

# Calculation of the Coupling Ratio under Different Load Form of Hybrid Coupled Walls

Longfei Liu, Yude Wang

School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan Hebei  
Email: longfeiliu123@sina.com

Received: Mar. 27<sup>th</sup>, 2016; accepted: Apr. 13<sup>th</sup>, 2016; published: Apr. 19<sup>th</sup>, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.  
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).  
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

Hybrid Coupled Walls use steel coupling beams instead of the traditional reinforced concrete beams. We put forward the general concept about coupling ratio in both double shear walls and multiple shear walls. It presents the proportion of system overturning moment produced by the structural external load resisted by the total constraint bending moment produced by shear forces of coupling beams. We also deduced the calculation formula of coupling ratio under uniform load, reverse triangle load and concentrated load. Actual engineering calculation showed that, compared with the traditional method, this calculation formula is more simple and accurate. This study provides a basic reference for subsequent research.

## Keywords

Hybrid Coupled Walls, Coupling Ratio, Calculation Equation

---

# 不同荷载形式下HCW耦连比计算

刘龙飞, 王育德

河北工程大学, 土木工程学院, 河北 邯郸  
Email: longfeiliu123@sina.com

收稿日期: 2016年3月27日; 录用日期: 2016年4月13日; 发布日期: 2016年4月19日

文章引用: 刘龙飞, 王育德. 不同荷载形式下 HCW 耦连比计算[J]. 土木工程, 2016, 5(3): 53-58.  
<http://dx.doi.org/10.12677/hjce.2016.53007>

## 摘要

混合连肢剪力墙(HCW)是采用钢连梁代替传统钢筋混凝土连梁的一种结构。文章提出了通用于双肢和多肢剪力墙的耦连比概念, 即耦连比表示连梁剪力产生的总约束弯矩与结构外部水平荷载产生的倾覆力矩的比值。文章推导出了均布荷载、倒三角形荷载和顶点集中荷载形式下耦连比的计算公式。实际工程计算表明, 与传统方法相比, 该计算方法更加简便、准确, 为后续研究提供了基本参考。

## 关键词

混合连肢剪力墙, 耦连比, 计算公式

## 1. 引言

20世纪90年代美国辛辛那提大学和加拿大麦吉尔大学的研究人员首次提出了HCW(Hybrid Coupled Walls), 即混合连肢剪力墙(1) [1]。

高层建筑结构中数量最多的是HCW。当水平荷载作用于HCW时, 钢连梁与钢筋混凝土墙肢之间产生相互约束作用。在约束作用下, 钢连梁首先发生屈服, 连梁的端部出现弯曲转角, 梁身出现弯曲变形。钢连梁产生的延性破坏, 消耗了部分地震能量。钢连梁的耗能能力可用耦连比来表示。

关于耦连比, 各国学者提出了不同的概念, 如: 苏明周、石韵提出的耦连比概念: 连梁剪力力偶占水平荷载下墙肢倾覆弯矩的比例[2]

$$CR = \frac{N \times L}{V \times H} \quad (1-1)$$

石韵推导了双肢剪力墙在倒三角形荷载下的耦连比CR的计算公式[3],

$$CR = \frac{3}{k^2 (k\alpha H)^2} \left[ \frac{(k\alpha H)^2}{3} - ch(k\alpha H) + \frac{sh(k\alpha H) - (k\alpha H)/2 + 1/(k\alpha H)}{ch(k\alpha H)} \times sh(k\alpha H) \right]$$

其中刚度参数[4]  $k\alpha H = \left[ \frac{12l^2 I_c}{l_0^3 hI} \left( 1 + \frac{AI}{A_1 A_2 l^2} \right) H^2 \right]^{\frac{1}{2}}$ 。公式表明耦连比的大小影响因素为墙肢整体性系数、

肢强系数和结构总高度。在国外, 中佛罗里达大学的 Sherif EI-Tawil 和 Kent Harries 对双肢剪力墙的耦连比做出了如下定义[5]:

$$CR = \frac{L \sum V_{beam,i}}{L \sum V_{beam,i} + \sum m_j} = \frac{L \sum V_{beam,i}}{OTM} \quad (1-2)$$

式中OTM(The Overturning Moment)为倾覆力矩。上式分子称为整体弯矩, 表示各层连梁约束弯矩的总和[6]。以上是双肢墙耦连比概念和公式。美国2005年版AISC钢结构抗震规范[7]对三肢墙耦连比的相关概念做了介绍。另外, Paulay 和 Priestly 教授对三肢剪力墙的CR进行了定义[8]:

$$CR = \frac{(CorT) \cdot S}{m_1 + m_2 + m_3 + (CorT) \cdot S} \quad (1-3)$$

综上所述, 现阶段耦连比的研究还存在下列问题:

- (1) 现有国内外文献提出的耦连比概念和计算公式中各不相同;
- (2) 现有的概念和公式只针对双肢剪力墙和三肢剪力墙;
- (3) 耦连比计算公式只针对倒三角形荷载形式, 对其他荷载形式没有涉及;
- (4) 计算公式(1-2)和(1-3)求出的耦连比存在一定误差, 这是因为现阶段求解内力过程中, 各层相对高度  $\varepsilon$  均取特定值而非连续值, 因此求出的墙肢轴力和墙肢弯矩是粗略值而不是精确值。

## 2. 不同荷载形式下 HCW 耦连比计算公式

为了解决上述问题, 本文以混合联肢剪力墙的作用机理为依据, 提出适用于任意墙肢数目的 HCW 的耦连比概念。推导了其计算公式, 并通过实例进行了验证。我们提出的耦连比表示钢连梁屈服产生的弯矩与外荷载产生弯矩的比值, 即:

$$CR = \frac{m_b}{M_p} \quad (2-1)$$

其中分子表示所有连梁对墙肢约束弯矩的总和, 分母表示外荷载对结构的倾覆弯矩。

对  $i$  ( $i$  大于等于 2) 肢 HCW 采用连续介质法计算[9], 可求出任意高度处的连梁对墙肢的约束弯矩  $m_b(\varepsilon) = V_0 \frac{\alpha_1^2}{\alpha^2} \Phi(\varepsilon)$  值。其中  $\varepsilon = \frac{x}{H}$ ,  $\Phi(\varepsilon)$  可通过求解连梁切口处的协调微分方程解出[10]。

传统计算方法在求解过程中, 将各层的  $\varepsilon$  取为常数, 但实际情况中每层的各个位置的相对高度并不是一个特定值, 而是由无数个连续值组成, 因此计算结果存在一定误差。

应用积分方法可以消除误差, 即对任意高度处的  $m_b(\varepsilon)$  值在全高范围内积分, 求出连梁总约束弯矩的精确值  $m_b = V_0 H \frac{\alpha_1^2}{\alpha^2} \int_0^1 \Phi(\varepsilon) d\varepsilon$ 。不同形式下外荷载引起的结构倾覆弯矩  $M_p$  易得, 进而可以求出任意墙肢剪力墙不同荷载形式下 HCW 耦连比的耦连比  $CR$ 。

$$CR = \begin{cases} \frac{2\alpha_1^2}{\alpha^2} \left[ \frac{1}{\alpha^2} - \frac{1}{\alpha^2} \frac{1}{ch\alpha} - \frac{th\alpha}{\alpha} + \frac{1}{2} \right] & \text{(均布荷载)} \\ \frac{3\alpha_1^2}{2\alpha^2} \left[ \frac{2-\alpha^2}{\alpha^3} th\alpha - \frac{2}{\alpha^2 ch\alpha} + \frac{2}{3} \right] & \text{(倒三角形荷载)} \\ \frac{\alpha_1^2}{\alpha^2} \left[ 1 - \frac{1}{\alpha} th\alpha \right] & \text{(顶点集中荷载)} \end{cases} \quad (2-2)$$

其中  $T = \frac{\alpha_1^2}{\alpha^2}$  为轴向变形影响参数。多肢剪力墙的  $T$  值计算较复杂, 在实际计算中, 对三肢和四肢墙,  $T$  值取 0.80, 对五肢、六肢和七肢剪力墙,  $T$  值取 0.85, 对于八肢及以上剪力墙,  $T$  值取 0.90。

由计算公式可知, 耦连比的大小是对墙肢整体性系数  $\alpha$  及轴向变形影响系数  $T$  的综合表现。整体性工作系数  $\alpha$  反映了连梁与墙肢的相对刚度关系,  $\alpha$  越大, 连梁对墙肢的约束弯矩越大, 整体性越好。轴向变形影响系数  $T$  是墙肢截面积和截面惯性矩的综合反映。

## 3. 算例

为验证上述公式, 以某实际工程为例进行了计算[11]。该建筑为 11 层三肢剪力墙结构, 层高为 3 m, 墙体厚度为 0.2 m, 结构示意图及各详细参数见图 1。计算结构在均匀荷载、倒三角形荷载和顶点集中荷载作用下耦连比的大小。

- (1) 几何特性求解

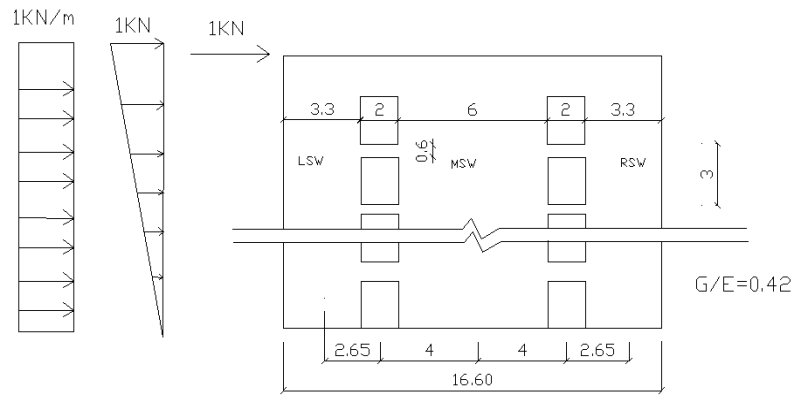


Figure 1. Structure of the project  
图 1. 某工程结构示意图

$$\text{墙肢 1, 3 的惯性矩 } I_{10} = I_{30} = \frac{b_1 h_1^3}{12} = \frac{0.2 \times 3.3^3}{12} = 0.59895 \text{ m}^4$$

$$\text{考虑剪切变形的折算惯性矩 } I_1 = I_3 = \frac{I_0}{1 + \frac{12\mu EI_{10}}{h^2 AG}} = \frac{0.59895}{1 + \frac{12 \times 1.2 \times 0.59895}{3^2 \times 0.66 \times 0.42}} = 0.13438 \text{ m}^4$$

$$\text{同理, 墙肢 2 的惯性矩 } I_{20} = 3.6 \text{ m}^4, \text{ 考虑剪切变形的折算惯性矩 } I_2 = 0.28966 \text{ m}^4$$

$$\text{连梁 1、2 的惯性矩 } I_{b1} = I_{b2} = 0.0036 \text{ m}^4, I_b = 0.0028636 \text{ m}^4$$

$$\text{连梁的刚度特征值 } D_1 = D_2 = \frac{I_b c_i^2}{a_i^3} = \frac{0.0028636 \times 3.325^2}{1^3} = 0.03165 \text{ m}^4$$

(2) 基本参数计算

$$\alpha_1^2 = \frac{6H^2}{h \sum_{i=1}^k I_i} \sum_{i=1}^k D_i = \frac{6 \times 33^2 \times 0.63}{3 \times 4.7979} = 28.5987$$

对于三肢剪力墙轴向变形影响系数  $T = 0.8$ , 则考虑轴向变形的整体参数

$$\alpha^2 = \frac{\alpha_1^2}{T} = \frac{28.5987}{0.8} = 35.7483, \alpha = 5.979$$

(3) 内力计算

首先求出各层的约束弯矩  $m_j(\varepsilon) = hV_0 \frac{\alpha_1^2}{\alpha^2} \Phi(\varepsilon)$ , 然后各层  $m_j$  叠加求出  $m_b$ 。再求出各层连梁的剪力

$$Q_{ij} = \frac{m_j}{2c_i} \eta_i, \text{ 因为只有两列连梁, 且是对称布置的, 所以 } \eta_i = \frac{1}{2}。 \text{ 最后求出墙肢弯矩 } M_i = \frac{I_{i0}}{\sum I_{i0}} \left( M_P - \sum_{s=j}^n m_s \right),$$

墙肢轴力  $N_{1j} = N_{3j} = \sum_{s=j}^n Q_{1s}$ 。表 1 为在墙肢底部连梁的约束弯矩总和, 各墙肢弯矩和轴力。

(4) 结果对比

将表 1 数据代入 Paulay 理论即公式(1-3)可得

$$CR = \frac{(CorT) \cdot S}{m_1 + m_2 + m_3 + (CorT) \cdot S} = \begin{cases} 59.928\% & \text{(均布荷载)} \\ 62.055\% & \text{(倒三角形荷载)} \\ 69.971\% & \text{(顶点集中荷载)} \end{cases}$$

Table 1. Internal force calculation under different load

表 1. 不同荷载形式下的内力计算

荷载形式	内力计算值				
	$m_b$	$M_p$	$M_1 = M_3$	$M_2$	$N_1 = N_3$
均布荷载	326.305	544.500	27.239	163.716	24.534
倒三角荷载	225.138	362.927	17.202	103.386	16.928
顶点集中荷载	23.084	32.993	1.237	7.435	1.736

应用本文提出的耦连比概念公式(2-1)得到的耦连比

$$CR = \frac{m_b}{M_p} = \begin{cases} \frac{326.305}{544.50} = 59.927\% & \text{(均布荷载)} \\ \frac{225.138}{362.927} = 62.034\% & \text{(倒三角形荷载)} \\ \frac{23.084}{32.993} = 69.966\% & \text{(顶点集中荷载)} \end{cases}$$

应用本文得出的耦连比计算公式(2-2)得到的耦连比

$$CR = \begin{cases} \frac{2\alpha_1^2}{\alpha^2} \left[ \frac{1}{\alpha^2} - \frac{1}{\alpha^2} \frac{1}{ch\alpha} - \frac{th\alpha}{\alpha} + \frac{1}{2} \right] = 57.692\% & \text{(均布荷载)} \\ \frac{3\alpha_1^2}{2\alpha^2} \left[ \frac{2 - \alpha^2}{\alpha^3} th\alpha - \frac{2}{\alpha^2 ch\alpha} + \frac{2}{3} \right] = 61.082\% & \text{(倒三角形荷载)} \\ \frac{\alpha_1^2}{\alpha^2} \left[ 1 - \frac{1}{\alpha} th\alpha \right] = 66.667\% & \text{(顶点集中荷载)} \end{cases}$$

通过对比上述三个结果, 可以发现结果十分接近, 这说明本文提出的耦连比概念和公式可行, 能同时适用于不同荷载形式下的双肢和多肢剪力墙。

应用计算公式(2-2)求解耦连比只需计算出  $\alpha$  值即可, 不必求解任何内力值, 且从理论角度看, 计算更为精确。

#### 4. 结论

通过工程实例的计算和对比分析可以得出:

(1) 根据 HCW 的作用机理, 提出的耦连比概念可行, 并且同时适用于双肢和多肢剪力墙, 通用的实现了概念的统一;

(2) 求出的耦连比计算公式(2-2)可行, 可以计算不同荷载形式下的耦连比。

(3) 与现有的计算公式相比较, 公式(2-2)可以更简便地计算出结果, 且结果更精确。

总之, 实现了不同荷载形式, 不同墙肢数目的耦连比概念和计算公式的统一, 且使计算精确简捷, 为后续耦连比研究提供基本参考。

#### 基金项目

河北省建设科技计划项目(2009-128)。

#### 参考文献 (References)

- [1] Hassan, M. and EI-Tawil, S. (2004) Inelastic Dynamic Behavior of Hybrid Coupled Walls. *Journal of Structural En-*

- gineering, ASCE*, **130**, 285-296. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2004\)130:2\(285\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2004)130:2(285))
- [2] 苏明周, 石韵, 梅许江, 蒋春云. 高耦连比新型混合连肢墙结构拟静力试验研究[J]. 土木工程学报, 2013, 46(1): 52-60.
  - [3] 石韵. 含型钢边缘构件高层混合连肢墙结构的抗震性能及设计方法研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2013.
  - [4] 常为华, 张相勇, 张亚珊. 高层剪力墙结构连梁的设计与分析[J]. 建筑结构, 2009(S2): 68-71.
  - [5] EI-Tawil, S. and Harries, K.A. (2010) Recommendations for Seismic Design of Hybrid Coupled Wall Systems. American Society of Civil Engineering, Reston.
  - [6] 阎奇武, 武建辉. 带钢连梁混合联肢剪力墙的研究与发展[J]. 中国西部科技, 2010, 9(2): 1-3.
  - [7] AISC 341-05 Seismic Provisions for Structural Steel Buildings. American Institute of Steel Construction, Chicago, 2005.
  - [8] Paulay, T. and Priestley, M.J.N. (1992) Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings. Wiley, New York. <http://dx.doi.org/10.1002/9780470172841>
  - [9] 江见鲸, 陆新征. 混凝土结构有限元分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
  - [10] 程文灏, 颜德姮, 王铁成. 混凝土结构中混凝土结构与砌体结构设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
  - [11] 包世华, 方鄂华. 高层建筑结构设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 1985.