

内置 GFRP 管钢管混凝土柱延性非线性分析

余宇豪¹, 律天昊¹, 王沛文¹, 韩金池¹, 石梦晗²

(1. 辽宁工程技术大学 土木工程学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 西安外事学院 人文艺术学院, 西安 710077)

摘要:利用 ABAQUS 有限元软件建立内套圆形 GFRP(玻璃纤维增强复合材料)管圆钢管混凝土组合柱轴心受压和单向偏心受压模型,研究内套 GFRP 管厚度、纤维缠绕角度、外层钢管厚度和构件长径比 4 个因素对构件的位移延性系数的影响,从而得到对构件的延性影响。结果表明:轴压工况下,此组合柱的位移延性系数随着内套圆形 GFRP 管厚度、长径比的增加而变小,随着外层钢管厚度递增而变大,GFRP 管纤维缠绕角度在 75°~90°对构件位移延性系数提升效果最好;偏压工况下,内套 GFRP 管厚度对组合柱的位移延性系数影响规律不明显,外层钢管厚度对构件的位移延性系数前期影响不大,但对后期影响显著,随着构件的长径比增大,构件的位移延性系数呈非线性下降。

关键词:内置圆形 GFRP(玻璃纤维增强复合材料)管;轴心受压;单向偏心受压;延性

中图分类号:TU352.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2023)09-0227-06

为满足现代实际工程中力学工作性、耐久性、抗(减)震好等需求,新型组合柱构件不断孕育而生,并相继运用在土木工程中。目前,国内外相关研究主要集中在 GFRP(玻璃纤维增强复合材料)管约束混凝土柱^[1-5]力学性能与抗震性能试验研究、GFRP 管-混凝土-钢管组合构件^[6-7]抗震(滞回)性能试验与有限元软件模拟研究并取得一定的成果。一旦发生火灾,GFRP 材料裸露在混凝土或钢管表面不能在高温下长期使用。虽然 GFRP 材料相较于其他 FRP 材料具有轻质高强、隔声性能好、可塑性强、混凝土热膨胀系数更加接近、防腐抗疲劳等特性可作为建材的重要补充,但其作为一种弹脆性材料,其破坏属于脆性破坏。与钢材相比,持荷能力弱、延性较差,因此本文将 GFRP 材料置于混凝土内部。与相同截面尺寸的双钢管混凝土组合柱相比,内套 GFRP 管比内套钢管对核心混凝土的约束紧箍作用更好,降低用钢量,从而节约成本。与内置 GFRP 管方钢管混凝土组合柱相比,方钢管对混凝土约束呈不均匀分布,易在角部出现应力集中现象。故本文采用圆型钢管约束混凝土。利用 ABAQUS 研究多因素对内套圆形 GFRP 管圆钢管混凝土组合柱在轴心受压工况下和单向偏心受压工况下位移延性系数影响规律是很有必要的。

此新型构件截面具体形式如图 1 所示。4 部分材料高效协同工作,使得构件具有良好的力学、耐久、抗震性能。首先,GFRP 管的存在,使核心混凝土处于复杂应力状态,强度和塑性均得到良好改善;同时,也避免了外钢管过早产生局部弯曲,提高构件的延性。其次,环形混凝土的套箍作用使构件呈延性破坏,避免或延缓 GFRP 管过早地发生屈曲破坏。因此,此新型组合柱较其他构件,具有较好的延性,即抗震性能良好。

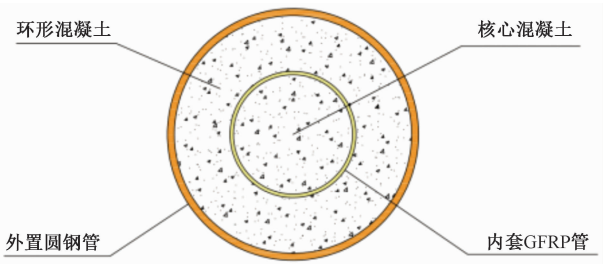


图 1 组合柱截面示意图

1 材料本构关系的确立

环形混凝土采用《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)中所提供的单轴受拉、受压的本构模型^[8];考虑到核心混凝土受钢管、GFRP 管双重套箍约束,提出了核心混凝土的套箍系数影响下的

收稿日期:2022-10-12

作者简介:余宇豪(2001—),男,河南安阳人,辽宁工程技术大学土木工程学院,研究方向为地下工程;律天昊(2002—),男(满族),辽宁阜新人,辽宁工程技术大学土木工程学院,研究方向为土木工程;王沛文(2001—),男,河南许昌人,辽宁工程技术大学土木工程学院,研究方向为建筑工程;韩金池(2001—),男,山东济宁人,辽宁工程技术大学土木工程学院,研究方向为土木工程地下工程;石梦晗(2002—),女,河南濮阳人,西安外事学院人文艺术学院,研究方向为网络与新媒体。

本构关系模型,具体表达式详见文献[9];GFRP 材料采用文献[2]中的本构关系模型;钢材本构采用二次塑流模型^[10]。

2 有限元模型的建立

采用 ABAQUS 建立轴压与单向偏压工况下的内套圆形 GFRP 管圆钢管混凝土组合柱有限元模型。

2.1 单元类型与网格划分

核心与环形混凝土、上下盖板均采用 C3D8R 实体单元。内套圆形 GFRP 管采用 Composite 模拟中常用 3 个 Simpson 积分点的 S4R 壳单元,并采用单向多层纤维环向缠绕而成。GFRP 材料的方向设置与多层 GFRP 材料铺层情况可以通过 ABAQUS 有限元软件中“查询”(Query)中的“层堆叠绘图”(Ply stack plot)查看 GFRP 材料铺层顺序,如图 2 所示。外层圆形钢管也采用 9 个 Simpson 积分点的 S4R 壳单元。为使得此新型有限元模型与实际构件受压试验后结果相吻合,需定义各材料的重要参数,包括单向 GFRP 材料的力学参数^[11]、核心与环形混凝土的强度等级(均为 C40)、塑性损伤模型中的混凝土受压行为参数^[12]、钢材力学性能指标^[12]。由于模型中的各部分几何形状规整,故选择

ABAQUS 中默认的自适应网格划分^[12],如图 3 所示。

2.2 界面间的接触关系

选取有限滑移模式建立各部分材料的界面接触关系。外层圆形钢管、内套圆形 GFRP 管与内外混凝土之间的接触关系均采取法向“硬”接触与切向“库仑摩擦”,此时,摩擦系数为 0.6,后者为 0.2。上下端板与内外混凝土部分的接触关系为法向“硬”接触,与外层圆形钢管、内套圆形 GFRP 管之间的接触关系采用软件中提供的“壳与实体耦合”,通过设置“壳单元”的边与“实体单元”的面建立接触关系^[12]。综上接触关系中,将外层圆形钢管、内套圆形 GFRP 管作为“主控面”,将环形与核心混凝土作为“从属面”,均采用“面面接触”^[12]。上下端板外表面各定义一个参考点,上下参考点与两个端板均采用绑定约束,以便设置边界条件。

2.3 分析步的设置

模拟需考虑几何非线性,故将“Nlgeom”设置为“on”。考虑到此模型对于运行速度、计算精度的要求,相关参数设置为:最大增长步数为 1 000;初始时间增量为 0.01;最大与最小时间增量分别为 0.1、 10^{-18} 。

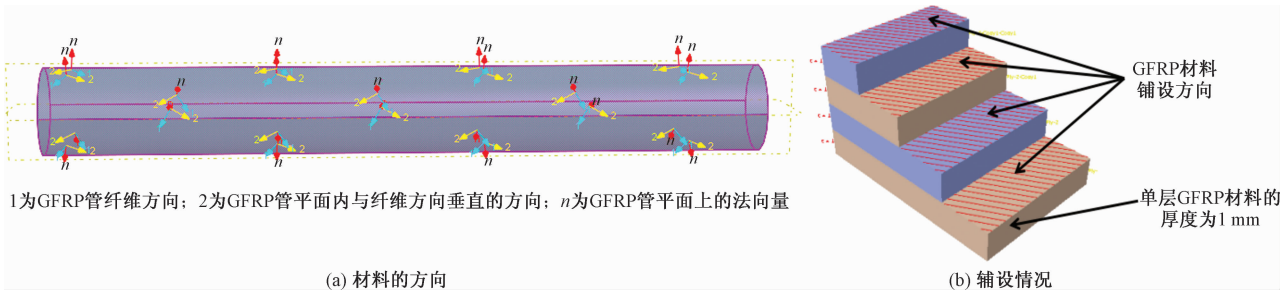


图 2 GFRP 材料的方向与铺设情况^[12]

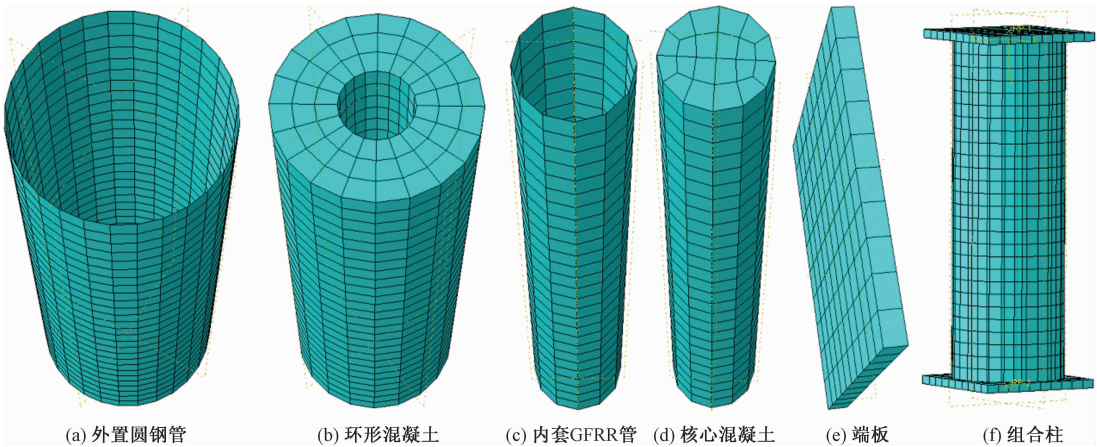


图 3 各部分网格划分

2.4 边界条件和加载方式

为保证模型快速收敛,全过程的加载方式只采用位移加载。其中,轴压模型中的底部参考点设置为“对称/反对称/端部固定”,即 $U_1=U_2=U_3=U_{R1}=U_{R2}=U_{R3}=0$ ($U_1、U_2、U_3$ 分别对应的 XYZ 轴 3 个方向的平移自由度; $U_{R1}、U_{R2}、U_{R3}$ 分别对应的 XYZ 轴 3 个方向的轴旋转自由度);此时模型上部的参考点设置为“位移/旋转边界条件”,即 U_3 方向设置竖向位移值的大小。对于单向偏压模型则利用“位移/旋转边界条件”设置竖向位移 ($U_1=U_2=U_{R1}=U_{R3}=0$),即: U_3 方向设置竖向位移值的大小, U_{R3} 方向的旋转边界条件不设置和底部约束 ($U_1=U_2=U_3=U_{R3}=0$),不设置 U_{R2} 和 U_{R3} 方向的边界条件^[12]。

3 数值模拟结果验证

参照《内置 GFRP 管的钢管混凝土组合柱的轴压性能研究》中的 10 根试件轴压结果从破坏模态、荷载-位移曲线与极限承载力 3 方面进行对比,验证本文模型的有效性。

4 位移延性系数影响因素分析

4.1 轴压下位移延性系数影响因素分析

将位移延性系数作为评价新型组合柱延性的一项重要指标,位移延性系数越大,构件延性越好,抗震、减震性能越好^[12],其计算表达式为 $\mu_{\Delta}=\Delta_u/\Delta_y$ 。根据构件荷载-位移骨架曲线计算出等效屈服变形、极限变形和延性系数。本文采用崔济东 YPD 程序,该软件提供了 3 种常用的等效屈服位移计算方法:几何作图法(方法 1)、等能量法(方法 2)、R. Park 法(方法 3)。最终采用 3 种方法计算的平均值作为新型组合柱位移延性系数。

4.1.1 内套圆形 GFRP 管壁厚度的影响

设置圆形钢管厚度、环形与核心混凝土强度等级以及内套圆形 GFRP 管纤维缠绕角度分别为 7 mm、C40 以及 75°时,分析内套 GFRP 管厚度为 2~7 mm,直径为 100 mm(构件 A1~A6)、150 mm(构件 C1~C6)、200 mm(构件 D1~D6)3 组构件不同方法下的位移延性系数。3 组均与普通钢管混凝土柱(B0)进行对比,构件位移延性系数见表 1。

当 GFRP 管直径保持一致时,组合柱的位移延性系数会随着 GFRP 管厚度的增加而变大,导致延性变差[图 4(a)]。当 GFRP 管直径为 100 mm,随着 GFRP 管厚增加,位移延性系数变化幅度较小;当直径为 150、200 mm 时,曲线形状走势相同,

GFRP 管厚度范围在 5~7 mm 较 0~5 mm 增幅明显,斜率较大,对构件延性影响较大^[12]。

表 1 构件的位移延性系数

编号	GFRP 尺寸 (厚度×直径)/ (mm×mm)	方法 1	方法 2	方法 3	3 种方法 平均值	各组 平均值
B0	0×0	3.61	2.99	3.35	3.32	3.32
A1	2×100	12.87	3.94	7.73	8.18	9.54
A2	3×100	14.82	3.44	10.82	9.69	
A3	4×100	16.21	3.88	9.02	9.70	
A4	5×100	14.85	3.73	10.67	9.75	
A5	6×100	15.09	3.57	11.21	9.95	
A6	7×100	14.70	3.83	11.36	9.97	
C1	2×150	9.58	3.00	3.60	5.39	6.98
C2	3×150	11.10	3.10	3.36	5.85	
C3	4×150	11.62	2.93	3.18	5.91	
C4	5×150	12.00	2.90	4.83	6.58	
C5	6×150	12.98	3.10	8.98	8.36	
C6	7×150	13.70	3.97	11.63	9.77	
D1	2×200	9.21	2.24	1.80	4.42	5.60
D2	3×200	9.75	2.32	1.93	4.67	
D3	4×200	10.19	2.43	1.82	4.81	
D4	5×200	10.56	2.51	1.89	4.99	
D5	6×200	11.56	2.80	5.40	6.59	
D6	7×200	12.09	3.94	8.42	8.15	

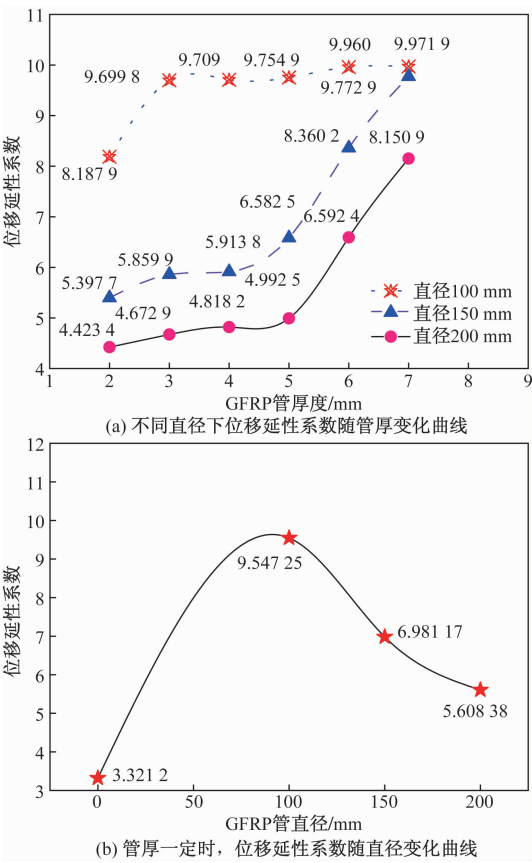


图 4 位移延性系数随 GFRP 管厚和直径的变化曲线

当 GFRP 管厚一定时,组合柱位移延性系数随 GFRP 管直径的增大而变小,位移延性系数分别为 9.55、6.98、5.61[图 4(b)],故构件延性较差。但此新型组合柱较普通钢管混凝土柱的位移延性系数(3.32)较大,分别提高了 188%、108%、69%,这体现了新型组合柱的优势。

4.1.2 内套 GFRP 管纤维缠绕角度的影响

当混凝土强度等级、钢管厚度、长径比、GFRP 尺寸(厚度×直径)分别为 C40、5 mm、3、2 mm×100 mm,设置内套 GFRP 管纤维缠绕角度范围在 0°~90°,位移延性系数随内套 GFRP 管纤维缠绕角度的变化如图 5 所示,曲线呈二次抛物线,内套 GFRP 管纤维缠绕角度为 45°左右时,构件延性最差,缠绕角度应设计在 75°~90°,构件延性较好。

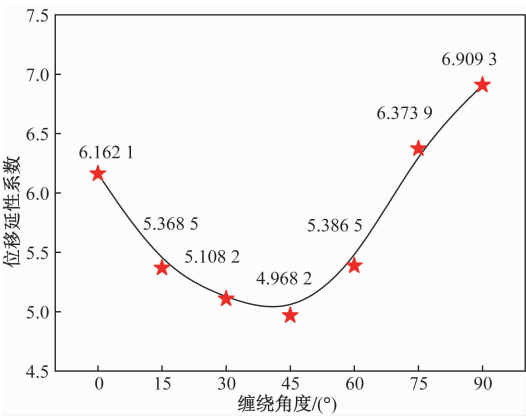


图 5 位移延性系数随内套 GFRP 管纤维缠绕角度变化曲线

4.1.3 外层钢管厚度的影响

当混凝土强度等级、长径比、GFRP 尺寸(厚度×直径)、GFRP 管纤维缠绕角度分别为 C40、3、4 mm×100 mm、75°,设置外层钢管厚度为 7~11 mm,位移延性系数随外层钢管厚度变化如图 6 所示。位移延性系数随外层钢管厚度递增呈线性增长。在所有影响因素中,钢管厚度影响位移延性系数较大。

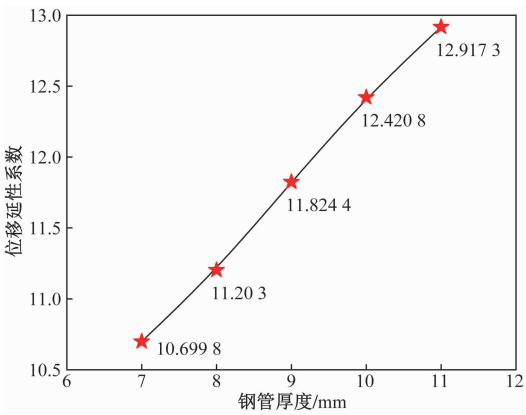


图 6 位移延性系数随钢管厚度变化曲线

4.1.4 长径比的影响

当混凝土强度等级、钢管厚度、GFRP 尺寸(厚度×直径)、GFRP 管纤维缠绕角度分别为 C40、7 mm、4 mm×100 mm、75°,长径比分别为 2.5、3.5、4.0,位移延性系数随长径比变化曲线如图 7 所示,位移延性系数随着构件长径比的增加而降低,且下降幅度逐渐变小,长径比对构件延性影响显著。

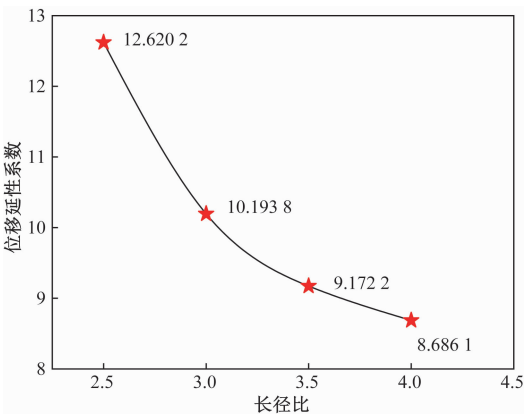


图 7 位移延性系数随长径比变化曲线

4.2 偏压下载移延性系数影响因素分析

4.2.1 偏心距的影响

当混凝土强度等级、长径比、外钢管厚度、GFRP 管纤维缠绕角度、构件尺寸(高度×直径)分别为 C40、3、4 mm、75°、600 mm×200 mm。设置偏心距范围为 30~90 mm,共计 15 组构件,不同偏心距下的位移延性系数变化曲线如图 8 所示。对于相同厚度的 GFRP 管,位移延性系数随偏心距的增大而减小。原因是大偏心构件破坏属于受拉破坏,加载侧与非加载侧的应力差距较大,导致内套 GFRP 管约束混凝土作用降低,紧箍作用难以发挥^[13]。当达到极限承载力以后,外围钢管屈服较快,单位荷载所产生的纵向位移较大。

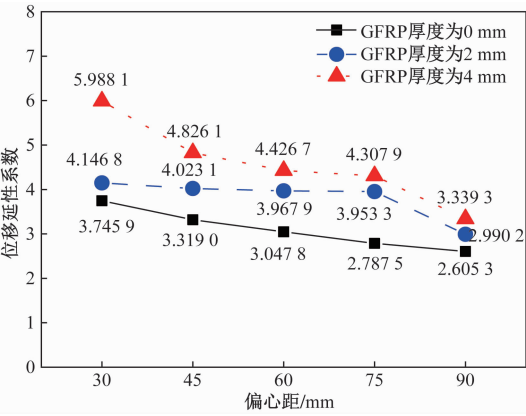


图 8 位移延性系数随不同偏心距变化曲线

4.2.2 内套 GFRP 管厚度的影响

如图 9 可知,随 GFRP 管厚度的增加,位移延性系数增大,除钢管混凝土构件曲线呈线性小幅下降,其余两条曲线无规律可循。当钢管混凝土中无内套 GFRP 管时,曲线略呈线性小幅下降,但下降趋势不明显。当 GFRP 管厚为 2 mm 时,偏心距在 30~75 mm,位移延性系数变化很不明显,偏心距大于 75 mm,数值下降速度很快。当 GFRP 管厚为 4 mm 时,曲线下降明显特别在 30~45 mm、75~90 mm 两个区间。由于内套 GFRP 管的存在,各组合柱的位移延性系数均高于普通钢管混凝土柱,即新型组合柱的延性较普通钢管混凝土柱好。

4.2.3 外钢管厚度对构件延性的影响

当混凝土强度等级、长径比、GFRP 管厚度、GFRP 管纤维缠绕角度、构件尺寸(高度×直径)、偏心距分别为 C40、3、4 mm、75°、600 mm×200 mm、30 mm,如图 9 可知,位移延性系数会随外钢管厚度增大而增大,前期增长缓慢,后期增长较快,同时,偏心距增大,位移延性系数随钢管厚度增加增幅缓慢。当钢管厚度为 4 mm 时,偏心距为 45 mm 与 60 mm 所对应的位移延性系数数值相差很小,但随钢管厚度增加,位移延性系数数值相差很大。

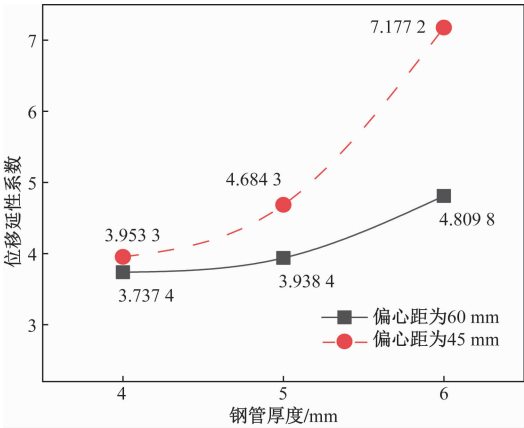


图 9 位移延性系数随钢管厚度变化曲线

4.2.4 构件的长径比对构件延性的影响

当混凝土强度等级、外钢管厚度、GFRP 管纤维缠绕角度、构件尺寸(高度×直径)分别为 C40、6 mm、75°、600 mm×200 mm,设置构件的长径比分别为 4、6、8。由图 10 可知:普通钢管混凝土柱,位移延性系数随构件长径比增大呈线性小幅下降;内套 GFRP 管钢管混凝土组合柱,位移延性系数随构件的长径比的增大呈非线性下降,且早期下降速度较快,后期下降速度变缓^[12]。

新型组合柱位移延性系数均高于普通钢管混凝土柱,足可以说明 GFRP 管对提高构件延性有显著的作用。

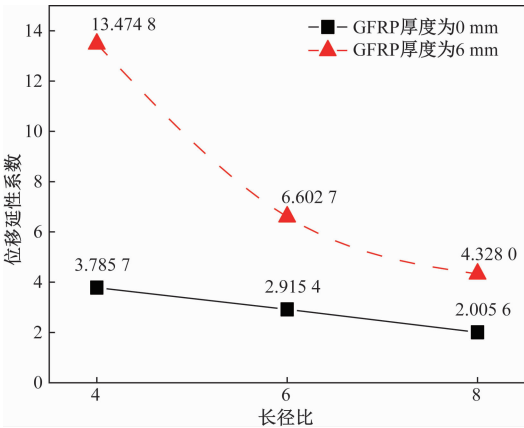


图 10 位移延性系数随长径比变化曲线

5 结论

- 1) 新型组合柱与普通钢管混凝土柱相比,在轴压和偏压工况下,位移延性系数均有显著提高,即抗震性能良好。
- 2) 轴压工况下,内套 GFRP 管厚度提高组合构件延性能力较强。内套 GFRP 管纤维缠绕角度在 75°~90°时对构件延性提升效果最好。与其他影响因素相比,外钢管的厚度对轴压组合柱的延性影响最大,随钢管厚度的递增均呈线性增长,变化规律最明显。
- 3) 偏压工况下,构件延性随外钢管厚度增加而提高。与其他影响因素相比,内套 GFRP 管厚度因素对构件后期延性的发展影响最大。长径比对构件延性的贡献最小。

参考文献

[1] 马文. GFRP 管约束型钢再生混凝土柱抗震性能试验研究[D]. 广州: 广州大学, 2020.

[2] 龙跃凌, 盘创汉, 黄锡文. GFRP 管以及 LRSFRP 管约束高强混凝土圆柱的轴压性能[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(26): 275-279.

[3] 樊彬彬. GFRP 管约束混凝土短柱轴压承载力和滞回性能研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2018.

[4] 王思晴. GFRP 管钢管混凝土纯弯构件的抗震性能研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2019.

[5] 方劲松. GFRP-钢复合管约束再生混凝土柱的抗震性能试验研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2018.

[6] 于殿友. 实腹式 GFRP-混凝土-铜管组合柱轴压与抗震性能研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2020.

[7] 武先梅. 中空 GFRP 管-混凝土-钢管组合梁抗弯性能及滞回性能分析[D]. 大庆: 东北石油大学, 2020.

[8] 李艳艳,刘彬,张玮天. 十字形截面钢-混凝土组合异形柱受压性能及有限元分析[J]. 科学技术与工程, 2018, 18 (22):249-255.

[9] 狄成义. 内置 CFRP 圆管方钢管高强混凝土轴压中长柱与长柱的有限元分析[D]. 沈阳:沈阳建筑大学, 2011.

[10] 章彦,谭向军,王群雄,等. 竖向均布荷载作用下四肢钢管混凝土格构柱力学性能数值分析[J]. 钢结构, 2015, 30 (10):38-43.

[11] 张秋坤. GFRP 管混凝土构件受压性能有限元分析[D]. 沈阳:东北大学, 2014.

[12] 石起振. 内置 GFRP 管圆钢管混凝土组合柱力学性能有限元分析[D]. 阜新:辽宁工程技术大学, 2017.

[13] 石起振,王来贵,吕学涛,等. 内置 GFRP 管钢管混凝土短柱轴压力学分析[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2018, 37(3):516-521.

Analysis of Influence Parameterson Ductility of Concrete Column with Built-in GFRP
Tube and Circular Steel Tube under Axial Compression Bias

SHE Yuhao¹, LYU Tianhao¹, WANG Peiwen¹, HAN Jinchi¹, SHI Menghan²

(1. School of Civil Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, China;
2. College of Humanities and Arts, Xi'an International University, Xi'an 710077, China)

Abstract: Based on the complete analysis of mechanical properties of GFRP (glass-fiber reinforced plastic) tube-circular steel tube concrete column under axial compression and bias, in order to study the influence of the four influencing parameters of the thickness of the internal GFRP tube, the thickness of the external steel tube and the aspect ratio of the member on the ductility of the composite short column of GFRP tube-circular steel tube concrete under axial compression and bias, the finite element software ABAQUS is used to simulate the influence of the combined short column under axial compression and bias pressure under the condition of influencing parameter changes. The numerical simulation results show that the simulation results of ABAQUS are in good agreement with the experimental results. In the axial pressure state, when the diameter of the internal GFRP tube remains the same, the ductility of the composite column decreases with the increase of the thickness of the internal GFRP tube, the ductility of composite column is improved with increasing thickness of external steel tube, the ductility of composite column deteriorates with the increase of aspect ratio GFRP tube fiber winding Angle of 75°~90° has the best effect on improving the displacement ductility coefficient of components. In the state of bias mechanics, the thickness of GFRP tube has the greatest influence on the ductility of composite column, the ductility of the small eccentricity column is not affected by the thickness of the outer steel tube, the ductility of the large eccentricity column is improved with the thickness of the outer steel tube increasing, the ductility of the composite column decreases non-linearly with the increase of the aspect ratio of the member. The decreasing speed is faster in the early stage and slower in the later stage.

Keywords: built-in circular GFRP (glass-fiber reinforced plastic) tube; axial compression; eccentric compression; ductility