

# 石灰石粉与不同矿物掺合料复掺对 高强自密实混凝土性能的影响

胡红梅<sup>1</sup>, 罗德富<sup>1</sup>, 李 巧<sup>2</sup>, 高菲菲<sup>1</sup>

(1.厦门大学 建筑与土木工程学院, 福建 厦门 361005; 2.重庆大学 建设管理与房地产学院, 重庆 400030)

**摘 要:** 基于混凝土的自密实性能和强度试验结果,研究了石灰石粉分别与粉煤灰、矿粉和硅灰3种不同矿物掺合料复掺组合对高强自密实混凝土性能的影响。结果表明:在合适的掺量范围和复配合比例条件下,将低活性的石灰石粉与高活性的硅灰复掺有很好的互补效应,对混凝土的自密实性能和强度产生了积极影响;石灰石粉与矿粉复掺不仅可以改善混凝土的自密实性能,同时也能满足高强要求。石灰石粉与硅灰、石灰石粉与矿粉复掺组合是制备高强自密实混凝土的有效技术手段。石灰石粉与粉煤灰复掺虽然显著提高了混凝土的自密实性能,但是不能满足高强要求,只能制备中、低强度自密实混凝土。

**关键词:** 石灰石粉; 矿物掺合料; 复掺; 高强自密实混凝土

中图分类号: TU528.041 文献标志码: A 文章编号: 1002-3550(2018)12-0081-05

Influence of compounding lime stone powder and different mineral admixture on properties of  
high strength self compacting concrete

HU Hongmei<sup>1</sup>, LUO Defu<sup>1</sup>, LI Qiao<sup>2</sup>, GAO Feifei<sup>1</sup>

(1.School of Architecture and Civil Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China;

2.School of Construction Management and Real Estate, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

**Abstract:** Based on the self compacting properties and strength test results of concrete, This paper studies the influence of compounding lime stone powder and other three different mineral admixtures, including fly ash, mineral powder and silica fume, on the properties of high strength self compacting concrete. The results show that: in the dosage range of appropriate proportion and conditions, the low activity of limestone powder and high active silica fume has complementary good effect and a positive impact on the concrete self compacting performance and strength. The addition of limestone powder and mineral powder can not only improve the self compacting performance of concrete, but also meet the requirements of high strength. The combination of limestone powder and silica fume, limestone powder and mineral powder are effective methods to prepare high strength self compacting concrete. The addition of limestone powder and fly ash can remarkably improve the self compacting performance of concrete, but it can not meet the requirements of high strength. Only medium and low strength self compacting concrete can be prepared.

**Key words:** limestone powder, mineral admixture, compounding, high strength self compacting concrete

## 0 引言

合理地利用矿物掺合料取代部分水泥,不仅能够改善自密实混凝土的性能,而且可以降低成本、利废环保,是发展绿色高性能自密实混凝土的需要<sup>[1]</sup>。目前在自密实混凝土中广泛应用的矿物掺合料是粉煤灰和矿粉,既有单掺,也有将二者双掺或者复掺。随着粉煤灰资源的日益紧缺,矿粉和硅灰价格的相对昂贵,石灰石粉由于易于粉磨加工、能耗低、与硅酸盐水泥能够良好匹配,以及能够提高混凝土流动性,满足自流平、自密实效果等优点而逐渐在自密实混凝土中得到应用。但是,相对于粉煤灰和矿粉而言,石灰石粉的利用率还较低,不合理的利用还较多。如何科

学、合理地利用石灰石粉配制自密实混凝土仍需进一步深入研究<sup>[2-4]</sup>。

我国部分专家学者针对石灰石粉作为混凝土矿物掺合料的物理和化学性能、应用效果和作用机理开展了专门研究,取得了一些成果。过去,大多数的研究认为石灰石粉属于惰性材料,之所以能在混凝土中起积极作用主要是因为它具有微集料效应。近年来的研究成果则认为石灰石粉具有一定的水化活性。刘数华等人研究认为,石灰石粉可以单独与水泥组成二元胶凝材料,也可再掺入其他矿物掺合料(如粉煤灰、矿粉、硅灰等)组成三元或多元胶凝材料<sup>[5]</sup>。本试验将石灰石粉分别与粉煤灰、矿粉和硅灰按一定比例混合、复掺,与水泥一起组成三元胶凝材料,根据混凝土自密实

收稿日期: 2018-01-25

性和强度的试验结果,研究石灰石粉与不同矿物掺合料复掺对 C60 自密实混凝土性能的影响,为石灰石粉在自密实混凝土中科学、合理应用提供依据。

## 1 试验原材料

水泥:福建龙海红狮水泥有限公司生产的“红狮”牌 P·O 42.5 级水泥,其相关的物理化学性能指标如表 1 所示。

骨料:采用细度模数为 2.67 的天然河砂,表观密度为

2 600 kg/m<sup>3</sup>;将 5~10、10~20 mm 单粒级石子按 5:5 混合配制成 5~20 mm 连续级配石子,表观密度为 2 710 kg/m<sup>3</sup>。

外加剂:选用“苏博特”JM-PCA 聚羧酸系减水剂,固含量为 23%。掺量 1%时的减水率为 28.2%,含气量为 3.5%,泌水率比为 36%。7、28 d 的抗压强度比分别为 178%、156%。

矿物掺合料:采用来自不同产地的 I 级粉煤灰、S95 级矿粉、磨细石灰石粉和硅灰四种矿物掺合料,它们的性能指标及来源如表 2 所示。

表 1 水泥的物理和化学性能

水泥品种	细度 /%	MgO /%	SO <sub>3</sub> /%	Loss /%	安定性	凝结时间		抗折强度 /MPa		抗压强度 /MPa	
						初凝	终凝	3 d	28 d	3 d	28 d
P·O 42.5	174	3.60	1.80	1.53	合格	150	210	5.0	8.4	29.4	52.9

表 2 四种矿物掺合料的物理性能及来源

品种	密度 / (g/cm <sup>3</sup> )	细度(45 μm 筛筛余) /%	比表面积 / (m <sup>2</sup> /kg)	需水比 /%	备注
I 级粉煤灰	2.36	11.8	372	89.1	厦门益材粉煤灰
S95 级矿粉	2.83	11.8	357	99.6	福建三明钢厂矿粉
石灰石粉	2.70	8.6	450	97.5	自制
硅灰	2.20	0	22 000	112.0	成都东蓝星硅灰

## 2 试验方案设计与结果分析

相关研究表明,单掺适量的石灰石粉,可以改善混凝土拌合物的工作性能,有利于混凝土强度的发展,但是由于石灰石粉的活性效应有限,使用效果受到制约,所以利用率不高<sup>[6]</sup>。随着矿物掺合料利用技术的快速发展,人们已经认识到掺合料的单一使用不如复合使用对混凝土技术性能和性价比的意义更大。一些专家学者提出了“超叠加理论”,认为最好的方法是将几种矿物掺合料复合在一起掺加到混凝土拌合物中,利用各种不同粒径的掺合料互相紧密填充的物理效应,来达到取长补短的目的,以及利用彼此的激发效应获得更快、更高的化学活性,从而配制出高强、高性能的混凝土<sup>[5-9]</sup>。

基于上述原因,本试验以 C60 高强自密实混凝土为设计目标,经过多次试配,分别设计了石灰石粉-粉煤灰、石灰石粉-矿粉、石灰石粉-硅灰两两复掺组合的试验方案;

以自密实性能和强度为考察指标,研究、分析石灰石粉与不同矿物掺合料复掺组合对 C60 自密实混凝土性能的影响,从中找出合理复掺方案。根据 JGJ/T 283—2012《自密实混凝土应用技术规程》,采用坍落扩展度(mm)和扩展时间 T<sub>500</sub>(s)来表征填充性,坍落扩展度与 J 环扩展度差值(mm)来表征间隙通过性。并且,通过观察 J 环圆钢附近是否有骨料堵塞,圆钢之间混凝土分布是否均匀,间接反映混凝土抗离析性。

为了激发石灰石粉的活性,笔者将块状石灰石在球磨试验机中充分磨细,制成比表面积达到 450 m<sup>2</sup>/kg 的粉末,细度指标超过 I 级粉煤灰和 S95 级矿粉,满足 JGJ/T 318—2014《石灰石粉在混凝土中应用规程》要求。

### 2.1 石灰石粉与粉煤灰复掺试验结果分析

经过试配,设计了 3 组石灰石粉与 I 级粉煤灰复掺试验方案和 1 组未掺矿物掺合料的基准组试验方案,见表 3。试验结果如表 4 和图 1 所示。

表 3 石灰石粉与粉煤灰复掺混凝土配合比方案

序号	胶凝材料用量 /kg	粉煤灰 /%	石灰石 /%	水泥 /%	砂 /kg	石 /kg	水 /kg	砂率 /%	减水剂 /kg	水胶比
0	570	0	0	100	820	867	171	48	8.2	0.30
A1	570	25	20	55	820	867	165	49	8.2	0.29
A2	570	30	15	55	820	867	165	49	8.2	0.29
A3	570	35	10	55	820	867	165	49	8.2	0.29

表 4 石灰石粉与粉煤灰复掺对混凝土自密实性能的影响

序号	复掺方案	混凝土自密实性能		
		坍落扩展度 /mm	T <sub>500</sub> /s	坍落扩展度与 J 环扩展度差值 /mm
0	0	630	3.67	45
A1	粉煤灰 25%+石灰石 20%	680	2.87	38
A2	粉煤灰 30%+石灰石 15%	680	2.47	30
A3	粉煤灰 35%+石灰石 10%	670	2.60	35

在矿物掺合料总量固定 45%的前提下,复掺石灰石粉和粉煤灰后,混凝土用水量减少的同时,拌合物的坍落扩

展度却在明显增大,达到 SF2 级高填充性要求,同时 T<sub>500</sub>和坍落扩展度与 J 环扩展度的差值相应减小。说明石灰石粉

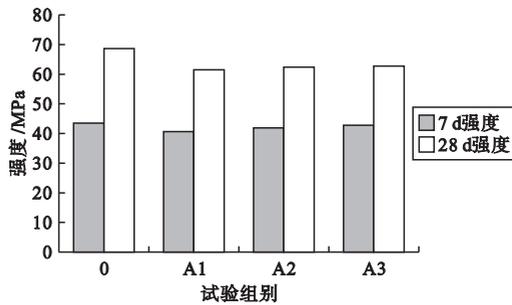


图1 石灰石粉与粉煤灰复掺对自密实混凝土强度的影响

与粉煤灰的复掺组合明显提高了拌合物的填充性和间隙通过性。但是当石灰石粉掺量达到 20%时,拌合物的填充性并没有进一步提高,并且 J 环差值由小变大,开始出现离析分层现象,黏聚性明显变差。

从强度发展趋势来看,当掺入粉煤灰和石灰石粉时,自密实混凝土的 7、28 d 强度有所降低,A1、A2、A3 组混凝土 28 d 强度分别为 61.3、62.5、62.8 MPa,均未能达到 C60 混凝土配制强度 69 MPa 要求。

试验结果说明,石灰石粉与粉煤灰复掺虽然有利于混凝土的自密实性能,但是不能满足高强要求,所以这种组

表5 石灰石粉与矿粉复掺混凝土配合比方案

序号	胶凝材料用量 /kg	石灰石粉 /%	矿粉 /%	水泥 /%	砂 /kg	石 /kg	水 /kg	砂率 /%	减水剂 /kg	水胶比
0	570	0	0	100	820	867	171	48	8.2	0.30
B1	580	20	20	60	820	867	174	48	8.2	0.30
B2	580	25	15	60	820	867	174	48	8.2	0.30

表6 石灰石粉与矿粉复掺对混凝土自密实性能的影响

序号	复掺方案	自密实性能		
		坍落扩展度 /mm	$T_{500}$ /s	坍落扩展度与 J 环扩展度差值 /mm
0	0	630	3.67	45
B1	石灰石 20%+矿粉 20%	640	3.38	40
B2	石灰石 25%+矿粉 15%	650	3.20	35

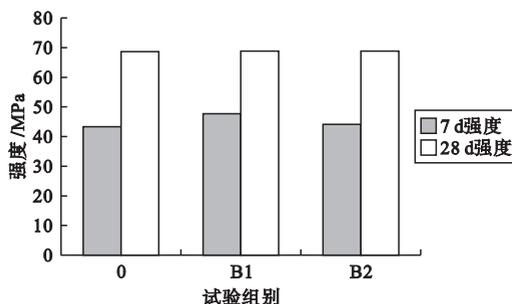


图2 石灰石粉与矿粉复掺对自密实混凝土强度的影响

当石灰石粉与矿粉复掺后,混凝土用水量有所增加,拌合物的坍落扩展度小幅增大,达到 SF1 级填充性指标要求,同时  $T_{500}$  和坍落扩展度与 J 环扩展度的差值小幅变小。并且随着石灰石粉掺量增多,矿粉掺量的减少,混凝土自密实性能相对较好。结果说明石灰石粉与矿粉的复掺组合对于混凝土的自密实性能还是有利的,石灰石粉在改善混凝土自密实性能方面的作用显然要大于矿粉。当矿粉掺量大于 15%时,拌合物的保水性下降,坍落扩展度与 J 环扩展度的差值增大,出现泌水和分层现象。当石灰石粉掺量过高时,拌合物的黏聚性下降,抗离析性也不好。

合方式并不适合制备高强自密实混凝土,只能制备中、低强度的自密实混凝土。

计涛等人采用扫描电镜观察水泥、粉煤灰和石灰石粉的颗粒形貌发现,石灰石粉颗粒的外观形貌与水泥颗粒比较接近,为表面粗糙无明显棱角的不规则体,并不具有减水效应<sup>[7]</sup>。但是,经过磨细的石灰石粉可以发挥其“填充效应”,细小的石灰石粉末填充在水泥、粉煤灰颗粒之间的空隙,不仅改善了水泥-石灰石粉-粉煤灰三元胶凝材料体系的颗粒级配,同时具有良好的分散作用。而粉煤灰中含有大量表面光滑的球形颗粒,使其具有类似于“轴承滚珠”一样的形态效应,可以提高浆体的流动性。二者组合复掺,同时起到减水、分散双重作用,从而改善了混凝土的自密实性能。但是,在水泥-石灰石粉-粉煤灰三元胶凝材料体系中,由于水泥用量的减少,激发粉煤灰活性的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  和激发石灰石粉的  $\text{C}_3\text{AH}_6$  相应不足,所以对混凝土强度产生了负面影响。

## 2.2 石灰石粉与矿粉复掺试验结果分析

同样经过试配,设计了二组石灰石粉与 S95 级矿粉复掺试验方案,详见表 5。试验结果如表 6 和图 2 所示。

在固定矿物掺合料总量 40%前提下,复掺石灰石粉与矿粉,自密实混凝土 7、28 d 强度均有所提高,B1、B2 组混凝土 28 d 强度分别为 68.7、69.0 MPa,达到 C60 混凝土配制强度要求。但是,当石灰石粉掺量超过 25%时,混凝土强度又会降低,不能满足 C60 自密实混凝土配制强度要求。试验结果证实,在合适的复掺比例下,复掺石灰石粉与矿粉不仅可以改善混凝土的自密实性能,同时也能满足高强要求,这种组合方式适合制备高强自密实混凝土。

相对于粉煤灰和石灰石粉,矿粉在混凝土中不仅可以发挥火山灰活性效应,还可以发挥胶凝效应,是一种较高活性的矿物掺合料<sup>[5]</sup>。当它与低活性的石灰石粉复掺时,可以有效激发石灰石粉的活性,达到“1+1>2”的效果。

## 2.3 石灰石粉与硅灰复掺试验结果分析

石灰石粉与硅灰复掺试验方案见表 7,试验结果如表 8 和图 3 所示。

考虑到硅灰的加入会对拌合物的填充性产生不利影响,这 3 组试验方案中适量增加了拌和用水量。自密实性能试验结果显示,当 15%的石灰石粉与 10%的硅灰复掺时,拌合物的填充性没有改变,和基准组一样,拌合物坍落扩

表 7 石灰石粉与硅灰复掺混凝土配合比方案

序号	胶凝材料用量 /kg	石灰石粉 /%	硅灰 /%	水泥 /%	砂 /kg	石 /kg	水 /kg	砂率 /%	减水剂 /kg	水胶比
0	570	0	0	100	820	867	171	48	8.2	0.30
C1	580	15	10	75	820	867	174	48	8.2	0.30
C2	580	25	5	70	820	867	174	48	8.2	0.30
C3	580	30	5	65	820	867	174	48	8.2	0.30

表 8 石灰石粉与硅灰复掺对混凝土自密实性的影响

序号	复掺方案	自密实性能		
		坍落扩展度 /mm	T <sub>500</sub> /s	坍落扩展度与 J 环扩展度差值 /mm
0	0	630	3.67	45
C1	石灰石粉 15%+硅灰 10%	630	3.75	43
C2	石灰石粉 25%+硅灰 5%	650	3.26	35
C3	石灰石粉 30%+硅灰 5%	660	3.18	40

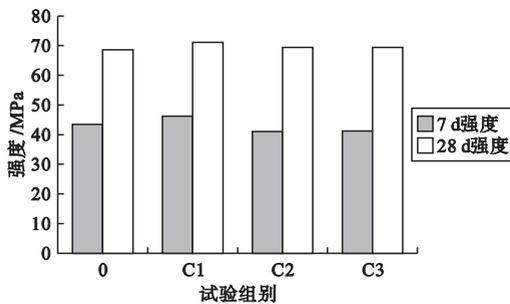


图 3 石灰石粉与硅灰复掺自密实混凝土强度的影响

展度达到 SF1 级填充性指标要求, T<sub>500</sub> 甚至略大于基准组, 坍落扩展度与 J 环扩展度的差值有少许减小; 当 25% 的石灰石粉与 5% 的硅灰复掺时, 拌合物的流动性有所提高, 坍落扩展度依然满足 SF1 级填充性指标要求, 但是 T<sub>500</sub> 和坍落扩展度与 J 环扩展度的差值均在减小; 当 30% 的石灰石粉与 5% 的硅灰复掺时, 拌合物的流动性进一步提高, 坍落扩展度达到 SF2 级高填充性要求, T<sub>500</sub> 进一步变小, 而坍落扩展度与 J 环扩展度的差值又有所回升。单从自密实性能试验结果来看, C2 组和 C3 组的复掺效果较好。

由图 3 可知, 当 10% 的硅灰与 15% 的石灰石粉复掺时, 自密实混凝土 7、28 d 强度均高于基准组, 28 d 强度达到 70.9 MPa, 超过 C60 混凝土配制强度要求; 随着硅灰掺量减至 5%, 石灰石粉掺量增至 25%、30% 时, 自密实混凝土 7、28 d 强度虽有少许降低, 但是 28 d 强度达到 69.4、69.5 MPa, 仍然满足 C60 混凝土配制强度要求。综合自密实性能和强度的试验结果, 笔者认为将 25%~30% 的石灰石粉与 5% 的硅灰复掺是理想的组合。

硅灰是一种高火山灰活性的矿物掺合料, 其高活性主要来源于两个方面: 一是很高的形成温度, 二是巨大的比表面积。硅灰在高温下形成的无定形结构和表面高能量结构是真正意义上的活性, 而极细颗粒所导致的快速火山灰反应及由此产生的对水泥水化的促进仅仅是一种表现形式。尽管如此, 后者的作用甚至超过前者。两个方面的综合作用使得硅灰表现出远比其他矿物掺合料更高的火山灰活性。另一方面, 硅灰的平均粒径仅为 0.10~0.20 μm, 远比水泥和石灰石粉颗粒小很多, 使得硅灰与水泥、石灰石粉之间有着很强的填充密实效应, 从物理层面上使混凝土结

构更加致密, 同时使孔结构细化, 从而显著提高混凝土强度和耐久性。所以, 当低活性的石灰石粉与高活性的硅灰复掺时, 石灰石粉能够改善混凝土的填充性, 而硅灰则起着增强作用。二者复掺可以优势互补, 对混凝土的自密实性能和强度产生有利影响<sup>[5, 10-13]</sup>。

### 3 结论

(1) 石灰石粉易于粉磨加工、能耗低, 与硅酸盐水泥能够良好匹配, 在水泥基浆体和混凝土中能够发挥填充效应, 改善水泥浆体和混凝土的密实度和流变性能, 使其能够自流平、自密实。但是由于石灰石粉的活性低, 单掺不能满足高强混凝土要求。

(2) 在矿物掺合料总量固定 45% 的前提下, 将石灰石粉和粉煤灰按一定比例复掺后, 减少拌和用水量的同时, 明显提高了拌合物的填充性和间隙通过性, 但混凝土 7 d 强度和 28 d 强度有所降低。这种复掺组合有利于混凝土的自密实性能, 但是不能满足高强要求, 所以不适合制备高强自密实混凝土, 只能制备中、低强度的自密实混凝土。

(3) 在固定矿物掺合料总量 40% 前提下, 将石灰石粉和矿粉按一定比例复掺后, 混凝土用水量有所增加, 拌合物的填充性和间隙通过性有所改善, 混凝土 7、28 d 强度亦有所提高。将 25% 的石灰石粉与 15% 的矿粉复掺不仅可以改善混凝土的自密实性能, 同时也能满足高强要求, 这种组合方式适合于配制高强自密实混凝土。

(4) 将低活性的石灰石粉与高活性的硅灰复掺有很好的互补效应, 石灰石粉改善了混凝土的自密实性能, 而硅灰则起着增强作用, 从而对高强自密实混凝土性能产生了积极影响。将 25%~30% 的石灰石粉与 5% 的硅灰复掺是制备高强自密实混凝土的有效技术手段。

#### 参考文献:

- [1] 张旭. 高掺量复合矿物掺合料自密实混凝土研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2004.
- [2] 刘数华, 冷发光, 李丽华. 混凝土辅助胶凝材料[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2010: 3.
- [3] 文俊强. 石灰石粉作混凝土掺合料的性能研究及机理分析[D]. 北京: 中国建筑材料研究总院, 2010.

- [4] 李悦,丁庆军.石灰石矿粉在水泥混凝土中的应用[J].武汉理工大学学报,2007,29(3):35.
- [5] 胡红梅,马保国.混凝土矿物掺和料[M].北京:中国电力出版社,2016.
- [6] 崔玉亮,陈健民,王子龙.石灰石粉对自密实混凝土性能的影响[J].低温建筑技术,2013(8):21.
- [7] 计涛,孔祥芝,纪国晋,等.石灰石粉掺合料的特性研究[C].中国硅酸盐学会混凝土与水泥制品分会第九届理事会成立大会暨第十届全国高性能混凝土学术研讨会论文集,2015:171.
- [8] 侯桂华.粉煤灰在混凝土中的应用[J].混凝土,2005(9):46.
- [9] 崔俊,卫帅帅,王莉,等.粉煤灰在自密实混凝土中的应用探讨[J].混凝土,2010(6):98.
- [10] 胡红梅,程瑶,林可.废弃石粉配制绿色高性能混凝土的试验研

- 究[J].材料导报,2007,21(12A):99.
- [11] 林可,胡红梅.废弃石粉及其复合矿物掺和料对混凝土性能的影响[J].福建建材,2005,3(4):4.
- [12] 姜德民.硅灰对高性能混凝土强度的作用机理研究[J].建筑技术开发,2001(4):16.
- [13] 杨华明,唐爱东.硅灰的性质及其应用[J].硅铝化合物,2004(3):2.

第一作者:胡红梅(1962-),女,硕士,教授,从事高性能混凝土、新型建筑材料及固体废弃物建材资源化利用研究。  
联系地址:福建省厦门市思明区大学路182号曾成奎楼A座厦门大学建筑与土木工程学院(361005)  
联系电话:13559231954

·上接第75页

表3 受弯承载力计算结果

钢材强度等级	受弯承载力/kN			
	C25	C45	C65	C85
Q235	90.2	98.6	101.6	103.0
Q345	121.6	139.6	146.1	149.1
Q390	133.5	155.3	163.6	167.4
Q420	138.9	165.4	175.0	179.5

图12为高强度纤维混凝土组合梁受弯承载力分析图。由图12可知,如果钢材的强度等级是一致的,那么随着混凝土强度等级的提升,组合梁将能承受更大的极限受弯承载力,钢梁屈服强度提高的幅度和受弯承载力提高的幅度成正比。如果钢材的强度等级是一致的,那么随着混凝土强度等级的提升,虽然组合梁能够承受的极限受弯承载力将会增大,但显著性较低。

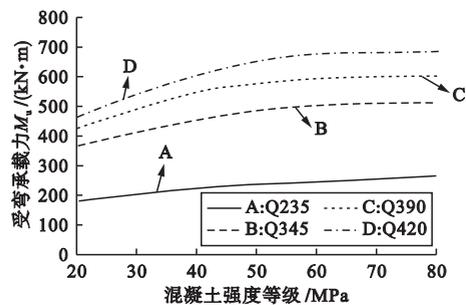


图12 组合梁受弯承载力分析图

## 5 结论

本课题在研究过程中采取高强度纤维混凝土组合梁的试验模式,针对性研究其破坏特征和受力性能,并分析计算高强度纤维混凝土组合梁的正截面受弯承载力的有效方法,确定其可行性,得出结论如下:

(1)高强度纤维混凝土组合梁的抗弯承载力和抗弯刚度比普通混凝土梁的曲线整体要高,在210 kN荷载下,普通混凝土的纵筋进入屈服阶段,在280 kN荷载下,高强度纤维混凝土组合梁纵筋的应变仍然呈线性增长状态,未进入屈服阶段。

(2)普通混凝土梁中箍筋的应力比高强度纤维混凝土组合梁的要大,组合梁的极限抗弯承载力可通过简化塑性

理论进行计算。

(3)在混凝土强度相同时,提高钢材强度等级,组合梁受弯承载力提高明显,如果钢材的强度等级是一致的,那么随着混凝土强度等级的提升,组合梁将能承受更大的极限受弯承载力。

参考文献:

- [1] 李卫全.碳纤维布加固钢筋混凝土T形梁的受弯性能分析[J].内蒙古公路与运输,2014(3):77-80.
- [2] 胡夏闽,江雨辰,施悦,等.部分外包混凝土简支组合梁受弯性能试验研究[J].建筑结构学报,2015,36(9):37-45.
- [3] MOURA CORREIA ANTÓNIO J P, RODRIGUES JOAO PAULO C. Fire resistance of partially encased steel columns with restrained thermal elongation[J].Journal of Constructional Steel Research,2011,67(4):593-601.
- [4] 王文炜,黄辉,戴建国,等.钢-GFRP-混凝土组合梁受弯性能试验[J].中国公路学报,2016,29(9):45-53.
- [5] 吉伯海,傅中秋,程苗,等.钢管轻集料混凝土组合梁受弯性能的试验研究[J].中南大学学报(自然科学版),2013,44(1):324-332.
- [6] 任冠宇,石启印.高强外包钢-高强混凝土简支组合梁受弯性能试验研究[J].建筑结构,2015,45(3):39-44.
- [7] 操礼林,石启印,王震,等.高强U形外包钢-混凝土组合梁受弯性能[J].西南交通大学学报,2014,49(1):72-78.
- [8] 黄辉,王文炜,戴建国.两跨连续GFRP-混凝土空心组合板的受弯性能试验研究[J].建筑结构学报,2015,36(10):59-65.
- [9] 混凝土结构设计规范:GB 50010—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [10] DUY L N, DONG J K, GUM S R Y, et al. Size effect on flexural behavior of ultra-high-performance hybrid fiber-reinforced concrete[J]. Composites Part B: Engineering,2013,45(1):1104-1116.

第一作者:陈剑波(1979-),男,工学硕士,副教授,研究方向:建筑结构设计、建筑施工。  
联系地址:南京江宁区科学园龙眠大道629号南京交通职业技术学院建筑工程学院(211188)  
联系电话:13913812212