

文章编号:1005-0523(2015)03-0097-06

再生混凝土与普通混凝土结合面剪应力分析

左宏¹, 易金^{2,3}, 陈杏⁴

(1.山东省邹平县水利局, 山东 邹平 256200; 2.广西建筑新能源与节能重点实验室, 广西 桂林 541004; 3.桂林理工大学土木与建筑工程学院, 广西 桂林 541004; 4.广西壮族自治区建筑科学研究设计院, 广西 南宁 530000)

摘要:针对再生混凝土与普通混凝土在结构体系中的协同工作问题,对由混凝土收缩原因引起的再生混凝土与普通混凝土叠合构件变形及结合面剪力问题进行了研究,重点分析结合面上剪应力产生的原因、分布特点、工程影响及其计算公式,并与实际叠合试件的试验数据做了对比分析。结果表明,叠合构件中再生混凝土层的收缩量及收缩稳定期均小于同等条件下自由干缩的再生混凝土,其结合面剪应力分布沿轴线方向随着构件尺寸变化增加明显,构件边缘处的剪应力值最大,从边缘向中部逐渐减小。在实际工程中,可通过合理控制叠合构件的长度和混凝土的配合比等方式,将结合面剪应力控制在允许范围内。

关键词:再生混凝土;剪应力;干缩试验;结合面

中图分类号:TU502.6;TU317.2

文献标志码:A

再生混凝土是将废弃混凝土经过捣碎、“清洗”、分级和按一定比例与级配混合成再生粗骨料,部分或者全部代替石子等天然骨料配制成的新混凝土,是解决目前建筑材料与生态环境协调发展问题的一种非常有效的途径^[1-2]。由于再生混凝土存在一些性能缺陷,目前在实际工程中完全用再生混凝土来替代普通混凝土显然是不可取的。如果选择将再生混凝土与普通混凝土叠合使用于混凝土结构体系中的非重要部位或非重要构件,必将极大拓宽其应用范围,但由此会带来两种混凝土的协同工作问题。目前国内外对再生混凝土和普通混凝土两种不同工作性能材料叠合而成的构件的工作性能问题已有少量研究^[3-5],但相比之下,由再生混凝土和普通混凝土弹性模量差异以及干缩所引起的变形协调问题则显得同样突出和重要。

1 结合面剪应力基本理论分析

两种不同性质的混凝土叠合形成整体后,由于二者干缩速率和干缩量的差异,在结合面上必将产生剪应力,使得两混凝土层偏心受压或受拉,而产生的剪应力与水平变位呈现线性比例关系^[6-7]。对于再生混凝土与普通混凝土叠合问题即有

$$\tau = -C_x u \quad (1)$$

式中: τ 为普通混凝土与再生混凝土结合面的剪应力; C_x 为普通混凝土与再生混凝土结合面的水平阻力系数; u 为结合面剪应力处的水平相对位移。

当再生混凝土-普通混凝土叠合试件干缩时,普通混凝土顶面产生了从两端向中部的剪应力,使其偏心受压。根据变形协调条件,叠合层再生混凝土也发生相应变形,从而在再生混凝土叠合层截面发生沿叠

收稿日期: 2015-03-19

基金项目: 广西自然科学基金项目(2012GXNSFBA053151); 广西重点实验室开放基金项目(11-03-21-3); 广西矿冶与环境科学实验中心项目(KH2011ZD007)

作者简介: 左宏(1978—),女,工程师,研究方向为新材料在水利工程中的应用。

合层高度的线性应力分布,建立以叠合试件的结合面为 x 轴方向、以垂直结合面为 y 轴方向的直角坐标系,如图1所示。

在坐标系任意点 x_0 处,截取再生混凝土一小段 dx 微元体,微元体的高度 h ,厚度 b ,轴力为 N (即微元体 σ_x 的合力),微元体产生的弯矩 M ,结合面的剪力 Q (剪应力 τ 的合力,即 $Q=\tau b dx$),如图1所示。

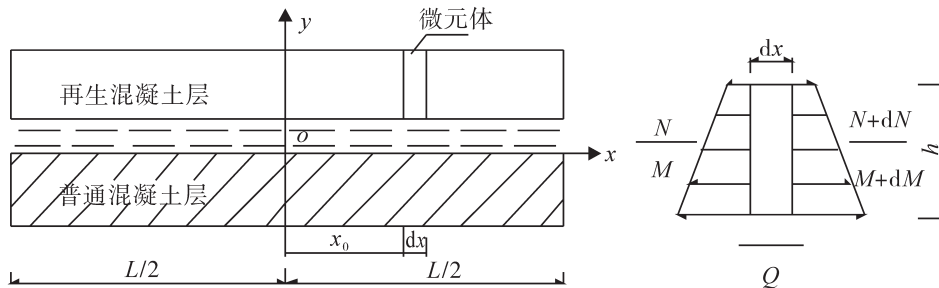


图1 叠合体-微元体受力图

Fig.1 Composite body-infinite body force diagram

由微元体受力分析,列出平衡方程 $\sum F_x=0$ 和 $\sum M=0$,即

$$N + dN - N + Q = 0 \quad (2)$$

$$M + dM - M - 1/2 Qh = 0 \quad (3)$$

对式(2),整理得

$$\frac{d\sigma}{dx} \Big|_{y=h/2} + \frac{\tau}{h} = 0 \quad (4)$$

对式(3),整理得

$$\frac{dM}{dx} - \frac{\tau b h}{2} = 0 \quad (5)$$

根据弹性力学,可知 $y=0$ 位置, $\sigma_x = \sigma \Big|_{y=\frac{h}{2}} - \frac{M}{I} \frac{h}{2}$,则

$$\frac{d\sigma_x}{dx} = \frac{d\sigma}{dx} \Big|_{y=h/2} - \frac{dM}{dx} \frac{h}{2I} \quad (6)$$

根据叠合构件建立的坐标系分析可知,结合面任意点的相对位移 u 由叠合构件约束位移 u_0 和叠合构件自由干缩引起的位移 $\varepsilon_{cs}x$ 合成,即

$$u = u_0 + \varepsilon_{cs}x \quad (7)$$

由(7)式得

$$\begin{aligned} \sigma_x &= E \frac{du_0}{dx} - E' \frac{du_0'}{dx} = E \frac{d(u - \varepsilon_{cs}x)}{dx} - E' \frac{d(u - \varepsilon_{cs}x)}{dx} \\ \sigma_x &= E \frac{du}{dx} - E\varepsilon_{cs} - E' \frac{du}{dx} + E'\varepsilon_{cs}' \end{aligned} \quad (8)$$

则

$$\frac{d\sigma_x}{dx} = E \frac{d^2u}{dx^2} - E' \frac{d^2u}{dx^2} \quad (9)$$

由式(4),(5)和(9)代入(6)整理得

$$(E' - E) \frac{d^2u}{dx^2} = \frac{4\tau}{h} \quad (10)$$

由式(1)和(10)整理得

$$(E - E') \frac{d^2u}{dx^2} = \frac{4C_x u}{h} \quad (11)$$

令 $\sqrt{\frac{4C_x}{(E-E')h}} = \alpha$, 由式(11)整理得

$$\frac{d^2 u}{dx^2} - \alpha^2 u = 0 \quad (12)$$

则其通解为 $u = A \operatorname{ch} \alpha x + B \operatorname{sh} \alpha x$ 。

根据弹性力学的相关理论,由边界条件定积分常数, $x=0$, $u=0$, $\operatorname{sh} 0=0$, 得 $A=0$, 由此得 $u = B \operatorname{sh} \alpha x$ 。

由上述分析得

$$\frac{du}{dx} = B\alpha \operatorname{ch} \alpha x \quad (13)$$

$x = \frac{L}{2}$, $\sigma_x = 0$, 得

$$\sigma_x \Big|_{x=\frac{L}{2}} = E \frac{du}{dx} - E \varepsilon_{cs} - E' \frac{du}{dx} + E' \varepsilon'_{cs} = 0$$

由此可得

$$\frac{du}{dx} = \frac{E \varepsilon_{cs} - E' \varepsilon'_{cs}}{E - E'} \quad (14)$$

由式(13),(14)整理得

$$B = \frac{E \varepsilon_{cs} - E' \varepsilon'_{cs}}{(E - E') \alpha \operatorname{ch} \alpha \frac{L}{2}} \quad (15)$$

$$u = \frac{E \varepsilon_{cs} - E' \varepsilon'_{cs}}{(E - E') \alpha \operatorname{ch} \alpha \frac{L}{2}} \operatorname{sh} \alpha x \quad (16)$$

把式(16)代入(1)得

$$\tau = -C_x \frac{E \varepsilon_{cs} - E' \varepsilon'_{cs}}{(E - E') \alpha \operatorname{ch} \alpha \frac{L}{2}} \operatorname{sh} \alpha x \quad (17)$$

由式(17)可知,再生混凝土与普通混凝土弹性模量差是影响其结合面上剪应力大小的一个重要因素,故再生混凝土骨料的来源对该剪应力起着一定的重大影响。

下面取一同批次试验中的再生混凝土与普通混凝土叠合试件作为算例:叠合试件全长 $L=2\,000\text{ mm}$ 宽度 $b=100\text{ mm}$,高度 $H=2h=100\text{ mm}$,叠合层混凝土高度 $h=50\text{ mm}$,试验龄期为180 d,其普通混凝土层的弹性模量为 $E=3.53 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$,再生混凝土层的弹性模量为 $E'=3.53 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2[8-9]}$ 。根据式(17),绘出剪应力纵向分布示意图,如图2所示。在再生混凝土-普通混凝土结合面边缘处的剪应力最大,中部最小。剪应力在一定长度(约 $\pm 600\text{ mm}$)范围内增加平缓,但超过一定范围后增长幅度明显增大。如果在结合面上某部位剪应力过大,则在该部位形成薄弱区,结合面将容易开裂。所以,在实际工程中,当再生混凝土与普通混凝土进行叠合浇筑时,必须考虑结合面上产生的剪应力。

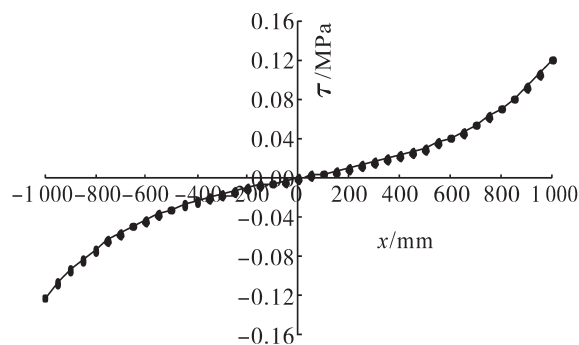


图2 结合面剪应力纵向分布示意图
Fig.2 Longitudinal shear stress on composite interface of distribution sketch

2 结合面剪应力算例

2.1 混凝土干缩试验

在本算例试验中再生混凝土的粗骨料来源于结构试验后的废弃梁,将其敲碎后运往碎石厂,经碎石机2次破碎,按一定比例和级配混合而成,细骨料采用的是河砂,混凝土配合比见表1。

表1 混凝土配合比

Tab.1 Proportions of concrete mix

混凝土种类(C30)	水灰比	砂率/%	每立方混凝土材料用量/kg				
			水	水泥	砂	天然骨料	再生骨料
普通混凝土	0.47	30	180	383	561	1 312	0
再生混凝土	0.47	30	180	383	561	0	1 312

本试验中试件尺寸为100 mm×100 mm×400 mm,为使干缩试验同步对比,对于叠合试件先浇筑100 mm×50 mm×400 mm的普通混凝土层,24 h后,将同尺寸的再生混凝土层与其浇筑在一起,再经24 h后拆模,安装千分表开始测量干缩数据。需要测量两类数据:自由干缩数据和叠合干缩数据。干缩测试点布置如图3所示。

2.1.1 再生混凝土与普通混凝土自由干缩量

图4干缩曲线表明,随着试验龄期的增长,再生混凝土与普通混凝土的自由干缩量都在不断增加,早期的干缩速率基本一致,50 d后二者差异逐渐增大。普通混凝土在90 d后,干缩基本达到稳定,而再生混凝土在190 d后才基本达到稳定。在试件干缩处于平缓阶段时,再生混凝土干缩量约为普通混凝土2.33倍,前者的后期干缩明显高于后者。

2.1.2 再生混凝土与普通混凝土对称叠合干缩量

图5干缩曲线表明,叠合试件中的再生混凝土与普通混凝土的早期干缩速率基本一致,在90 d后差异逐渐增大,再生混凝土层的干缩量明显比普通混凝土层大,随着试验龄期的增长,其干缩变形差值进一步增大,二者在150 d后达到最大且基本趋于稳定,再生混凝土的干缩量约为普通混凝土的1.26倍,这相对于自由干缩有明显减小。叠合构件中再生混凝土层的收缩量及收缩稳定期均小于同等条件下自由干缩的再生混凝土,而其普通混凝土层反之,故叠合构件中的再生混凝土和普通混凝土受其相互间的收缩影响明显。

叠合构件的收缩量及收缩稳定期介于再生混凝土与普通混凝土自由收缩之间,二者受其相互间的收缩影响明显。



(a) 叠合试件干缩测试点布置示意图(单位:mm)



(b) 叠合试件干缩试验测试点布置图

图3 叠合试件干缩测试点布置图

Fig.3 Composite specimen dry shrinkage test point arrangement

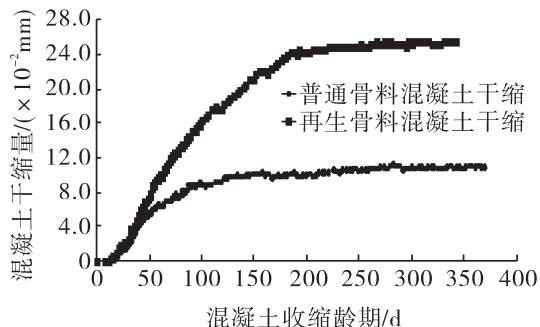


图4 再生混凝土与普通混凝土自由干缩

Fig.4 Free shrinkage of recycled concrete and ordinary concrete

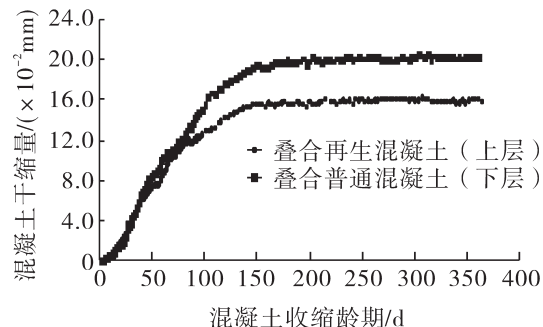


图5 再生混凝土-普通混凝土干缩

Fig.5 Shrinkage of recycled concrete-ordinary concrete

2.2 结合面剪应力计算过程

叠合式混凝土试件的宽度 $b=100\text{ mm}$, 高度 $H=2h=100\text{ mm}$, 叠合层混凝土高度 $h=50\text{ mm}$, 叠合试件全长 $L=400\text{ mm}$ 。选取试验龄期 180 d, 叠合式普通混凝土的有效弹性模量为 $E=3.53\times 10^4\text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$, 再生混凝土的有效弹性模量为 $E'=2.10\times 10^4\text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ 。由上文自由干缩试验测得: 普通混凝土干缩应变 $\varepsilon_{cs}=2.65\times 10^{-4}$, 再生混凝土干缩应变 $\varepsilon'_{cs}=6.26\times 10^{-4}$ 。由于徐变过程的复杂性, 加之二者在早期干缩率较为接近, 未考虑整个干缩过程徐变对变形的影响, 实际上, 混凝土徐变在此类问题中有利于结合面应力的释放, 起到减缓变形、减少开裂的作用。

取 $C_s=1.20\text{ N}\cdot\text{mm}^{-3[6]}$ 。将 $E, E', \varepsilon_{cs}, \varepsilon'_{cs}$ 代入理论推导出的公式(17), 计算叠合式混凝土试件结合面在 $x=200\text{ mm}$ 处剪应力的理论值, 得

$$\tau = 0.058\text{ MPa}$$

同理, 分别计算出 $x=150\text{ mm}, 100\text{ mm}, 50\text{ mm}, 0, \dots$ 处的剪应力大小, 计算结果如图6所示。

由图6可知, 当叠合试件长度控制在一定小的范围内, 其结合面剪应力大小从中心沿两侧长度方向按直线形式平缓增加。但如果叠合试件长度过大, 如图2所示 ($L=2\text{ 000 mm}$), 则增长幅度明显增大。

由再生混凝土与普通混凝土对称叠合干缩试验实际测量的再生混凝土层基准收缩量 $\Delta l_1 = 20.12\times 10^{-2}\text{ mm}$, 普通混凝土层基准收缩量 $\Delta l_2 = 15.75\times 10^{-2}\text{ mm}$, 代入公式(1)得叠合式混凝土试件在 $x=200\text{ mm}$ 处剪应力的实际值

$$\tau = 0.052\text{ MPa} < 0.058\text{ MPa}$$

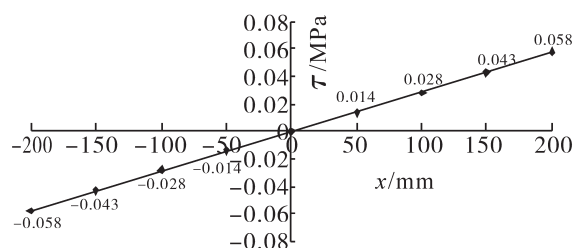


图6 普通混凝土-再生混凝土结合面剪应力

Fig.6 Shear stress on composite interface of recycled-ordinary concrete

3 结论

- 1) 当再生混凝土与普通混凝土叠合时, 在结合面上会产生沿轴线方向分布随构件尺寸变化增加的剪应力, 构件边缘处的剪应力值最大, 从边缘向中部逐渐减小。
- 2) 叠合构件中再生混凝土层的收缩量及收缩稳定期均小于同等条件下自由干缩的再生混凝土, 而其普通混凝土层反之, 故二者受其相互间的收缩影响明显。
- 3) 结合面上的剪应力随叠合构件长度的增加而增大, 在一定长度(就本批次试验的混凝土而言约为 1 200 mm) 范围内, 剪应力增加平缓, 但超过一定范围后增长幅度明显增大。
- 4) 在实际工程中, 可通过合理控制叠合构件的长度、再生混凝土和普通混凝土的配合比等方式, 将结合面剪应力控制在允许范围内。

参考文献:

- [1] 肖建庄. 再生混凝土材料与结构研究新进展[J]. 世界科学, 2006(2): 29-31.
- [2] MEYER C. The greening of the concrete industry[J]. Cem Concr Comp, 2009, 31(8): 601-605.
- [3] 沈一军, 朱赞成, 郑最. 膨胀土膨胀变形与膨胀力试验研究[J]. 华东交通大学学报, 2014, 31(4): 100-104.
- [4] 肖建庄, 高歌, 徐亚玲, 等. 再生混凝土叠合梁受弯力学性能试验研究[J]. 结构工程师, 2012, 28(2): 122-126.
- [5] 王磊, 傅张俊. 不同剪跨比下再生混凝土与普通混凝土叠合梁抗剪性能研究[J]. 混凝土, 2013(6): 110-113.
- [6] 王铁梦. 工程结构裂缝控制[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997: 65-69.
- [7] 虞建成, 左文生, 程祖辉, 等. 叠合式混凝土板梁桥结合面受力性能分析[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2007, 37(2): 222-228.
- [8] 徐金俊, 陈宗平, 余兴国, 等. 长龄期再生混凝土弹性模量及泊松比试验研究[J]. 混凝土, 2012(1): 15-17.

Shear Stress on the Composite Interface of Recycled Concrete and Ordinary Concrete

Zuo Hong¹, Yi Jin^{2,3}, Chen Xing⁴

(1. Zouping County Water Conservancy Bureau of Shandong Province, Zouping 256200, China; 2. Guangxi Key Laboratory of New Energy and Building Energy Saving, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China; 3. Civil Engineering College, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China; 4. Academy of Building Research and Design of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Nanning 530000, China)

Abstract: Aiming at the problem of RC (recycled concrete) and OC (ordinary concrete) cooperative work in structural system, this paper studied the problems of deformation caused by dry shrinkage of the RC and OC composite components and shear stress on the interface. It specifically analyzed the characteristics of the causes, distribution, engineering effects and calculation formula, and compared with the actual test data. The results show that, under the same condition, shrinkage value and stabilization period of the RC part in composite components were less than the RC free shrinkage. Shear stress increased significantly along the axial line direction with the change of component size, and the shear stress reached a maximum on the edges of interface, and it gradually decreased from the edge to the central. In practical engineering, controlling the length of the composite components and proportions of concrete mix reasonably would make the shear stress within the allowable range.

Key words: recycled concrete; shear stress; shrinkage test; interface

(责任编辑 刘棉玲)

(上接第62页)

Facility Layout Improvement of Company F Based on SLP and Production Logistics

Gan Weihua, Xu Qihe, Huang Wen, Xie Donglian

(School of Mechatronic Engineering, East China Jiaotong university, Nanchang 330013, China)

Abstract: A good workshop layout can reduce the costs of materials handling and shorten the walking distance, then improve the efficiency. This paper takes chilled glass (CG) branch of glass workshop in company F as a case to analyze the layout improvement. Firstly, it describes the present production logistics situation of the workshop in company F in details. Then it points out the problems, e.g. repeated handling, detour line and complicated process. Therefore, it finds out the optimal workshop arrangement after using the system facilities planning layout method (SLP). Finally, it compares the new layout with the old one in terms of the logistics costs.

Key words: systematic layout planning (SLP); operation process chart; production logistics; logistic cost

(责任编辑 王建华 李萍)