

DOI:10.11918/202010067

双肢剪力墙耦合比计算方法及其应用研究

刘 韬^{1,2}, 张令心^{1,2}, 陈永盛^{1,2}

(1. 中国地震局工程力学研究所, 哈尔滨 150080;

2. 中国地震局地震工程与工程振动重点实验室(中国地震局工程力学研究所), 哈尔滨 150080)

摘 要: 耦合比作为衡量联肢墙受力性能的重要参数,在国际上已逐步用来指导联肢墙的设计。为了计算弹性和塑性阶段双肢墙的耦合比并明确其合理的应用范围,通过理论推导与数值模拟结果给出了弹性和塑性耦合比的计算方法,分析了耦合比全过程变化规律和不同弹性和塑性耦合比组合下双肢墙的反应,提出了利用耦合比计算双肢墙顶点水平位移的理论公式和通过耦合比实现双肢墙理想屈服机制的建议。研究结果表明:本文弹性和塑性耦合比计算方法与双肢墙顶点水平位移理论公式是有效合理的;弹性耦合比主要由双肢墙几何尺寸所控制;塑性耦合比影响双肢墙的极限承载力和延性,应限制其上限;弹性与塑性耦合比的差值应不小于10%,以防止墙肢先于多数连梁发生屈服。通过快速计算和控制耦合比,可使双肢墙的设计更加合理与安全。

关键词: 双肢剪力墙;耦合比;计算方法;水平位移;屈服机制

中图分类号: TU973

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2021)10-0041-11

Study on calculation and application of the coupling ratio for coupled shear walls

LIU Tao^{1,2}, ZHANG Lingxin^{1,2}, CHEN Yongsheng^{1,2}

(1. Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China;

2. Key Lab of Earthquake Engineering and Engineering Vibration of China Earthquake Administration

(Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration), Harbin 150080, China)

Abstract: The coupling ratio (CR) is an important parameter that measures the mechanical behaviors of coupled walls (CWs). The design method using CR for CWs has been adopted gradually and internationally. To calculate CR in elastic and plastic stages and clarify a reasonable range for its application, a calculation method was proposed based on theoretical derivation and numerical simulation results. The variation of CR during elastic-plastic stage and the responses of CWs with different combinations of elastic and plastic CRs were analyzed. A theoretical formula for calculating top lateral displacement of CWs was put forward, and the suggestion on realizing ideal yielding mechanism for CWs by using CR was given. Results show that the calculation method of elastic and plastic CRs and the formula of top displacement were both effective and reasonable. The elastic CR was mainly controlled by the geometry of CWs, whereas the plastic CR had impacts on the ultimate strength and ductility of CWs, whose upper limit should thereby be set. The difference between plastic CR and elastic CR should be larger than 10% so as to avoid the occurrence of yielding in wall piers prior to most coupling beams. A safer and more reasonable design for CWs can be achieved by calculating and controlling CRs.

Keywords: coupled shear wall; coupling ratio; calculation method; lateral displacement; yielding mechanism

水平荷载作用下,双肢剪力墙基底的总倾覆力矩可分解为各墙肢弯矩和两侧墙肢附加轴力形成的拉压力偶两个部分(见图1),附加轴力 N 由相连连梁的梁端剪力所引起。这种连梁与墙肢耦合受力的特性称之为双肢墙的耦合作用。该耦合作用既可降低各墙肢的抗弯需求,又可使双肢墙相比两个单独墙肢具有更大的抗侧刚度^[1]。为了更直观清晰地

反映联肢墙的受力特性,El-Tawil等^[1]将基底拉压力偶占总倾覆力矩的比例定义为耦合比(coupling ratio, CR)。耦合比之前也被称作为耦合度(degree of coupling)^[2];在中国还被译作耦联率^[3]或耦连比^[4-5],均为本文所指的耦合比。

国内外学者对耦合比开展了许多研究。Shiu等^[6]通过试验研究表明,耦合比较大的联肢墙试件具有更大的抗侧刚度和承载力,但是耦合比过大将导致连梁耗能较弱,底层墙肢破坏严重。Ozsalcuk^[7]根据试验结果建议耦合比不超过55%。Harries^[2]根据不同类型连梁的延性需求,提出耦合比的上限为50%~65%。El-Tawil等^[1,8-9]根据不同耦合比下的12层混合联肢墙(连梁为钢连梁,墙

收稿日期: 2020-10-21

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51678542);

中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项(2019A01);

黑龙江省头雁行动计划

作者简介: 刘 韬(1993—),男,硕士研究生;

张令心(1967—),女,研究员,博士生导师

通信作者: 张令心,lingxin_zh@126.com

肢为 RC 墙) Pushover 分析结果, 建议在高烈度区混合联肢墙的耦合比选为 30% ~ 45% 比较合适。Lequesne^[10] 考虑了附加轴力对墙肢受弯性能的影响, 建议耦合比控制在 30% ~ 50%。近十年, 中国学者也逐步重视耦合比对联肢墙受力性能的影响研究^[3-5, 11-12]。相关研究均表明, 合理控制耦合比大小可以使联肢墙具有较好的抗震性能。

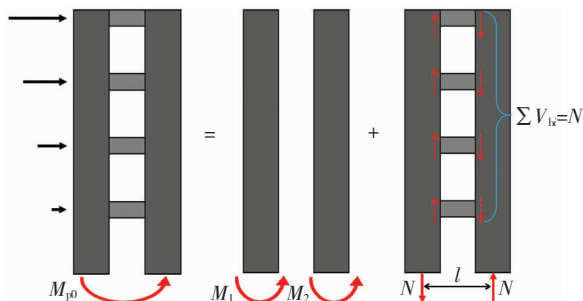


图 1 双肢墙受弯分解

Fig. 1 Distribution of moments in a typical CW

考虑到耦合比是影响联肢墙受力性能的重要参数, 加拿大混凝土设计标准^[13]首次将耦合比应用于联肢墙设计之中。随着对耦合比研究的进一步深入, 国外提出通过先确定目标耦合比大小, 然后完成联肢墙抗震设计的方法^[1, 14-15]。中国学者也开展了由耦合比指导联肢墙抗震设计方法的研究^[16-18]。此外, 有许多学者在联肢墙试验研究中, 也将耦合比作为设计试件的重要参数^[19-21]。因此, 高效准确地计算出耦合比, 对联肢墙的合理设计和试验研究有着重要的现实意义。

现有耦合比计算公式主要分为统计回归^[22-23]和理论计算^[24-25]两类。由于统计回归得到的公式在计算精度和适用范围上存在局限性, 目前计算耦合比主要依据倒三角水平荷载形式下的理论公式。但是, 现有理论计算公式所考虑的水平荷载形式并不完整, 无法满足其余常用形式(均布荷载、顶部集中力)下计算耦合比的需求, 且缺乏公式的详细推导过程。此外, 以上所提耦合比计算公式均适用于弹性阶段, 然而当联肢墙进入塑性阶段后, 耦合比将会不断变化, 目前缺少塑性阶段耦合比的简化计算公式, 并存在塑性阶段定义不统一的问题, 例如 Harries^[2]取第一根连梁屈服时的耦合比; El-Tawil 等^[9]取联肢墙达到目标位移时的耦合比等。最后, 弹性和塑性阶段耦合比的控制因素和相互关系仍不清楚, 缺乏二者明确合适的应用范围, 例如将塑性阶段耦合比的限值应用于弹性耦合比之上, 这将会影响对耦合比的合理应用。

因此, 鉴于耦合比的重要性和目前研究的不充分, 本文推导并完善三种水平荷载形式下弹性耦合

比理论计算公式, 并对其进行敏感性分析; 然后, 详细分析耦合比的全过程变化特点和规律, 提出塑性耦合比简化计算方法; 最后, 研究弹性和塑性耦合比对联肢墙承载力和延性、刚度与屈服机制的影响, 并探讨耦合比合适的应用范围, 旨在为应用耦合比实现双肢墙合理设计提供理论依据。

1 弹性阶段耦合比计算方法及敏感性分析

不同形式水平荷载作用下联肢墙的耦合比是不同的。目前, 耦合比理论计算公式仅针对倒三角形, 但对于一些采用顶部集中力加载的联肢墙试验研究^[6, 26-27], 若仍采用现有耦合比计算公式, 将会导致计算误差。本节将根据耦合比定义和双肢墙内力解析解, 通过详细的理论推导, 完善三种常用水平荷载形式下耦合比理论计算公式。随后, 在本文给出的理论公式基础之上, 分析耦合比对联肢墙的主要参数和水平荷载形式的敏感性。

1.1 弹性耦合比计算方法

耦合比定义式可表示为

$$R = \frac{Nl}{M_{p0}} = \frac{Nl}{Nl + M_1 + M_2} \quad (1)$$

式中: R 为耦合比; N 为墙肢附加轴力; M_{p0} 为联肢墙基底的总倾覆力矩; M_1 和 M_2 分别为两片墙肢承受的弯矩; l 为两侧墙肢形心间距, 详见图 1。由式(1)可知, 确定了墙肢附加轴力与联肢墙基底总倾覆力矩即可获得耦合比。目前, 国内外求解联肢墙内力主要采取的方法是连续连杆法^[28-29], 计算模型见图 2, 根据连杆中点位移协调条件和墙肢内力平衡关系, 建立合适的微分方程即可求解墙肢内力。国内通常以连梁的约束弯矩作为未知函数进行求解^[28], 需要将每层连梁的约束弯矩转化为梁端剪力后求和获得墙肢基底附加轴力, 不利于耦合比计算公式的推导。而文献[30]给出了三种水平荷载形式下直接计算附加轴力的方法, 可极大简化推导耦合比理论计算公式的步骤, 其计算公式^[30]为

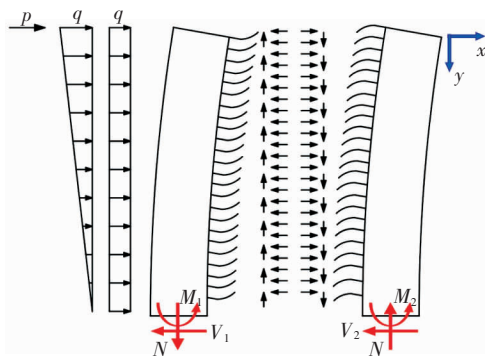


图 2 水平荷载作用下双肢墙计算模型

Fig. 2 CW calculation model under lateral loads

$$N(\xi) = V_0 \frac{HTg(\xi, \alpha)}{l} \quad (2)$$

式中: H 为双肢墙高度; T 为轴向变形影响系数; ξ 为截面相对高度,墙肢基底取 $\xi = 1$; α 为整体参数; $g(\xi, \alpha)$ 为关于 α 和 ξ 的函数。

从式(2)可看出,墙肢附加轴力 N 和基底剪力 V_0 是乘积关系,故将双肢墙倾覆力矩 M_p 也通过 V_0 表示:

$$M_p(\xi) = V_0 H f_M(\xi) \quad (3)$$

式中 $f_M(\xi)$ 按式(4)计算, $\xi = 1$ 时为双肢墙基底倾覆力矩 M_{p0} 。

$$f_M(\xi) = \begin{cases} (3\xi^2 - \xi^3)/3, & \text{倒三角荷载} \\ \xi^2/2, & \text{均布荷载} \\ \xi, & \text{顶部集中力} \end{cases} \quad (4)$$

将式(2)、(3)带入式(1),弹性耦合比 R_e 可表示为

$$R_e = \frac{Nl}{M_{p0}} = \frac{(TV_0H/l)g(1, \alpha)l}{V_0Hf_M(1)} \quad (5)$$

对式(5)进行推导和化简后即可获得三种水平荷载形式下弹性耦合比理论计算公式:

$$R_e = TQ_\alpha \quad (6)$$

式中 Q_α 按下式计算

$$Q_\alpha = \begin{cases} \frac{3}{\alpha^2} \left[-\text{ch}\alpha + \left(\text{sh}\alpha + \frac{1}{\alpha} - \frac{\alpha}{2} \right) \frac{\text{sh}\alpha}{\text{ch}\alpha} + \frac{\alpha^2}{3} \right], & \text{倒三角荷载} \\ \frac{2}{\alpha^2} \left[-\text{ch}\alpha + (\text{sh}\alpha - \alpha) \frac{\text{sh}\alpha}{\text{ch}\alpha} + \frac{\alpha^2}{2} + 1 \right], & \text{均布荷载} \\ \frac{1}{\alpha} \left[\alpha - \frac{\text{sh}\alpha}{\text{ch}\alpha} \right], & \text{顶部集中力} \end{cases} \quad (7)$$

综上,按照图 3 即可通过理论公式快速方便地计算出三种水平荷载形式下的弹性耦合比。为了验证本文 R_e 理论计算公式的准确性,参照文献[31]中 18 层和 10 层双肢墙进行重新设计并作为本文算例,其中 10 层算例为非对称双肢墙,算例几何尺寸见表 1。表 2 为本文计算结果与数值模拟结果对比,算例分析模型的建立与验证见本文 2.1 节。从表 2 可看出,三种水平荷载形式下,本文计算结果均与数值模拟结果较为接近,可以验证本文计算方法的有效性。表 2 还列出本文方法与现有方法的对比,其中,文献[22-23]为统计回归得到的简化公式,该公式虽然可以更快地计算出耦合比,但是仅适用于对称的双肢墙(表中 NA 表示无法计算获得),且计算结果的精确性存在局限性;文献[24]为水平倒三角荷载形式下的理论公式,与本文计算结果相同。

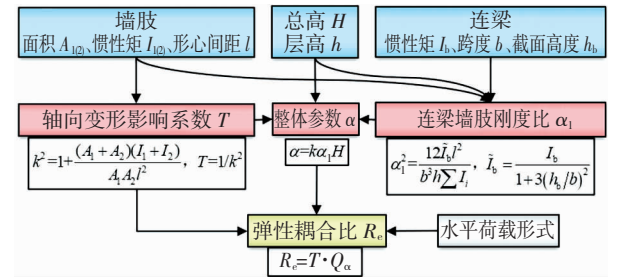


图 3 弹性耦合比计算流程

Fig. 3 Flowchart of calculation procedure for elastic CR

表 1 双肢墙算例几何信息

Tab. 1 Geometric information of typical CWs

算例	墙肢截面/ (m × m)	层高/ m	连梁截面/ (m × m)	连梁跨度/ m
18 层双肢墙	0.4 × 6	3.6	0.4 × 0.9	3
10 层双肢墙	0.25 × 6/5.4	3.6	0.25 × 0.9	3

注:0.25 × 6/5.4 指两片墙肢的截面尺寸分别为 0.25 × 6 和 0.25 × 5.4。

表 2 三种水平荷载形式下双肢墙弹性耦合比

Tab. 2 Elastic CRs of typical CWs under three types of lateral loads

计算方法	18 层双肢墙算例			10 层双肢墙算例		
	倒三角	均布	集中	倒三角	均布	集中
数值模拟	69.8	66.0	74.8	59.3	55.4	65.7
本文方法	71.3	68.1	76.2	61.4	57.6	68.4
文献[22]		68.9			NA	
文献[23]		58.3			NA	
文献[24]	71.3	—	—	61.4	—	—

1.2 弹性耦合比敏感性分析

从耦合比理论计算式(6)、(7)可知,耦合比受联肢墙的主要参数 α 和 T 与水平荷载形式所影响,本小节分别从以上两个方面开展耦合比敏感性分析。

1.2.1 参数 α 和 T 对耦合比影响分析

在式(6)中,轴向影响系数 T 作为等号右侧的因子,故 T 与耦合比成正比例关系。整体参数 α 在计算公式中以双曲函数的形式存在,为了直观地分析 α 对耦合比的影响,根据耦合比理论公式(6)、(7),可得三种水平荷载形式下耦合比随整体参数 α 的变化情况(见图 4), T 取 0.9。从图 4 可看出,三种水平荷载形式下的耦合比与整体参数 α 呈现出相似的变化规律;当 α 在 0~3 时,耦合比的增长最快,且近似呈线性增长;当 α 在 3~10 时,耦合比随 α 的增长速度逐渐降低;当 $\alpha > 10$ 之后,耦合比的增长效果不再显著。

由上述分析可知,相比轴向影响系数 T ,整体参数 α 对耦合比的影响更加明显。如前所述,提升耦合比可增加拉压力偶在抵抗总倾覆力矩中所占的比例,进而有效地降低各墙肢的抗弯需求。由耦合比

对 α 的敏感性分析可知,当 $\alpha > 10$ 之后,耦合比的 增长不再明显。也就是说,此时继续增加 α ,无法有 效地降低各墙肢的抗弯需求,难以提升联肢墙耦合 作用带来的优势。因而,本文建议联肢墙整体参数 α 的取值不大于 10。另外,从整体参数 α 可反映联 肢墙整体性强弱的角度来看, α 越大表示连梁的相 对刚度越大,因而,中国联肢墙定义中 α 的取值范 围为 $1 \leq \alpha < 10^{[28]}$,在 $\alpha > 10$ 之后,连梁对墙肢的约 束作用很强,此时,联肢墙表现为整体悬壁墙(或整 体小开口墙),可以按整体小开口墙计算^[28]。上述 分析表明,本文从耦合比角度给出的联肢墙整体参 数 α 的取值与中国联肢墙定义中 α 的取值范围相 吻合。

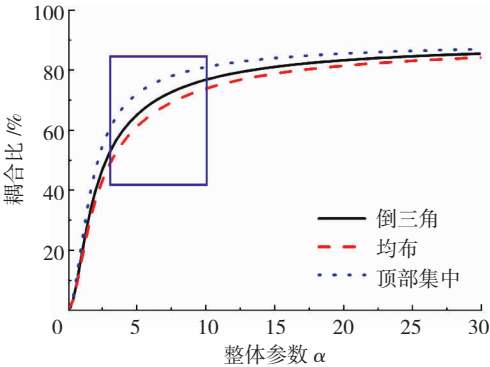


图 4 三种水平荷载形式下弹性耦合比对比 ($T=0.9$)

Fig. 4 Comparison of elastic CRs under three types of lateral loads ($T=0.9$)

1. 2. 2 水平荷载形式对耦合比影响分析

从图 4 还可看出,水平荷载形式对耦合比大小 有影响,从大到小依次为:顶部集中力、倒三角荷载、 均布荷载;尤其在联肢墙 α 的常用范围 3~10 时,

水平荷载形式对耦合比的大小影响较明显;由计算 结果可知,当 $\alpha=5$ 时,顶部集中力与均布荷载下耦 合比的差值为 11%,与倒三角荷载下的差值为 7%。

2 塑性阶段耦合比变化规律及计算方法

当联肢墙进入塑性阶段后,耦合比开始发生变 化,其变化情况主要受连梁墙肢刚度比所影响^[2]。 因而 Harries^[2] 将连梁和墙肢的有效刚度带入理论 公式中计算塑性阶段的耦合比,该方法虽然考虑了 开裂对连梁墙肢刚度比的影响,但仍不能反映实际 情况^[2],故计算结果不准确。为此,本文首先采用 数值模拟的方法分析耦合比的变化趋势,然后基于 分析结果和理论依据给出塑性阶段耦合比简化计 算方法。为了区分不同阶段的耦合比,本文将弹性和 塑性耦合比分别记为 R_e 和 R_p 。

2. 1 耦合比全过程变化趋势分析

为了详细准确地分析耦合比的变化趋势,参照 文献[31],并根据 JGJ 3—2010《高层建筑混凝土结 构技术规程》^[32] (以下简称《高规》)重新设计了 10 层 和 18 层双肢墙作为本节分析算例。所有算例层高 均为 3.6 m、墙肢长度为 6 m、连梁跨度为 3 m;10 层 和 18 层算例的墙肢/连梁截面宽度分别为 0.25 m 和 0.4 m;2 个算例的每个楼层均分别设计了截面高 度为 0.9 m 和 1.5 m 两种连梁,算例截面详细信息 见表 3;纵筋和箍筋分别为 HRB400 和 HRB335 级。 本节共计 4 个双肢墙分析算例,算例命名分别为: CSW10-3-0.9、CSW10-3-1.5、CSW18-3-0.9 和 CSW18-3-1.5,其中 CSW10-3-0.9 表示 10 层, 连梁跨度和截面高度分别为 3 m 和 0.9 m。

表 3 双肢墙算例截面设计信息

Tab. 3 Reinforcement details of typical CWs

层号	墙肢				连梁			
	混凝土等级	边缘构件 纵筋/mm	边缘构件 箍筋/mm	水平(竖向) 分布筋/mm	截面高度/ m	混凝土等级	单侧纵筋/ mm	箍筋/mm
1~3	C40	8 Φ 20/22	Φ 10@100	Φ 10(12)@100	0.9 (1.5)	C30	6 Φ 22/25	Φ 10@100
4~5/4~9							(5 Φ 22/25)	
6~10/10~18	C35	8 Φ 16/18						

注:/为区分 10 层和 18 层算例,如 8 Φ 20/22 表示:10 层算例为 8 Φ 20,18 层算例为 8 Φ 22。

本文基于 OpenSees 平台,RC 墙肢和连梁分别 采用多竖板单元^[33]和连接单元进行模拟,联肢墙模 型建立方式同文献[30]。传统 RC 连梁采用美国既 有建筑抗震评估和修复规范(ASCE/SEI 41—13: Seismic evaluation and retrofit of existing buildings)给 出的 RC 连梁恢复力模型^[34],本文同时考虑了连梁 开裂的影响,开裂剪力根据文献[35]获得;交叉暗 撑 RC 连梁参照文献[36]进行参数选取。图 5 为联

肢墙模拟结果与试验结果的对比,试件 CW-2 和试 件 CW-RC 信息分别详见文献[37]与文献[20]。 从图 5(a)可看出,试件 CW-2 的模拟滞回曲线与 试验滞回曲线吻合较好;滞回模拟结果在顶点位 移达到 40 mm 附近时,承载力忽然下降,其原因为轴 压力较大的墙肢模型的主压应力为零,即混凝土被 压碎。这与试验中墙肢出现明显的剪切裂缝和墙角 被压溃的现象是相吻合的。试件 CW-2 正、负单向

推覆分析的模拟结果与试验结果的骨架曲线较为接近。试验结果的峰值荷载分别约为 138.05 kN 和 -136.27 kN,相应的模拟结果为 126.33 kN 和 -126.97 kN,其相对误差均小于 10%,模拟结果与试验结果吻合较好。从图 5(b)可看出,试件 CW-RC 的模拟滞回曲线与试验滞回曲线吻合较好,其中 d_y 和 d_u 分别为试验得到的屈服位移和极限位移。试件 CW-RC 在首次达到试验屈服位移 d_y 时,试验与模拟结果分别为 6 840 kN·m 和 6 904 kN·m,其相对误差为 0.92%,模拟结果与试验结果吻合很好。通过以上对比,可以说明本文联肢墙弹塑性模型是有效可靠的。

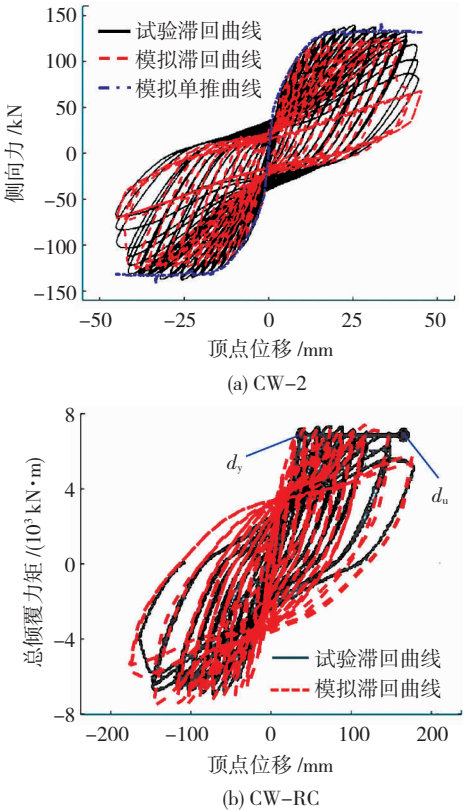


图 5 模拟结果与试验结果对比

Fig. 5 Comparison between numerical simulation and test results

对上述 4 个算例进行静力弹塑性推覆分析,水平荷载形式分别选为倒三角与均布荷载形式。图 6、7 为 8 种工况下,算例双肢墙的耦合比随顶点位移增加的变化趋势,图中连梁屈服 (3/10) 代表 10 根连梁有 3 根连梁发生屈服。从所有算例分析结果可以看出,当连梁开裂后,耦合比开始下降;随着双肢墙顶点位移的增加,耦合比将进入平稳变化的阶段。耦合比受连梁墙肢刚度比影响^[2],因而当连梁开裂后,连梁墙肢刚度比下降,耦合比出现变小的趋势;随着墙肢损伤程度的增加,连梁墙肢刚度比不再发生明显的变化,故耦合比最终呈现出逐渐趋向于平稳变化的状态,并保持较长时间,直至有连梁或墙肢丧失承载能力。图 6、7 中右墙压碎取多竖板模型

中的 RC 平板单元主压应力为零时的状态。

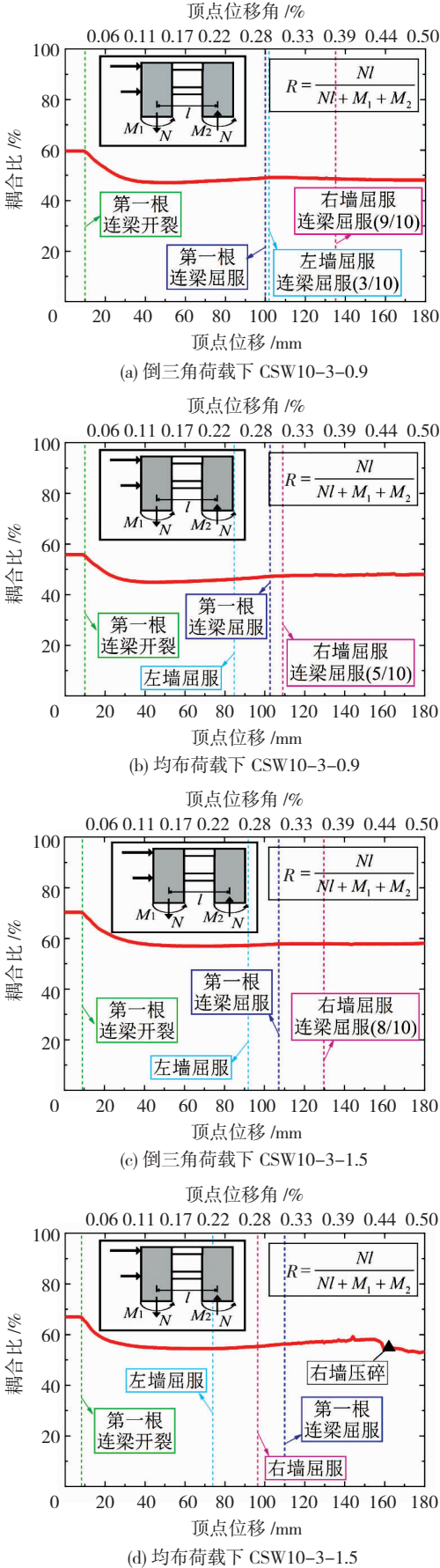


图 6 10 层双肢墙算例耦合比随顶点位移变化趋势

Fig. 6 Variation of CR with top displacement for 10-story typical CWs

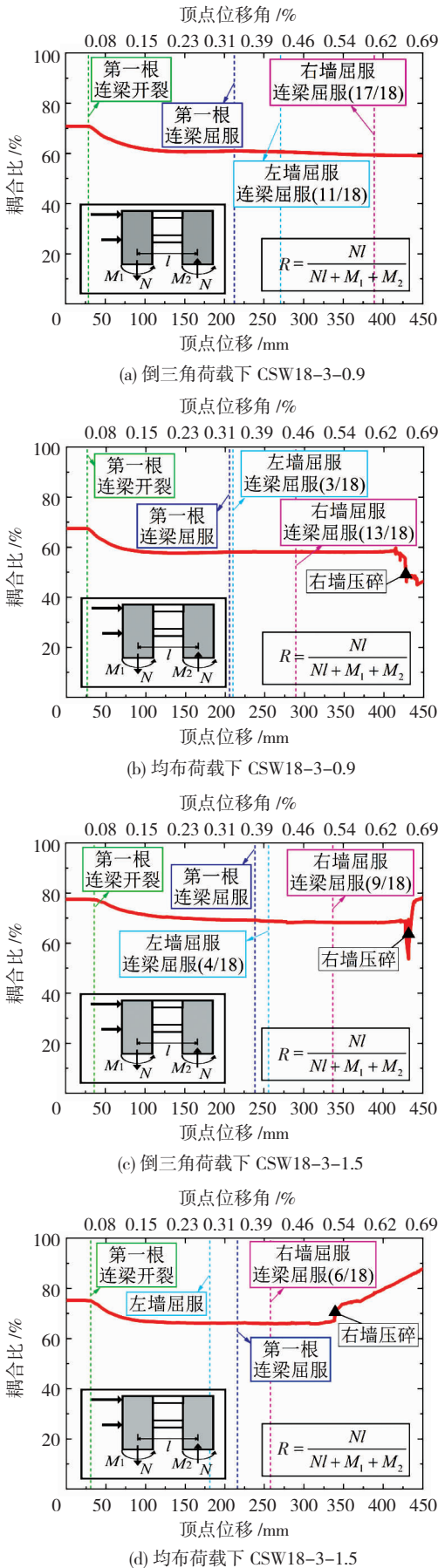


图 7 18 层双肢墙算例耦合比随顶点位移变化趋势

Fig. 7 Variation of CR with top displacement for 18-story typical CWs

2.2 塑性耦合比简化计算方法

如上所述,当双肢墙进入塑性阶段后,耦合比会趋于相对稳定变化的状态。因此,如果获得该稳定阶段任意状态下的耦合比,就可近似反映出塑性阶段耦合比的大小。从图 6、7 可知,2 个算例虽然水平荷载形式和双肢墙设计不同,但在连梁或墙肢截面屈服至其丧失承载力之间,耦合比均处于稳定变化的阶段。因而,参考文献[1]对耦合比的定义并结合本文上述的分析结果,将双肢墙墙肢基底屈服时的耦合比定义为本文塑性耦合比,进而可通过该状态下耦合比的大小反映塑性阶段的耦合比。

通过以上塑性耦合比的定义, R_p 可按下式计算:

$$R_p = \frac{N_y l}{N_y + M_{y1} + M_{y2}} \quad (8)$$

式中: N_y 为墙肢基底屈服时受到的附加轴力,对于联肢墙中的连梁来说,其作为第一道防线,通常在墙肢基底屈服时,多数连梁已经发生屈服;根据本文算例分析结果可知,当多数连梁屈服后,墙肢基底的附加轴力趋于稳定,且大小约为所有连梁名义屈服剪力之和,故 N_y 可按式(9) 计算; M_{y1} 和 M_{y2} 分别为左右墙肢受弯屈服承载力,可按照《高规》^[32] 中规定的 RC 墙肢拉弯或压弯承载力计算公式获得,见式(11)至式(13),值得注意的是,墙肢的轴力应考虑附加轴力的影响,材料取标准值。

$$N_y = \sum V_{bn} \quad (9)$$

式中: V_{bn} 为连梁名义屈服剪力,即连梁弯曲屈服时的剪力,按式(10) 计算。

$$V_{bn} = \frac{2M_y}{b} = \frac{2f_y A_s (h_{b0} - a'_s)}{b} \quad (10)$$

式中: f_y 为连梁纵筋屈服强度; A_s 为单侧纵筋面积; h_{b0} 为连梁截面有效高度; a'_s 为纵筋受压合力点至保护层外侧距离; b 为连梁跨度。

$$M_{y2} = A'_s f'_y (h_{w0} - a'_s) - M_{sw} + M_c - (G + N_p) \left(h_{w0} - \frac{h_w}{2} \right) \quad (11)$$

式中: A'_s 为受压区纵向钢筋面积; f'_y 为纵向钢筋受压屈服强度; h_{w0} 为剪力墙截面有效高度, $h_{w0} = h_w - a'_s$,其中 h_w 为墙肢截面高度; a'_s 为墙肢受压边缘至端部钢筋合力点的距离; G 为 RC 墙初始轴压力; M_{sw} 与 M_c 分别为竖向分布钢筋和受压区混凝土对受拉钢筋合力点所产生的力矩,按《高规》^[32] 规定进行计算。

$$M_{y1} = A'_s f'_y (h_{w0} - a'_s) - M_{sw} + M_c - (G - N_p) \left(h_{w0} - \frac{h_w}{2} \right), N_p \leq G \quad (12)$$

$$M_{y1} = M_{wu} \left(1 - \frac{N_p - G}{N_{0u}} \right), N_p > G \quad (13)$$

式中: M_{wu} 与 N_{0u} 分别为截面纯弯承载力和轴心受拉承载力,按《高规》^[32]规定进行计算。综上,塑性耦合比简化计算方法的流程图见图 8。

从上述塑性耦合比计算方法可知, R_p 只受墙肢和连梁截面强度设计所影响,与水平荷载形式无关;通过图 6、7 中相同算例在不同水平荷载形式下的耦合比变化趋势也可看出,水平荷载形式对 R_e 影响较明显,而对 R_p 几乎没影响。

为了验证本文塑性耦合比计算方法的合理性,图 9 为本文塑性耦合比计算结果与数值模拟结果的

比对,可以看出,本文计算方法可反映出双肢墙进入塑性阶段后耦合比的大小,进而说明该方法是有效的。

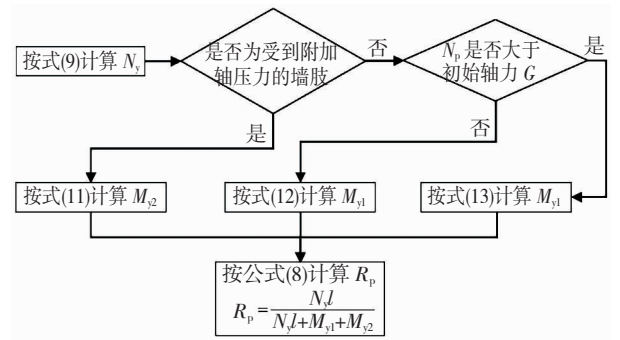


图 8 塑性耦合比计算流程

Fig. 8 Flowchart of calculation procedure for plastic CR

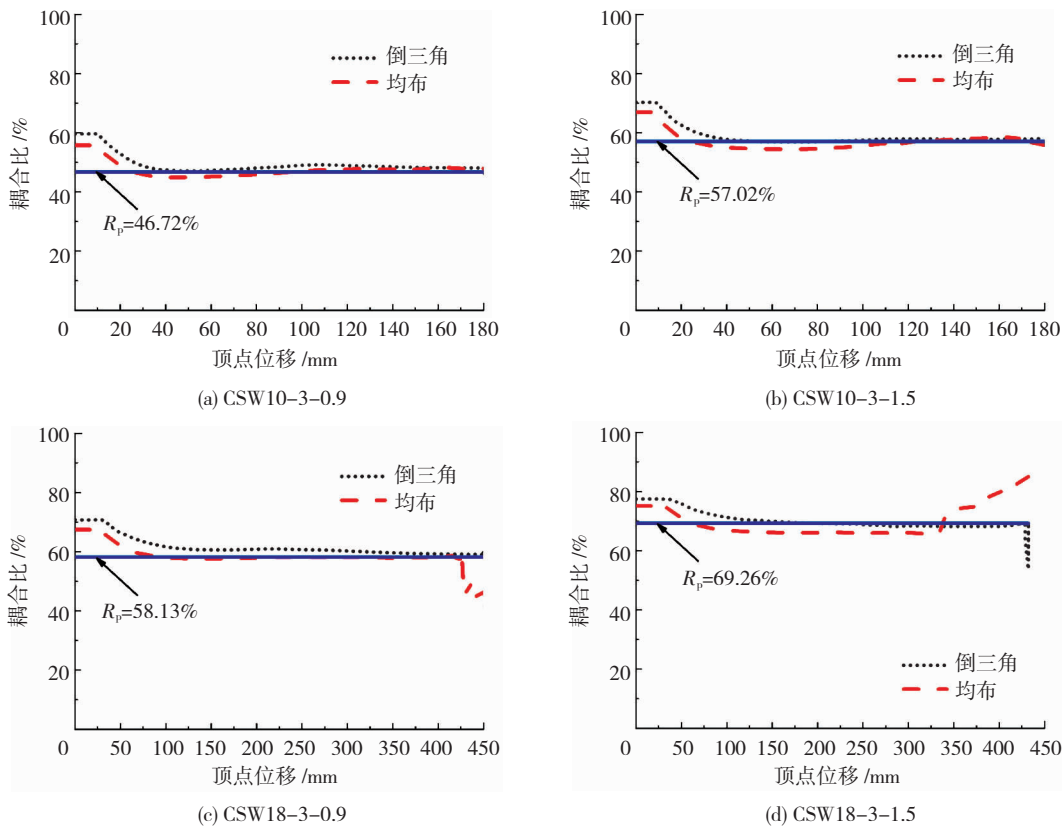


图 9 塑性耦合比计算与模拟结果对比

Fig. 9 Comparison of plastic CRs obtained from calculations and simulations

3 耦合比的影响分析

由 2.1 节分析可知,耦合比在双肢墙进入塑性阶段后会发生变化, R_e 主要由墙肢和连梁几何尺寸控制, R_p 主要受墙肢和连梁的截面强度设计影响。本节将结合 R_e 和 R_p ,研究耦合比对双肢墙承载力和延性、水平位移与屈服机制的影响,为提升双肢墙的合理设计提供参照依据。

为了清楚地分析 R_e 和 R_p 对双肢墙的影响,首先通过调整几何尺寸设计了 R_e 分别为 55.8% 和 66.4% 的双肢墙算例,详见表 4;然后通过调整连梁

截面配筋,将 R_p 的变化范围设计为 30% ~ 60%,增量为 10%,共计 8 个分析算例。本节静力弹塑性推覆分析均为倒三角荷载,图 10 为本节 8 个算例耦合比的变化趋势图,其中耦合比出现明显的下降是因为有连梁或墙肢丧失承载能力。

表 4 不同 R_e 双肢墙算例几何尺寸

Tab. 4 Dimensions of typical CWs with different elastic CRs

层数	层高/mm	墙肢长度/mm	墙肢厚度/mm	连梁高度/mm	连梁宽度/mm	连梁跨度/mm	R_e /%
10	3 600	6 600	250	600	250	1 800	55.8
				900			66.4

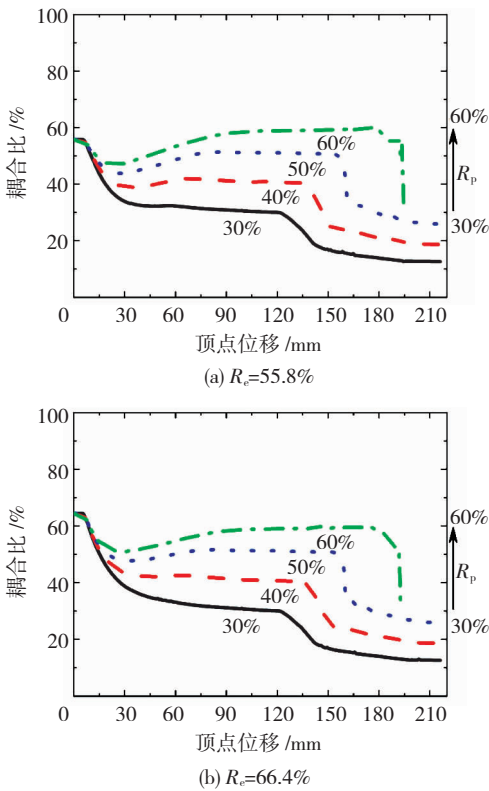


图 10 双肢墙算例耦合比随顶点位移变化趋势

Fig. 10 Variation of CR with top displacement for typical CWs

3.1 耦合比对双肢墙承载力和延性影响分析

图 11 为不同 R_e 和 R_p 组合下,算例双肢墙基底剪力随顶点位移的变化图。从图 11(a)可看出,由于 R_e 相同,弹性阶段的力-位移曲线几乎重合;进入塑性阶段后, R_p 越大,双肢墙的承载力越大; R_p 为 60% 的算例在模拟结果中更早发生破坏,原因为,相比其他 R_p 较小的算例, R_p 为 60% 的算例在达到相同的顶点位移时所受到的外荷载会更大,同时较大的 R_p 也会导致附加轴力更大,过大的附加轴力会对墙肢产生不利影响。所以 R_p 还会对双肢墙的延性产生影响。从图 11(b)可进一步看出,在弹性阶段,相同 R_e 算例的力-位移曲线几乎重合,不同 R_e 算例的抗侧刚度不同, R_e 越大,双肢墙整体抗侧刚度越大;随着顶点位移的增加,算例的力-位移曲线逐渐由 R_p 控制,相同 R_p 算例的极限承载力和延性近似相同。所以值得注意的是,耦合比的限值应针对 R_p ,而不是 R_e 。

3.2 耦合比对双肢墙水平位移影响分析

双肢墙耦合比越大,说明由墙肢自身承担总倾覆力矩的比例越低。而双肢墙以弯曲变形为主,当墙肢弯矩降低后,其弯曲变形也减小了,双肢墙整体的水平位移就会降低。因而,可以判断当耦合比越大时,双肢墙的水平位移越小。从图 11 中算例联肢墙受力情况可知,无论在弹性或塑性阶段,耦合比越大时,相同基底剪力下算例双肢墙的水平位移都越小。

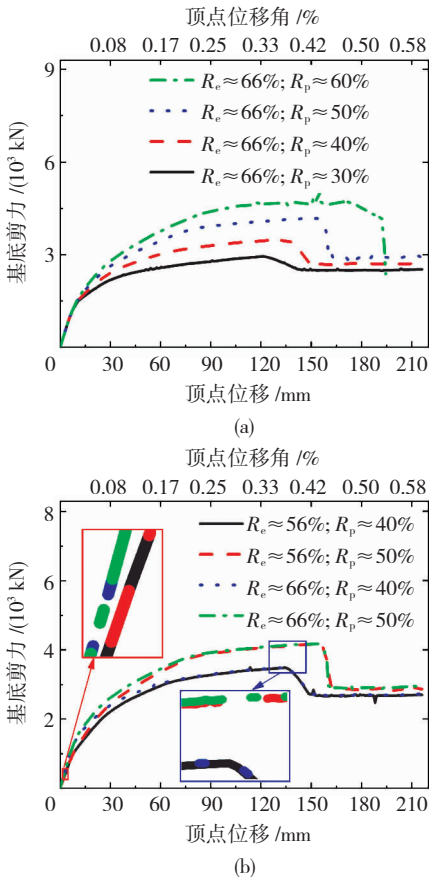


图 11 不同 R_e 和 R_p 组合下算例双肢墙力-位移曲线

Fig. 11 Base shear forces versus top lateral displacement of typical CWs with different combinations of elastic and plastic CRs

通过以上分析,说明耦合比与双肢墙水平位移有较强的关联性。利用双肢墙连续连杆简化计算模型(见图 2)可以得到双肢墙顶点水平位移的解析公式^[28],在此基础上,通过对公式中的双曲函数进行推导化简,并结合本文弹性耦合比理论计算公式,得到了通过耦合比计算双肢墙顶点水平位移的理论公式,见式(14),由于篇幅有限,略去了该公式推导和化简的详细过程。

$$D = \frac{V_0 H^3}{E \sum I_i} \begin{cases} \frac{11}{60} \left(1 + 3.64\eta^2 - T + \frac{3.64}{\alpha^2} R_e \right), & \text{倒三角荷载} \\ \frac{1}{8} \left(1 + 4\eta^2 - T + \frac{4}{\alpha^2} R_e \right), & \text{均布荷载} \\ \frac{1}{3} \left(1 + 3\eta^2 - T + \frac{3}{\alpha^2} R_e \right), & \text{顶部集中力} \end{cases} \quad (14)$$

式中: η^2 为剪切变形系数,考虑了墙肢剪切变形对双肢墙水平位移的影响,矩形截面按下式计算:

$$\eta^2 = \frac{3 \sum I_i}{H^2 \sum A_i} \quad (15)$$

为了验证式(14)的准确性,表 5 列出了基底剪力为 100 kN 时,本文第 3 节算例分别采用本文方法和数值模拟计算得到的结果对比,从表中可看出,在

三种水平荷载形式下,式(14)计算结果与数值模拟结果均吻合很好,验证了该公式的准确性。

表 5 三种水平荷载形式下双肢墙顶点水平位移计算结果

Tab.5 Top lateral displacement of typical CWs under three types of lateral loads

mm

计算方法	CSW - 10 - 0.9			CSW - 10 - 1.5			CSW - 18 - 0.9			CSW - 18 - 1.5		
	倒三角	均布	集中力	倒三角	均布	集中力	倒三角	均布	集中力	倒三角	均布	集中力
本文方法	0.71	0.50	1.27	0.50	0.35	0.90	1.81	1.26	3.21	1.52	1.05	2.74
数值模拟	0.70	0.50	1.25	0.52	0.38	0.84	1.77	1.26	2.95	1.48	1.05	2.51

3.3 耦合比对双肢墙屈服机制影响分析

在联肢墙设计时,通常将连梁作为第一道防线,以实现多数连梁先于墙肢屈服的机制。由 2.1 节分析可知,连梁墙肢刚度比的变化与耦合比的变化成正相关。从图 6、7 中可看出,在耦合比进入塑性平稳变化的阶段后,出现了轻微的上下波动。在此阶段,当连梁先于墙肢屈服,说明连梁的整体刚度退化速度相比墙肢更快,连梁墙肢刚度比降低,耦合比应呈现出下降的趋势,这与图中的变化趋势相一致。同理,对于墙肢先于连梁屈服的算例,从图中可看到耦合比出现了上涨的变化趋势。因此可以推断,若保证 R_e 大于 R_p 并增加二者的差值,可使耦合比处于向下变化的趋势,连梁的损伤大于墙肢,以防止墙肢先于连梁屈服的情况。

表 6 为本文 2、3 节 16 种工况下,算例双肢墙屈服次序与耦合比的关系。从表中前 8 行的对比可得,增加 R_e 和 R_p 的差值可以有效地防止墙肢先于连梁屈服的不利情况。在多数连梁先于墙肢屈服的算例中(表中下划线加粗标注), R_e 和 R_p 的差值均大于 10%。为此,本文建议 R_e 和 R_p 的差值不应小于 10%,进而通过控制耦合比实现多数连梁先于墙肢屈服的机制。

4 耦合比的应用建议

目前,国际上已逐步认识到耦合比对联肢墙受性能影响的重要性,在实践中通过控制耦合比的范围,实现联肢墙的合理设计。但是,耦合比会发生变化,目标耦合比的选择并没有明确规定联肢墙处于哪一个阶段,例如,同样的目标耦合比针对联肢墙弹性阶段或形成机构时,对联肢墙的设计要求是不同的。此外,耦合比的变化受到联肢墙几何尺寸和截面强度设计共同影响,如何利用耦合比的变化使得联肢墙设计更加合理仍值得探讨。

针对上述问题,结合目前耦合比研究成果和本文研究结果,对提升合理应用耦合比指导双肢墙设计给出以下建议:

1)耦合比上限的选取应针对 R_p ,根据 R_p 完成

墙肢和连梁截面强度设计。当耦合比过大时,墙肢会受到轴拉力或较大轴压力,墙肢延性下降,更容易发生破坏,反而削弱了双肢墙塑性阶段的受力性能,因而应控制耦合比上限。此处主要针对双肢墙进入塑性阶段后,故耦合比上限应针对 R_p 更为合理,可通过调整墙肢和连梁的截面强度设计实现目标 R_p 。根据目前研究成果^[2,7,10-12],建议耦合比上限一般不应超过 60%。

表 6 算例双肢墙基底墙肢和连梁屈服次序

Tab.6 Yielding order of base wall piers and coupling beams for typical CWs

$R_e/\%$	$R_p/\%$	$(R_e - R_p)/\%$	第一根 连梁屈服 位移/mm	左墙屈 服位移 /mm	右墙屈 服位移 /mm
55.8	30.0	25.8	55.9	103.6 (9/10)	117.1
55.8	40.0	15.8	62.2	91 (9/10)	114.4
55.8	50.0	5.8	72.1	75.7 (5/10)	104.5
55.8	60.0	-4.2	83.3	71.2 (0/10)	106.3
66.4	30.0	36.4	55	102.7 (9/10)	115.3
66.4	40.0	26.4	62.2	91.6 (9/10)	112.6
66.4	50.0	16.4	71.2	75.7 (5/10)	103.6
66.4	60.0	6.4	81.1	70.3 (0/10)	102.7
59.6	48.5	11.1	100	101.8 (3/10)	135.1
55.7	47.6	8.1	102.7	84.7 (0/10)	109
70.2	57.8	12.4	107.2	91.9 (0/10)	129.7
66.9	58.3	8.6	109.9	73.9 (0/10)	96.4
70.7	59.1	11.6	212.5	271 (11/18)	388.9
67.5	58.1	9.4	205.3	209.8 (3/18)	289
77.5	68.2	9.3	238.6	255.7 (4/18)	336.7
75.1	66.1	9.0	216.1	181 (0/18)	257.5

注:表中(9/10)表示 10 根连梁有 9 根屈服;屈服位移指墙肢或连梁屈服时双肢墙的顶点位移。

2)耦合比下限的选取应针对 R_e ,根据 R_e 调整墙肢和连梁的截面尺寸。目前,在 R_e 的应用中,主要有文献[16-17]通过目标 R_e 完成连梁截面尺寸设计,文献[18]通过弹性阶段层间位移角限值,限制耦合比下限。由于 R_e 与双肢墙的延性和极限承载力无关,因而无需对其限制上限。但是, R_e 与双

肢墙的弹性刚度成正相关,如果 R_e 太小,可能不满足弹性设计时的位移限制要求,所以通过水平位移限制 R_e 下限是合理的。在弯曲变形为主的抗侧力构件中,文献[38]指出采用顶点位移角作为位移限值更加合适;中高层双肢墙以一阶振型变形为主^[1,39],可通过底部剪力法快速估算出小震作用下的基底剪力;双肢墙刚度沿高度均匀分布,可取弹性阶段的顶点位移角限值为 $1/1\ 000$ ^[16]。将小震作用下的基底剪力带入本文式(14)即可判断 R_e 是否满足下限要求,也可根据目标 R_e 反算双肢墙的几何尺寸。

3) 通过耦合比控制双肢墙屈服机制,令 $R_e - R_p \geq 10\%$ 。上述对 R_e 和 R_p 的控制只满足了双肢墙弹性阶段位移限值和塑性阶段较好的受力性能的要求。根据 3.3 节研究结果,通过控制 R_e 和 R_p 的差值可以有效地防止墙肢先于多数连梁屈服,进而实现双肢墙理想的屈服机制。

综上所述,通过控制 R_p 的上限, R_e 的下限,及 R_e 和 R_p 的差值,并采取本文给出弹性和塑性耦合比计算公式和双肢墙顶点水平位移公式,即可高效地应用耦合比指导和完成双肢墙合理的设计。

5 结 论

本文通过理论分析和数值模拟,给出了弹性和塑性耦合比的计算方法和利用耦合比计算双肢墙水平位移的理论计算公式,并通过与数值模拟结果的比对,验证了其有效性;详细分析了耦合比的影响因素和变化趋势、耦合比对双肢墙受力性能的影响以及如何利用耦合比实现双肢墙合理的设计,主要结论如下:

1) 通过将双肢墙墙肢基底附加轴力的解析公式和倾覆力矩表达式带入耦合比定义式中,消去公因子基底剪力,可以推导出三种水平荷载形式下弹性耦合比的理论计算公式。本文弹性耦合比公式能适用于非对称双肢墙,在精度和应用范围上优于统计公式。弹性阶段耦合比主要由双肢墙的几何尺寸所控制。

2) 弹性耦合比与双肢墙轴向影响系数 T 成正比关系;随着双肢墙整体参数 α 的增加,耦合比随之增长的速率越来越慢,当 $\alpha > 10$ 之后,耦合比逐渐趋于平稳。三种水平荷载形式下,相同双肢墙的弹性耦合比从大到小依次为:顶部集中力、倒三角荷载、均布荷载;当 α 在 $3 \sim 10$ 时,水平荷载形式对弹性耦合比的大小影响较明显。

3) 当双肢墙第一根连梁开裂后,连梁墙肢刚度比降低,耦合比开始下降;随着墙肢损伤程度的增加,在墙肢或连梁发生屈服之前,耦合比会进入稳定

变化的阶段,且保持较长时间,直至有墙肢或连梁丧失承载力。在耦合比塑性稳定阶段,当多数连梁先于墙肢屈服时,耦合比呈现出轻微降低的变化趋势;若墙肢先发生屈服,耦合比会出现轻微的上涨。

4) 通过定义塑性耦合比为墙肢基底屈服时的状态,可以利用该状态下墙肢和连梁承载力的关系计算出塑性耦合比,计算结果可以较好地反映塑性阶段耦合比的大小。塑性耦合比主要受墙肢和连梁截面强度所影响,与水平荷载形式几乎无关。塑性耦合比影响双肢墙的极限承载力和延性。

5) 在现有双肢墙顶点位移计算公式的基础上,通过理论推导和化简可以获得利用耦合比计算双肢墙顶点水平位移的公式。弹性耦合比的下限可以通过双肢墙弹性位移角限值进行确定,耦合比上限应针对塑性耦合比。增加 R_e 与 R_p 的差值可以有效地防止墙肢先于多数连梁发生屈服;本文建议 R_e 与 R_p 的差值不应小于 10% 。

参考文献

- [1] EL-TAWIL S, HARRIES K A, FORTNEY P J, et al. Seismic design of hybrid coupled wall systems: state of the art[J]. Journal of Structural Engineering, 2010, 136(7): 755. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000186
- [2] HARRIES K A. Ductility and deformability of coupling beams in reinforced concrete coupled walls[J]. Earthquake Spectra, 2001, 17(3): 457. DOI: 10.1193/1.1586184
- [3] 田建勃,史庆轩,刘云贺,等. PRC 连梁-混合联肢剪力墙抗震性能分析[J]. 工程力学, 2018, 35(11): 53
TIAN Jianbo, SHI Qingxuan, LIU Yunhe, et al. Research on a seismic performance of PRC coupling beam-hybrid coupled shear wall system[J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(11): 53. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2017.07.0575
- [4] 石韵,苏明周,梅许江,等. 高耦连比新型混合连肢墙结构滞回性能拟静力试验研究[J]. 土木工程学报, 2013, 46(1): 52
SHI Yun, SU Mingzhou, MEI Xujiang, et al. Experimental study on hysteretic behavior of innovative hybrid coupled wall system with high coupling ratio[J]. China Journal of Civil Engineering, 2013, 46(1): 52
- [5] 石韵,苏明周. 基于位移控制多点加载的新型混合连肢墙结构非线性有限元分析[J]. 工程力学, 2013, 30(9): 220
SHI Yun, SU Mingzhou. FEM analysis of the hysteretic behavior of innovative hybrid coupled wall system based on displacement controlled multi-points loading[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(9): 220. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2012.05.0377
- [6] SHIU K N, TAKAYANAGI T, CORLEY W G. Seismic behavior of coupled wall systems[J]. Journal of Structural Engineering, 1984, 110(5): 1051. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1984)110:5(1051)
- [7] OZSELCUK A R. Experimental and analytical studies of coupled wall structures[D]. Berkeley: University of California, Berkeley, 1989
- [8] EL-TAWIL S, KUENZLI C M, HASSAN M. Pushover of hybrid coupled walls. I: design and modeling[J]. Journal of Structural Engineering, 2002, 128(10): 1272. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2002)128:10(1272)
- [9] EL-TAWIL S, KUENZLI C M. Pushover of hybrid coupled walls. II: analysis and behavior[J]. Journal of Structural Engineering, 2002, 128(10): 1282. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2002)128:10(1282)

- [10] LEQUESNE R D. Behavior and design of high-performance fiber-reinforced concrete coupling beams and coupled-wall systems[D]. Ann Arbor: University of Michigan-Ann Arbor, 2011
- [11] 孙亚. 带可更换钢连梁的混合联肢剪力墙抗震性能研究[D]. 北京:清华大学,2015
SUN Ya. Study on seismic behavior of hybrid coupled wall with replaceable steel coupling beams[D]. Beijing:Tsinghua University, 2015
- [12] 刘帅,潘超,周志光. 耗能联肢墙体系的减震性能及参数影响[J]. 浙江大学学报(工学版),2019,53(3):492
LIU Shuai, PAN Chao, ZHOU Zhiguang. Seismic performance and parametric influences of damping-coupled wall system[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2019, 53(3):492. DOI: 10.3785/j. issn. 1008-973X. 2019.03.010
- [13] Design of concrete structures for buildings: CSA A23.3—M94[S]. Toronto: Canadian Standards Association, 1994
- [14] 伍云天,李英民,张祁,等. 美国组合联肢剪力墙抗震设计方法探讨[J]. 建筑结构学报,2011,32(12):137
WU Yuntian, LI Yingmin, ZHANG Qi, et al. Seismic design of hybrid coupled walls in United States[J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(12):137
- [15] CHAN-ANAN W, LEELATAVIWAT S, GOEL S C. Performance-based plastic design method for tall hybrid coupled walls[J]. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 2016, 25(14):681. DOI: 10.1002/tal.1278
- [16] 梁兴文,史金田,车佳玲,等. 混凝土联肢剪力墙结构抗震性能控制方法[J]. 工程力学,2013,30(11):207
LIANG Xingwen, SHI Jintian, CHE Jialing, et al. A seismic behavior control method for concrete coupled shear walls[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(11):207. DOI: 10.6052/j. issn. 1000-4750. 2012.07.0559
- [17] 田建勃,王游春,史庆轩,等. 设置钢板混凝土连梁的混合联肢剪力墙结构抗震性能控制方法[J]. 建筑结构学报,2019,40(增刊1):8
TIAN Jianbo, WANG Youchun, SHI Qingxuan, et al. Seismic behavior control method for hybrid coupled shear wall system with plate-reinforced composite coupling beam[J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(S1):8
- [18] 刘丹. 新型混合联肢墙结构抗震性能及可恢复能力研究[D]. 北京:清华大学,2017
LIU Dan. Study on seismic behavior and resiliency of novel hybrid coupled wall structures[D]. Beijing: Tsinghua University, 2017
- [19] LEHMAN D E, TURGEON J A, BIRELY A C, et al. Seismic behavior of a modern concrete coupled wall[J]. Journal of Structural Engineering, 2013, 139(8):1371. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000853
- [20] CHENG Minyuan, FIKRI R, CHEN Chengcheng. Experimental study of reinforced concrete and hybrid coupled shear wall systems[J]. Engineering Structures, 2015, 82:214. DOI: 10.1016/j. engstruct. 2014. 10.039
- [21] LÜ Xilin, CHEN Cong, JIANG Huanjun, et al. Shaking table tests and numerical analyses of an RC coupled wall structure with replaceable coupling beams[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2018, 47(9):1882. DOI: 10.1002/eqe.3046
- [22] CHAALLAL O, GAUTHIER D, MALENFANT P. Classification methodology for coupled shear walls[J]. Journal of Structural Engineering, 1996, 122(12):1453. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1996)122:12(1453)
- [23] DORAN B. A magnified beam algorithm to determine the coupling ratios of R/C coupled shear wall[J]. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 2009, 18(8):926. DOI: 10.1002/tal.508
- [24] CHAALLAL O, NOLLET M J. Upgrading the degree of coupling of coupled shear walls[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1997, 24(6):987. DOI: 10.1139/cjce-24-6-986
- [25] HARRIES K A, MOULTON J D, CLEMSON R L. Parametric study of coupled wall behavior—implications for the design of coupling beams[J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(3):482. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2004)130:3(480)
- [26] LI Guoqiang, PANG Mengde, LI Yanwen, et al. Experimental comparative study of coupled shear wall systems with steel and reinforced concrete link beams[J]. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 2019, 28(18):e1678. DOI: 10.1002/tal.1678
- [27] 黄东升,程文灏,彭飞. 对称双肢短肢剪力墙的低周反复荷载试验研究[J]. 建筑结构学报,2005,26(3):51
HUANG Dongsheng, CHENG Wenrang, PENG Fei. Low-cycle loading experimental study on symmetric double short-pier shear walls[J]. Journal of Building Structures, 2005, 26(3):51. DOI: 10.3321/j. issn:1000-6869. 2005.03.007
- [28] 包世华,张铜生. 高层建筑结构设计和计算(上册)[M]. 2版. 北京:清华大学出版社,2013:126
BAO Shihua, ZHANG Tongsheng. Design and calculation of high-rise building structure (Volume I) [M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2013:126
- [29] SMITH B S, COULL A. Tall building structures: analysis and design[M]. New York: Wiley InterScience, 1991:213
- [30] 张令心,刘韬,陈永盛. 联肢剪力墙墙肢附加轴力计算方法及其影响分析[J]. 哈尔滨工业大学学报,2021,53(10):31
ZHANG Lingxin, LIU Tao, CHEN Yongsheng. Calculation method and impact analysis of the additional axial force in wall piers for coupled shear walls[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2021, 53(10):31. DOI:10.11918/202010066
- [31] 缪志伟. 钢筋混凝土框架剪力墙结构基于能量抗震设计方法研究[D]. 北京:清华大学,2009
MIAO Zhiwei. Study on energy-based seismic design methodology for reinforced concrete frame-shear wall structures[D]. Beijing: Tsinghua University, 2009
- [32] 高层建筑混凝土结构技术规程:JGJ 3—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010
Technical specification for concrete structures of tall building: JGJ 3—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010
- [33] KOLOZVARI K, ORAKCAL K, WALLACE J W. Shear-flexure interaction modeling of reinforced concrete structural walls and columns under reversed cyclic loading[R]. Berkeley: Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 2015
- [34] Seismic evaluation and retrofit of existing buildings: ASCE/SEI 41—13[S]. Reston: American Society of Civil Engineers, 2014
- [35] 龚炳年,方鄂华. 连系梁位移全过程试验与分析研究[J]. 建筑科学,1988(4):41
GONG Bingnian, FANG Ehua. Experimental investigation and full-range analysis of reinforced concrete coupling beam between shear walls[J]. Building Science, 1988(4):41
- [36] NAISH D, WALLACE J W. Testing and modeling of diagonally reinforced concrete coupling beams[C]//9th US National and 10th Canadian Conference on Earthquake Engineering. Toronto: [s. n.], 2010:1575
- [37] 陈云涛,吕西林. 联肢剪力墙抗震性能研究—试验和理论分析[J]. 建筑结构学报,2003,24(4):26
CHEN Yuntao, LÜ Xilin. Seismic behavior of coupled shear walls—experiment and theoretical analysis[J]. Journal of Building Structures, 2003, 24(4):26. DOI: 10.3321/j. issn: 1000-6869. 2003.04.004
- [38] 聂建国,田淑明. 框架—混凝土核心筒混合结构位移限值的探讨[J]. 建筑结构,2012,42(4):31
NIE Jianguo, TIAN Shuming. Discussions about drift limit of frame-concrete corewall hybrid structures[J]. Building Structure, 2012, 42(4):31
- [39] HASSAN M, EL-TAWIL S. Inelastic dynamic behavior of hybrid coupled walls[J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(2):293. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9445(2004)130:2(285)