



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 105777017 B

(45)授权公告日 2017.10.24

(21)申请号 201610217897.2

(22)申请日 2016.04.08

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 105777017 A

(43)申请公布日 2016.07.20

(73)专利权人 西安建筑科技大学
地址 710055 陕西省西安市碑林区雁塔路
13号

(72)发明人 郑山锁 董方园 郑捷 孙龙飞
王斌 张艺欣 李磊 王帆 秦卿
杨威 左河山 石磊 郑淇
张晓辉 周炎

(74)专利代理机构 西安通大专利代理有限责任
公司 61200

代理人 徐文权

(51)Int.Cl.

C04B 28/04(2006.01)

(56)对比文件

CN 103539407 A, 2014.01.29,
CN 103553459 A, 2014.02.05,
CN 103553494 A, 2014.02.05,
CN 103553458 A, 2014.02.05,
CN 103553460 A, 2014.02.05,

审查员 李凡

权利要求书2页 说明书15页

(54)发明名称

一种用于型钢混凝土组合结构C250强度等
级的混凝土

(57)摘要

本发明公开了一种用于型钢混凝土组合结
构C250强度等级的混凝土,配比为:水泥:细骨料
:粗骨料:水:减水剂:消泡剂:硅粉:粉煤灰:激发
剂:膨胀剂:复合保塑剂=504:769:1308:102:21
:1.5:100:125:11:52:0.65。制备方法为:先将减
水剂、激发剂和复合保塑剂均匀拌入水中得到混
合物,按重量比在搅拌机中依次加入细骨料和混
合物总量的1/3拌匀;加入粗骨料和混合物总量
1/3拌匀;加入水泥、膨胀剂、硅灰和粉煤灰拌匀;
加入消泡剂和剩余混合物,搅拌,出料。该混凝土
能在自然状态下显著改进型钢与混凝土之间的
粘结性能,有效发挥钢与混凝土各自力学性能与
相互协同工作性能,大幅度提升结构构件的承载
能力与使用性能和耐久性,具有良好高体积稳定
性和经济性。

1. 一种用于型钢混凝土组合结构C250强度等级的混凝土,其特征在于,该混凝土按照 kg/m^3 的配合比为:

水泥:细骨料:粗骨料:水:减水剂:消泡剂:硅粉:粉煤灰:激发剂:膨胀剂:复合保塑剂
=504:769:1308:102:21:1.5:100:125:11:52:0.65;

所述复合保塑剂为复合高效保塑剂,该保塑剂包括下述质量比的原料:

混凝土保塑剂5%~15%;羟基羧酸盐类缓凝剂45%~55%;高分子减缩剂35%~40%;

所述羟基羧酸盐类缓凝剂为葡萄糖酸钠、酒石酸钾钠、柠檬酸钠、水杨酸钠中的一种;

所述高分子减缩剂为含聚氧化烯链的梳形聚合物、含聚醚和脂肪族类有机物的聚合物、含甲醚基聚合物/甲醚基聚合物的共聚物中的一种;

所述含聚氧化烯链的梳形聚合物为JM-SRA系列混凝土减缩剂;

所述含聚醚和脂肪族类有机物的聚合物为JSJ型减缩剂;

所述含甲醚基聚合物/甲醚基聚合物的共聚物为ZZD-A型减缩剂。

2. 根据权利要求1所述的一种用于型钢混凝土组合结构C250强度等级的混凝土,其特征在于,所述细骨料采用质量比为8:2的比例颗粒圆滑、质地坚硬、级配良好的中偏粗河砂和质地精纯、级配良好的优质石英砂;其细度模数为2.8~3.2之间;以质量比计,其含泥量和泥块含量应不大于0.3%;以干砂的质量比计,其氯离子含量应不大于0.02%, SO_3 含量应不大于0.5%;石英砂中二氧化硅含量应不小于99%,三氧化二铁含量应不大于0.005%,铬、钛金属杂质含量应不大于0.01%。

3. 根据权利要求1所述的一种用于型钢混凝土组合结构C250强度等级的混凝土,其特征在于,所述粗骨料采用质量致密坚硬、强度高、表面粗糙、粒形为近似球形、针片状含量小、级配良好的以玄武岩、花岗岩为主要成分的人工碎石,按照连续粒级碎石 $\Phi 5\sim\Phi 10$ 投料;粗骨料其母体岩石的立方体抗压强度应不低于300MPa,最大粒径应控制在10mm;以质量比计,其 SO_3 含量应不大于0.5%,含泥量应不大于0.2%,泥块含量应不大于0.1%,针、片状颗粒含量应不大于0.5%,且不得混入风化颗粒。

4. 根据权利要求1所述的一种用于型钢混凝土组合结构C250强度等级的混凝土,其特征在于,所述混凝土高性能减水剂选择聚羧酸系混凝土高性能减水剂,减水率应大于30%,最大饱和掺量应不小于全部胶凝材料总量的2.5%。

5. 根据权利要求1所述的一种用于型钢混凝土组合结构C250强度等级的混凝土,其特征在于,所述水泥选择P·I62.5R硅酸盐水泥;

所述消泡剂选择AGITAN@P803粉末消泡剂。

6. 根据权利要求1所述的用于型钢混凝土组合结构C250强度等级的混凝土,其特征在于,所述硅粉采用质量比为3:2的30nm纳米硅粉和亚微硅粉,30nm纳米硅粉和亚微硅粉的含水率均应不大于1%,烧失量均应不大于3%,氯离子含量均应不大于0.01%,火山灰活性指数均应大于95%;其中,30nm纳米硅粉的比表面积应不小于 $40000\text{m}^2/\text{kg}$,硅含量应不小于99.9%;亚微米硅粉的比表面积应不小于 $25000\text{m}^2/\text{kg}$,二氧化硅含量应不小于95%;

所述粉煤灰采用优质I级特细粉煤灰,0.045mm方孔筛余应不大于10%,其烧失量应不大于3%, SO_3 含量应不大于2%,含水量应不大于1%,需水量比应不大于95%,比表面积应大于 $700\text{m}^2/\text{kg}$ 。

7. 根据权利要求1所述的用于型钢混凝土组合结构C250强度等级的混凝土,其特征在于,所述激发剂为粉煤灰激发剂FAEA,其按照下述质量百分比计的原料复合配制而成:

65%~73%的水玻璃;23%~30%的二水石膏;3%~5%的三乙醇胺;

所述水玻璃是利用固体片状NaOH和市售硅酸钠水玻璃按比例调制模数为1.0的水玻璃。

8. 根据权利要求1所述的用于型钢混凝土组合结构C250强度等级的混凝土,其特征在于,所述膨胀剂选用硫铝酸钙高效膨胀剂,0.08mm方孔筛筛余应不大于10%,其比表面积应大于 $300\text{m}^2/\text{kg}$,水中7天限制膨胀率应不小于0.05%,28d抗压强度应不小于50MPa,MgO含量应不大于3%,碱含量应不大于0.5%。

9. 一种权利要求6所述用于型钢混凝土组合结构C250强度等级的混凝土的制备方法,其特征在于,该方法采用改进的水泥裹砂石法混凝土搅拌工艺,具体工艺步骤如下:

1) 先将减水剂 $21\text{kg}/\text{m}^3$ 、激发剂 $11\text{kg}/\text{m}^3$ 和复合保塑剂 $0.65\text{kg}/\text{m}^3$ 均匀拌入称量好的水 $102\text{kg}/\text{m}^3$ 中,得到混合物;

2) 然后按照重量配比在强制式搅拌机中加入 $615.2\text{kg}/\text{m}^3$ 的河砂、 $153.8\text{kg}/\text{m}^3$ 的石英砂和步骤1)混合物总量的 $1/3$,均匀搅拌1~2min;

3) 再加入 $1308\text{kg}/\text{m}^3$ 的 $\Phi 5\sim\Phi 10$ 连续粒级碎石粗骨料和步骤1)混合物总量的 $1/3$,均匀搅拌2~4min;

4) 接着加入全部胶结材料: $504\text{kg}/\text{m}^3$ 的水泥、 $52\text{kg}/\text{m}^3$ 的膨胀剂、 $60\text{kg}/\text{m}^3$ 的纳米硅粉、 $40\text{kg}/\text{m}^3$ 的亚微硅粉和 $125\text{kg}/\text{m}^3$ 的粉煤灰,均匀搅拌3~4min;

5) 最后加入 $1.5\text{kg}/\text{m}^3$ 的消泡剂和剩余步骤1)混合物,均匀搅拌2~3min,停留3分钟后再搅拌2~3min至均匀,出料,即得C250强度等级的混凝土拌合物。

一种用于型钢混凝土组合结构C250强度等级的混凝土

技术领域

[0001] 本发明属于建筑材料技术领域,涉及一种用于型钢混凝土组合结构强度等级为C250的特高强高性能混凝土。

背景技术

[0002] 1824年波特兰水泥的发明使混凝土技术得到了迅速的发展,其用量之大,适用范围之广堪居世界之最。尽管混凝土是一种传统的人造建筑材料,但因其具有不可取代的优越性(原料丰富、生产工艺简单、性价比高优点)以及混凝土材料科学与技术的不断进步,混凝土已成为土木工程用材的主体,在未来的土木工程和国家建设中也将是不可缺少的主材之一。同时,随着城市规模的不断扩大,人口的不断增多,地价的不断升高,建筑所处环境的严酷化,建筑技术的不断进步及经济的高速发展,建筑物越来越向空中、地下及水中延伸,即建筑超/特高化、超/特大跨化、地下化、轻量化及重型结构的发展,尤其是型钢混凝土结构在超/特高化、超/特大跨化、地下化、海上或水下化、轻量化等新奇或巨型建筑工程领域的应用,对混凝土这种建筑材料的要求也越来越高。因此,混凝土的超/特高强度和超/特耐久化的研究和实践将成为该领域的发展趋势。

[0003] 型钢混凝土组合结构(简称SRC结构)是钢—混凝土组合结构的一种主要形式,由于其承载能力高、刚度大、延性好、抗震性能优越、防火防腐、便于施工等一系列优点,已被越来越广泛地应用于大跨、重型结构,地下、水下或海上工程及地震/台风区的高层和超/特高层建筑。与钢结构相比,SRC结构可节省大量钢材,增强截面刚度,克服钢结构耐火性、耐腐蚀性和耐久性差及易屈曲失稳等缺点,使钢材的能力得以充分的发挥;与普通钢筋混凝土结构(简称RC结构)相比,型钢混凝土组合结构可减小构件的截面尺寸,减小所占的空间,从而增大建筑使用空间;在施工上,型钢混凝土结构的钢骨架本身可作为混凝土挂模、滑模的骨架,不仅大大简化了支模工程,还是承受全部施工荷载(包括挂、滑模与所浇混凝土)的支承体系;另外,由于SRC结构具有整体性强,延性性能好等优点,能大大改善钢筋混凝土受剪破坏的脆性性质,使结构的抗震性能得到明显的改善,承载能力及延性均比RC结构有较大的提高。因此,在日本和欧美等发达国家,具有良好抗震性能的SRC结构已成为一种公认的新型抗震结构体系,且与钢结构、木结构、钢筋混凝土结构并称为四大结构。我国也是一个多地震国家,绝大多数地区为地震区,部分位于高烈度及多遇地震区,在这些地区推广SRC结构就具有非常重要的现实意义;另一方面,由于人口的快速增长使住房需求量也在不断增多,而土地资源稀缺宝贵,进而促进了建筑向更高空间发展,故在经济条件以及城市规划允许的条件下建设超/特高层建筑也成为节约资金和节省土地的有效措施。因此,SRC结构在我国有非常广阔的应用前景,尤其是随着我国经济实力的不断增强及超/特高强钢材和特高强高性能混凝土(它们是被公认的21世纪材料)的成功研制与应用,将极大促进这种结构体系的推广应用和发展进步。已有研究证明,特高强高性能混凝土的强度越高,其脆性将会增加,延性也会较差,在高应力或复杂应力状态下,特高强高性能混凝土构件将由脆性控制破坏过程,工作的可靠性降低。但是,将这种新型高技术混凝土应用在在型钢混凝土组

合结构(简称SRC结构)中,即型钢特高强高性能混凝土组合结构(简称SRUSUPC结构),可以扬长避短,克服特高强高性能混凝土脆性大、延性差和型钢耐火、耐腐蚀性能差的弱点,使其优越性能和经济效益得以充分发挥。

[0004] SRC结构中,型钢与混凝土之间良好的粘结作用是保证SRC构件中型钢与混凝土协调工作的基础,型钢、钢筋和混凝土三种材料元件协同工作,以抵抗各种作用效应,才能够充分发挥其优点。但SRC结构与RC结构的显著区别之一在于型钢与混凝土之间的粘结力远远小于钢筋与混凝土之间的粘结力,型钢与普通混凝土的粘结力大约只相当于光面钢筋粘结力的45%。国内外诸多试验研究结果表明,型钢与混凝土之间存在着粘结滑移现象,且对SRC构件的受力性能乃至承载能力有显著影响。因此,如何保证型钢与混凝土有效地协同工作成为SRC结构研究的重点之一。目前,工程设计中对型钢与混凝土之间粘结滑移问题的处理方法一般有两种:其一是通过计算在构件表面加设一定数量的剪切连接件,这样势必造成施工中的不便并提高造价,且易造成混凝土内部先天性微裂缝等缺陷;其二是不设置或仅设置少量剪切连接件,在承载能力计算中考虑粘结滑移的影响,相应降低构件的承载能力,这样必然存在不经济的因素。另一方面,在工程结构设计中普遍存在着重强度而轻耐久性的现象,国内外已出现过诸多混凝土结构在使用过程中的安全性和耐久性方面的问题。一些混凝土结构工程在使用不足设计年限一半即由于碱骨料反应、氯离子侵蚀等原因而完全丧失使用功能乃至承载能力,个别工程甚至出现局部坍塌或整体倒塌,造成人员伤亡或建筑设施破坏。因此,SRUSUPC结构中,提高型钢与特高强高性能混凝土之间的自然粘结性能,在型钢表面不设置或仅按构造要求设置少量剪切连接件就可保证型钢与特高强高性能混凝土有效地协同工作的研究具有重大意义;同时,混凝土结构工程的耐久性也日益引起人们的密切关注和高度重视,并成为亟待解决的问题。

[0005] 现有技术用于型钢混凝土组合结构的混凝土的强度等级有C30、C35、C40、C45、C50及C55的低强度高性能混凝土,C60、C70、C80、C90及C100的高强高性能混凝土和C110、C120、C130、C140及C150的超高强高性能混凝土,还有后续C160、C170、C180、C190及C200的超/特高强高性能混凝土的制备技术,上述各强度等级混凝土显著提高了型钢与(超)高强高性能混凝土之间的粘结性能,并提高了结构的耐久性;但是,还存在不能由此延伸到更高强度的特高强高性能混凝土,且将其用于型钢混凝土组合结构时不能解决型钢与特高强高性能混凝土之间的自然粘结性能差的问题,故不能满足土木工程建筑向空中、地下及水中延伸,即建筑超/特高化,超/特大跨化,地下化,海上或水下化,超耐久化和重型、巨型及新奇结构工程等应用和发展这一趋势的要求。另外,现有技术中也存在部分将混凝土超/特高强度、超/特耐久化的制备技术,但是它们均未涉及或未解决用于SRC结构时型钢与特高强高性能混凝土之间的自然粘结性能差的问题。

发明内容

[0006] 本发明的目的是提供一种用于型钢混凝土组合结构强度等级为C250的特高强高性能混凝土。该混凝土应用在型钢混凝土组合结构中,能在自然状态(亦即型钢表面不设置或仅按构造要求设置少量剪切连接件)下显著改进型钢与混凝土之间的粘结性能,有效发挥钢与混凝土两种材料各自的力学性能与相互协同工作性能,从而大幅度提升结构构件的承载能力与使用性能;另外,该混凝土能提高结构的耐久性,并具有良好的工作性能、高体

积稳定性和经济性。

[0007] 为解决上述技术问题,本发明是这样实现的:

[0008] 一种用于型钢混凝土组合结构C250强度等级的混凝土,该混凝土的配合比为(单位:kg/m³):

[0009] 水泥:细骨料:粗骨料:水:减水剂:消泡剂:硅粉:粉煤灰:激发剂:膨胀剂:复合保塑剂=504:769:1308:102:21:1.5:100:125:11:52:0.65。

[0010] 所述的水泥选择质量稳定、性能较好、强度较高的P·I62.5R硅酸盐水泥,使用前需与聚羧酸系混凝土高性能减水剂进行两者之间的适应性试验,试验方法采用现行建材行业标准《水泥与减水剂相容性试验方法》JC/T 1083-2008中的方法,并选择与聚羧酸系混凝土高性能减水剂相容性好的水泥品种。所选水泥性能指标(包括细度、SO₃含量、MgO含量、初凝时间、终凝时间、3天强度、28天强度)应不低于国家现行相关标准的要求,并选用碱含量少、水化热低、需水性也低的水泥品种。

[0011] 所述的细骨料采用质量比为8:2的颗粒圆滑、质地坚硬、级配良好的中偏粗河砂和质地精纯、级配良好的石英砂。其中,砂的品质应不低于现行建材行业标准《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》JC/T 52-2006及国家标准《建筑用砂》GB/T 14684-2011中规定的优质砂标准。其细度模数为2.8~3.2之间,含泥量和泥块含量应不大于0.3%(以质量计),氯离子含量应不大于0.02%(以干砂的质量计),SO₃含量应不大于0.5%。石英砂中二氧化硅含量应不小于99%,三氧化二铁含量应不大于0.005%,铬、钛等金属杂质含量应不大于0.01%。

[0012] 所述粗骨料采用质量致密坚硬、强度高、表面粗糙、粒形为近似球形、针片状含量小、级配良好的以玄武岩、花岗岩为主要成分的人工碎石,按照连续粒级碎石Φ5~Φ10投料;碎石的品质应不低于现行建材行业标准《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》JC/T 52-2006以及《建筑用卵石、碎石》GB/T 14685-2011等相关标准的规定要求。粗骨料其母体岩石的立方体抗压强度应不低于300MPa,最大粒径应控制在10mm;以质量比计,其SO₃含量应不大于0.5%,含泥量应不大于0.2%,泥块含量应不大于0.1%,针、片状颗粒含量应不大于0.5%,且不得混入风化颗粒。进行该混凝土配制时,采用连续粒级碎石Φ5~Φ10投料。

[0013] 经过大量尝试性对比试验及与水泥相容性试验,该发明所选用的高效减水剂为聚羧酸系混凝土高性能减水剂,其品质应不低于现行国家标准《混凝土外加剂应用技术规范》GB50119-2013和《混凝土外加剂》GB 8076-2008等相关标准的规定要求,所选用高效减水剂的减水率应大于30%。所选用高效减水剂的最大饱和掺量不小于全部胶凝材料总量的2.5%,采用同掺法,且使用前需与所选择的水泥品种进行相容性试验。

[0014] 所述消泡剂选择AGITAN®P803粉末消泡剂。

[0015] 所述的硅粉采用质量比为3:2的30nm纳米硅粉和亚微硅粉,其品质应不低于国家标准《高强高性能混凝土用矿物外加剂》GB/T 18736-2002等相关标准的规定要求,同时,30nm纳米硅粉和(亚)微硅粉的含水率均应不大于1%,烧失量均应不大于3%,氯离子含量均应不大于0.01%,火山灰活性指数均应大于95%。其中,30nm纳米硅粉的比表面积应不小于40000m²/kg,硅含量应不小于99.9%;(亚)微米硅粉的比表面积应不小于25000m²/kg,二氧化硅含量应不小于95%。

[0016] 所述的粉煤灰采用燃煤工艺先进的电厂生产的优质I级特细粉煤灰。其品质应不

低于国家标准《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》GB/T 1596—2005等相关标准的规定要求，且其细度(0.045mm方孔筛筛余，%)应不大于10%，烧失量应不大于3%，SO₃含量应不大于2%，含水量应不大于1%，需水量比应不大于95%，比表面积应大于700m²/kg。

[0017] 所述的激发剂是由发明人所在研究团队自主研制的高效粉煤灰激发剂(FAEA)，该激发剂对掺有纳米硅粉和亚微硅粉的超细磨粉煤灰水化反应的活性进行进一步激发，其按照下述质量百分比计的原料复合配制而成：

[0018] 无机材料65%~73%的水玻璃(利用固体片状NaOH和市售硅酸钠水玻璃按比例调制成模数约为1.0的水玻璃)、23%~30%普通二水石膏(CaSO₄·2H₂O)和有机材料3%~5%三乙醇胺(TEA)复合配制而成。

[0019] 制备方法如下：首先将固体片状NaOH溶于水中制成一定浓度的碱性溶液，然后和已知模数的硅酸钠水玻璃(市售水玻璃的模数一般2.4~3.3之间)调制成模数为1.0的试验需要的水玻璃，最后再与普通二水石膏和TEA复合配制成为所需的复合激发剂(FAEA)。

[0020] 经试验测定，该激发剂与早强硅酸盐水泥、聚羧酸系混凝土高性能减水剂具有良好的相容性。

[0021] 所述膨胀剂选用适用于特高强高性能混凝土的硫铝酸钙类高效膨胀剂，其品质应不低于国家标准《混凝土膨胀剂》GB23439-2009等相关标准的规定要求，且其细度(0.08mm方孔筛筛余，%)应不大于10%，比表面积应大于300m²/kg，限制膨胀率(水中7天)应不小于0.05%，28d抗压强度应不小于50MPa，MgO含量应不大于3%，碱含量应不大于0.5%。

[0022] 所述保塑剂选用适用于特高强高性能混凝土的复合高效保塑剂，该保塑剂包括下述质量比的原料：

[0023] 混凝土保塑剂5%~15%；羟基羧酸盐类缓凝剂45%~55%；高分子减缩剂35%~40%；

[0024] 所述混凝土保塑剂为与聚羧酸系高效减水剂具有较好相容性的性质稳定的市面销售的保塑剂；

[0025] 所述羟基羧酸盐类缓凝剂为葡萄糖酸钠、酒石酸钾钠、柠檬酸钠、水杨酸钠中的一种；

[0026] 所述高分子减缩剂为含聚氧化烯链的梳形聚合物、含聚醚和脂肪族类有机物的聚合物、含甲醚基聚合物/甲醚基聚合物的共聚物中的一种；

[0027] 所述含聚氧化烯链的梳形聚合物为江苏苏博特新材料股份有限公司研制开发的JM—SRA系列混凝土减缩剂，其主要成分为烷基聚氧乙烯醚；

[0028] 所述含聚醚和脂肪族类有机物的聚合物为冶金部建筑研究总院研制的JSJ型减缩剂，其主要成分是聚醚和脂肪族类有机物；

[0029] 所述含甲醚基聚合物/甲醚基聚合物的共聚物为浙江大学建筑工程学院研制ZZD—A型减缩剂，其主要成分是甲醚基聚合物与甲醚基聚合物。

[0030] 经过大量尝试性对比试验及与水泥相容性试验，该保塑剂与硅酸盐水泥和本发明所用的高性能减水剂具有良好的相容性。其品质应不低于现行国家标准《混凝土外加剂应用技术规范》GB50119-2013等相关标准的规定。

[0031] 所述的拌合水选用自来水，其品质应不低于国家建设部标准《混凝土用水标准》JGJ63-2006等相关标准的规定要求，并要求所选用自来水的碱含量不大于1000mg/L。

[0032] 本发明还给出了用于型钢混凝土组合结构C250强度等级的混凝土的制备方法,该方法采用改进的水泥裹砂石法混凝土搅拌工艺,具体工艺步骤如下:

[0033] 1) 先将减水剂 $21\text{kg}/\text{m}^3$ 、激发剂 $11\text{kg}/\text{m}^3$ 和复合保塑剂 $0.65\text{kg}/\text{m}^3$ 均匀拌入称量好的水 $102\text{kg}/\text{m}^3$ 中,得到混合物;

[0034] 2) 然后按照重量配比在强制式搅拌机中加入 $615.2\text{kg}/\text{m}^3$ 的河砂、 $153.8\text{kg}/\text{m}^3$ 的石英砂和步骤1)混合物总量的 $1/3$,均匀搅拌 $1\sim 2\text{min}$;

[0035] 3) 再加入 $1308\text{kg}/\text{m}^3$ 的 $\Phi 5\sim \Phi 10$ 连续粒级碎石粗骨料和步骤1)混合物总量的 $1/3$,均匀搅拌 $2\sim 4\text{min}$;

[0036] 4) 接着加入全部胶结材料: $504\text{kg}/\text{m}^3$ 的水泥、 $52\text{kg}/\text{m}^3$ 的膨胀剂、 $60\text{kg}/\text{m}^3$ 的纳米硅粉、 $40\text{kg}/\text{m}^3$ 的亚微硅粉和 $125\text{kg}/\text{m}^3$ 的粉煤灰,均匀搅拌 $3\sim 4\text{min}$;

[0037] 5) 最后加入 $1.5\text{kg}/\text{m}^3$ 的消泡剂和剩余步骤1)混合物,均匀搅拌 $2\sim 3\text{min}$,停留3分钟后再搅拌 $2\sim 3\text{min}$ 至均匀,出料,即得C250强度等级的混凝土拌合物。

[0038] 所述制备的用于型钢混凝土组合结构强度等级为C250的混凝土拌合物,其养护方法采用加热养护中的蒸汽养护,其养护流程为:静停(4~6小时)→升温加热(升温速度为每小时 10°C)→恒温加热(相对湿度大于95%, $80^\circ\text{C}\sim 90^\circ\text{C}$,48~72小时)→降温加热(降温速度为每小时 10°C)→标准养护至28天。

[0039] 本发明的有益效果是:

[0040] 1. 本发明生产的混凝土是一种适用于型钢混凝土组合结构强度等级为C250的特高强高性能混凝土。该混凝土在能确保其所应具备的力学性能(即C250强度等级、塑性等)以及具有高耐久性、高工作性、高体积稳定性和经济性的基础上,显著地改进该混凝土与型钢之间的自然粘结性能,使其应用在型钢混凝土结构设计中无需(或仅需按构造要求少许地)在型钢表面加设剪切连接件,即可保证型钢与该混凝土的有效协同工作,从而减少了施工工序,节约了钢材,提高了施工效率,并避免了在型钢表面大量设置剪切连接件且易造成该混凝土内部先天性微裂缝等缺陷,具有显著的经济效益和施工质量改进效果,其力学性能对比试验结果见表4。

[0041] 2. 本发明中使用的高效减水剂选择聚羧酸系混凝土高性能减水剂(减水率应大于30%),相比其它类型的减水剂,与早强硅酸盐水泥的相容性良好,其不含 Na_2SO_4 ,可进一步提高该混凝土的耐久性。

[0042] 3. 本发明中使用的消泡剂选择粉末消泡剂,型号为AGITAN@P803,可对混凝土搅拌过程中形成且振捣密实后仍残留在混凝土内的大量微泡进行脱泡,使其密实度有效提高,增强了混凝土的耐久性和剪切稳定性。

[0043] 4. 本发明中使用的复合激发剂选择自主研发的碱性复合激发剂(FAEA),能促使钙矾石的生成,使掺有粉煤灰和硅灰的混凝土具有一定的微膨胀性,改善混凝土的收缩性能。通过复合激发剂将粉煤灰表面玻璃体网状结构解聚,从而激发粉煤灰的潜在活性,可以增强粉煤灰水合过程中以铝硅酸盐为主要水化组分的三维空间结构玻璃体的腐蚀作用,提高正向水合反应的动力,生成更多的C-S-H凝胶、水化铝酸钙及水化硅酸钙等晶体,促进粉煤灰参与早期水化进程,充分利用粉煤灰活性微骨料及滚珠效应和硅灰填充颗粒之间的缝隙,改善胶结材料的性能以及减少用水量,且二次水化产物填充混凝土内部空隙,对所配制混凝土的早期强度、后期强度和耐腐蚀能力有显著的提高;另一方面,复合激发剂的作用促

进了硅灰-粉煤灰基矿物聚合物的形成,在提高混凝土耐久性的同时也显著改善了型钢与特高强高性能混凝土之间的粘结性能。

[0044] 5. 本发明生产的用于型钢混凝土组合结构强度等级为C250的高性能混凝土是通过加入活性矿物掺料(特细粉煤灰、纳米硅粉和亚微硅粉),采用等量取代法代替部分水泥,利用活性矿物掺合料的火山灰反应、增强效应、填充效应、耐久性改善效应及混凝土水化热的温峰消减效应,并充分利用活性矿物掺合料复合掺入及活性矿物掺合料与高效减水剂的复合掺合料所产生的超叠加效应,根据它们与水泥颗粒、粗细骨料粒径不在同一级的特点优化混凝土材料中胶凝材料部分的颗粒级配,粉煤灰和硅灰能够填充水泥颗粒间的孔隙,不仅使混凝土中集料与水泥石之间的界面结构以及水泥石的孔结构均得到了大幅改善,提高了水泥石的致密度、抗渗性,同时典型的致密结构能扩展到骨料表面,从而使混凝土更加密实坚硬,混凝土的力学性能(尤其是与型钢之间的粘结性能)、耐久性能和工作性能均有很大的提高。

[0045] 6. 本发明中使用的纳米硅粉,是一种无毒、无味、无污染、高纯度、无杂质的纳米材料。纳米硅粉的颗粒尺寸小,比表面积大,可以充分发挥其微填充效应;纳米硅粉表面存在大量不饱和键及不同键合状态的氢基,或为因缺氧而偏离稳定状态的硅氧结构,能消耗和细化 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体,促进水化速度和水化程度,使形成的水化硅酸钙凝胶更加致密;相比于(亚)微硅粉,具有更高的活性(特别是诱增活性)和自由能态,对混凝土微观结构的改善和力学性能的提高(即C250强度等级、塑性等)均有不小的促进作用,同时对提高型钢与特高强高性能混凝土之间的粘结性能也产生了显著效果。

[0046] 7. 本发明掺加适量的粉煤灰可以改善混凝土拌和料的流动性、粘聚性和保水性,但粉煤灰代替部分水泥会在一定程度上降低混凝土的早期强度,而掺入适量的硅灰,可显著提高混凝土的强度和耐久性,且可以与水泥水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生二次水化反应,形成胶凝产物,填充水泥石结构,改善浆体的微观结构,提高硬化体的力学性能和耐久性。粉煤灰和硅灰的共同使用则可以提高混凝土基体密实度,从而提高型钢与混凝土之间的粘结性能。

[0047] 8. 本发明中使用的膨胀剂,是一种硫铝酸钙类混凝土高效膨胀剂。硫铝酸钙类混凝土高效膨胀剂与水化合生成钙矾石膨胀水化物晶体($\text{C}_3\text{A} \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$),能防止或减少混凝土水化、硬化中化学反应、物理反应和热力学反应所引起的体积收缩开裂进行补偿,并能填充、堵塞各种毛细孔缝使混凝土内部结构更加致密,不仅大大提高了混凝土的抗裂防渗性能和体积稳定性,并可使混凝土的密实性和强度得到进一步的提高。

[0048] 9. 本发明中使用的保塑剂,是一种由混凝土高效保塑剂、无机酸盐类缓凝剂、高分子减缩剂复合配制而成的复合高效保塑剂。该高效保塑剂在适量掺加时能有效减缓水泥颗粒的水化,故具有高坍落度保持能力,而且使特高强高性能混凝土的早期收缩率有所降低,有助于提高混凝土的抗裂性,从而增强了混凝土的耐久性;在与高性能减水剂的共同作用下,不仅能够改善混凝土的早期强度较低的缺点,还能显著提高型钢与混凝土组合结构的力学性能(塑性、抗压强度、型钢与混凝土之间的粘结性能等)。

[0049] 10. 本发明中使用的石英砂是一种坚硬、耐磨、化学性能稳定的硅酸盐矿物。其主要矿物成分是二氧化硅,具有一定的抗酸性介质侵蚀能力,并可以弥补河砂是惰性材料的缺点参与水化反应并降低水化热,提高了混凝土的耐久性和强度。

[0050] 11. 本发明生产的用于型钢混凝土组合结构强度等级为C250的特高强高性能混凝土是在普通混凝土生产工艺条件下, 并采用尽量减少水泥颗粒、外加剂颗粒及超细活性矿物颗粒在混凝土搅拌时到处飞扬的水泥裹砂石搅拌工艺的投料方法实现的, 制备工艺简单并易于实现, 适合于工程化和产业化, 便于大规模推广应用, 具有较好的社会效益。

[0051] 12. 本发明生产的用于型钢混凝土组合结构强度等级为C250的特高强高性能混凝土的原材料中含有大量的粉煤灰、硅粉, 它们是工业废料和废弃物, 其消纳可对环境保护做出巨大贡献, 符合可持续发展的要求, 是一种绿色混凝土, 一种环境友好材料。

[0052] 13. 本发明选用的原材料(包括工业废料)为大量、规模化生产的市场流通、买售产品, 原材料易得。

[0053] 14. 本发明中所采用的蒸汽加热养护可以加速水泥及活性矿物掺合料水化反应的进程和火山灰效应的发挥, 能改善混凝土微观结构, 提高了其界面粘结力和强度。另外, 混凝土或混凝土构件的蒸汽加热养护技术业已成熟, 且易掌握, 为该发明的推广应用奠定了基础。

[0054] 15. 本发明生产的用于型钢混凝土组合结构强度等级为C250的特高强高性能混凝土是通过加入超细活性矿物掺料(超细粉煤灰和超细磨硅粉), 采用等量取代法代替部分水泥, 利用活性矿物掺合料的火山灰反应、增强效应、填充效应、耐久性改善效应及特高强高性能混凝土水化热的温峰消减效应, 并充分利用活性矿物掺合料复合掺入及活性矿物掺合料与高效减水剂的复合掺合料所产生的超叠加效应, 根据它们与水泥颗粒、粗细骨料粒径不在同一级的特点优化特高强高性能混凝土材料中胶凝材料部分的颗粒级配, 在此配比中, 骨料占比约75%, 适当减小了砂率, 即提高了碎石占比; 不仅使特高强高性能混凝土中集料与水泥石之间的界面结构以及水泥石的孔结构均得到了大幅改善, 提高了水泥石的致密度、抗渗性, 同时典型的致密结构能扩展到骨料表面, 从而使特高强高性能混凝土更加密实坚硬, 特高强高性能混凝土的力学性能(尤其是与型钢之间的粘结性能)、耐久性能和工作性能均有很大的提高。

[0055] 本发明是以在自然状态(亦即型钢表面不设置或仅按构造要求设置少量剪切连接件)下显著改进型钢与混凝土之间的粘结性能, 有效发挥钢与混凝土两种材料各自的力学与协同工作性能, 从而大幅度提升结构构件的承载能力与性能, 并提高结构的耐久性为宗旨, 来研究用于型钢混凝土组合结构强度等级为C250的特高强高性能混凝土的制备技术。目前, 国内外制作特高强高性能混凝土所用的硅酸盐水泥的质量和强度越来越高, 所用活性矿物掺合料(硅粉、粉煤灰等)的加工技术与质量不断改进, 加之高性能减水剂、高效膨胀剂、高效保塑剂等混凝土外加剂的研究与应用均已取得了较大的进展, 且消泡剂和激发剂在混凝土中的研究与应用也正逐步发展, 从而为上述研究宗旨的实现鉴定了基础。同时, 特高强高性能混凝土的配制要求的水泥用量相对较少, 而生产水泥意味着二氧化碳的大量排放, 故在一定程度上减轻了对地球造成的温室效应; 它要求有足够数量并占胶结材料比重较大的粉煤灰、硅粉等优质的活性矿物掺料, 意味着工业废料的合理处置利用, 将有利于形成良好的生产循环和环境保护, 而这些优质的活性矿物掺料正是改善混凝土材料自身性能所需要的。总之, 应用特高强高性能混凝土可以节约水泥、将工业废料变废为宝、延长结构工程使用年限, 并最终保护生态环境和自然资源。综上所述, 用于型钢混凝土组合结构的特高强高性能混凝土的研究与开发将为更好地使用混凝土走出了一条可持续发展的道路, 它

将提升结构工程的综合能力与性能,促进钢-混凝土组合结构在我国,尤其高烈度及多遇地震地区的高层、超/特高层建筑,海上平台或水下结构,地下建筑,超/特大跨、超/特重型结构中推广应用,改善基础设施和人居环境中建筑结构的科技含量,并发挥它具有较大的承载能力和刚度、良好的抗震性能、施工进度快、耐久和耐火性好及显著的社会和经济效益等独特优势。因此,型钢特高强高性能混凝土组合结构具有很高的工程应用价值和广阔的市场前景。

具体实施方式

[0056] 本发明研制的用于型钢混凝土组合结构强度等级为C250的特高强高性能混凝土,除了与普通混凝土采用类似的材料—水泥、砂、碎石、水外,还加入了其不可缺少的组分:混凝土高性能减水剂、混凝土高效膨胀剂和活性矿物掺合料(硅粉、粉煤灰),另外还掺入了粉末消泡剂,激发剂和复合高效保塑剂。特高强高性能混凝土与普通混凝土不同,其强度和性能均较普通和高强混凝土有大幅度的提高。特高强高性能混凝土的水灰比一般都小于0.22,其水胶比小于0.15,而普通和高强混凝土的水灰比一般在0.30以上,特高强高性能混凝土的粗骨料最大粒径亦小于普通和高强混凝土的。上述各项差异导致了特高强高性能混凝土与普通和高强混凝土在性能上有着很大的差别,通过加入超细活性矿物掺料,利用超细活性矿物掺料的火山灰反应、(微)填充效应及增塑效应,优化特高强高性能混凝土材料中胶凝材料部分的颗粒级配,不仅使特高强高性能混凝土中集料与水泥石之间的界面结构以及水泥石的孔结构均得到了大幅改善,提高了水泥石的致密度、抗渗性,同时典型的致密结构能扩展到骨料表面,从而使特高强高性能混凝土更加密实坚硬,特高强高性能混凝土的力学性能(尤其是与型钢之间的粘结性能)和耐久性能均有很大的提高。同时,通过粉末消泡剂的掺入,可减少在混凝土搅拌过程中形成且振捣密实后仍残留在混凝土内水泥浆体中或水泥浆体与骨料之间的界面过度区的大量气泡进行脱泡,使其密实度有效提高,对特高强高性能混凝土的力学性能(包括与型钢之间的粘结性能)和耐久性能的提高均做出了不小的贡献。另外,通过激发剂的掺入,可使混凝土具有一定的微膨胀性,改善混凝土的收缩性能;可以增强粉煤灰水和过程中以铝硅酸盐为主要水化组分的玻璃体的腐蚀作用,增大粉煤灰的活性,提高正向水合反应的动力,生成更多的C-S-H凝胶、水化铝酸钙及水化硅酸钙等晶体,对所配制混凝土的强度和耐腐蚀能力有显著的提高。而混凝土高效膨胀剂的掺入,可对混凝土硬化反应所产生的体积收缩开裂进行补偿,可以填充、堵塞混凝土中的各种毛细孔缝,提高混凝土的抗裂防渗性能、密实性、强度和体积稳定性。对于高性能减水剂和复合高效保塑剂的掺入,减少了水泥用水量,对水泥颗粒有一定的分散和润湿作用,使混凝土的早期收缩率有所降低,有效的减少了混凝土早期裂缝的开展,不仅能够改善混凝土的早期强度较低的缺点,还能显著提高型钢与混凝土组合结构的耐久性和力学性能(塑性、抗压强度、型钢与混凝土之间的粘结性能等)。

[0057] 和光圆钢筋与混凝土之间的粘结相似,型钢与混凝土之间的粘结力也主要由化学胶结力、摩擦阻力和机械咬合力三部分组成。型钢与混凝土之间的粘结力的每一组成部分都与混凝土的性能密切相关。

[0058] 化学胶结力是混凝土中的水泥凝胶体在型钢表面产生的化学粘着力或吸附力,其(抗剪)极限值取决于水泥的性质和型钢表面的粗糙程度。浇筑混凝土时,水泥浆体在钢材

表面产生表面张力,在表面张力的作用下,钢材表面上的水泥浆体将形成自平衡;浇注混凝土一般要进行振捣,振捣力(扰动)能够加强并加快水泥浆体向钢材表面氧化层的渗透;在养护过程中水泥浆体结晶,水泥晶体硬化形成化学胶结力。化学胶结力只在型钢混凝土构件的原始形成状态下存在,一旦发生连接面上的(局部)粘结滑移,水泥晶体就会被剪断并挤压破碎,化学胶结力则丧失。影响化学胶结力的主要因素有混凝土强度、型钢钢材表面粗糙程度、试件浇筑方式与振捣程度以及后期的养护和混凝土的收缩情况等。

[0059] 化学胶结力丧失后,由于钢材表面的粗糙不平以及其它原因所引起的钢材表面状况变化(钢材表面凹凸不平),使其与接触面上的混凝土晶体颗粒咬合在一起,这样就形成了机械咬合力。对于工厂生产并经后期处理的轧制工字钢等型钢,一旦粘结滑移发展加快,型钢与混凝土接触面上的混凝土晶体被压碎整合,这时机械咬合力也基本上丧失。影响机械咬合力的主要因素为型钢钢材表面的粗糙程度与表面状况(锈蚀程度等)、混凝土骨料级配、混凝土强度以及型钢混凝土构件的受力方式等。

[0060] 型钢周围混凝土对型钢的摩阻力亦是在型钢与混凝土之间的粘着力破坏后形成,且主要是在机械咬合力基本丧失后才发挥作用。当化学胶结力,尤其是机械咬合力丧失后,由于与型钢接触面上的混凝土晶体被剪断、压碎且膨胀,加之保护层和箍筋等横向约束,将在型钢与混凝土的连接面上产生正压力,加上连接面上摩擦系数较大,从而形成了摩擦阻力。摩擦阻力在化学胶结力丧失以后一直都存在,是型钢与混凝土之间后期粘结力的主要部分。影响摩擦阻力的因素有型钢的配钢形式及其表面特征、型钢与混凝土之间粘结面的大小、构件受力方式、混凝土骨料级配以及影响横向约束的因素(型钢的混凝土保护层厚度、配箍率、混凝土收缩)等。

[0061] 本发明所要解决的关键技术问题是,在确保特高强高性能混凝土所应具备的力学性能(即强度和塑性)以及具有高耐久性、高工作性、高体积稳定性和经济性的基础上,显著地改进混凝土与型钢之间的(自然)粘结性能,使在型钢混凝土结构设计中无需(或仅需按构造要求少许地)在型钢表面加设剪切连接件,即可保证型钢与混凝土之间有可靠的粘结和锚固,使两者在荷载作用下能协调一致、共同工作。

[0062] 本发明从原理和设计原则上,打破“饱罗米”公式的限制,通过正交试验法及对比实验法,考虑混凝土高性能减水剂、混凝土高效膨胀剂、消泡剂、激发剂、高效保塑剂五者之间及其与水泥的相容性,粗骨料最大粒径、粗骨料不同粒径之间及其与细骨料粒径之间的级配对混凝土强度及性能的影响以及活性矿物掺料的(微)填充效应、火山灰活性等性能因素,选用优质粗细骨料并控制粒径和级配,在特高强高性能混凝土配制材料中掺入适量的混凝土高性能减水剂、混凝土高效膨胀剂、混凝土复合高效保塑剂和优质活性矿物超细粉,并考虑消泡剂和激发剂的加入,降低水灰比,立足于当地现有的易得材料,不改变常规生产工艺,为尽量减少水泥颗粒、外加剂颗粒及超细活性矿物颗粒在混凝土搅拌时到处飞扬采用水泥裹砂石搅拌工艺的投料方法,利用活性矿物掺合料的火山灰反应、增强效应、(微)填充效应、耐久性改善效应及特高强高性能混凝土水化热的温峰消减效应,并充分利用活性矿物掺合料复合掺入及活性矿物掺合料与混凝土高性能减水剂的复合掺合料所产生的超叠加效应、消泡剂的脱泡作用、膨胀剂的补偿收缩和填充作用、激发剂的活性激发作用、复合高效保塑剂的保塑减缩与缓凝作用,配制出力学性能(尤其是与型钢之间的粘结性能)好、工作性能优异、耐久性能好、成本相对较低的适用于在型钢混凝土结构中可靠应用的强

度等级为C250的特高强高性能混凝土。本发明的力学性能试验对比结果如表4所示。

[0063] 本发明选择原材料时,不仅要求原材料为优质,还要求配制特高强高性能混凝土所用的原材料为当地易得。另外,考虑到所配制混凝土的强度很高,根据最大密实度理论对混凝土材料中粗细骨料的颗粒级配进行优化,使粗细颗粒互相有良好的填充,以减少骨料的空隙率;同时,一般水泥的平均粒径为20~30 μm ,小于10 μm 的颗粒并不多,而活性矿物掺合料的颗粒粒径远比水泥颗粒粒径细小,超细粉煤灰的平均粒径为3~6 μm ,能填充水泥颗粒之间的空隙,微硅粉的平均粒径也很小,为0.10~0.26 μm ,能填充水泥颗粒与超细粉煤灰颗粒之间以及超细粉煤灰粒子之间的空隙,纳米微硅粉的平均粒径更小,为10nm~0.1 μm ,能填充胶凝颗粒之间及其与界面结构之间的微细缝隙或空隙,故此在所配制的特高强高性能混凝土材料中对胶凝材料部分的颗粒级配进行优化也至关重要。而外部劣化因子(如硫酸盐等因子)对混凝土的侵蚀性很大程度上取决于混凝土的空隙构造,而这正是造成混凝土耐久性问题的主要原因。活性矿物掺合料的掺入,降低了水泥颗粒之间和界面的空隙率,使水泥石结构和界面结构更为致密,阻断了可能形成的渗透通路,从而使所配制的特高强高性能混凝土的抗渗性大幅度提高,水及其它各种侵蚀介质(Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 CO_2 等)均难以进入混凝土内部,并可减少碱-硅反应的发生几率和次氯酸钙的生成几率,其强度和耐久性能得到大幅度提高。即当水泥石结构和界面结构中大于0.1 μm 的大孔含量较低时,将有利于所配制特高强高性能混凝土的各项性能的改善,否则,对所配制特高强高性能混凝土的强度、抗渗性能、抗腐蚀性能和耐久性能均不利。

[0064] 以活性矿物掺合料取代部分水泥后,还可以使水泥颗粒空隙中的一部分水分被填充其内的矿物掺合料置换出来,可使水泥净浆的流动度增大。但也并不是所有的矿物掺合料都具有这种显著的增塑效应,主要是由于部分活性矿物掺合料的比表面积太大或者其本身具有多孔结构,虽然其取代水泥后能置换出水泥净浆中的部分水分,但由于其本身吸水或润湿表面需要较多自由水,导致水泥净浆的流动性并不增大。为了保证所研制特高强高性能混凝土的高工作性能,本发明采用混凝土高性能减水剂和活性矿物掺合料复合掺入的方法,在两者的协同工作下,活性矿物掺料的微细颗粒不仅充分发挥了它们的(微)填充效应,并将填充于空隙之中的水分置换出来,使颗粒之间的间隔水层加厚;另外,活性矿物掺合料的微细颗粒吸附了混凝土高性能减水剂分子,其表面形成的双电层电位所产生的静电斥力大于粉体粒子之间的万有引力,促使粉体颗粒分散,并进一步加剧水泥颗粒的分散,使水泥净浆的流动性增加,从而有效地改善了混合料的流动性;同时,超细活性矿物掺合料的复合掺入降低了水化热,可提高混凝土的体积稳定性。

[0065] 用于配制特高强高性能混凝土的原材料中的骨料应具有较高的固有强度、韧度和稳定性,以能够抵御各种静态和动态应力、冲击及磨蚀作用,而不会导致所配制混凝土性能的下降。由于不同骨料的表面状态不同,导致水泥浆体与骨料之间的粘结强度也不相同,通常情况下碎石较卵石有较高的粘结强度;另一方面,水泥浆体中硅灰含量比例不同时,粘结强度相差亦很大,掺硅粉时,水泥浆体与骨料之间的粘结强度比不掺时高得多。普通混凝土在破坏时,水泥浆体与骨料的粘结界面是薄弱的环节,裂缝是沿着水泥浆体与骨料的界面出现的,骨料一般不会破坏,且外界侵蚀也往往从此界面开始发展,而特高强高性能混凝土中的水泥浆体与骨料的粘结界面不再是薄弱环节,它的破坏也不再沿着界面发生,而是由于骨料的破坏而导致的,因此骨料的性能对特高强高性能混凝土的性能有较大的影响。

本发明的研究中选用的细骨料采用颗粒圆滑、质地坚硬、级配良好、含泥量小的中粗河砂；粗骨料为表面粗糙、质地优良、级配良好的以花岗岩、玄武岩为主要成分的人工碎石，其最大粒径应控制在10mm。这样，混凝土的均匀性又得到了进一步的提升，从而使混凝土更加密实，强度也能进一步得到提高。

[0066] 本发明在制备时采用水泥裹砂石法(又称改进的SEC法)混凝土搅拌工艺，在强制式搅拌机中进行搅拌，其投料顺序为：先将聚羧酸系混凝土高性能减水剂、激发剂和复合高效保塑剂均匀拌入称量好的水中，得到混合物；然后加入细骨料和拌有高性能减水剂和激发剂混合物总量的1/3→搅拌均匀(1~2分钟)→加入粗骨料和拌有高性能减水剂和激发剂混合物总量的1/3→搅拌均匀(2~4分钟)→加入全部胶结材料(水泥、膨胀剂、硅灰和粉煤灰)→搅拌均匀(3~4分钟)→加入消泡剂和剩余拌有高性能减水剂和激发剂混合物→均匀搅拌(2~3分钟)→停留3分钟后再搅拌至均匀(2~3分钟)→出料。这种工艺能尽量减少水泥颗粒及超细活性矿物颗粒在混凝土搅拌时到处飞扬，并可提高所制备混凝土的强度，且所制备的混凝土不宜出现离析现象，泌水少，工作性能相对较好。

[0067] 本发明在养护时采用加热养护中的蒸汽养护，其养护流程为：静停(4~6小时)→升温加热(升温速度为每小时10℃)→恒温加热(相对湿度大于95%，80℃~90℃，48~72小时)→降温加热(降温速度为每小时10℃)→标准养护至28天。该养护方法可以加速水泥及活性矿物掺合料水化反应的进程和火山灰效应的发挥，能改善混凝土微观结构，提高了其界面粘结力和强度。

[0068] 实施例：

[0069] (一) 原材料

[0070] 1. 水泥

[0071] 选择质量稳定、性能较好的秦岭牌P·I62.5R水泥，使用前与聚羧酸系混凝土高性能减水剂进行两者之间的适应性试验，试验方法采用现行建材行业标准《水泥与减水剂相容性试验方法》JC/T 1083-2008中的方法，与聚羧酸系混凝土高性能减水剂相容性良好。所选水泥性能指标符合《硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥》GB175-2007等国家现行相关标准的要求，其碱含量少、水化热低、需水性也低。

[0072] 2. 骨料

[0073] 采用质量比为8:2的砂和石英砂。

[0074] 砂采用颗粒圆滑、质地坚硬、级配良好的中偏粗、灞河砂，砂的品质符合现行建材行业标准《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》JC/T 52-2006及国家标准《建筑用砂》GB/T14684-2011中规定的优质砂标准。其细度模数为3.0，含泥量和泥块含量均控制在0.3% (以质量计) 以下，氯离子含量控制在0.02% (以干砂的质量计) 以下，SO₃含量应不大于0.5%。

[0075] 选择质地精纯、级配良好的石英砂。其二氧化硅含量应不小于99%，三氧化二铁含量应不大于0.005%，铬、钛等金属杂质含量应不大于0.01%。进行该混凝土配制时，采用不同粒径规格(2-4mm、1-2mm、0.63-1mm、0.315-0.63mm、0.16-0.315mm、<0.16mm) 多级配投料。

[0076] 所述粗骨料采用质量致密坚硬、强度高、表面粗糙、粒形为近似球形、针片状含量小、级配良好的以玄武岩、花岗岩为主要成分的人工碎石，按照连续粒级碎石Φ5~Φ10投料；碎石的品质应不低于现行建材行业标准《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》JC/

T52-2006以及《建筑用卵石、碎石》GB/T 14685-2011等相关标准的规定要求。粗骨料其母体岩石的立方体抗压强度应不低于300MPa,最大粒径应控制在10mm;以质量比计,其SO₃含量应不大于0.5%,含泥量应不大于0.2%,泥块含量应不大于0.1%,针、片状颗粒含量应不大于0.5%,且不得混入风化颗粒。进行该混凝土配制时,采用连续粒级碎石Φ5~Φ10投料。

[0077] 3. 粉煤灰

[0078] 采用燃煤工艺先进的电厂生产的优质I级特细粉煤灰。其品质符合国家标准《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》GB/T 1596-2005等相关标准的规定要求,其细度(0.045mm方孔筛筛余,%)不大于5%,烧失量为2.2%,SO₃含量为1.5%,需水量比小于95%,比表面积约为1000m²/kg。

[0079] 4. 硅粉

[0080] 采用质量比为3:2的30nm纳米硅粉和亚微硅粉,选用的30nm纳米硅粉和(亚)微硅粉的品质符合国家标准《高强高性能混凝土用矿物外加剂》GB/T 18736-2002等相关标准的规定要求,30nm纳米硅粉和(亚)微硅粉的含水率均小于1%,烧失量均不大于3%,氯离子含量均不大于0.01%,火山灰活性指数均大于95%。其中,30nm纳米硅粉的比表面积约为42000m²/kg,硅含量不小于99.9%;(亚)微米硅粉的比表面积约为27000m²/kg,二氧化硅含量不小于99%。

[0081] 5. 混凝土高性能减水剂

[0082] 经过大量尝试性对比试验及与水泥相容性试验,该发明所选用的高效减水剂为聚羧酸系混凝土高性能减水剂,其品质符合现行国家标准《混凝土外加剂》GB 8076-2008等相关标准的规定要求,所选用高效减水剂的减水率大于30%。所选用高效减水剂的最大掺量为全部胶凝材料总量的2.5%,采用同掺法,使用前与所选择的水泥品种进行相容性试验且相容性良好。

[0083] 6. 激发剂

[0084] 选用由发明人所在研究团队自主研制的高效粉煤灰激发剂(FAEA),是在经过对掺有纳米硅粉和亚微硅粉的超细磨粉煤灰水化反应特点的研究并认识到其活性有待进一步激发和利用的基础上,由无机材料65%~75%的水玻璃(利用固体片状NaOH和市售硅酸钠水玻璃按比例调制模数约为1.0的水玻璃)、23%~30%普通二水石膏(CaSO₄·2H₂O)和有机材料3%~5%三乙醇胺(TEA)复合配制而成。制备方法如下:首先将固体片状NaOH溶于水中制成一定浓度的碱性溶液,然后和已知模数的硅酸钠水玻璃(市售水玻璃的模数一般2.4~3.3之间)调制模数为1.0的试验需要的水玻璃,最后再与普通二水石膏和TEA复合配制成为所需的复合激发剂(FAEA),详见表1。经试验测定,该激发剂与早强硅酸盐水泥、聚羧酸系混凝土高性能减水剂具有良好的相容性。

[0085] 表1 FAEA激发剂的不同配比

激 发 剂	水玻璃 (%)	普通二水石膏 (%) (CaSO ₄ ·2H ₂ O)	三乙醇胺 (%) (TEA)
[0086] 配比 1	73	24	3
配比 2	72	23	5
配比 3	68.5	28	3.5
配比 4	65	30	5

[0087] 7. 膨胀剂

[0088] 经过大量尝试性对比试验及与水泥相容性试验,该发明所选用的膨胀剂为适用于特高强高性能混凝土的硫铝酸钙类混凝土高效膨胀剂,其品质符合国家标准《混凝土膨胀剂》GB23439-2009等相关标准的规定要求,且其细度(0.08mm方孔筛筛余,%)不大于10%,比表面积约为400m²/kg,限制膨胀率(水中7天)不小于0.05%,28d抗压强度大于55MPa,MgO含量不大于2%,碱含量不大于0.3%。

[0089] 8. 保塑剂

[0090] 选用适用于特高强高性能混凝土的复合高效保塑剂,该保塑剂包括下述质量比的原料:

[0091] 混凝土保塑剂5%~15%;羟基羧酸盐类缓凝剂45%~55%;高分子减缩剂35%~40%。

[0092] 其中,混凝土保塑剂为与聚羧酸系高效减水剂具有较好相容性的性质稳定的市面销售的保塑剂。羟基羧酸盐类缓凝剂为葡萄糖酸钠、酒石酸钾钠、柠檬酸钠、水杨酸钠中的一种。高分子减缩剂为含聚氧化烯链的梳形聚合物、含聚醚和脂肪族类有机物的聚合物、含甲醚基聚合物/甲醚基聚合物的共聚物中的一种。

[0093] 其中,含聚氧化烯链的梳形聚合物为江苏苏博特新材料股份有限公司研制开发的JM-SRA系列混凝土减缩剂,其主要成分为烷基聚氧乙烯醚;含聚醚和脂肪族类有机物的聚合物为冶金部建筑研究总院研制的JSJ型减缩剂,其主要成分是聚醚和脂肪族类有机物;含甲醚基聚合物/甲醚基聚合物的共聚物为浙江大学建筑工程学院研制ZSD-A型减缩剂,其主要成分是甲醚基聚合物与甲醚基聚合物。

[0094] 经过大量尝试性对比试验及与水泥相容性试验,该保塑剂与硅酸盐水泥和本发明所用的高性能减水剂具有良好的相容性。其品质应不低于现行国家标准《混凝土外加剂应用技术规范》GB50119-2013等相关标准的规定。

[0095] 表2保塑剂的不同配比

保 塑 剂		实施例 1	实施例 2	实施例 3	实施例 4
混凝土保塑剂%		5	15	12	13
[0096] 羟基羧酸盐类缓凝剂%	葡萄糖酸钠	55			
	酒石酸钾钠			50	
	柠檬酸钠		45		
	水杨酸钠				52
高分子减缩剂%	JM-SRA	40			
	JSJ			38	
	ZZD-A		40		35

[0097] 9. 拌合水

[0098] 选用自来水为拌合水,其品质符合国家建设部部标准《混凝土拌合用水标准》JGJ 63-2006等相关规定的规定要求,且碱含量少于800mg/L。

[0099] (二) 配合比

[0100] 本发明对于将会在型钢混凝土结构中应用的强度等级为C250的特高强高性能混凝土提供的配合比如表3所示。

[0101] 表3用于型钢混凝土组合结构的特高强高性能混凝土配合比(单位:kg/m³)

混凝土强度等级	水泥品种	水泥	砂	石	水	减水剂	消泡剂	硅粉	粉煤灰	激发剂	膨胀剂	保塑剂
C250	P·I 62.5R	504	769	1308	102	21	1.5	100	125	11	52	0.65

[0103] (三) 搅拌工艺

[0104] 该发明采用水泥裹砂石法混凝土搅拌工艺,具体工艺步骤如下:

[0105] 先将聚羧酸系混凝土高性能减水剂21kg/m³、激发剂11kg/m³和复合高效保塑剂0.65kg/m³均匀拌入称量好的水102kg/m³中,得到混合物;然后按照重量配比在强制式搅拌机中加入615.2kg/m³的河砂、153.8kg/m³的石英砂及拌有高性能减水剂、激发剂和复合高效保塑剂混合物总量的1/3,均匀搅拌1~2分钟后,加入1308kg/m³的粗骨料(Φ5~Φ10连续粒级碎石)和拌有高性能减水剂、激发剂和复合高效保塑剂混合物总量的1/3,均匀搅拌2~4分钟后,再加入全部胶结材料(包括膨胀剂):504kg/m³的水泥、52kg/m³的膨胀剂、60kg/m³的纳米硅粉、40kg/m³的(Ⅱ)微硅粉和125kg/m³的粉煤灰,均匀搅拌3~4分钟后,加入1.5kg/m³的AGITAN@P803粉末消泡剂和剩余拌有高性能减水剂和激发剂的混合物,均匀搅拌2~3分钟,休息3分钟后再搅拌2~3分钟至均匀,出料,即得C250强度等级的混凝土拌合物。

[0106] 这种工艺能尽量减少水泥颗粒、外加剂颗粒及超细活性矿物颗粒在混凝土搅拌时到处飞扬,并可提高所制备混凝土的强度,且所制备的混凝土不宜出现离析现象,泌水少,工作性能相对较好。

[0107] (四) 养护方法

[0108] 该发明采用加热养护中的蒸汽养护,具体养护流程如下:

[0109] 静停(4~6小时)→升温加热(升温速度为每小时10℃)→恒温加热(相对湿度大于

95%，80℃～90℃，48～72小时)→降温加热(降温速度为每小时10℃)→标准养护至28天。

[0110] 该养护方法可以加速水泥及活性矿物掺合料水化反应的进程和火山灰效应的发挥，能改善所制备混凝土的微观结构，提高其界面粘结力和强度。

[0111] (五) 力学性能试验结果对比

[0112] 按照上述配合比所配制的适用于型钢混凝土组合结构的强度等级为C250的特高强高性能混凝土与一般超高强混凝土(强度等级为C250的混凝土)的力学性能对比试验结果如表4所示。

[0113] 表4混凝土力学性能对比试验结果

混凝土 强度等级		坍落度 / mm	立方体抗 压强度 /MPa	劈拉强度 / MPa	与型钢 粘结强度 / MPa	28d 龄期氯离子扩 散系数 DRCM(10^{-11} m ² /s)	
[0114]	一般超 高强混 凝土	C250	45	270.61	16.65	3.19	<3.0
	本发明	C250	38	285.11	20.15	5.58	<3.0

[0115] 从表4可以看出，按该技术制备的强度等级为C250的特高强高性能混凝土，实现了在能确保其所应具备的力学性能(即C250强度等级、塑性等)以及具有高耐久性、高可靠性、高工作性、高体积稳定性和经济性的基础上，显著地改进混凝土与型钢之间的(自然)粘结性能，粘结强度提高了1.75倍。使在型钢混凝土结构设计中无需(或仅需按构造要求少许地)在型钢表面加设剪切连接件，即可保证型钢与混凝土的有效协同工作，从而减少了施工工序，节约了钢材，提高了施工效率，并避免了在型钢表面大量设置剪切连接件且易造成混凝土内部先天性微裂缝等缺陷，可带来显著的经济效益和施工质量改进效果，具有较高的工程应用价值和广阔的市场前景。