-转角曲线为线性,如图 1(c)第一象限中虚线所示,则自复位墙的整体刚度可取为:

$$k_w = \frac{dF}{d\theta} = -\frac{W}{2} \quad (7)$$

当向左施加水平力时(如图 1(a)中虚线箭头所示),墙体绕 O_1 点逆时针转动。同上述推导过程,可得水平力-转角曲线与向右施加水平力时的曲线关于原点对称,如图 1(c)中第三象限所示。

1.3 讨论

当前述可得仅考虑自重影响时,自复位墙受力性能具有如下特点: 1) 当水平力增大至转动临界荷载之前,墙体转角为零,此时墙体整体刚度为无穷大; 2) 当墙体发生转动后,自复位墙整体刚度为负,其绝对值单调减小或基本不变(线性情况); 3) 当卸载后,体系无残余变形,表明自复位墙能通过墙体的自重实现自复位性能; 4) 自复位墙水平力-转角曲线为一非线性弹性曲线,因此不具备滞回耗能能力。

2 预应力筋对自复位墙力学性能的影响

本节仅考虑预应力筋影响,忽略阻尼器作用,以考察预应力筋对自复位墙力学性能的影响,如图 2(a)所示,其中 F_{p0} 表示预应力筋的初始力。为简化起见,假设受力过程中预应力筋始终保持弹性状态,其弹性刚度为 k_p 。

2.1 转动临界荷载

当 F 由零增大至转动临界荷载 F_{cr} 时, 墙体开始绕 O_2 点顺时针转动。对 O_2 点取矩, 由力矩平衡条件可得:

$$F_{cr}h = (W + F_{p0})\frac{b}{2} \quad (8)$$

可解得:

$$F_{cr} = \frac{W + F_{p0}}{2} \tan \alpha \quad (9)$$

对比式(2)及式(9)可得, 当考虑预应力筋影响时, 自复位墙转动临界荷载得到提高, 其增加的大小与预应力筋初始力成正比。

2.2 水平力-转角曲线

当 $F \geq F_{cr}$ 时, 墙体绕 O_2 点转动, 如图 2(b)所示。当 $\theta \leq \alpha$ 时, 对 O_2 点由力矩平衡方程可得:

$$F \frac{b}{\sin \alpha} \cos(\alpha - \theta) = W \frac{b}{2 \sin \alpha} \sin(\alpha - \theta) + \left(F_{p0} + k_p b \sin \frac{\theta}{2} \right) \frac{b}{2} \cos \frac{\theta}{2} \quad (10)$$

可解得:

$$F = \frac{1}{2} W \tan(\alpha - \theta) + \frac{1}{2} \left(F_{p0} + k_p b \sin \frac{\theta}{2} \right) \sin \alpha \cos \frac{\theta}{2} \sec(\alpha - \theta) \quad (11)$$

由于 $0 \leq \theta \leq \pi/2, 0 \leq \alpha \leq \pi/2, -\pi/2 \leq \alpha - \theta \leq \pi/2$, 所以 $\sec(\alpha - \theta) > 0$, 则式(11)中第二项大于 0。对比式(4)、式(11)可知, 当考虑预应力筋影响时, 自复位墙恢复力得到提高, 增加量即为式(11)中第二项, 其大小不仅与预应力筋的初始力和弹性刚度有关, 而且与墙体的几何尺寸有关。

当墙体处于临界倾覆状态时, 即 $F=0$, 代入式(11)可求得临界倾覆转角 θ_{cr} :

$$\theta_{cr} = \alpha + \arctan \frac{\left(F_{p0} + k_p b \sin \frac{\theta}{2} \right) \sin \alpha \cos \frac{\theta}{2} \sec(\alpha - \theta)}{W} \quad (12)$$

同前述理由, 可知式(12)中第二项大于 0, 则 $\theta_{cr} > \alpha$, 对比式(5)可知预应力筋的存在可以提高自复位墙体的临界倾覆转角。

当 $\alpha、\theta$ 及 $(\alpha - \theta)$ 都很小时, 式(11)可简化为:

$$F = \frac{W + F_{p0}}{2} \alpha + \frac{k_p b \alpha - 2W}{4} \theta \quad (13)$$

由式(7), 自复位墙的整体刚度可取为:

$$k_w = \frac{k_p b \alpha}{4} - \frac{1}{2} W \quad (14)$$

可以看出, 当 $k_p \geq 2W/(b\alpha)$ 时, 自复位墙整体刚度为正, 反之则为负, 分别如图 2(c)第一象限中实线及虚线所示。

当 $\theta > \alpha$ 时, 墙体重心位于 O_2 之外, 此时仅预应力筋提供抗倾覆力矩, 重力和水平推力提供倾覆力矩。对 O_2 点取力矩, 由力矩平衡方程可得:

$$F \frac{b}{\sin \alpha} \cos(\theta - \alpha) + W \frac{b}{2 \sin \alpha} \sin(\theta - \alpha) = \left(F_{p0} + k_p b \sin \frac{\theta}{2} \right) \frac{b}{2} \cos \frac{\theta}{2} \quad (15)$$

可以看出式(15)与式(10)在形式上完全一致, 因此前述推导仍成立。

当向左施加水平力时, 墙体绕 O_1 点逆时针转动。同上述推导过程, 可得水平力-转角曲线与向右施加水平力时的曲线关于原点对称, 如图 2(c)中第三象限所示。

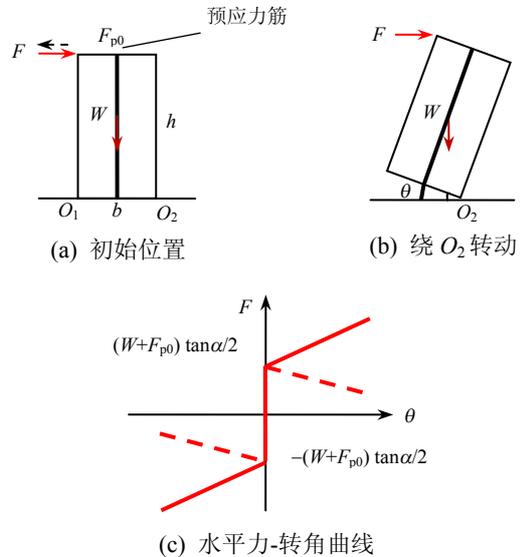


图 2 预应力筋对自复位墙力学性能的影响

Fig.2 Influence of prestressed tendon on the mechanical behavior of self-centering wall

2.3 预应力筋的影响分析

对比图 1(c)、图 2(c)可以看出, 预应力筋对自复位墙的力学性能有如下影响: 1) 预应力筋可以显著提高自复位墙的转动临界荷载及恢复力, 其增加量与墙体几何尺寸及预应力筋参数(初始力及弹性刚度)有关; 2) 自复位墙整体刚度与预应力筋弹性刚度有关。当预应力筋弹性刚度较大时, 自复位墙整体刚度为正; 3) 当卸载后, 体系无残余变形, 表明自复位墙具有自复位能力, 且由于预应力筋的存在, 提高了墙体的临界倾覆转角, 从而更有利于墙体的自复位; 4) 自复位墙水平力-转角曲线仍为一

非线性弹性曲线，因此仍不具备滞回耗能能力。

3 预应力筋及阻尼器对自复位墙力学性能的影响

本节同时考虑预应力筋及阻尼器影响，重点考察阻尼器对自复位墙力学性能的影响。阻尼器的布置如图 3(a)所示，分别以 D_1 、 D_2 表示，与 O_2 点的距离分别为 b_1 、 b_2 。阻尼器的滞回模型采用理想弹塑性模型，如图 3(c)所示，其中 k_d 表示阻尼器的弹性刚度， f_y 表示阻尼器的屈服力。为简化起见，依然假设受力过程中预应力筋始终保持弹性状态。为节省篇幅，本节以下仅对正向加载进行分析。

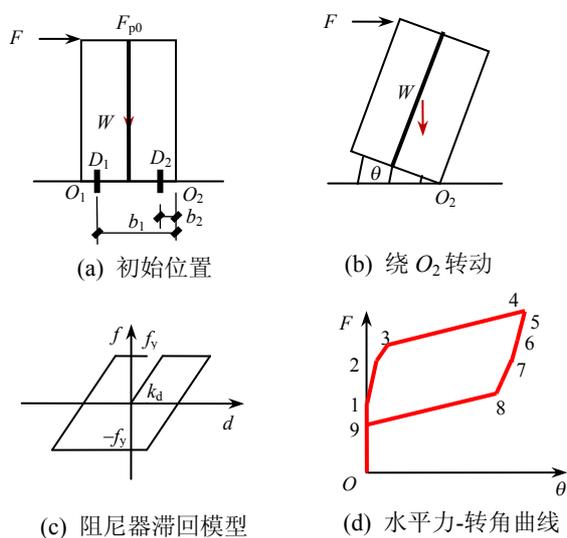


图 3 预应力筋及阻尼器对自复位墙力学性能的影响
Fig.3 Influence of prestressed tendon and damper on the mechanical behavior of self-centering wall

3.1 转动临界荷载

当 F 由零增大至转动临界荷载 F_{cr} 时，墙体开始绕 O_2 点顺时针转动。对 O_2 点取矩，由力矩平衡条件可得：

$$F_{cr} h = (W + F_{p0}) \frac{b}{2} \quad (16)$$

可解得：

$$F_{cr} = \frac{W + F_{p0}}{2} \tan \alpha \quad (17)$$

对比式(9)、式(17)可以看出，阻尼器不会影响自复位墙的转动临界荷载。

3.2 水平力-转角曲线

当 $F \geq F_{cr}$ 时，墙体绕 O_2 点转动，如图 3(b)所示。为求得自复位墙水平力-转角滞回曲线，对于典型的滞回环(如图 3(d)所示)，定义如下 9 个特征点，如表 1 所示。值得说明的是，表中 6 号、7 号特征点

的先后次序跟阻尼器的位置有关。

表 1 典型滞回环特征点定义

Table 1 Definition of characteristic points of typical hysteresis loop

点号	状态	点号	状态	点号	状态
1	墙体开始转动	2	D_1 受拉屈服	3	D_2 受拉屈服
4	墙体开始卸载	5	D_1 卸载至零	6	D_2 卸载至零
7	D_1 受压屈服	8	D_2 受压屈服	9	墙体复位

对 O_2 点取矩，由力矩平衡条件可得：

$$F \frac{b}{\sin \alpha} \cos(\alpha - \theta) = W \frac{b}{2 \sin \alpha} \sin(\alpha - \theta) + \left(F_{p0} + k_p b \sin \frac{\theta}{2} \right) \frac{b}{2} \cos \frac{\theta}{2} + \sum_{i=1}^2 f \left(2b_i \sin \frac{\theta}{2} \right) b_i \cos \frac{\theta}{2} \quad (18)$$

式(18)等号右边第三项表示阻尼器提供的抗倾覆力矩， $f \left(2b_i \sin \frac{\theta}{2} \right)$ 表示第 i 个阻尼器的恢复力， $2b_i \sin \frac{\theta}{2}$ 表示第 i 个阻尼器的位移。

式(18)对各个特征点均成立，根据阻尼器的滞回模型(图 3(c))，即可得出表 1 中各个特征点水平力和转角的解析表达式。求得各特征点后，逐一连接各点，即可近似得到自复位墙水平力-转角滞回曲线。

值得指出的是，自复位墙水平力-转角滞回曲线的形状及其表征的耗能能力与墙体的几何尺寸、预应力筋及阻尼器参数有关，相关的研究由于篇幅所限将另文详述。

3.3 算例

设自复位墙墙体几何尺寸为 $1500\text{mm} \times 2200\text{mm} \times 240\text{mm}$ (宽 \times 高 \times 厚)，墙体自重 $W=15.0\text{kN}$ 。预应力筋参数及阻尼器参数取值分别为： $F_{p0}=35.23\text{kN}$ 、 $k_p=6.63\text{kN/mm}$ 、 $b_1=1300\text{mm}$ 、 $f_y=23.75\text{kN}$ 、 $k_d=118.76\text{kN/mm}$ 。此外，假设墙体卸载时的转角 θ_4 等于 0.01。根据 3.2 节中的推导，计算所得的自复位墙水平力-转角滞回曲线如图 4 所示。

3.4 阻尼器的影响分析

对比图 2(c)、图 3(d)可以看出，阻尼器对自复位墙的力学性能有如下影响：1) 阻尼器不影响自复位墙的转动临界荷载；2) 当卸载后，体系无残余变形，表明自复位墙仍具有自复位能力；3) 水平力-转角曲线为一闭合曲线，因此自复位墙能通过阻尼器来滞回耗能。

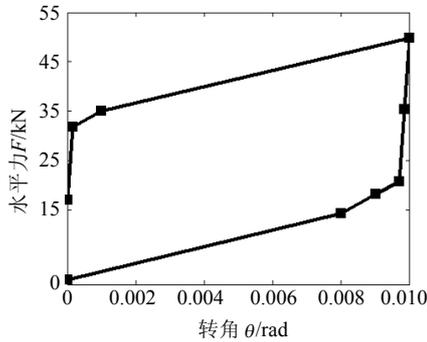


图4 自复位墙水平力-转角滞回曲线

Fig.4 Horizontal load vs. rotation hysteresis curve of self-centering wall

4 结论

本文通过理论推导, 得出了往复荷载作用下自复位墙的水平力-转角曲线, 研究了其在往复荷载作用下的受力机理。可以得出如下主要结论:

(1) 墙体自重和预应力筋主要提供自复位能力。预应力筋可以显著增强体系的自复位能力, 但仅考虑预应力筋时, 体系本质上为一非线性弹性体系, 不具备滞回耗能能力。

(2) 阻尼器主要提供耗能能力。

(3) 往复荷载作用下自复位墙的力学性能与墙体几何尺寸、预应力筋及阻尼器参数有关。

参考文献:

- [1] Christopoulos C, Filiatrault A E, Folz B. Seismic response of self-centring hysteretic SDOF systems [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2002, 31(5): 1131—1150.
- [2] Seo C Y, Sause R. Ductility demands on self-centering systems under earthquake loading [J]. *ACI Structural Journal*, 2005, 102(2): 275—285.
- [3] Pampanin S, Christopoulos C, Priestley M J N. Performance-based seismic response of frame structures including residual deformations. Part II: Multidegree-of-freedom systems [J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2003, 7(1): 119—147.
- [4] Christopoulos C, Pampanin S. Towards performance-based seismic design of MDOF structures with explicit consideration of residual deformations [J]. *Journal of Earthquake Technology*, 2004, 41(1): 53—73.
- [5] 周颖, 吕西林. 摇摆结构及自复位结构研究综述[J]. *建筑结构学报*, 2011, 32(9): 1—10.
Zhou Ying, Lü Xilin. State-of-the-art on rocking and self-centering structures [J]. *Journal of Building Structures*, 2011, 32(9): 1—10. (in Chinese)
- [6] 郭佳, 辛克贵, 何铭华, 等. 自复位桥梁墩柱结构抗震性能试验研究与分析[J]. *工程力学*, 2012, 29(增刊1): 29—34, 45.
Guo Jia, Xin Kegui, He Minghua, et al. Experimental study and analysis on the seismic performance of a self-centering bridge pier [J]. *Engineering Mechanics*, 2012, 29(Suppl 1): 29—34, 45. (in Chinese)
- [7] 何铭华, 辛克贵, 郭佳. 新型自复位桥梁墩柱节点的局部稳定性研究[J]. *工程力学*, 2012, 29(4): 122—127.
He Minghua, Xin Kegui, Guo Jia. Local stability study of new bridge piers with self-centering joints [J]. *Engineering Mechanics*, 2012, 29(4): 122—127. (in Chinese)
- [8] Armouti N. Seismic performance of precast concrete structural walls [D]. Bethlehem: Lehigh University, 1993.
- [9] Kurama Y C. Seismic analysis, behavior and design of unbonded post-tensioned precast concrete walls [D]. Bethlehem: Lehigh University, 1997.
- [10] Perez F J. Experimental and analytical lateral load response of unbonded post-tensioned precast concrete walls [D]. Bethlehem: Lehigh University, 2004.
- [11] Perez F J, Pessiki S, Sause R. Lateral load behavior of unbonded post-tensioned precast concrete walls with vertical joints [J]. *PCI Journal*, 2004, 49(2): 48—64.
- [12] Perez F J, Pessiki S, Sause R. Seismic design of unbonded post-tensioned precast concrete walls with vertical joint connectors [J]. *PCI Journal*, 2004, 49(1): 58—79.