

预铸复合螺箍 SRC 柱之轴压行为研究

尹衍樑¹, 翁正强², 王瑞祯¹, 梁景裕²

(1. 润泰集团, 台湾台北 10492; 2. 台湾交通大学土木工程系, 台湾新竹 30050)

[摘要] 开展了一系列大尺寸钢骨钢筋混凝土矩形柱的轴压试验, 旨在探讨新型的复合螺旋箍筋或“尹氏螺箍”在矩形 SRC 柱之使用效益。由于“尹氏螺箍”采用自动化加工制造, 可大幅降低箍筋绑扎之人力及缩短工期, 极具经济效益, 很适合用于预铸工法。依据力学原理探讨 SRC 柱箍筋用量的合理性, 研究参数包括箍筋的型式、间距及钢骨之型式、SRC 柱之轴压强度与韧性。由于 SRC 柱内部的钢骨亦能够围束混凝土, 有助于降低 SRC 柱箍筋之需求量, 达到更经济的设计结果; 且螺旋箍筋对混凝土的围束效果比传统水平闭合箍筋更好, 可提升柱之强度与抗震能力。试验结果显示, 配置新型五螺箍之 SRC 柱可以发展出良好的强度与韧性, 且具备良好的经济效益。研究并建立了一组适合这种新型 SRC 柱之围束箍筋设计方法, 以提供学术界与工程界参考。

[关键词] 预铸工法; 钢骨钢筋混凝土 (SRC); 矩形 SRC 柱; 复合螺箍; 五螺箍; 轴压强度

[中图分类号] TU37 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742 (2006) 12-0016-15

基本上, 钢骨钢筋混凝土 (steel reinforced concrete, SRC) 建筑构造结合了钢骨 (S) 与钢筋混凝土 (RC), 使得它可以兼具 S 构造与 RC 构造之特色。由于 SRC 构造具有许多结构力学的优点, 因此近年来台湾采用 SRC 构造的建筑物有逐渐增加之趋势^[1]。一个经过适当设计的 SRC 构造可以撷取 S 与 RC 构造的优点, 并可利用它们来互相截长补短, 达到更安全与更经济的双赢目标。以 SRC 柱为例, 包覆于钢骨表面的混凝土可以发挥以下功能: **a.** 提供钢骨柱防火被覆; **b.** 增进钢骨柱防锈功能; **c.** 提升钢骨柱之抗压能力; **d.** 增加钢骨柱之结构劲度。另一方面, 由于 SRC 柱中之钢骨亦能够提供 SRC 柱内混凝土一部分的围束功能, 因此亦有助于降低 SRC 柱箍筋之需求量, 达到更为经济的设计结果^[2]。

目前矩形 SRC 柱之箍筋大多配置水平闭合箍筋 (hoop, 或称为横箍筋), 如图 1 所示^[3]。由于横箍筋之绑扎十分耗费人力, 因此若采自动化机械加工的螺旋箍筋 (spiral), 将可大幅降低箍筋

绑扎之人力需求。再者, 螺旋箍筋具有连续性, 不像每支横箍筋均为独立个体, 且需在角隅处以弯钩来固定, 因此螺旋箍筋不仅对混凝土之围束效果比横箍筋更好, 亦能节省箍筋的用量。

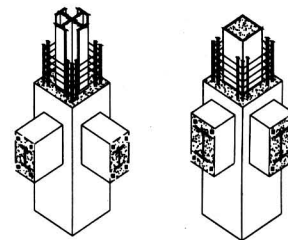


图 1 配置传统水平闭合箍筋矩形 SRC 柱示意图^[3]

Fig.1 Rectangular SRC columns with rectilinear perimeter hoop confinements^[3]

五螺箍 (5-spirals) 的创新构想由尹衍樑博士率先提出, 因此又称之为尹氏螺箍 (Yin's spirals), 如图 2 所示, 五螺箍的配置方式是以一个中心的大圆螺箍, 再搭配四个角落的小圆螺箍交织而成。这

种创新的配置方式突破了传统螺旋箍筋仅适用于圆形断面柱的限制，巧妙地克服了螺旋箍筋应用于矩形断面柱的缺点，使它对矩形柱四个角落的混凝土发挥良好的围束效果。再者，由于五螺箍可以采用自动化加工制造，可大幅降低传统箍筋绑扎之人力并缩短工期，因此极具经济效益，很适合用于预铸工法。关于柱箍筋采用新型五螺箍的配置方式，已经由张国镇、尹衍樑、王瑞祯、王柄雄等证实可以成功地应用于矩形 RC 柱上^[4, 5]。

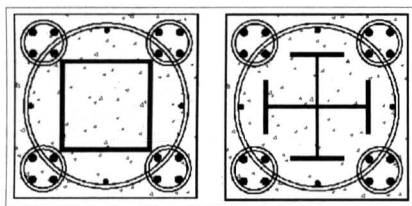


图 2 配置新型五螺箍矩形 SRC 柱截面示意图
Fig.2 Rectangular SRC column cross-sections with 5-spiral confinements

本研究拟进一步探讨此种新型的复合式五螺箍是否也可以推广应用于矩形 SRC 柱。拟针对采用五螺箍之矩形 SRC 柱进行轴压强度与韧性之研究，目的在于探讨这种新型的五螺箍应用于矩形 SRC 柱之可行性及经济效益，并对未来的工程应用提供适当之建议。

另一方面，关于 SRC 柱中之钢骨亦能够对 SRC 柱内之混凝土提供围束作用，可以由图 3 与图 4 来加以说明。如图 3 所示，Mirza 等对包覆 H 型钢骨之 SRC 柱的研究显示^[6]，由于 SRC 柱中有钢骨存在，混凝土受围束之情形有别于一般纯 RC 柱。此外，翁正强等进一步考量包覆十字型钢骨对混凝土之围束区域^[7]，如图 4 所示。为了考量钢骨对混凝土之围束效应，将 SRC 柱截面中之混凝土分为三种不同的区域：一为“高度围束区”（highly confined area）（如图 3 及 4 中之深灰色部份），即受钢骨翼板与腹板间所围束之混凝土；二为“普通围束区”（ordinarily confined area）（如图 3 及 4 中浅灰色部份），即箍筋内侧之混凝土但不包含上述钢骨翼板与腹板所包围之区域；三为“未受围束区”（unconfined area）（如图 3 及 4 中之空白部份），即箍筋外围之混凝土部份。基于此一概念，翁正强等建议对包覆 H 型钢骨之 SRC 柱可采用“三角形围束模式”来仿真混凝土受围束之状态^[7]；对包覆十

字型钢骨之 SRC 柱则可采用“矩形围束模式”来仿真，如图 5 及图 6 所示。

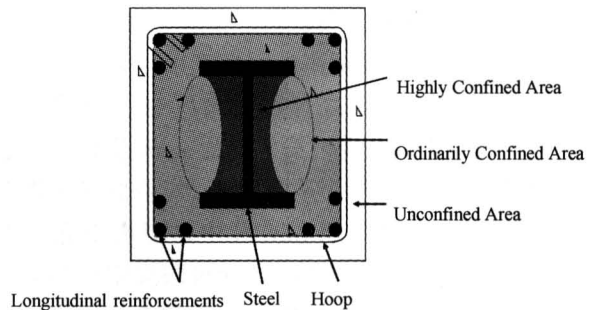


图 3 包覆 H 型 SRC 柱中混凝土受围束情形^[9]
Fig.3 Conditions of concrete confinement in a SRC column with H-shape steel^[9]

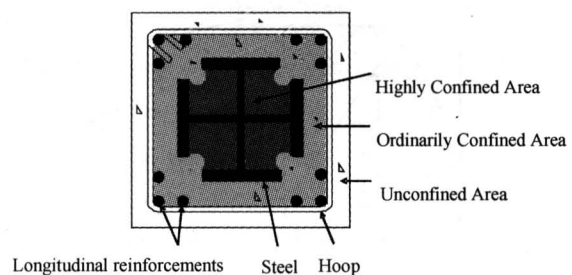


图 4 包覆十字型 SRC 柱中混凝土受围束情形^[9]

Fig.4 Conditions of concrete confinement in a SRC column with cross-H steel^[9]

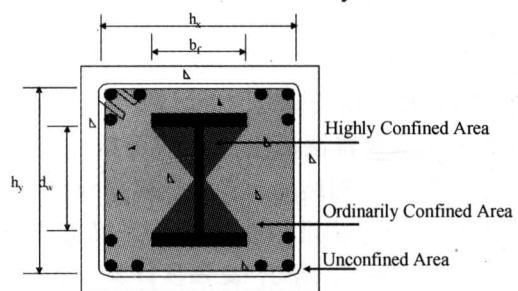


图 5 三角形围束模式

Fig.5 Triangular confining model

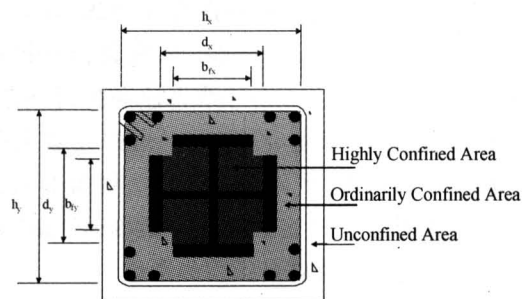


图 6 矩形围束模式

Fig.6 Rectangular confining model

由于 SRC 柱中各区域之混凝土受到的围束程度并不相同，因此对于混凝土抗压强度的考量亦有所差异。图 7 显示 Mirza 等在考虑包覆 H 型钢骨 SRC 柱中之混凝土受到高度围束作用、普通围束作用以及未受围束作用之情形时的应力 - 应变曲线图^[8, 9]。该应力（应变曲线图系由 Kent 及 Park^[10]之混凝土在不同围束情形下的应力 - 应变曲线图修正求得，由图 7 中可知当 SRC 柱中之混凝土完全未受到围束作用时，混凝土应力达极限强度后即迅速递减。但若 SRC 柱中之混凝土受到良好的围束，则混凝土之极限应变明显增大。

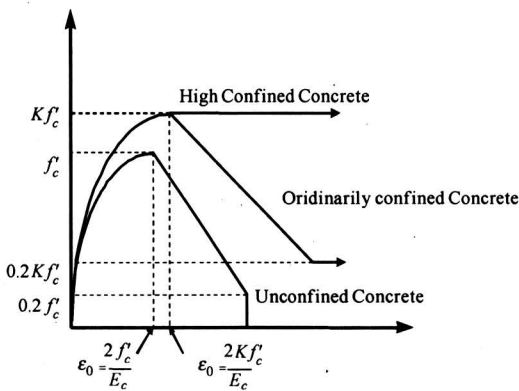


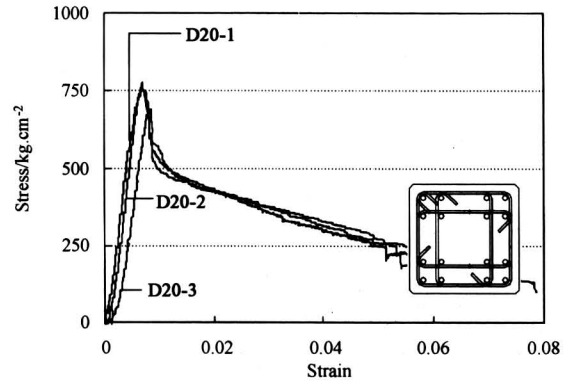
图 7 包覆 H 型 SRC 柱中混凝土应力 - 应变曲线^[8]

Fig.7 Stress-strain curve of concrete in SRC column with H-shape steel^[8]

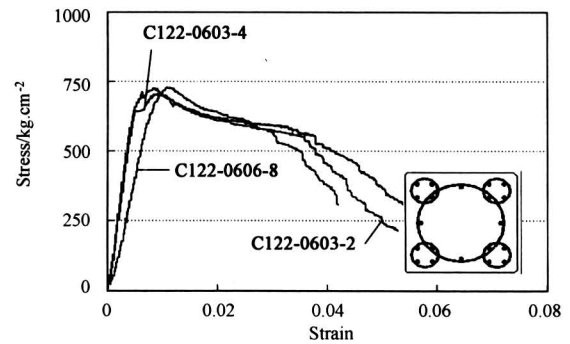
在 SRC 柱之相关研究方面，1976 年 Furlong 建议利用转换系数将混凝土转换为等效之钢骨^[11]，然后再利用 AISC 钢结构之设计公式来设计 SRC 构件。1983 年 Furlong 进一步比较 ACI 规范及 AISC-LRFD 规范对 SRC 受压构件之强度计算方法^[12]，发现 ACI 之计算结果过于保守，且其计算过程较为繁琐。1991 年 Hamdan 等探讨混凝土强度、围束效应及钢骨表面处理对 SRC 柱钢骨及 RC 接口握裹强度之影响^[13]。1992 年 Wakabayashi 研究高强度钢材于 SRC 构造之应用^[14]。1995 年蔡克铨等探讨钢骨量、主筋量及箍筋间距对包覆型 SRC 短柱之极限强度的影响^[15]。1996 年叶士青考虑钢骨截面形状、钢骨量、箍筋间距、箍筋形式等参数探讨 SRC 短柱之强度、围束效应及剩余强度的影响^[16]。

另一方面，2005 年张国镇、尹衍樑、王柄雄等以多种新型式之围束箍筋进行一系列的矩形 RC 柱轴压试验^[4, 5]，试验结果显示，在适当的组合之

下，复合式螺旋箍筋可以成功地应用在矩形 RC 柱中，并能对 RC 柱核心之混凝土产生良好的围束效果。图 8 显示该试验之五螺箍 RC 柱及传统横箍 RC 柱之应力应变曲线。由图中可以看出，配置复合式螺旋箍筋之 RC 柱具有较佳之延展性，亦即其韧性明显优于配置传统矩形横箍筋之 RC 柱。



a. 传统横箍 RC 柱受轴压之应力 - 应变曲线
a. Stress-strain curves of RC columns with traditional rectilinear hoops



b. 五螺箍 RC 柱受轴压之压力 - 应变曲线
b. Stress-strain curves of RC columns with 5-Spirals confinements

图 8 传统横箍 RC 柱与五螺箍 RC 柱之应力 - 应变曲线比较^[4]

(注：1 kgf/cm² = 0.098 N/mm²)

Fig.8 Comparisons of stress-strain curves between RC columns with traditional rectilinear hoops and RC columns with 5-Spirals confinements^[4]

对于采用五螺箍之矩形 SRC 柱，目前尚未发现已经发表之研究文献。为了探讨这种新型 SRC 柱的力学行为与经济效益，本研究进行系列的大尺寸短柱轴压试验，总共包含 11 支 SRC 柱与 2 支 RC 柱，作为评估这种新型五螺箍 SRC 柱之强度与韧性的依据，并对其未来的工程应用提供适当的建议。

1 相关设计规范之回顾

简要回顾目前美国 ACI 318 Code (2005)^[17], AISC Seismic Provisions (2005)^[18], 及台湾最新公告 (2004) 中关于 SRC 柱之围束箍筋的设计规定^[19]。

1.1 美国 ACI 设计规范

美国 ACI - 318 规范广泛应用于钢筋混凝土结构之设计, 不过目前该规范对 SRC 柱之围束箍筋量尚无明文规定。该规范第 21 章中规定, 采用螺箍筋之一般钢筋混凝土柱, 其螺箍筋之体积比 ρ_s , 不得小于下列二式之规定:

$$\rho_s = 0.45 \left(\frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \left(\frac{f'_c}{f_{yh}} \right) \quad (1)$$

$$\rho_s = 0.12 \left(\frac{f'_c}{f_{yh}} \right) \quad (2)$$

其中 f'_c 为混凝土之抗压强度; f_{yh} 为围束箍筋之屈服强度; A_g 为 SRC 柱之全截面积; A_c 为受箍筋围束部分柱核之截面积。式 (2) 系考虑将式 (1) 中 A_g 与 A_c 之比值取为 1.25 时所求得之结果。

再者, ACI - 318 规范第 21 章 21.4.4 节中规定采用矩形闭合箍筋及系筋之 RC 柱之最小围束箍筋量 (A_{sh}) 不得小于下列二式之规定:

$$A_{sh} = 0.3 s h_c \left(\frac{f'_c}{f_{yh}} \right) \left(\frac{A_g}{A_{ch}} - 1 \right) \quad (3)$$

$$A_{sh} = 0.09 s h_c \left(\frac{f'_c}{f_{yh}} \right) \quad (4)$$

其中 s 为围束箍筋之间距; h_c 为受箍筋围束之柱核心截面之宽度; A_{ch} 为受箍筋围束部分柱核之截面积。式 (4) 系考虑将式 (3) 中 A_g 与 A_{ch} 之比值取为 1.3 时所求得之结果。

1.2 美国 AISC 设计规范

美国 AISC - Seismic Provisions (2005) 之中有关包覆型 SRC 柱箍筋配置之要求^[18], 规定 SRC 柱之最小围束箍筋量 A_{sh} , 应依下式计算:

$$A_{sh} = 0.09 s h_c \left(\frac{f'_c}{f_{yh}} \right) \left(1 - \frac{f_{ys} A_s}{P_n} \right) \quad (5)$$

其中 f_{ys} 为钢骨之屈服强度; A_s 为钢骨之截面积; P_n 为 SRC 柱之轴压标称强度, 其值依 AISC - LRFD 设计规范 (2005) 计算^[19]。值得注意的是式 (5) 系沿用式 (4) 之基本架构, 但因 SRC 柱截面中之钢骨亦能提供一部份之轴向抗压强度, 所以式 (5) 中 $(1 - f_{ys} A_s / P_n)$ 是一个“折减系数”, 主要系考虑钢骨分担 SRC 柱之轴力, 间接使混凝土受压状况

减轻, 以作为减少 SRC 柱箍筋用量之依据。

美国 AISC - LRFD 设计规范 (2005) 对于 SRC 柱之轴压标称强度 P_n 之计算公式如下^[20]:

$$P_n = A_s F_{cr} \quad (6)$$

其中 F_{cr} 为临界压应力, 应依以下公式计算:

当 $\lambda_c \leq 1.5$ 时:

$$F_{cr} = [\exp(-0.419 \lambda_c^2)] F_{my} \quad (7)$$

当 $\lambda_c > 1.5$ 时:

$$F_{cr} = \left(\frac{0.877}{\lambda_c} \right) F_{my} \quad (8)$$

其中 λ_c 为柱之长细比参数, 依下式计算:

$$\lambda_c = \frac{KL}{r_m \pi} \sqrt{\frac{F_{my}}{E_m}} \quad (9)$$

式中 K 为有效长度系数; L 为构件之未支撑长度; r_m 为钢骨或钢管之回转半径, 其值不得小于 SRC 构件在屈曲平面上截面深度之 0.3 倍; F_{my} 为修正后之钢骨屈服强度, 依下式计算:

$$F_{my} = f_y + C_1 f_{yr} (A_r / A_s) + C_2 f'_c (A_c / A_s) \quad (10)$$

其中 f_y 为钢骨屈服强度; f_{yr} 为主筋屈服强度; A_r 为主筋截面积; A_c 为混凝土净截面积。式 (9) 中之 E_m 为修正后之钢骨弹性模量, 依下式计算:

$$E_m = E_s + C_3 E_c (A_c / A_s) \quad (11)$$

其中 E_s 为钢骨之弹性模量; E_c 为混凝土之弹性模量。式 (10) 与 (11) 中 C_1 , C_2 及 C_3 为合成截面之转换系数, 当 SRC 构件为包覆型 SRC 截面时, $C_1 = 0.7$, $C_2 = 0.6$, $C_3 = 0.2$; 当 SRC 构件为钢管混凝土截面时, $C_1 = 1.0$, $C_2 = 0.85$, $C_3 = 0.4$ 。

1.3 台湾 SRC 构造设计规范

多年以来, 由于台湾的《建筑技术规则》并未明订 SRC 构造设计之相关规定^[21], 使得建筑师与工程人员进行 SRC 构造设计时缺乏一套依循的标准。基于此一需求, 台湾建筑研究所乃项目委托结构工程学会进行 SRC 构造设计规范之研究, 并由交通大学翁正强教授担任计划主持人, 经过多年的努力并广泛征询学者专家之意见, 台湾 SRC 构造设计规范草案于 2003 年底经过营建署审议通过^[1]。

营建署于 2004 年 1 月 16 日公布《建筑技术规则》部分修正条文, 在《建筑技术规则》的建筑构造编增列“第七章: 钢骨钢筋混凝土构造”, 由第 496 至 520 条明订 SRC 构造设计相关规定。营建署并明订台湾《钢骨钢筋混凝土构造设计规范与解

说》^[19] (以下简称为《台湾 SRC 规范》) 自 2004 年 7 月 1 日起正式施行。从此以后, 台湾从事 SRC 构造设计之业者与审查机构将可以有明确的 SRC 构造设计规范可以依循。

《台湾 SRC 规范》第九章 9.7.3 节参考 AISC - Seismic Provisions 之相似作法^[18,19], 规定采用矩形闭合箍筋之 SRC 柱, 其围束箍筋量 A_{sh} , 不得小于下列二式之要求:

$$A_{sh} = 0.3sh_c \left(\frac{f'_c}{f_{yh}} \right) \left(\frac{A_g}{A_{ch}} - 1 \right) \left[1 - \left(\frac{A_s f_{ys}}{(P_n)_u} \right) \right] \quad (12)$$

$$A_{sh} = 0.09sh_c \left(\frac{f'_c}{f_{yh}} \right) \left[1 - \left(\frac{A_s f_{ys}}{(P_n)_u} \right) \right] \quad (13)$$

其中 $(P_n)_u$ 依下式计算:

$$(P_n)_u = f_{ys} A_s + 0.85f'_c A_c + f_{yr} A_r \quad (14)$$

设计者宜注意式 (14) 与式 (6) 的差异, 其中公式 (14) 系依据强度迭加之概念来计算 SRC 柱之轴压标称强度 $(P_n)_u$; 而式 (6) 则采用截面转换的方式利用三个转换系数 C_1, C_2, C_3 , 将 SRC 柱中的 RC 部份转换成纯钢构之后再来计算 SRC 柱之轴

压标称强度。

另一方面, 当 SRC 柱配置螺旋箍筋时, 《台湾 SRC 规范》建议 SRC 柱螺箍筋之体积比 ρ_s , 不得小于下列二式之要求:

$$\rho_s = 0.45 \left(\frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \left(\frac{f'_c}{f_{yh}} \right) \left[1 - \left(\frac{A_s f_{ys}}{(P_n)_u} \right) \right] \quad (15)$$

$$\rho_s = 0.12 \left(\frac{f'_c}{f_{yh}} \right) \left[1 - \left(\frac{A_s f_{ys}}{(P_n)_u} \right) \right] \quad (16)$$

其中 $(P_n)_u$ 为 SRC 柱之轴向标称强度, 依式 (14) 计算。

2 五螺箍 SRC 柱轴向抗压试验

2.1 试件设计

共进行 11 支钢骨钢筋混凝土 (SRC) 短柱及 2 支钢筋混凝土 (RC) 短柱 (作为试验之对照组) 之轴向抗压试验。所有短柱试件之全截面尺寸均为 600 mm × 600 mm, 长度均为 1 200 mm。各试件之截面如图 9 所示, 试件截面型式包括四大类: 配置五螺箍之 SRC 柱、配置传统横箍筋之 SRC 柱、配置五螺箍之 RC 柱及配置传统横箍筋之 RC 柱。

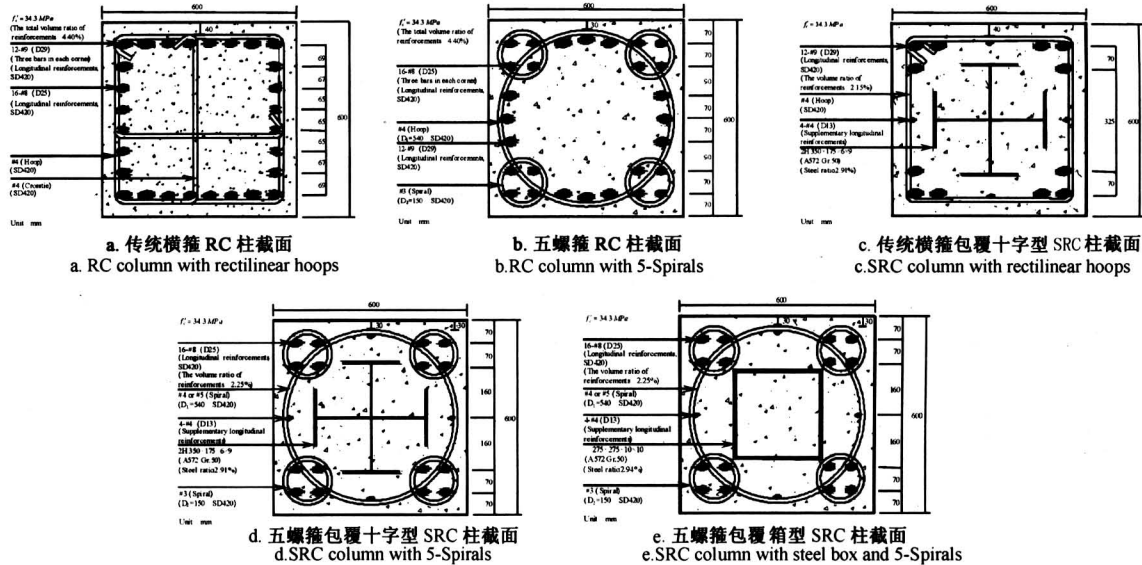


图 9 本研究各系列短柱试件截面配置图

Fig.9 Details of cross-sectional layout of the column specimens

主要设计参数包括箍筋型式、间距与用量、经济效益、钢骨型式与用量、SRC 柱之轴压强度与韧性等。为了探讨箍筋型式、间距与用量对 SRC 柱混凝土围束效应之影响, 特别将所有 SRC 柱试件之钢骨用量及主筋用量固定, 而改变试件之箍筋型

式、间距与用量。短柱试件编号、主筋号数、箍筋号数、钢骨尺寸以及箍筋用量、设计方法如表 1 所示。

在 SRC 柱试件之围束箍筋用量方面, 采用三种不同的计算方法来配置 SRC 柱之箍筋 ACI - 318

Code, Taiwan SRC Code 及 Weng's Formula 设计法^[22], 前两者设计法已于前面叙述, 不再赘述。以下针对 Weng's Formula 设计方法进行说明。

Weng's Formula 设计法 翁正强等经一系列 SRC 柱轴压试验与力学分析^[22], 提出称为 Weng's Formula 设计法, 该法主要是考虑到 SRC 柱内的钢骨翼板 (flanges) 也能够提供混凝土有效的围束作用, 因此可以更节省 SRC 柱之箍筋用量。

如图 3、图 4 所示, Weng's Formula 设计法认为 SRC 柱内之“高度围束区混凝土 (highly confined concrete)”可由 SRC 柱内钢骨之翼板提供围束, 而 SRC 柱之箍筋则只需用来围束“普通围束区混凝土 (ordinarily confined concrete)”。由于钢骨翼板已经围束了大部份的混凝土, 因此 SRC 柱所需要的围束箍筋用量可进一步放宽。以下为 Weng's Formula 所建议的 SRC 柱围束箍筋之设计公式^[22]:

1) 采用螺箍筋之 SRC 柱, 其螺箍筋体积比 ρ_s , 不得小于下列二式之规定:

$$\rho_s = 0.45 \left(\frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \left(\frac{f'_c}{f_{yh}} \right) \left[1 - \left(\frac{P_s + P_{hcc}}{(P_n)_u} \right) \right] \quad (17)$$

$$\rho_s = 0.12 \left(\frac{f'_c}{f_{yh}} \right) \left[1 - \left(\frac{P_s + P_{hcc}}{(P_n)_u} \right) \right] \quad (18)$$

2) 采用矩形闭合箍筋之 SRC 柱, 其围束箍筋量 A_{sh} , 不得小于下列二式之规定:

$$A_{sh} = 0.3 sh_c \left(\frac{f'_c}{f_{yh}} \right) \left(\frac{A_g}{A_{ch}} - 1 \right) \left[1 - \left(\frac{P_s + P_{hcc}}{(P_n)_u} \right) \right] \quad (19)$$

$$A_{sh} = 0.09 sh_c \left(\frac{f'_c}{f_{yh}} \right) \left[1 - \left(\frac{P_s + P_{hcc}}{(P_n)_u} \right) \right] \quad (20)$$

式 (17) 至 (20) 的中括号为 Weng's Formula 建议的“箍筋用量折减系数”, 其中 P_s 为钢骨之轴压强度, 依下式计算:

$$P_s = f_{ys} A_s \quad (21)$$

P_{hcc} 为高度围束区混凝土之轴压强度, 按

$$P_{hcc} = 0.85 f'_c A_{hcc} \quad (22)$$

计算, A_{hcc} 为高度围束区混凝土之截面积 (如图 3 及图 4 中之深灰色标示部份)。

如表 1 所示, 以 ACI-318 Code 所设计之 SRC 柱围束箍筋用量当作比较之基准, 将 Taiwan SRC Code 及 Weng's Formula 设计法所求得之每单位长度需要的箍筋用量详细列出来。表 1 中之折减系数 (reduction factor) 系指 Taiwan SRC Code 及 Weng's

Formula 设计法相对于 ACI-318 Code 之箍筋用量的折减程度。由表中可以看出, 采用 Weng's Formula 设计法之折减系数介于 0.57 至 0.68 之间; 显示以 Weng's Formula 设计法所求得之箍筋用量, 大约可以比 ACI-318 Code 所需的箍筋用量节省 1/3 左右。

2.2 试验设置

由于设计之短柱属于大尺寸试件 (截面尺寸为 600 mm × 600 mm), 其预期之轴压强度高达 21 000 kN 以上, 目前台湾一般大学实验室之仪器尚无法达到此轴压强度之要求, 故特向台湾中华工程顾问公司位于杨梅镇之材料试验室借用其轴压强度 58 800 kN 之万能试验机来进行试件之轴压试验, 如图 10 所示。由于考虑到试件端部可能受应力集中之影响, 试验前于试件上下两端各套上由钢板组合成之帽盖, 以尽量确保试件均匀受压。试件侧面并装设一组 LVDT (linear variable differential transformer) 位移计以量测试件之缩短量。图 11 为 SRC 短柱轴压试验构架与 SRC 柱截面示意图。试验之进行采用位移控制, 加载行程速率控制为 0.03 mm/s。试验过程中记录 SRC 柱之轴力 P 与位移 Δ 曲线与相关数据, 作为力学分析之依据。

试验之前, 试件的钢骨、钢筋及混凝土皆进行基本力学性质试验。在钢骨部分, 从所使用的各种不同厚度之钢板切取拉伸试片; 主筋及箍筋亦取与试件相同尺寸之钢筋作拉伸试片; 混凝土强度方面, 在灌置试件的同时制作标准圆柱试体, 所有材料均依据 ASTM 材料试验之规定进行测试。试件之材料强度如表 2 所示。

3 试验结果与讨论

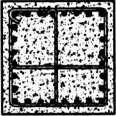
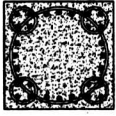


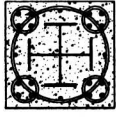
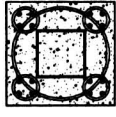

3.1 短柱受轴压之破坏模式

图 12 显示所有 11 支 SRC 柱试件与 2 支 RC 柱试件之轴力 P 与位移 Δ 关系曲线。整体而言, 在试件开始受到轴向载重时, 轴力与位移关系会有一段近似直线之行为; 随着载重增加, 混凝土表面逐渐产生裂缝; 然后混凝土有不同程度之开裂与剥落。到试验末段, 箍筋可能到达屈服或发生弯勾脱开或断裂之情形; 主筋亦可能发生些微弯曲或较明显的屈曲 (buckling)。最后, 发生巨响及载重骤降的现象, 随后即终止试验。

图 13 比较 2 支 RC 柱 (试件 RC1 与 RC2) 的轴力-位移曲线。这两支 RC 柱试件的尺寸与主筋用量完全相同, 唯一不同的是横箍的型式, 其中试件

表 1 RC 与 SRC 短柱试件规划表

Table 1 Design details of columns tested in this study

column cross-section	specimen designation	hoop/spiral		hoop/spiral spacing/mm	volumetric ratio	weight of hoop/spiral /N·m ⁻¹	reduction factor	design guide
		small circle	large circle					
	RC1 - H - ACI - 90		# 4	90	1.67%	405	1.00	ACI - 318 Code
	RC2 - Y - ACI - 75	# 3	# 4	75	1.25%	360	1.00	ACI - 318 Code
	SRC1 - HC - TWN - 75		# 4	75	1.34%	298	0.79	Taiwan SRC Code
	SRC2 - HC - WENG - 90		# 4	90	1.11%	248	0.65	Weng's Formula
	SRC3 - YC - ACI - 75	# 3	# 4	75	1.25%	360	1.00	ACI - 318 Code
	SRC4 - YC - TWN - 95	# 3	# 4	95	0.99%	283	0.79	Taiwan SRC Code
	SRC5 - YC - WENG - 115	# 3	# 4	115	0.81%	235	0.65	Weng's Formula
	SRC6 - YC - S1 - 75	# 3	# 4	75	1.25%	360	1.00	Spacing = SRC1
	SRC7 - YC - S2 - 90	# 3	# 4	90	1.04%	299	0.83	Spacing = SRC2
	SRC8 - YB - TWN - 95	# 3	# 4	95	0.99%	283	0.79	Taiwan SRC Code
	SRC9 - YB - WENG - 110	# 3	# 4	110	0.85%	245	0.68	Weng's Formula
	SRC10 - YC - HS - TWN - 105	# 3	# 4	105	0.88%	256	0.70	Taiwan SRC Code
	SRC11 - YC - HS - WENG - 130	# 3	# 4	130	0.71%	208	0.57	Weng's Formula

Note: (1) Total number of test specimens: 11 SRC columns; 2 RC columns

(2) SRC column dimensions: Height: 1 200 mm; Cross-section: 600 × 600 mm

(3) Steel section in SRC column: A572 Gr.50; $f_{ys} = 343 \text{ N/mm}^2$; Cross H: 2H350 × 175 × 6 × 9; $\rho_s = 2.91\%$; Cross H: 2H350 × 200 × 9 × 14; $\rho_s = 4.72\%$ (SRC10 and SRC11 only); Box section: □275 × 275 × 10 × 10; $\rho_s = 2.94\%$

(4) (a) Longitudinal reinforcements in SRC hoop Column: 12 # 9 (D29); $\rho_r = 2.15\%$; SD420; $f_{yr} = 412 \text{ N/mm}^2$

(b) Longitudinal reinforcements in SRC spiral Column: 16 # 8 (D25); $\rho_r = 2.25\%$; SD420; $f_{yr} = 412 \text{ N/mm}^2$

Supplementary longitudinal reinforcements: 4 # 4 (D13); Cut 50 mm short at each end.

(5) Hoop (Spiral): # 3 (D10)、# 4 (D13); SD420; $f_{yh} = 412 \text{ N/mm}^2$

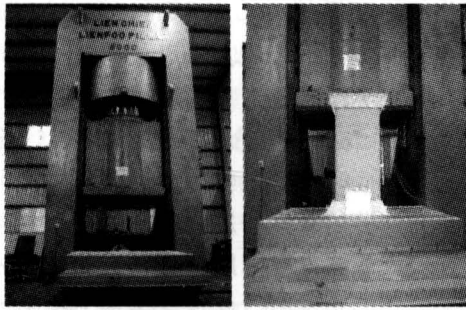
(6) Normal weight concrete: $f'_c = 34.3 \text{ N/mm}^2$

(7) Longitudinal reinforcements in RC column:

(a) RC1: 16 # 8 (D25) and 12 # 9 (D29); $\rho_r = 4.40\%$; SD420; $f_{yr} = 412 \text{ N/mm}^2$

(b) RC2: 16 # 8 (D25) and 12 # 9 (D29); $\rho_r = 4.40\%$; SD420; $f_{yr} = 412 \text{ N/mm}^2$

(8) The reduction factor is defined as the calculated volume ratio of hoop or spiral in each specimen divided by the volume ratio determined according to ACI - 318 code.



a. 58800 kN 万能试验机
a. The 5880 kN universal test machine
b. 试件架设于试验机平台上之情形
b. Test setup of SRC column

图 10 58 800 kN 万能试验机与 SRC 柱试件之架设

Fig.10 The 58 800 kN universal test machine and test setup of SRC column

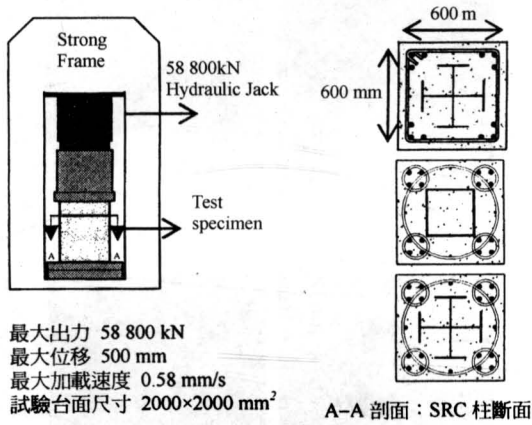


图 11 SRC 短柱轴压试验构架与 SRC 柱截面示意图

Fig.11 Test setup and the SRC column cross-sections

表 2 试件之材料强度

Table 2 Material properties of columns tested

Strength	Steel plate thickness/mm				Reinforcement				Concrete $f'_c/N \cdot mm^{-2}$	
	6	9	10	14	#3	#4	#8	#9		
$f_y/N \cdot mm^{-2}$	429	445	411	421	485	463	442	430	41.1	47.4
$f_u/N \cdot mm^{-2}$	536	563	514	539	723	736	685	674		

RC1 配置传统横箍，试件 RC2 则配置新型五螺箍。可以看出，这两支 RC 柱试件之韧性 (ductility) 有明显的差异。对配置新型五螺箍的 RC 柱而言，其轴力 - 位移曲线到试验末段呈现较缓和的递减趋势；配置传统横箍的 RC 柱其轴力 - 位移曲线在到达轴力最大值之后，随即出现急速下降的情形。值

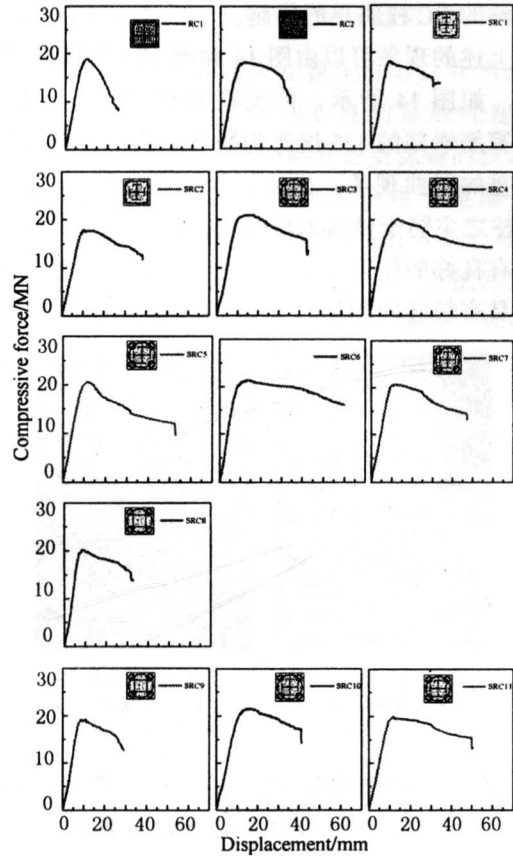


图 12 本研究短柱试件之轴力 - 位移曲线图

Fig.12 Load-displacement curves of the tested columns

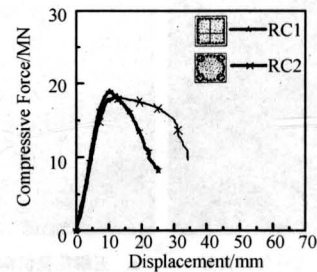


图 13 五螺箍 RC 柱与传统横箍 RC 柱之轴力 - 位移曲线的比较

Fig.13 Comparison of load-displacement curves between RC columns with traditional rectilinear hoops and RC columns with 5 - Spirals confinements

得注意的是，类似之应力 - 应变曲线亦可在张国镇、尹衍樑、王柄雄等于 2005 年的研究报告中发现^[4,5]，如图 8a 与 8b 的两组曲线所示。因此，试验结果显示：在相同的截面尺寸与主筋用量之条件下，配置新型五螺箍的 RC 柱，其韧性会比配置传

统横箍的 RC 柱明显的优越。

上述的现象可以由图 14 和图 15 得到进一步的验证。如图 14 所示, 传统横箍柱于试验末段时, 由于箍筋端部的 135 度弯钩脱开, 进而导致主筋发生严重的屈曲现象。反之, 如图 15 所示, 五螺箍 SRC 柱之主筋于试验末段时仅轻微弯曲, 显示五螺箍具有良好的围束混凝土能力。因此, 五螺箍 SRC 柱亦具有较佳的韧性。

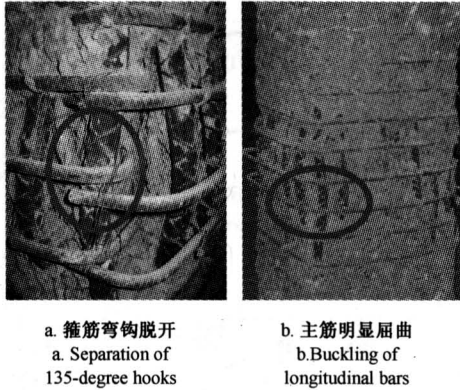


图 14 传统横箍 RC 柱 (RC1) 于试验结束后剥除碎裂混凝土后之情况
Fig. 14 Failure mode of traditional RC column (RC1) with rectilinear hoops

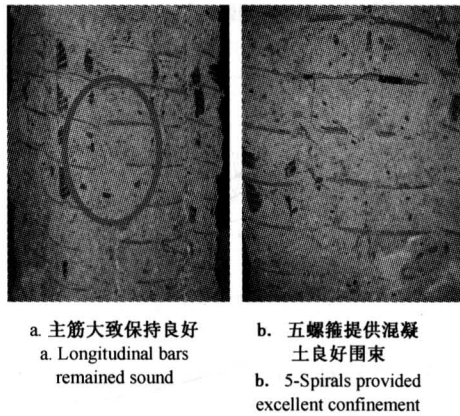


图 15 五螺箍 SRC 柱 (SRC4) 于试验结束后剥除碎裂混凝土后之情况
Fig. 15 Failure mode of SRC column (SRC4) with 5-spiral confinements

另一方面, 对于配置新型五螺箍的 SRC 柱而言, 由于螺旋箍筋能够提供混凝土良好的围束, 且 SRC 柱内的钢骨翼板 (flanges) 也能够提供柱内核心混凝土有效的围束作用, 阻止柱混凝土向外爆

开, 因此使得五螺箍 SRC 柱试件之轴力 - 位移曲线在到达轴力最大值之后, 可以呈现较平缓的递减趋势, 而不至于出现轴力急速下降的情形。到试验末段, 五螺箍 SRC 柱因为外围局部的小螺箍先行屈服或断裂, 此时试件之轴力会稍微下降, 但仍可维持支撑大部分的载重, 展现良好的韧性。直到试验最后期, 大螺箍发生屈服或断裂之后轴力才急速下降, 随后即终止试验。此现象显示大螺箍围束了主要混凝土面积, 当其发生断裂之后, 箍筋对于混凝土之围束能力便跟着下降, 轴压强度亦随之下降。图 16 显示一部份五螺箍 SRC 柱 (SRC3, SRC4, SRC5) 与五螺箍 RC 柱 (RC2) 达极限载重时之破坏情形。

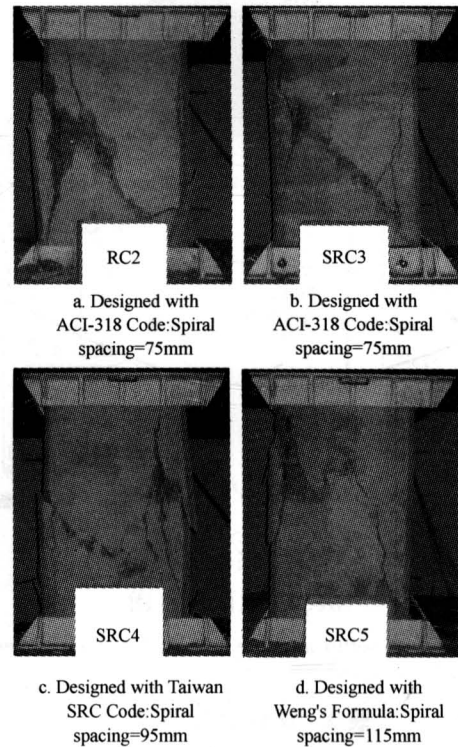


图 16 五螺箍 SRC 柱 (SRC3, SRC4, SRC5) 与五螺箍 RC 柱 (RC2) 达极限载重时之破坏情形

Fig. 16 Failure conditions at peak load observed from the RC and SRC columns with 5-spiral confinements (Specimens RC2, SRC3, SRC4 and SRC5)

3.2 箍筋间距及型式对 SRC 柱强度与韧性之影响
主要设计参数包括箍筋型式、间距与用量、经济效益、钢骨型式与用量、SRC 柱之轴压强度与韧性等。为了探讨箍筋型式、间距与用量对 SRC 柱

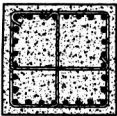
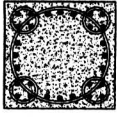



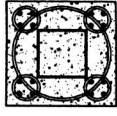
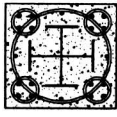
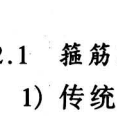
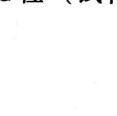

混凝土围束效应之影响，特别将所有 SRC 柱试件之钢筋用量及主筋用量固定，而改变试件之箍筋型式、间距与用量。以下分别就各试件之箍筋间距及箍筋型式对轴压强度与韧性之影响作一比较。

表 3 显示试验所得之所有短柱试件之极限轴压强度 (P_u)_{test}。此外，对于 SRC 柱韧性之探讨，根据试件轴压试验之轴力 - 位移曲线，以 SRC 柱之轴压强度下降至其极限轴压强度七成时所测得之应变变量 $\epsilon_{0.7P_u}$ 与其在达到极限轴压强度时之应变变量 ϵ_{P_u}

之比值，即 $\epsilon_{0.7P_u} / \epsilon_{P_u}$ ，作为 SRC 柱之韧性指标 (ductility index) μ ，其结果如表 3 所示。当 SRC 柱之韧性指标愈大时，表示 SRC 柱的延展性愈好，愈不容易发生脆性破坏，亦即具备更优越的抗震潜在能力。再者，为了探讨五螺箍应用于矩形 SRC 柱之经济效益，表 3 亦将采用 ACI - 318 Code, Taiwan SRC Code 与 Weng's Formula 设计之试件所需之“每单位长度箍筋用量”及“折减系数”详细的列出来。兹依据试验与分析之结果讨论如下：

表 3 RC 与 SRC 短柱试件之强度、韧性及箍筋用量经济效益分析

Table 3 Strength, ductility and cost-effectiveness of confinements of tested columns

Column cross-section	Specimen designation	(P_u) _{test} /kN	$\mu = \epsilon_{0.7P_u} / \epsilon_{P_u}$	Weight of hoop/spiral/ $N \cdot m^{-1}$	Reduction factor	Design guide
	RC1 - H - ACI - 90	18 962	1.82	405	1.00	ACI - 318 Code
	RC2 - Y - ACI - 75	18 109	2.65	360	1.00	ACI - 318 Code
	SRC1 - HC - TWN - 75	18 187	3.27	298	0.79	Taiwan SRC Code
	SRC2 - HC - WENG - 90	17 952	3.60	248	0.65	Weng's Formula
	SRC3 - YC - ACI - 75	20 963	4.36	360	1.00	ACI - 318 Code
	SRC4 - YC - TWN - 95	20 198	4.77	283	0.79	Taiwan SRC Code
	SRC5 - YC - WENG - 115	20 630	4.48	235	0.65	Weng's Formula
	SRC6 - YC - S1 - 75	21 336	5.07	360	1.00	Spacing = SRC1
	SRC7 - YC - S2 - 90	20 826	4.28	299	0.83	Spacing = SRC2
	SRC8 - YB - TWN - 95	20 208	3.52	283	0.79	Taiwan SRC Code
	SRC9 - YB - WENG - 110	19 227	3.12	245	0.68	Weng's Formula
	SRC10 - YC - HS - TWN - 105	21 562	2.75	256	0.70	Taiwan SRC Code
	SRC11 - YC - HS - WENG - 130	19 953	4.35	208	0.57	Weng's Formula

3.2.1 箍筋间距对 SRC 柱轴压强度之影响

1) 传统横箍 SRC 柱。测试的两支传统横箍 SRC 柱 (试件 SRC1, SRC2) 分别依据 Taiwan SRC

Code 与 Weng's Formula 设计所需之箍筋用量。在箍筋采用相同直径的情况下，试件 SRC1 与 SRC2 之箍筋间距分别为 75 mm 及 90 mm。由表 3 比较 SRC1

与 SRC2 发现, 两支传统横箍 SRC 柱试件的轴压强度大致相近, 分别为 18 187 与 17 952 kN (比值为 1.01); 但其单位长度之箍筋用量则有明显的差异, 分别为 298 与 248 N/m (比值为 1.20); 折减系数则分别为 0.79 与 0.65。此现象显示采用 Weng's Formula 设计之传统横箍 SRC 柱虽然其箍筋用量较少, 但其强度并未明显衰减, 仍然可以维持接近采用 Taiwan SRC Code 之 SRC 柱试件的轴压强度。

2) 新型五螺箍 SRC 柱。测试的 9 支五螺箍 SRC 柱 (试件 SRC3 至 SRC11) 分别依据 ACI - 318 Code, Taiwan SRC Code 与 Weng's Formula 设计所需之箍筋用量。采用相同直径箍筋情况下, 9 支五螺箍 SRC 柱之箍筋间距由 60 mm 变化到 130 mm。

以试件 SRC3, SRC4 及 SRC5 为例, 由表 3 可以发现, 这 3 支五螺箍 SRC 柱试件的轴压强度十分相近, 分别为 20 963, 20 198 与 20 630 kN (SRC3, SRC4 相对于 SRC5, 比值为 1.02 与 0.98); 但其单位长度之箍筋用量则有明显的差异, 分别为 360, 283 与 235 N/m (SRC3, SRC4 相对于 SRC5, 比值为 1.53 与 1.20); 折减系数则分别为 1.00, 0.79 与 0.65。此现象显示, 采用 Weng's Formula 设计之五螺箍 SRC 柱, 其箍筋用量节省甚多, 但其强度并未明显衰减。反之, 若采用 ACI - 318 Code 或 Taiwan SRC Code 来设计, 试件之轴压强度并没有明显提升效果, 但是箍筋用量则增加很多。此现象显示, 采用 Weng's Formula 设计之五螺箍 SRC 短柱试件, 虽然其箍筋间距较大, 但轴压强度并不会明显衰减。类似的现象也可以从其他组的 SRC 短柱试件发现, 如试件 SRC6 及 SRC7、试件 SRC8 及 SRC9、试件 SRC10 及 SRC11, 此处不再赘述。

3.2.2 箍筋型式对 SRC 柱轴压强度之影响 测试的 SRC 柱试件, 其箍筋型式主要分为两大类: 传统横箍与新型五螺箍。如表 3 所示, 比较试件 SRC1, SRC2 及试件 SRC4, SRC5 之轴压强度可以发现, 五螺箍 SRC 柱 (SRC4, SRC5) 之箍筋间距皆大于传统横箍 SRC 柱 (SRC1, SRC2), 但其轴压强度却均大于传统横箍 SRC 柱。此现象显示, 配置五螺箍之 SRC 柱, 其箍筋间距可较传统横箍 SRC 柱宽, 但试验之轴压强度并不会较差; 亦即表示配置五螺箍之 SRC 柱可以在较少之箍筋用量下, 达到略优于传统横箍 SRC 柱之轴压强度。

此外, 如表 3 所示, 再分别比较试件 SRC1, SRC2 及试件 SRC6, SRC7 发现, 在配置相同箍筋

间距与相同纵向总用钢量 (包括主筋与钢筋) 之下, 五螺箍 SRC 柱 (SRC6, SRC7) 之轴压强度明显高于传统横箍 SRC 柱 (SRC1, SRC2)。

另一方面, 如图 17 所示的五螺箍 SRC 柱与传统横箍 SRC 柱之轴力 - 位移曲线比较可以明显的看出来, 配置五螺箍之 SRC 柱 (SRC6, SRC7) 其轴压强度较大, 且其强度在到达最大值后之下降趋势较为平缓, 此现象显示配置五螺箍之 SRC 柱, 其力学行为优于传统横箍 SRC 柱。

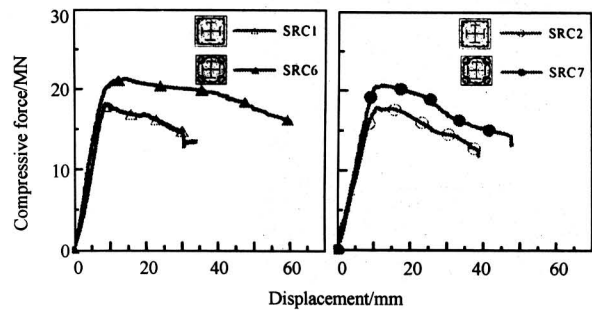


图 17 相同纵向总用钢量与箍筋间距之五螺箍 SRC 柱与传统横箍 SRC 柱之轴力 - 位移曲线比较

Fig.17 Comparison of load-displacement curves between SRC columns with rectilinear hoops and SRC columns with 5-spirals confinements

3.2.3 SRC 柱试件韧性之探讨

1) 传统横箍 SRC 柱与传统横箍 RC 柱之比较。观察表 3 所显示的 SRC 柱韧性指标 μ 可以发现, 传统横箍 SRC 柱 (试件 SRC1, SRC2) 即使在箍筋用量较少的情况下, 其韧性指标 (分别为 3.27 与 3.60) 仍然优于传统横箍 RC 柱 (试件 RC1) 之韧性指标 (其值为 1.82)。此现象显示, 传统横箍 SRC 柱明显地比传统横箍 RC 具有较佳的抗震能力。如图 18 所示, 传统横箍 SRC 柱 (SRC1, SRC2) 之韧性表现皆较传统横箍 RC 柱 (RC1) 佳, 试件 SRC1 与 SRC2 之轴压强度在到达最大值后之下降趋势较为平缓, 不像试件 RC1 有强度快速衰减的缺点。

2) 五螺箍 SRC 柱与五螺箍 RC 柱之比较。由表 3 之比较结果发现, 所有五螺箍 SRC 柱 (试件 SRC3 至 SRC11) 之韧性指标皆优于五螺箍 RC 柱 (试件 RC2)。在五螺箍 SRC 柱之韧性指标中, 最大者为试件 SRC6 的 5.07, 其值远大于试件 RC2 的 2.65。此外, 如图 19 所示, 在相同纵向总用钢

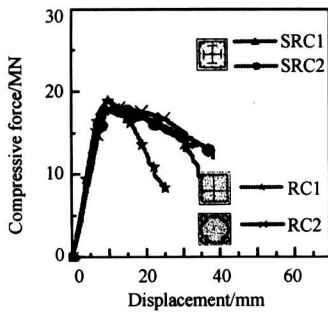


图 18 五螺箍 RC 柱、传统横箍 SRC 柱与传统横箍 RC 柱之轴力 - 位移曲线比较

Fig.18 Comparison of load-displacement curves among RC columns with rectilinear hoops and 5-spirals confinements and SRC columns with rectilinear hoops

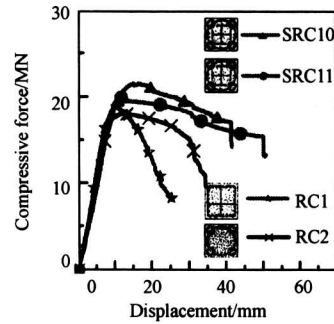


图 20 高钢骨量五螺箍 SRC 柱、五螺箍 RC 柱与传统横箍 RC 柱之轴力 - 位移曲线的比较

Fig.20 Comparison of load-displacement curves among RC columns with rectilinear hoops and 5-spirals confinements and high steel ratio SRC columns with 5-spirals confinements

量之下，SRC3，SRC4 及 SRC5 之韧性表现皆比五螺箍 RC 柱及传统横箍 RC 柱优越甚多。

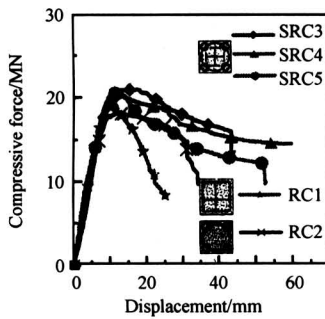


图 19 五螺箍 SRC 柱、五螺箍 RC 柱与传统横箍 RC 柱之轴力 - 位移曲线的比较

Fig.19 Comparison of load-displacement curves among RC columns with rectilinear hoops and 5-spirals confinements and SRC columns with 5-spirals confinements

另一方面，如图 20 所示，钢骨用量较高之五螺箍 SRC 柱（试件 SRC10，SRC11），虽然其箍筋间距较大，但韧性表现仍较五螺箍 RC 柱及传统横箍 RC 柱佳；且 SRC11 为所有试件中箍筋用量最少的（箍筋间距 130 mm），但其韧性仍然优于五螺箍 RC 柱。上述之观察均显示五螺箍应用于矩形 SRC 柱时，不但能减少箍筋用量节省成本，亦能增进 SRC 柱的抗震能力。

3) 五螺箍 SRC 柱与传统横箍 SRC 柱之比较。经由表 3 比较传统横箍 SRC 柱（试件 SRC1、SRC2）及五螺箍 SRC 柱（试件 SRC4、SRC5）的韧性指标后发现，不论是采用 Taiwan SRC Code 或 Weng's

Formula 设计，传统横箍 SRC 柱之韧性指标均低于五螺箍 SRC 柱。值得注意的是，五螺箍 SRC 柱之箍筋用量较少，显示五螺箍应用于 SRC 柱可减少箍筋用量，且具有良好的韧性表现，证明了五螺箍应用于矩形 SRC 柱之可行性。

图 21 为五螺箍 SRC 柱（SRC4）、传统横箍 SRC 柱（SRC2）与传统横箍 RC 柱（RC1）之韧性指标比较图。可看出 SRC 柱之韧性指标皆大于传统横箍 RC 柱，其韧性指标为传统横箍 RC 柱之 2.62 倍。比较 SRC2 及 SRC4 之曲线还发现，五螺箍 SRC 柱之韧性指标大于传统横箍 SRC 柱，约为传统横箍 SRC 柱之 1.33 倍。显示出在相同纵向总用钢量与箍筋间距之状况下，五螺箍 SRC 柱之韧性表现明显优于传统横箍 RC 柱与传统横箍 SRC 柱。

3.3 箍筋设计公式之比较与讨论

目前 ACI-318 Code 对 SRC 柱之围束箍筋之设计尚未有明文规定，因此若引用 ACI 规范来设计 SRC 柱，大多沿用一般 RC 柱之设计规定来配置 SRC 柱之围束箍筋。又由于 ACI 规范并未考虑 SRC 柱内钢骨对柱轴力之分担与钢骨翼板对混凝土之围束之贡献，因此依据 ACI-318 Code 所设计之 SRC 柱围束箍筋量，将显得过于保守且不经济。

另一方面，台湾 SRC 构造设计规范对于 SRC 柱之围束箍筋量的折减方式主要是参考美国 AISI-Seismic Provisions 之作法，考虑钢骨分担一部分 SRC 柱之轴力，使得混凝土所需承担之轴力相对降低，因而对 SRC 柱中所需之围束箍筋量予以折减。不过，由于台湾 SRC 规范并未考虑钢骨翼板对 SRC

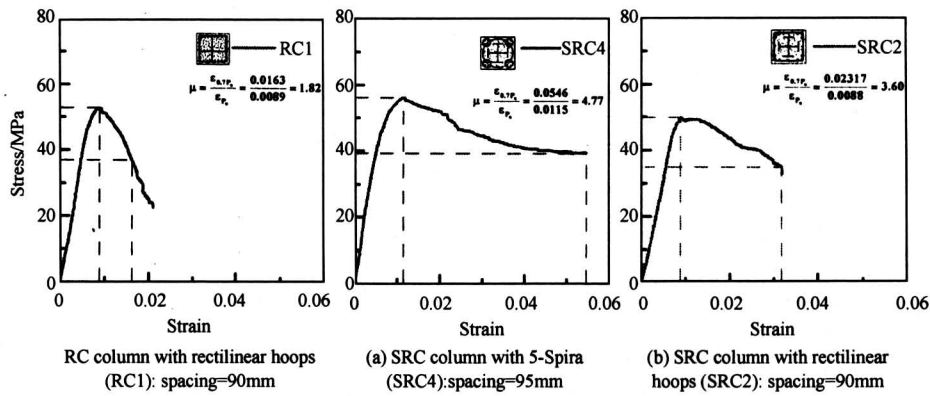


图 21 五螺箍 SRC 柱、传统横箍 SRC 柱与传统横箍 RC 柱之韧性指标比较图

Fig.21 Comparison of the ductility ratios among RC and SRC columns with rectilinear hoops and SRC columns with 5-spirals confinements

柱内混凝土之围束贡献，因此若依台湾 SRC 规范来设计“具有相同钢骨截面积但钢骨翼板宽度不同”的 2 支 SRC 柱所需的箍筋用量时，将会得到相同的设计结果，这样似乎并不合理^[22]。因为钢骨翼板的宽度愈宽，钢骨截面所能围束的混凝土面积就愈多，对混凝土的围束贡献就愈大，因此所需的箍筋用量就比较少。

所以，如图 3 与图 4 所示，Weng's Formula 考虑到 SRC 柱中的“高度围束区之混凝土”主要是由钢骨之翼板提供围束，而 SRC 柱内需要箍筋围束的混凝土区域主要在“普通围束区之混凝土”，因此 SRC 柱之围束箍筋量得以进一步放宽^[22]。Weng's Formula 设计法之特色在于同时考虑“钢骨用量”与“钢骨翼板对柱核心混凝土之围束作用”的影响，以一个新的折减系数来放宽 SRC 柱中所需之围束箍筋量，将有助于使 SRC 柱之围束箍筋配置更为合理，并可以得到更经济的设计结果。

如前所述，SRC 柱之箍筋设计采用三种不同的标准：a. ACI - 318 Code，箍筋用量最多；b. Taiwan SRC Code，箍筋用量次之；c. Weng's Formula，箍筋用量最少。试验结果发现，采用 Weng's Formula 设计的 SRC 柱，在较少的围束箍筋用量之下，仍可达到 SRC 柱设计所需之轴压强度。

3.4 箍筋用量经济效益之探讨

以下针对本研究测试的 11 支大尺寸 SRC 柱及 2 支 RC 柱之强度、韧性及箍筋用量之经济效益作一综合探讨：

1) 五螺箍 RC 柱与传统横箍 RC 柱之比较。2 支 RC 短柱试件为试验之对照组，如图 13 所示，

虽然五螺箍 RC 柱（试件 RC2）在轴向强度方面略低于传统横箍 RC 柱（试件 RC1），但在韧性表现上明显优于传统横箍 RC 柱。在箍筋用量方面，如表 3 所示，五螺箍 RC 柱（RC2）之单位长度箍筋用量为 360 N/m，明显低于传统横箍 RC 柱（RC1）的 405 N/m，亦即所采用的五螺箍 RC 柱之箍筋用量为传统横箍 RC 柱之 89%。

2) 传统横箍 SRC 柱与传统横箍 RC 柱之比较。如图 18 所示，虽然传统横箍 SRC 柱（试件 SRC1，SRC2）在轴向强度方面略低于传统横箍 RC 柱（试件 RC1），但在韧性表现上皆明显优于传统横箍 RC 柱。在箍筋用量方面，如表 3 所示，传统横箍 SRC 柱（SRC1，SRC2）之单位长度箍筋用量为 298 与 248 N/m，皆低于传统横箍 RC 柱（RC1）的 405 N/m。换言之，SRC1（采用 Taiwan SRC Code 设计）之箍筋用量为传统横箍 RC 柱之 74%；SRC2（采用 Weng's Formula 设计）之箍筋用量为传统横箍 RC 柱之 61%。

3) 五螺箍 SRC 柱与五螺箍 RC 柱之比较。如图 19 所示，在相同纵向总用钢量下，五螺箍 SRC 柱（试件 SRC3，SRC4，SRC5）之强度及韧性皆优于五螺箍 RC 柱（试件 RC2），显示同样配置五螺箍之短柱，SRC 柱的表现皆优于 RC 柱。在箍筋用量方面，如表 3 所示，五螺箍 SRC 柱（SRC4，SRC5）之单位长度箍筋用量为 283 与 235 N/m，皆少于五螺箍 RC 柱（RC2）的 360 N/m，显示五螺箍应用于 SRC 柱中，其箍筋用量需求可较五螺箍 RC 柱为低，但并不影响其强度与韧性的表现。例如，试件 SRC5 的箍筋用量仅为试件 RC2 之 65%。

4) 五螺箍 SRC 柱与传统横箍 SRC 柱之比较。观察表 3 发现, 五螺箍 SRC 柱 (试件 SRC3 至 SRC7) 在强度及韧性表现上优于传统横箍 SRC 柱 (试件 SRC1, SRC2), 且五螺箍 SRC 柱之箍筋用量略少于传统横箍 SRC 柱。例如试件 SRC4 之箍筋用量为 SRC1 之 95%, 试件 SRC5 之箍筋用量仅为 SRC1 之 79%, 显示五螺箍应用于 SRC 柱可以达到箍筋减量的目的, 亦可满足强度与韧性之需求。

4 结论

本研究共进行 11 支大尺寸的矩形 SRC 柱及 2 支 RC 柱之轴压试验, 试件型式包括四大类: 配置五螺箍之 SRC 柱; 配置传统横箍之 SRC 柱; 配置五螺箍之 RC 柱; 配置传统横箍之 RC 柱。根据试验结果, 分析比较以上四种不同类型短柱的强度、韧性及箍筋用量之经济性等。整体而言, 分析结果显示在相同的纵向总用钢量 (包括主筋与钢筋) 之情形下, 采用新型五螺箍之 SRC 柱具有最佳的强度、韧性与经济性。同时, 由于五螺箍可以采用自动化机械加工制造, 有助于大幅降低施工所需之人力及缩短工期, 因此极具经济效益。

根据试验与分析结果, 探讨范围可初步归纳出以下重点:

4.1 SRC 柱之强度

1) 在相同的纵向总用钢量下, 配置五螺箍之 SRC 柱, 其箍筋间距可较传统横箍 SRC 柱宽, 但试验之轴压强度并不会较差。此现象显示配置五螺箍之 SRC 柱可以在较少之箍筋用量下, 达到略优于传统横箍 SRC 柱之轴压强度。

2) 采用 Weng's Formula 设计之五螺箍 SRC 柱, 其箍筋用量节省甚多, 但其强度并未明显衰减。反之, 若采用 ACI-318 Code 或 Taiwan SRC Code 来设计, 试件之轴压强度并没有明显提升效果, 但是箍筋用量则增加很多。

4.2 SRC 柱之韧性

1) 研究发现, 五螺箍 SRC 柱之韧性比传统横箍 SRC 柱更好, 亦优于同样配置五螺箍之 RC 柱。

2) 整体而言, 采用五螺箍之试件其韧性皆优于采用传统横箍筋者。五螺箍除了围束混凝土的能力比较好之外, 没有传统横箍筋可能发生弯钩脱落之问题, 因此能够发挥较佳的韧性, 即具备更优越的抗震潜能。

4.3 SRC 柱之箍筋设计法

1) 试验结果初步证实, 采用 Weng's Formula 设计之五螺箍 SRC 柱具有明显的经济效益。试件中, 相较于 ACI-318 Code 对 RC 柱之箍筋用量要求, 采用 Weng's Formula 设计之五螺箍 SRC 柱的箍筋用量折减系数介于 0.57 与 0.68 之间。

2) 若采用 ACI-318 Code 建议之一般 RC 柱的围束箍筋配置方式来设计 SRC 柱, 由于该规范并未考虑 SRC 柱中之钢筋能够对 SRC 柱核心之混凝土提供良好的围束, 因此其设计结果将会显得过于保守且不经济, 并可能导致箍筋过密而增加 SRC 柱施工之困难度。

4.4 SRC 柱之箍筋用量经济效益

1) 在相同的纵向总用钢量之下, 五螺箍 SRC 柱所需之箍筋用量明显低于传统横箍 SRC 柱。例如五螺箍 SRC 柱 (试件 SRC5) 之每单位长度箍筋用量为横箍 SRC 柱 (试件 SRC1) 之 79%。

2) 对于同样采用五螺箍的 SRC 柱与 RC 柱而言, 五螺箍 SRC 柱之韧性表现皆优于五螺箍 RC 柱。例如五螺箍 SRC 柱 (试件 SRC5) 之箍筋用量为五螺箍 RC 柱 (试件 RC2) 之 65%, 经济效益十分明显。

参考文献

- [1] 翁正强. 台湾钢筋钢筋混凝土构造 (SRC) 设计规范之发展[J]. 结构工程 (台湾), 2005, 20(1): 3~30
- [2] 翁正强. 钢梁与包覆 RC 箱型钢柱之梁柱接头抗震性能研究[J]. 建筑钢结构进展, 2005, 7(5): 33~49
- [3] 翁正强. 台湾首部钢筋钢筋混凝土构造 (SRC) 设计规范之特色[J]. 土木水利 (台湾), 2005, 32(5): 54~62
- [4] 张国镇, 尹衍樑, 王瑞祯, 等. 螺旋箍筋于矩形柱应用之试验研究[J]. 工程 (台湾), 2005, 78(3): 101~124
- [5] 王柄雄. 新矩形混凝土柱围束型式之研究[D]. 台北: 台湾大学土木工程研究所硕士论文, 2004
- [6] Mirza S A. Parametric study of composite column strength variability[J]. Journal of Constructional Steel Research, 1989, 14 (2): 121~137
- [7] 翁正强, 颜圣益, 林俊昌. 包覆型 SRC 柱钢筋对混凝土围束箍筋量之影响[J]. 土木水利工程学刊 (台湾), 1998, 10(2): 193~204
- [8] Mirza S A, Skrabek B W. Reliability of short composite beam-column strength interaction[J]. ASCE Journal of Structural Engineering, 1991, 117 (8): 2320~2339

- [9] Mirza S A, Skrabek B W. Statistical analysis of slender composite beam-column strength [J]. *ASCE Journal of Structural Engineering*, 1992, 118 (5): 1312 ~ 1332
- [10] Kent D C, Park R. Flexural members with confined concrete [J]. *ASCE Journal of Structural Division*, 1971, 97 (7): 1969 ~ 1990
- [11] Furlong R W. AISC columns design logic makes sense for composite column, too [J]. *AISC Engineering Journal*, 1976, First Quarter: 1 ~ 7
- [12] Furlong R W. Column rules of ACI, SSLC and LRFD compared [J]. *ASCE Journal of Structural Engineering*, 1983, 109(10): 2375 ~ 2386
- [13] Hamdan M, Hunaiti Y. Factors affecting bond strength in composite columns [A]. *Proc of The 3rd Inter Conference on Steel-Concrete Composite Structures [C]*. Fukuoka, Japan, 1991, 213 ~ 218
- [14] Wakabayashi M. Research on earthquake resistant capacity of composite structures using high strength steel [A]. *Proc of the 10th World Conference on Earthquake Engineering [C]*. Balkema, Rotterdam, 1992, 3425 ~ 3430
- [15] 蔡克铨, 连 阳, 陈诚直. 钢管钢筋混凝土柱轴向载重行为 [J]. *土木水利工程学刊(台湾)*, 1995, 8 (4): 535 ~ 545
- [16] 叶士青. 钢管钢筋混凝土柱轴向载重行为研究 [D]. 新竹: 台湾交通大学土木工程研究所硕士论文, 1996
- [17] American Concrete Institute. *Buildings Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318 - 05) and Commentary (ACI318R - 05)* [S]. Farmington Hills, Michigan, 2005
- [18] American Institute of Steel Construction. *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings [S]*. Chicago, Illinois, 2005
- [19] 营建署. 钢管钢筋混凝土构造设计规范与解说 [S]. 台湾, 2004
- [20] American Institute of Steel Construction. *Load and resistance factor design specification for structural steel buildings [S]*. Chicago, Illinois, 2005
- [21] 营建署. 建筑技术规则 [S]. 台湾, 2004
- [22] 翁正强, 王晖舜, 李 让, 梁景裕. 钢管钢筋混凝土柱围束箍筋量之试验与耐震设计 [J]. *结构工程(台湾)*, 已接受刊登, 2005

Axial Compressive Behavior of Precast SRC Columns With Multi-Spirals

Yin Yanliang¹, Weng Zhengqiang², Wang Ruizhen¹, Liang Jingyu²

(1. *Ruentex Group, Taipei, Taiwan 10492, China*;

2. *Chiao Tung University, Department of Civil Engineering, Hsinchu, Taiwan 30050, China*)

[Abstract] Presented herein is an experimental study on the axial compressive behavior of rectangular SRC (steel reinforced concrete) columns confined with a new type of multi-spiral cages. The multi-spiral is a device of five interconnected spiral cages, named “5-Spirals” or “Yin’s Spirals” in this study, with a large spiral at the center and four small ones at the corners. The innovation of applying the 5-spirals to rectangular SRC columns is to take its superiority in concrete confinement and its efficiency in automatic production for the precast construction industry. The major parameters of this study included the cost effectiveness of the multi-spirals, and the strength and ductility of the spirally confined SRC columns. As compared to the reinforced concrete column tied with traditional rectilinear hoops, the test results showed that, with significant cost savings of confinement steel, the SRC columns confined with 5-spirals demonstrated excellent performances in both strength and ductility.

[Key words] precast construction; steel reinforced concrete; rectangular SRC column; multi-spirals; 5-Spirals; strength