

文章编号:1006-2467(2022)04-0422-09

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2020.347

双钢板混凝土单元平面内屈服准则

黄城均, 朱天怡, 宋晓冰

(上海交通大学 土木工程系, 上海 200240)

摘要: 针对承受平面内薄膜内力的双钢板混凝土(Steel-Concrete-Steel, SCS)单元, 基于固体力学的3个基本方程(平衡条件、变形协调条件以及本构方程), 提出了满足钢板 Tresca 屈服准则的 SCS 单元平面(主)应力空间的屈服准则. 提出了一种结合试验数据确定 SCS 单元屈服荷载的计算方法, 并将该方法应用于 SCS 单元双向拉压试验, 分析 9 个不同配钢率和不同拉压比的 SCS 单元试件, 将 SCS 单元的屈服准则与试验结果进行对比. 此外, 采用 Ozaki 的 7 个剪切单元试件进行进一步验证. 结果表明, SCS 单元的屈服准则与试验结果具有较好的一致性.

关键词: 双钢板混凝土结构; 平面应力状态; 力学分析; 屈服准则

中图分类号: TU 398

文献标志码: A

In-Plane Yield Criterion of Steel-Concrete-Steel Unit Panel

HUANG Chengjun, ZHU Tianyi, SONG Xiaobing

(Department of Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: A yield criterion for the steel-concrete-steel (SCS) unit panel subjected to in-plane membrane forces is proposed, which is expressed in the in-plane (principal) stress space and follows the Tresca yielding principle for steel plates. This yield criterion for the SCS unit panel is based on the Navier's three principles (equilibrium conditions, strain compatibility, and the constitutive laws of materials). A calculation method for determining the yield load of the SCS unit in combination with the test data is proposed, and the method is applied to the bidirectional tensile and compression test of the SCS unit. By using this method, nine SCS tested panels with different steel ratios and different tension compression ratios are analyzed, and the yield criterion of the SCS unit is compared with the test results. In addition, seven SCS shear specimens tested by Ozaki are used for further verification. The results derived from the yield criterion of the SCS panel elements are found in good agreement with the test results.

Key words: steel-concrete-steel structure; in-plane stress state; mechanical analysis; yield criterion

双钢板混凝土(Steel-Concrete-Steel, SCS)组合结构是由外侧两层钢面板与核心的混凝土层构成的“三明治”夹芯结构. 通过横向钢构件(如对穿的钢筋或型钢)将两侧钢板相互连接, 增强施工过程中的

整体性以及 SCS 结构的面外抗剪能力. 在钢板与混凝土交界面设置焊接栓钉, 传递两种材料之间的剪力和拉力, 保证钢板和混凝土之间协同工作. 大量的试验研究表明, SCS 结构具有承载力高、延性和抗震

收稿日期: 2020-10-23

基金项目: 国家科技重大专项资助项目(2011ZX06002-001)

作者简介: 黄城均(1992-), 男, 浙江省绍兴市人, 博士生, 从事双钢板混凝土组合结构研究.

通信作者: 宋晓冰, 男, 教授, 博士生导师, 电话(Tel.): 13391066368; E-mail: xbsong@sjtu.edu.cn.

性能优越及抗冲击等特点^[1-2]. 在几十年的工程应用中,SCS 结构得到了广泛的应用,特别是在核电设施^[3]、海洋结构物^[4-5]和高层建筑^[6]等领域.

对于核电站安全壳以及海洋结构物这一类四面围合而成的结构,传统的基于构件的设计方法并不适用. 这类结构没有典型的独立传统构件(如梁、柱、墙等),是一种剪力墙式或壳体结构^[7]. 在设计时,这类结构通常可以视作由一系列单元组合而成. 而这些单元主要承受平面内薄膜力(双向的轴力和面内剪力)^[8]. 针对承受平面内薄膜力的 SCS 单元,往往通过建立一系列设计准则,如针对 SCS 单元在不同加载路径下的破坏准则,用于设计校核. 在这个领域,Song 等^[9]通过极限分析建立了适用的极限分析模型. 该准则以混凝土达到单轴抗压强度或者钢板达到最大抗拉强度作为判断依据,考虑钢板屈服以后与混凝土发生应力重分布,得出了 SCS 单元在平面内不同加载路径下极限承载力的包络面. 黄城均等^[10]在此基础上,提出了考虑混凝土的受压软化效应的极限分析模型. 这些研究为我国于 2019 年 5 月发行的《核电站钢板混凝土结构技术标准》^[11]提供了部分理论依据.

需要指出,使用充分考虑钢板屈服后塑性流动的破坏准则去校核 SCS 单元的承载力有时并不安全. 一方面,在正常使用工况下,SCS 结构中的钢板一般处于线弹性状态,未达到屈服状态;另一方面,工程中使用的部分钢材并不具有理想弹塑性性质,屈服平台很窄. 此外,上海交通大学 Huang 等^[8]在 2016 年进行的平面内双向加载试验结果表明,当 SCS 单元承受单轴拉,或者较小的压拉比时,从钢板发生屈服到 SCS 单元达到极限承载力,变形急剧增加,而承载力增加并不显著. 因此,有必要针对 SCS 单元建立以钢板屈服为临界状态的判断准则.

文献调研表明,目前尚无相关研究提出 SCS 单元的屈服准则. 本文着力于利用固体力学基本方程建立简洁表达的 SCS 单元屈服准则,对 SCS 单元的安全评估进行补充,并通过双轴拉压试验^[8]以及 Ozaki 的剪切试验进行试验验证^[12].

1 理论推导

1.1 平面内问题描述

承受平面内薄膜内力 N_x, N_y, V_{xy} 的 SCS 单元如图 1 所示,这里的平面指钢板所在平面(xOy 平面),这些薄膜内力可视为均布在 SCS 单元边界所在截面上.

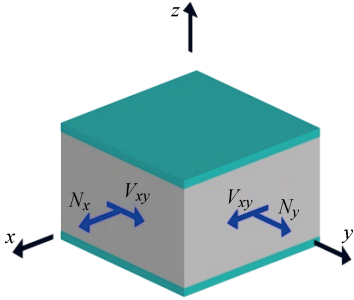


图 1 承受平面内薄膜力的 SCS 组合单元
Fig. 1 SCS combination unit subjected to in-plane membrane forces

定义 SCS 单元内钢板的正应力为 σ_{sx}, σ_{sy} ,切应力为 τ_{sxy} ,混凝土的正应力为 σ_{cx}, σ_{cy} ,切应力 τ_{cxy} ,如图 2(a) 所示,图中 t_s 为单侧钢板厚度. 若将 SCS 单元视为一种由等效均质材料(等效厚度为混凝土厚度 t_c)组成的等效单元,可将均质材料所承受的均匀应力称为等效应力,分别由正应力 σ_x, σ_y 及切应力 τ_{xy} 表示,如图 2(b) 所示. 通过坐标转换,此应力状态可通过两个主应力 σ_1, σ_2 在主应力方向 1,2 上的表达,如图 2(c) 所示.

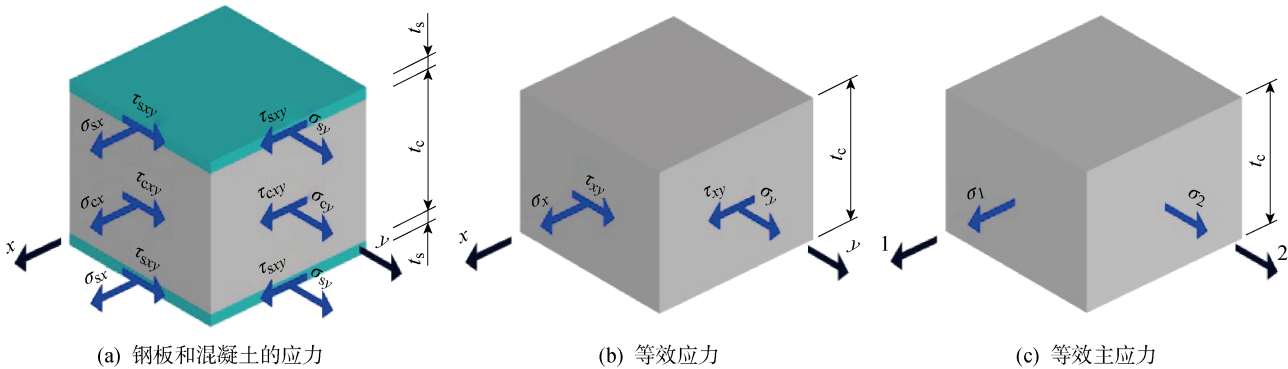


图 2 SCS 单元的平面应力状态
Fig. 2 In-plane stress state in SCS unit

1.2 SCS 单元的屈服准则与破坏准则

对于平面内等比例双向拉压加载 ($\sigma_1 > 0, \sigma_2 < 0$) 的 SCS 单元, 一般情况会经历混凝土开裂、钢板屈服以及 SCS 单元达到极限承载力 3 个阶段^[12].

当钢板达到初始屈服状态时, SCS 单元承受的等效应力为 SCS 单元的屈服强度. 将不同加载比例下 SCS 单元的屈服强度组成的包络面称为 SCS 单元的屈服准则. SCS 单元的破坏准则是对应 SCS 单元达到极限承载力的包络面, 其对应的状态是钢板达到最大抗拉强度或者混凝土被压碎^[10]. 在 SCS 组合结构中, 钢材(钢板)的屈服并不意味着结构达到了极限承载力, SCS 单元从钢板初始屈服到达到极限承载力, 伴随着钢板的塑性流动以及钢板和混凝土之间的应力重分布, 单元的承载力和变形都会增长^[9-10]. 需要指出的是, 在钢板的塑性流动阶段, 钢板的抗拉刚度会逐渐减小, 因此在钢板屈服后, SCS 单元的整体刚度会逐渐降低, 单元承载力增加的同时变形也会加速增长. 平面内双向加载试验结果表明^[8]: SCS 单元从钢板初始屈服到极限承载力状态, SCS 单元的承载力增加可以达到 40~70%, 变形增加 2~3 倍.

1.3 基本假定

(1) 对于平面内双向拉压加载的 SCS 试件, 栓钉间距 B_s 与单侧钢板厚度 t_s 的比值小于 30, 可确保钢板和混凝土满足变形协调条件(无相对滑移)、且钢板在屈服前不发生屈曲失稳破坏^[13].

(2) 钢板的屈服准则服从 Tresca 屈服准则^[14]. Tresca 屈服准则, 即最大剪应力准则, 与 von Mises 准则相比, 虽然忽略了中间主应力对材料破坏的影响, 但是具有更简单的分段线性数学表达式, 使得在组合结构的计算表达与应用更简洁方便.

(3) 混凝土的破坏准则服从拉断的 Mohr-Coulomb 破坏准则^[14], 且不考虑混凝土的抗拉能力和抗拉刚度, 以 $E_{\text{sec}} = 0.7E_c$ 作为开裂后混凝土的弹性模量, 其中 E_c 为混凝土的初始弹性模量. 这是一种针对开裂混凝土的常用简化处理方法, 尤其是在钢板屈服前, 混凝土的非线性特征还没有十分显著.

(4) 不考虑 SCS 单元在钢板屈服前的混凝土的受压软化与约束强化效应.

由于钢板和对穿拉结钢筋的约束, 在承受较大压力时, 混凝土可能出现明显的约束效应, 然而根据试验结果分析, 在钢板初始屈服前, 这种约束状态对混凝土的影响并不大. 此外, 与钢筋混凝土 (Reinforced Concrete, RC) 结构明显不同的是, 由于栓钉的规则布置, 在 SCS 单元中, 混凝土出现的受拉裂

缝都是沿着栓钉呈现笔直形态而非 RC 中弯曲的形态, 在很大程度上减少混凝土开裂对混凝土抗压强度的影响. 栓钉为裂缝间混凝土提供侧向约束, 因此裂缝间混凝土的工作方式类似于多个短柱. 试验结果显示, 即使在极限状态下, 受压软化效应对混凝土带来的影响也不大. 因此, 以钢板屈服为临界状态的 SCS 单元屈服准则研究中, 可以暂不考虑受压软化与约束强化效应对混凝土抗压性能的影响.

1.4 补充说明

(1) 定义在单位长度范围内 SCS 单元中两侧钢板能够承受的拉力与混凝土能够承受的轴心压力的比值为配筋度 Φ . 根据 SCS 单元的组成, 可知配筋度在其平面内任意方向都相等, 表达为

$$\Phi = \Phi_x = \Phi_y = \frac{2f_y t_s}{f_c t_c} \quad (1)$$

式中: f_y 和 f_c 分别为钢板单轴抗拉屈服强度和混凝土的单轴抗压强度.

(2) 由于混凝土的开裂以及钢板打孔、栓钉焊接导致钢板上残余应力的存在, 钢板与混凝土的变形不会在交界面的每一个位置都保持一致. 但文中涉及的应力和应变是平均意义上的. 对于应力, 认为在所考虑截面是均匀分布的; 对于应变, 是较大长度下发生的平均应变, 可以横跨多条受拉裂缝, 即平均应变是指包含裂缝宽度的应变, 因此当栓钉布置足够密集能实现钢板和混凝土可靠连接时, 在单元层面, 钢板和混凝土的平均应变是一致的^[15].

1.5 基本方程组

在平面主应力空间内, 承受平面内薄膜力 (σ_1, σ_2) 的 SCS 单元, 如图 3 所示. 图中 (σ_{1s}, σ_{2s})、(σ_{1c}, σ_{2c}) 分别表示钢板和混凝土的主应力. 钢板和混凝土的主应变分别记为 ($\epsilon_{1s}, \epsilon_{2s}$)、($\epsilon_{1c}, \epsilon_{2c}$), SCS 单元主应变记为 (ϵ_1, ϵ_2).

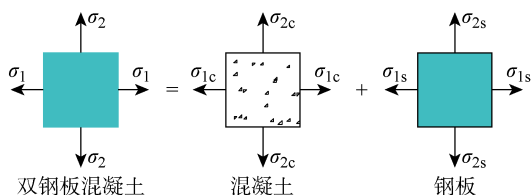


图 3 SCS 单元的平面主应力状态

Fig. 3 In-plane principal stress state of SCS unit

1.5.1 平衡方程

$$t_c \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \end{bmatrix} = 2t_s \begin{bmatrix} \sigma_{1s} \\ \sigma_{2s} \end{bmatrix} + t_c \begin{bmatrix} \sigma_{1c} \\ \sigma_{2c} \end{bmatrix} \quad (2)$$

1.5.2 变形协调方程 根据基本假定 1, 可得变形协调方程:

$$\begin{bmatrix} \epsilon_{1c} \\ \epsilon_{2c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \epsilon_{1s} \\ \epsilon_{2s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \end{bmatrix} \tag{3}$$

1.5.3 应力应变关系

(1) 钢板.

钢板达到屈服前,处于线弹性状态,其应力和应变之间满足:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{1s} \\ \sigma_{2s} \end{bmatrix} = \frac{E_s}{1-\nu_s^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu_s \\ \nu_s & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_{1s} \\ \epsilon_{2s} \end{bmatrix} \tag{4}$$

式中: E_s 、 ν_s 分别为钢板的弹性模量和泊松比.

(2) 混凝土.

钢板达到屈服时,混凝土可能处于两种状态,受拉开裂后的单轴压应力状态和未开裂时的双轴应力状态,其平面主应力应变关系可分别表达为

$$\begin{bmatrix} \sigma_{1c} \\ \sigma_{2c} \end{bmatrix} = E_{sec} \begin{bmatrix} 0 \text{ 或 } 1 & 0 \\ 0 & 1 \text{ 或 } 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_{1c} \\ \epsilon_{2c} \end{bmatrix} \tag{5}$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_{1c} \\ \sigma_{2c} \end{bmatrix} = \frac{E_c}{1-\nu_c^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu_c \\ \nu_c & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_{1c} \\ \epsilon_{2c} \end{bmatrix} \tag{6}$$

式中: ν_c 为混凝土的泊松比.

1.6 SCS 单元的屈服准则

结合钢板和混凝土的屈服/破坏准则,以及式(2)~(6),得到 SCS 单元的屈服准则,在平面内主应力坐标系下如图 4 所示. 图 4 中 $n_1 = f_y/f_c$, $n_2 = E_{sec}/E_s$. 该准则由多折线构成,定义折线转折点为关键点,即对应图中的点 A、B、C 和 D.

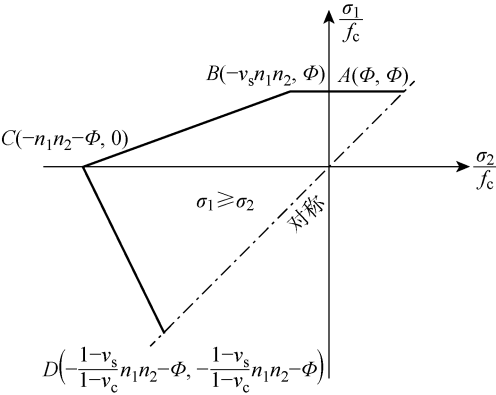
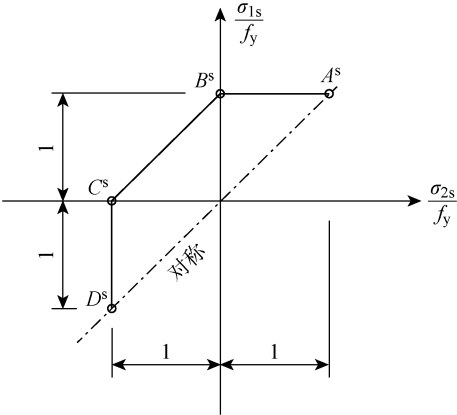


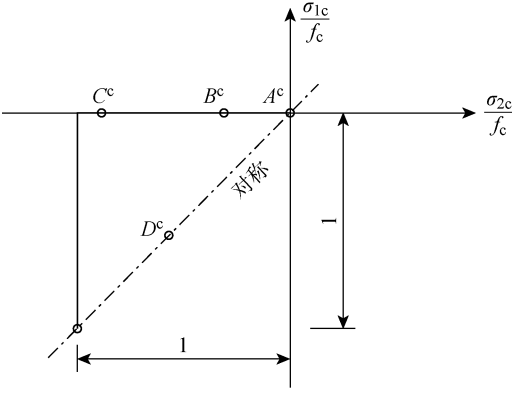
图 4 SCS 单元的屈服准则(平面主应力空间)

Fig. 4 Yield criterion of SCS unit (in-plane principal stress coordinates)

1.6.1 推导说明 考虑到对称性,仅讨论 $\sigma_1 \geq \sigma_2$ 范围内的关键点 A、B、C 和 D 以及区段 BC 的推导过程,为便于说明,在各关键点位置时,对应钢板和混凝土的应力状态在图 5 中予以标注,上标 s 和 c 分别代表钢板和混凝土.



(a) 钢板



(b) 混凝土

图 5 钢板和混凝土的关键点应力状态
Fig. 5 Stress state of steel plate and concrete at key points

(1) A 点.

SCS 单元受到双轴等比例拉力,由于忽略混凝土的抗拉承载力,钢板达到 Tresca 屈服面时,单元承载力完全由钢板提供,此时钢板和混凝土的应力状态分别对应图 5(a)中的 A^s 点和图 5(b)中的 A^c 点,SCS 单元的屈服准则表现为图 4 中 A 点,坐标为 (Φ, Φ) .

(2) B 点.

当 SCS 单元处于由双轴受拉转向一拉一压,且加载的压拉比较小时,由于混凝土的泊松比 ν_c (取 0.2)小于钢板的泊松比 ν_s (取 0.3),当钢板屈服时,钢板处于双向拉状态,混凝土逐渐由双向受拉状态转向单向压状态. 钢板和混凝土的应力状态分别在图 5(a)中的 $A^s B^s$ 区段和图 5(b)中的 $A^c B^c$ 区段. 此时,SCS 单元的屈服准则表现为图 4 中 AB 区段. 随着压拉比进一步增大,钢板屈服时,钢板由双向拉状态逐步转向一拉一压状态,即图 5(a)中的 $A^s B^s$ 区段进入 $B^s C^s$. 因此,钢板屈服时,当钢板处于单轴拉应力屈服状态 ($\sigma_{1s} = f_y, \sigma_{2s} = 0$),即图 5(a)中 B^s

点时,SCS 单元屈服准则出现转折点 B .

代入式(2)~(6)可得混凝土的应力状态 ($\sigma_{1c} = 0, \sigma_{2c} = -\nu_s n_2 f_y$) 以及 SCS 单元的应力状态 ($\sigma_1 = \Phi f_c, \sigma_2 = -\nu_s n_2 f_y$), SCS 单元的屈服准则表现为图 4 中 B 点,坐标为 $(-\nu_s n_1 n_2, \Phi)$.

(3) BC 段.

当加载压拉比较大时,由于混凝土的泊松比小于钢板的泊松比,单元达到屈服面之前混凝土会在 2 方向出现受拉裂缝,混凝土处于单向压状态,对应图 5(b)中的 $B^s C^c$ 区段. 钢板屈服时为双轴拉压应力屈服,对应图 5(a)中的 $B^s C^s$ 区段. 依据 Tresca 屈服准则,钢板的双轴主应力之间满足

$$\sigma_{1s} - \sigma_{2s} = f_y \quad (7)$$

其中 $0 \leq \sigma_{1s} \leq f_y$,代入式(2)~(6)可得 SCS 单元主应力之间的关系满足

$$\left[(1 - \nu_s) \frac{n_1 n_2}{\Phi} + 1 \right] \frac{\sigma_1}{f_c} - \frac{\sigma_2}{f_c} = n_1 n_2 + \Phi \quad (8)$$

即图 4 中 BC 段的表达式.

(4) C 点.

当 SCS 单元承受单轴压力时,此时 SCS 单元的主拉应力为 0 ($\sigma_1 = 0$). 同时,由于混凝土的泊松比小于钢板的泊松比,混凝土在垂直于主压方向会受到钢板的拉伸从而出现受拉裂缝. 结合基本假定 3, 钢板屈服时,混凝土的主拉应力为 0,混凝土处于单向压状态,即 $\sigma_{1c} = 0$. 根据式(2),可知钢板处于单轴压应力屈服状态 ($\sigma_{1s} = 0, \sigma_{2s} = -f_y$),此时钢板和混凝土的应力状态分别对应图 5(a)中的 C^s 点和图 5(b)中的 C^c 点.

由式(2)~(6),可得混凝土和 SCS 单元的主压应力状态:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{2c} &= -n_2 f_y \\ \sigma_2 &= -(n_2 f_y + \Phi f_c) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

对于 Q235 和 Q345 钢材, $\sigma_{2c} > -f_c$, SCS 单元的屈服准则表现为图 4 中 C 点,坐标为 $(-n_1 n_2 - \Phi, 0)$.

(5) D 点.

SCS 单元处于双向等比例压加载,此时钢板的主压应力状态为 $\sigma_{1s} = \sigma_{2s} = -f_y$. 并且由式(2)~(6)可得混凝土和 SCS 单元的主应力状态分别为

$$\begin{aligned} \sigma_{1c} = \sigma_{2c} &= \frac{-(1 - \nu_s) E_{\text{sec}}}{(1 - \nu_c) E_s} f_y \\ \sigma_1 = \sigma_2 &= -\frac{(1 - \nu_s) E_{\text{sec}}}{(1 - \nu_c) E_s} f_y - \Phi f_c \end{aligned}$$

此时钢板和混凝土的应力状态分别对应图 5(a)中的 D^s 点和图 5(b)中的 D^c 点. 对于 Q235 和

Q345 钢材, $\sigma_{1c} = \sigma_{2c} > -f_c$, SCS 单元的屈服准则表现为图 4 中 D 点,其坐标为 $\left(-\frac{1 - \nu_s}{1 - \nu_c} n_1 n_2 - \Phi, -\frac{1 - \nu_s}{1 - \nu_c} n_1 n_2 - \Phi \right)$.

1.6.2 平面主应力状态下的数学表达 将应力无量纲化表示,记 $\tilde{\sigma}_1 = \frac{\sigma_1}{f_c}, \tilde{\sigma}_2 = \frac{\sigma_2}{f_c}$,并引入参数 $k_1 \sim k_4$,即

$$\left. \begin{aligned} k_1 &= 1 + (1 - \nu_s) n_1 n_2 / \Phi \\ k_2 &= \frac{n_1 n_2 (\nu_c - \nu_s)}{(1 - \nu_s) n_1 n_2 + (1 - \nu_c) \Phi} \\ k_3 &= -n_1 n_2 - \Phi \\ k_4 &= -n_1 n_2 (1 - \nu_s) / (1 - \nu_c) - \Phi \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

在 $\tilde{\sigma}_1 \geq \tilde{\sigma}_2$ 范围内,可将 SCS 单元的屈服准则表达为

$$\left. \begin{aligned} \tilde{\sigma}_1 &= \Phi - \nu_s, n_1 n_2 \leq \tilde{\sigma}_2 \leq \Phi \\ 0 \leq \tilde{\sigma}_1 < \Phi, \tilde{\sigma}_2 &= k_1 \tilde{\sigma}_1 + k_3 \\ k_4 \leq \tilde{\sigma}_1 < 0, \tilde{\sigma}_2 &= k_2 \tilde{\sigma}_1 + k_3 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

2 SCS 单元平面内双向加载试验

2016 年上海交通大学 Huang 等^[8]对 9 块 SCS 单元试件进行了双向拉压加载试验. 试件设计为十字形,由 2 个力传递区和 1 个测试区组成. 测试区的长、高和宽分别为 800 mm、800 mm 和 260 mm. 主要的试验参数包括加载压拉比、材料性能(钢板和混凝土的材料常数)和栓钉间距与钢板厚度比(B_s/t_s)^[8].

在加载过程中测试了混凝土的立方体强度 f_{cu} . 栓钉直径 8 mm,长 60 mm,间距 75 mm. B_s/t_s 的数值在 12.5~25.4,能够实现钢板与混凝土可靠连接,并确保钢板受压屈服前不出现局部屈曲. 连接两侧钢板的对穿钢筋直径为 10 mm,布置间距为 150 mm. 对穿钢筋的体积配筋率为 0.349%.

试件的竖向压力由 1 000 t 的作动器施加,水平拉力由两个 200 t 作动器施加. 在测试区每一侧钢板的外表面上分别布置了 4 个线位移传感器(LVDTs),用于测量加载过程中主拉方向和主压方向的平均应变. 试验详情参见文献[8].

3 SCS 单元屈服荷载确定办法

试验中 SCS 单元的屈服荷载是通过试验数据和钢板的屈服准则来确定的. 考虑到试验中采用的主要加载模式为单轴压、单轴拉和一拉一压,因此在钢板屈服前,混凝土往往会出现垂直于主拉力方向的裂缝,如图 6 所示. 若考虑裂缝处和裂缝间钢板实

际应力状态的差异,并认为裂缝处钢板先于裂缝间钢板达到屈服状态.基于试验实测数据,双向加载的外力(拉力 N_1 、压力 N_2)以及 SCS 单元的双向主应变(拉应变 ϵ_1 、压应变 ϵ_2),结合钢板的材性参数,可以获取裂缝处钢板初始屈服于 Tresca 屈服准则时 SCS 单元承受的荷载.

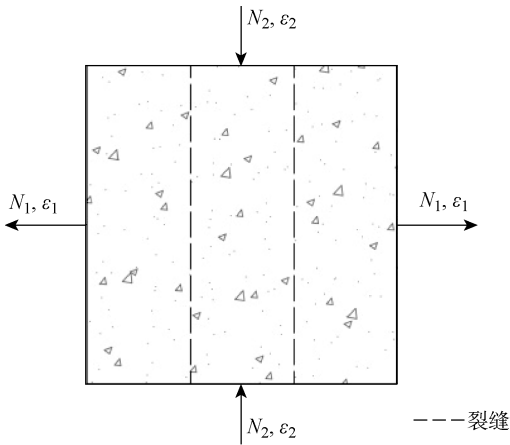


图 6 SCS 单元中混凝土的受拉裂缝

Fig. 6 Tensile cracks for concrete in SCS unit

考虑到主压方向混凝土和钢板的变形可以认为是协调的,裂缝处钢板的压应变 ϵ_2^s 等于实测 SCS 单元主压方向的平均压应变.由平衡关系,裂缝处钢板的主拉应力 $\sigma_1^s = \frac{N_1}{A_s}$,其中 A_s 为主拉方向钢板的有效受拉面积.在屈服之前,钢板的应力应变关系满足线弹性关系式(4),若记 $\eta = \frac{E_s}{1 - \nu_s^2}$,则裂缝处钢板的主应力由已知量求得:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1^s \\ \sigma_2^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \nu_s & (1 + \nu_s^2)\eta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1^s \\ \epsilon_2^s \end{bmatrix} \tag{12}$$

从而可根据 Tresca 屈服准则确认裂缝处钢板是否屈服.

4 试验验证

在平面主应力空间下,SCS 单元的屈服准则主要分布于 3 个区域:双轴拉、双轴压以及一拉一压.文献调研表明,目前尚未有相关 SCS 单元在双轴拉和双轴压受力模式的试验数据可供验证.对于双轴受拉,由于混凝土开裂退出工作,忽略混凝土的拉力通常是符合实际且简单的,单元承载力完全由钢板提供.对于双轴受压,由于混凝土的约束强化效应可能会更加显著,使用文中所建立的 SCS 单元屈服准则将会更趋于安全.因此试验验证的焦点主要在单轴拉压和拉压耦合的区段,即图 4 中的第 2 象限.

4.1 平面内双向拉压试验验证

根据上节介绍的基于试验测试数据的 SCS 单元屈服荷载确定方法对测试数据进行处理,将不同拉压比加载以及不同钢板厚度的 SCS 单元试件的屈服荷载列于表 1.根据本文提出的 SCS 单元屈服准则,结合双向抗压试验的试验参数^[8]计算得到的 SCS 单元试件屈服荷载也对应陈列在表 1.从表 1 中的数据分析可知,相对误差均在 10% 以内,且相对误差的平均值为 3.30%.说明本文所建议的 SCS 单元屈服准则能够很好地估计 SCS 单元在双向拉压加载模式下的屈服强度.

更直观地,在平面主内力空间内,将试验结果和 SCS 单元的屈服准则进行对比,如图 7 所示.需指出的是,图 7 中横纵坐标轴分别对应 SCS 单元平面内的主压力和主拉力,因此需将式(11)中表达的无量纲等效应力通过乘以 $A_c f_c$ 转化成内力的形式.其中

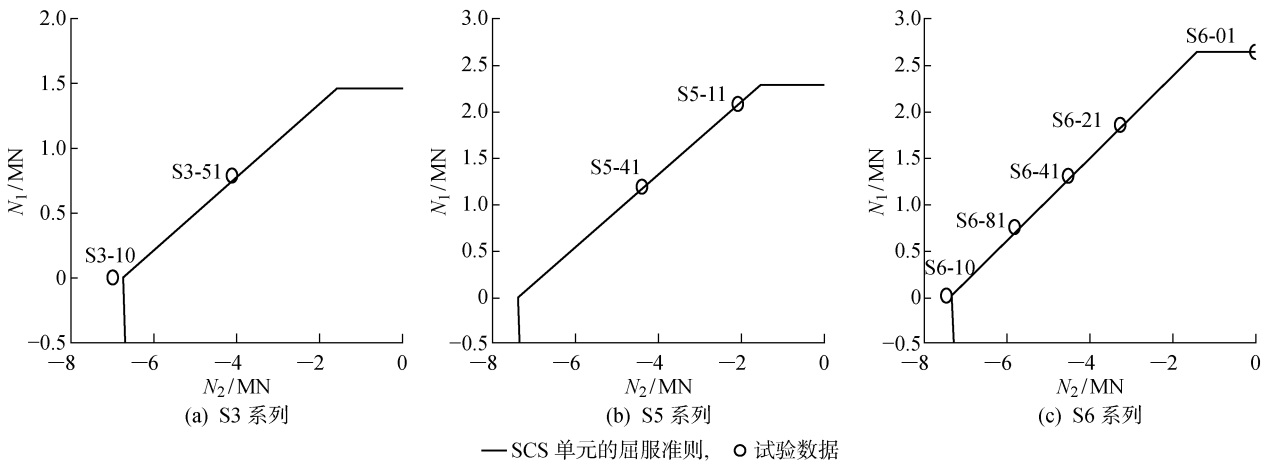


图 7 SCS 单元屈服准则与试验结果的比较

Fig. 7 Comparisons of yield criterion and test results of SCS unit

表 1 SCS 屈服准则与双向拉压试验的屈服荷载

Tab.1 Yield strengths from SCS yield criterion and biaxial test results

试件 编号	试验结果		SCS 单元屈服准则		相对 误差/%
	拉力/ kN	压力/ kN	拉力/ kN	压力/ kN	
S3-51	840	−4 370	789	−4 106	−6.05
S3-10	0	−6 624	0	−6 977	5.32
S5-11	1 902	−1 902	2 081	−2 081	9.33
S5-41	1 184	−4 386	1 188	−4 400	0.31
S6-01	2 640	0	2 640	0	0.00
S6-21	1 815	−3 213	1 845	−3 264	1.61
S6-41	1 283	−4 472	1 296	−4 517	1.00
S6-81	756	−6 039	728	−5 812	3.75
S6-10	0	−7 300	0	−7 473	2.36
平均值					3.30

A_c 为 SCS 单元中混凝土的横截面积。

从图 7 中可以看到,在配钢率 2.3%~4.6%范围内,对于各种双向拉压等比例加载,本文提出的 SCS 单元的屈服准则与试验结果吻合较好。

4.2 平面内纯剪与压剪试验验证

选用日本学者 Ozaki 等^[12]关于 SCS 单元平面内的纯剪与压剪试验数据与本文所提的 SCS 单元屈服准则进行对比分析。Ozaki 等采用的试件为截面边长为 1 200 mm 的正方形面板,厚度为 200 mm,并在试件周边各设置了隔板,隔板在长宽方向布置的面积(A_p)相同。考虑到周边分隔板对 SCS 单元的承载力的影响,将分隔板视作一维受力构件,对本文所提的模型进行修正。

结合 1.6 节论述,SCS 单元屈服准则(图 4)中

A, B, C, D 关键点分别对应钢板初始屈服点在 A^s, B^s, C^s, D^s 。因此,在关键点位置时,可通过钢板的应变状态评估分隔板的应力状态,从而将 SCS 单元的屈服准则调整为图 8 中所示的 $A'-B'-C'-D'$,阴影部分则为分隔板对 SCS 单元在钢板初始屈服状态时承载力的贡献。

若记 $\Phi_p = \frac{A_p f_y}{A_c f_c}$,则布置对称分隔板 SCS 单元的屈服准则的各个关键点的坐标可表示为

$$A'(\Phi + (1 - \nu_s)\Phi_p, \Phi + (1 - \nu_s)\Phi_p)$$
$$B'(-\nu_s n_1 n_2 - \Phi_p, \Phi + \Phi_p)$$
$$C'(-n_1 n_2 - \Phi - \Phi_p, \nu_s \Phi_p)$$
$$D'(-\frac{1 - \nu_s}{1 - \nu_c} n_1 n_2 - \Phi - (1 - \nu_s)\Phi_p,$$
$$-\frac{1 - \nu_s}{1 - \nu_c} n_1 n_2 - \Phi - (1 - \nu_s)\Phi_p)$$

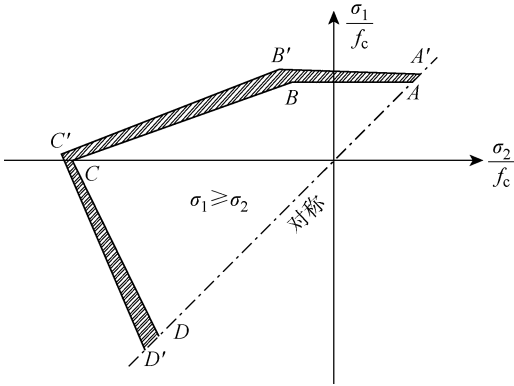


图 8 SCS 单元屈服准则(含双向分隔板)

Fig.8 Yield criterion of SCS unit (with partition webs)

详细的试验数据及与本文模型(修正后)的对比结果如表 2 所示。其中 NN 代表 SCS 单元试件仅布

表 2 SCS 屈服准则与剪切试验的屈服荷载

Tab.2 Yield strengths from SCS yield criterion and shear test

试件编号	钢板		混凝土	试验结果		SCS 单元屈服准则	
	$A_s(A_p)/\text{cm}^2$	$f_y(E_s)/\text{MPa}$	$f_c(E_c)/\text{MPa}$	轴力/kN	剪力/kN	剪力/kN	相对误差/%
S2-00NN	53.5(17.1)	340(1.97×10 ⁵)	42.2(2.72×10 ⁴)	0	2 290	2 381	3.99
S2-15NN	53.5(17.1)	340(1.97×10 ⁵)	41.6(2.77×10 ⁴)	353	2 330	2 564	10.04
S2-30NN	53.5(17.1)	340(1.97×10 ⁵)	42.0(2.79×10 ⁴)	705	2 490	2 693	8.14
S3-00NN	75.4(16.9)	351(1.99×10 ⁵)	41.9(2.71×10 ⁴)	0	3 070	3 176	3.44
S3-15NN	75.4(16.9)	351(1.99×10 ⁵)	41.6(2.67×10 ⁴)	353	3 130	3 238	3.43
S3-30NN	75.4(16.9)	351(1.99×10 ⁵)	40.1(2.70×10 ⁴)	705	3 170	3 307	4.33
S4-00NN	104.9(16.7)	346(2.07×10 ⁵)	42.8(2.76×10 ⁴)	0	3 560	3 805	6.89
平均值							5.75

置周边的分隔板而没有布置中间分隔板.通过图 8 所示的屈服准则确定 SCS 单元的屈服荷载时,需考虑实际的加载拉压比例,表 2 中轴力为 0 的 3 个试件为纯剪试件,等效的拉压比为 1:1,而施加轴力的试件则需要对预先施加的压力以及对应的剪力进行坐标换算.

从表 2 中的数据分析可知,相对误差均在 3%~11%,且相对误差的平均值为 5.75%.说明本文所建议的 SCS 单元屈服准则能够很好地估计 SCS 剪切单元的屈服强度.需要指出的是,将分隔板作为一维受力构件与钢板,混凝土协同变形的处理可能在一定程度上高估分隔板对单元屈服时承载力,通过 SCS 单元屈服准则预测的屈服荷载均比剪切试验的结果要高一些.

5 分析与讨论

5.1 考虑高强钢材对屈服准则的修正

在试验验证时,由于 SCS 单元试件采用的钢板的单轴抗拉强度在 300 MPa 左右,钢板的屈服比混凝土的受压破坏先发生.如果钢材的强度进一步提高,比如采用单轴抗拉强度超过 400 MPa 的高强钢,混凝土受压破坏可能先于钢板屈服.此时,对于图 4 中所提的 SCS 单元屈服准则需进行相应修正:在关键点 A 和 B,由于压拉比较小,在钢板屈服时,混凝土在主压方向的压应力水平小于 f_c ,可以继续采用 1.6 节所提出的方式确定,但对于关键点 C 和 D,可偏保守地取钢材的屈服强度为 400 MPa 进行确定.

5.2 钢板打孔和焊接栓钉、对穿钢带来的残余应力

SCS 单元的钢板由于打孔和焊接栓钉、对穿钢,不可避免地存在残余应力.文中提出的 SCS 单元屈服准则并未对残余应力的影响进行考虑.若要进一步考虑残余应力对钢板屈服造成的影响,可通过测定焊接栓钉、对穿钢后的钢板的残余应力分布情况,从而对钢板的屈服判定准则做出相应的调整.这方面的工作作者所在的课题组正在进行研究中.

6 结论

(1) 基于力学分析的基本方法得到基本方程组,推导了不同受力情况下 SCS 单元的屈服荷载,并且提出了 SCS 单元在平面(主)应力空间下的屈服准则.

(2) 提出结合试验数据确定 SCS 单元屈服荷载的计算方法,并将该方法应用于 SCS 单元双向拉压试验.

(3) 将 SCS 单元屈服准则与双向拉压试验以及 Ozaki 等^[12]的剪切试验结果相对比,结果表明,在双向拉压加载区域本文所提的 SCS 单元屈服准则能较好地预测 SCS 单元的屈服强度.

参考文献:

[1] 冷予冰,宋晓冰,葛鸿辉,等. 钢板混凝土简支梁抗剪承载模式及承载力分析[J]. 土木工程学报, 2015, 48(7): 1-11.
LENG Yubing, SONG Xiaobing, GE Honghui, *et al.* Study on shear resisting pattern and strength of simply supported steel-concrete-steel sandwich beams [J]. **China Civil Engineering Journal**, 2015, 48(7): 1-11.

[2] LENG Y B, SONG X B. Shear strength of steel-concrete-steel sandwich deep beams: A simplified approach[J]. **Advances in Structural Engineering**, 2019, 22(1): 42-53.

[3] SEO J, VARMA A H, SENER K, *et al.* Steel-plate composite (SC) walls: In-plane shear behavior, database, and design[J]. **Journal of Constructional Steel Research**, 2016, 119: 202-215.

[4] YAN J B, LIU X M, LIEW J Y R, *et al.* Steel-concrete-steel sandwich system in arctic offshore structure: Materials, experiments, and design[J]. **Materials & Design**, 2016, 91: 111-121.

[5] YAN J B, LIEW J Y R, ZHANG M H, *et al.* Experimental and analytical study on ultimate strength behavior of steel-concrete-steel sandwich composite beam structures[J]. **Materials and Structures**, 2015, 48(5): 1523-1544.

[6] 聂建国,樊健生,黄远,等. 钢板剪力墙的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(9): 1-8.
NIE Jianguo, FAN Jiansheng, HUANG Yuan, *et al.* Experimental research on steel plate shear wall [J]. **Journal of Building Structures**, 2010, 31(9): 1-8.

[7] 蒋亚军,陈思佳,黄城均,等. 核电用双钢板-混凝土单元轴心受压组合效应[J]. 浙江大学学报(工学版), 2019, 53(4): 724-731.
JIANG Yajun, CHEN Sijia, HUANG Chengjun, *et al.* Composite effect of steel-concrete-steel elements under axial compression for nuclear power plant[J]. **Journal of Zhejiang University (Engineering Science)**, 2019, 53(4): 724-731.

[8] HUANG C J, CHEN S J, LENG Y B, *et al.* Experimental research on steel-concrete-steel sandwich panels subjected to biaxial tension compression[J]. **Journal of Constructional Steel Research**, 2019, 162:

105725.

[9] SONG X B, CHU M, GE H H, *et al.* A failure criterion for steel-concrete composite walls[C]// **International Conference on Sustainable Development of Critical Infrastructure**. Reston, VA, USA: American Society of Civil Engineers, 2014: 324-331.

[10] 黄城均, 宋晓冰. 双钢板混凝土组合结构平面内破坏准则研究[J]. **建筑结构**, 2019, 49(4): 123-128.
HUANG Chengjun, SONG Xiaobing. Study on in-plane failure criterion of steel-concrete-steel composite structures[J]. **Building Structure**, 2019, 49(4): 123-128.

[11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 核电站钢板混凝土结构技术标准: GB/T 51340-2018[S]. 北京: 中国计划出版社, 2018.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical standard for steel plate concrete structures of nuclear power plants: GB/T 51340-2018 [S]. Beijing: China Planning Press, 2016.

[12] OZAKI M, AKITA S, OSUGA H, *et al.* Study on steel plate reinforced concrete panels subjected to cyclic in-plane shear[J]. **Nuclear Engineering and Design**, 2004, 228(1): 225-244.

[13] USAMI S, AKIYAMA H, NARIKAWA M. Study on a concrete filled steel structure for nuclear plants. Part 2: Compressive loading tests on wall members [EB/OL]. (1995-08-13)[2020-09-20]. [https:// repository. lib. ncsu. edu/handle/1840. 20/25529](https://repository.lib.ncsu.edu/handle/1840.20/25529).

[14] 陈惠发, 萨利普 A F. 混凝土和土的本构方程[M]. 余天庆. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.
CHEN Waifa, SALIPU A F. Constitutive equations for materials of concrete and soil[M]. YU Tianqing. Beijing: China Architecture & Building Press, 2004.

[15] BELARBI A, HSU T T C. Constitutive laws of concrete in tension and reinforcing bars stiffened by concrete[J]. **ACI Structural Journal**, 1994, 91(4): 465-474.

(本文编辑:陈晓燕)