

智能动力混凝土 – 低标号自密实混凝土的探索与实践

杨健英¹, 吴慧华², Dr. Bruce Christensen¹, 江靖², 李林¹, 冯丘陵¹

(1) 巴斯夫化学建材亚太区, 上海; (2) 巴斯夫化学建材上海麦斯特建工, 上海

摘要: 本文结合我国原材料和混凝土市场的特点, 基于巴斯夫自主知识产权的 RheoMATRIX®外加剂新技术, 提出了以 C30 为代表的低标号自密实混凝土的新概念及解决方案—智能动力混凝土 (Smart Dynamic Concrete™, SDC)。智能动力混凝土的设计参数: 胶凝材料总量低于 380kg/m³, 初始流动度 600~670mm, 1hr 的流动度不小于 600mm, T50 不超过 12s, 无泌水、离析现象。大量的试验证明, 智能动力混凝土在中国市场上具有广泛的推广应用前景。

关键词: 自密实混凝土, 智能动力混凝土, 巴斯夫化学建材, RheoMATRIX®, Glenium 6000 SDC

1 前言

近些年来, 中国混凝土的商品化、预拌化生产取得了迅猛的发展。据统计2008年中国商品混凝土产量已达6.9亿立方米, 同比2007年的5.9亿立方米增长了16.95%^[1], 如需达到发达国家商品混凝土占现浇混凝土的60%以上, 设2010—2017年按年增长率15%递增, 我国将在2017年达此目标(年产18亿立方米)^[2], 这同时说明商品混凝土在中国发展的空间依然很大。但就目前的混凝土技术和市场状况而言, 我们依旧面临许多挑战: 如混凝土需更高的流动性, 以满足复杂建筑结构的建设要求; 优良的稳定性和泵送性, 以加快工程建设速度; 高耐久性, 以延长建筑结构的使用寿命; 原材料的广泛适应性, 以降低混凝土生产质量控制压力; 减少污染, 以满足愈发严格的环保要求; 产品的同质化低价竞争, 无法实现差异化的市场定位; 混凝土生产和应用企业管理水平参差不齐, 质量问题频发, 建筑质量存在很大的潜在风险, 等等。面对这些挑战, 巴斯夫化学建材的研发部门以制备低成本、自密实、状态稳定的低强度混凝土为目标, 成功研发了能够解决或部分解决上述问题的混凝土革新技术, 即智能动力混凝土(SDC)。

智能动力混凝土也可以称作低强度等级的自密实混凝土。它是对已被广泛认可的自密实混凝土(Self-Consolidation Concrete, SCC)的完善与补充。自密实混凝土是指在浇注过程中无需振捣, 仅依靠混凝土自重就能填充至模板任何角落和钢筋间隙的混凝土。自密实混凝土技术出现于上世纪 80 年代, 并很快在亚洲各地尤其是日本推广开来, 与此同时一些指导工程实践的建议和标准也陆续公布。日本土木工程师协会在《自密实混凝土应用指南》中提出自密实混凝土有三种类型: 粉末型(P)、粘度剂类型(V)以及混合型(C)^[3]。其中粉末型要达到自密实效果主要是通过降低水胶比来获得足够的抗离析性能以及掺加适量的高效减水剂与引气剂来获得必要的流动性。粘度剂类型自密实混凝土要获得自密实效果主要是使用粘度改性剂来达到足够的抗离析性能, 高效减水剂与引气剂同样被使用以获得必要的流动性。该种类型的自密实混凝土通常使用在水下浇筑方面。混合型结合了以上两种技术, 以达到最佳的技术经济性能。

自密实混凝土的优越性得到了广泛的认可, 并成功应用于国内外各类工程项目中, 但通常限于总胶大于 500kg/m³的 C50 以上中高强度混凝土, 仅占混凝土总生产和使用量的很少一部分。按对北京混凝土协会和上海混凝土协会 2007 年产品强度分布看, C40 以上只占 15.72%^[2]。国内外学者就低标号自密实混凝土进行了大量的卓有成效的研究^[4-5], 但由于受到实际混凝土生产原材料质量, 生产管理与控制水平, 及外加剂敏感性等诸多因素的限制, 自密实混凝土在低标号混凝土中的应用一直没有实现广泛推广。商品混凝土是迄今为止主要的混凝土生产形式, 其中 70~80%甚至 80%以上的商品混凝土强度等级为 C25~C35, 这个强度等级的混凝土性能的改善和施工技术的进步, 对整个混凝土行业的发展具有广泛而深远的影响。智能动力混凝土的成功推广与应用, 必将会提升混凝土生产和使用行业的整体技术进步。

2 SDC 解决方案的提出

2.1 SDC 设计理念

通常认为，混凝土的自密实性能只能通过使用高效减水剂和大量的粉体材料来实现，因此在大多数人眼中 SCC 属高端产品，只能用于高强度等级的混凝土，或有特殊设计要求的异形混凝土结构的浇注。其次，SCC 与普通混凝土不同，需要专门的检测方法来评价它的综合性能，以及严格的生产管理来保证其质量。由于我国目前的 SCC 技术水平良莠不齐，生产应用中存在诸多不确定性，造成了很多人对 SCC 性能和性价比表示怀疑，阻碍了其在更大应用范围的推广。另外，聚羧酸高效减水剂是配制自密实混凝土的主要减水剂，其优异的减水与保坍性能已被广泛接受，但当被用于低标号混凝土时，其对用水量及集料质量波动的过渡敏感，使混凝土生产商望而却步。事实上，当商品混凝土生产商遇到低标号自密实混凝土的技术要求时，通常的做法是提供高于设计强度的自密实混凝土，因而导致自己的成本增加，因为此时混凝土需要提高胶凝材料的用量来满足自密实性能要求。

为了解决低强度等级混凝土的自密实及聚羧酸减水剂在低标号混凝土中应用的敏感性问题，BASF 提出了 SDC 的概念和解决方案，即用较低的胶凝材料来配制自密实混凝土（总胶凝材料用量低于 380 kg/m^3 ，甚至可能低于 350 kg/m^3 ）以取代 C25~C35 的普通商品混凝土。与通过提高强度等级而配制的自密实混凝土相比较，可以节省胶凝材料用量 ($50\sim 100 \text{ kg/m}^3$)，最终降低原材料成本。这就需要一种粘度改性剂，能够改善水泥砂浆的流变学性能，即适当增加塑性粘度，但不显著影响混凝土流动性（低屈服值）。保证低标号自密实混凝土匀质性的同时具有良好的流动性。配比中水泥及其它掺和料用量取决于强度等级、耐久性暴露条件以及水灰比，总胶凝材料的用量不以改善自密实性为目的。最后，也是最重要的一点，就是该粘度改性剂的最佳掺量范围要相对宽泛，不能对用水量和原材料质量的波动过于敏感，否则会增加实际生产应用过程中质量控制得压力和难度。基于此，BASF 的科研人员比较分析了各类粘度改性剂的特点，设计并合成了一种新型的粘度改性剂 RheoMATRIX[®]，并开发了 Glenium[®] 6000 SDC 系列高性能减水剂产品。

2.2 SDC 设计思路

SDC 是针对量大面广的低标号混凝土的新技术，考虑到实际混凝土生产原材料的多样性和质量波动的频繁性，综合成本控制、使用习惯等市场因素，在中国的推广应用，我们选择就地取材，以常规掺加萘系减水剂的一般工作性 C30 混凝土为参照。首先，我们确定了技术目标和参数，即：胶凝材料总量不大于 380 kg/m^3 ，强度发展与参照混凝土相当或略高，初始扩展度为 $600\sim 700\text{mm}$ ，且不离析、不泌水，T50 值小于 12s，1hr 后扩展度大于 600mm ，且和易性良好。其次，与同样材料配制的同等强度的参照混凝土比较，相应的 SDC 的单方成本增长控制在 10% 以内，但成本应低于通过提高胶材用量来满足相同应用的自密实要求的混凝土。

为了更精细化的控制 SDC 成本，并充分发挥 Glenium[®] 6000 SDC 系列外加剂的减水与早强优势，在配比优化中，尽量减少水泥用量，相应增加粉煤灰与矿粉的取代率，适当地降低水灰比，提高砂率。调整的幅度视原材料条件而定，外加剂的配方也会因材料的变化而变化，最终实现各项性能的平衡，实现技术经济性能的最大化。

3 SDC 试验与测试

3.1 测试标准与测试方法

胶凝材料总量不大于 380 kg/m^3 ，3 天、7 天和 28 天强度发展与参照混凝土相当或略高，初始扩展度为 $600\sim 700\text{mm}$ ，且不离析、不泌水，T50 值小于 12s，1hr 后扩展度大于 600mm ，且和易性良好。在掺和料的使用量高出相关标准的规定比例时，根据需要测试抗碳化、抗渗和收缩性能，特殊情况下建议测试弹性模量、徐变和抗冻融性。

测试方法参照 GB/T50081—2002《普通混凝土长期和耐久性能试验方法》，CECSC203: 2006《自密实混凝土应用技术规程》和 CCES02—2004《自密实混凝土设计与施工指南》。

3.2 原材料性能

水泥：海螺 P.O 42.5 水泥，标准稠度用水量 28.4%。

矿粉：宝田 S95 矿粉，主要性能指标见表 1。

表 1 矿粉的主要性能指标

流动度比 (%)	活性指数 (%)		比表面积 (m ² /kg)	密度 (g/cm ³)	含水量 (%)	SO ₃ (%)
	7D	28D				
105	82	110	415	2.9	0.1	0.12

粉煤灰：石洞口 II 级灰。

细骨料：中砂 (F.M. = 2.59)，其颗粒级配见图 1。

粗骨料：5-20 mm 碎石，其颗粒级配见图 2。

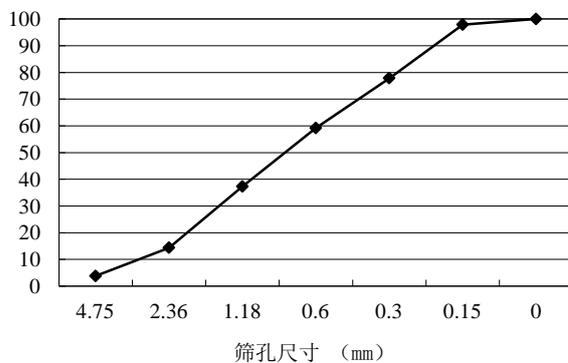


图 1 细骨料颗粒级配图

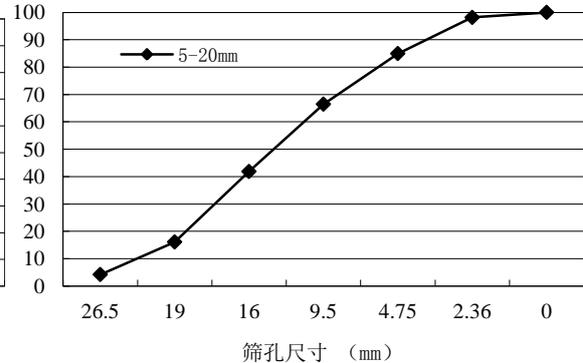


图 2 粗骨料颗粒级配图

外加剂：BASF 外加剂，高性能减水剂 Glenium® 6000 SDC 系列，减水率不低于 20%；萘系中效减水剂 LN800N，减水率不低于 12%。

3.3 试验配比

本试验意在对比两种不同类型的混凝土（即智能动力混凝土与传统振捣混凝土）的相关性能，通过前期试验，确定混凝土配合比如下（表 2）。

表 2 混凝土配比

单位：kg/m³

原材料	水	水泥	矿粉	粉煤灰	细骨料	粗骨料	外加剂
SDC	170	180	50	130	880	880	Glenium® 6000 SDC-1.0%
TVC	180	200	70	80	792	916	LN800N-1.6%

4 结果与讨论

4.1 新拌混凝土的性能

本实验观察了 SDC 与传统振捣混凝土 (TVC) 在新拌状态下的相关性能。由表 4 可见，TVC 初始扩展度为 375mm，1hr 后扩展度基本消失，坍落度与扩展度保持能力较差。这是因为在该类混凝土中主要使用了萘系减水剂，而该类减水剂坍落度保持能力较差。与之对比，SDC 初始扩展度为 605mm，1h 后扩展度依然达到 600mm，具有较强的保坍能力。Glenium® 6000 SDC 外加剂的掺入使得混凝土的粘度有所增加，SDC 无泌水、离析现象，但同时混凝土的流动状态依然较好，T50 流动时间初始为 7s，1hr 后为 10s。由于胶凝材料用量的下降，SDC 的凝结时间较 TVC 有所延长。因此就混凝土新拌状态而言，SDC 明显好于 TVC。

表 3 新拌混凝土性能

		SDC	TVC
坍落度 (mm)	初始	235	215
	1h	220	10
扩展度 (mm)	初始	605	375
	1h	600	---
T50 (s)	初始	7	---
	1h	10	---
含气量 (%)	初始	4.6	3.5
凝结时间 (h: min)	初凝	10: 15	9: 10
	终凝	13: 00	12: 10

4.2 抗压强度

图 3 为两种不同类型的混凝土抗压强度对比示意图。由图可见，TVC 的 3d 与 7d 抗压强度均略高于 SDC，但随着养护时间的延长，SDC 的强度发展速度加快，其 28d 的抗压强度已经超过 TVC，这可能时因为 SDC 的粉煤灰用量较高，强度发展较慢，但随着时间的延长，掺合料二次反应开始显现，同时 SDC 由于使用了新型外加剂，混凝土水灰比下降，从而也会是强度增加。若要进一步提高 SDC 的早期强度，可以再适当的增加水泥用量或降低水灰比,具体的配比优化方案视实际需要而定。

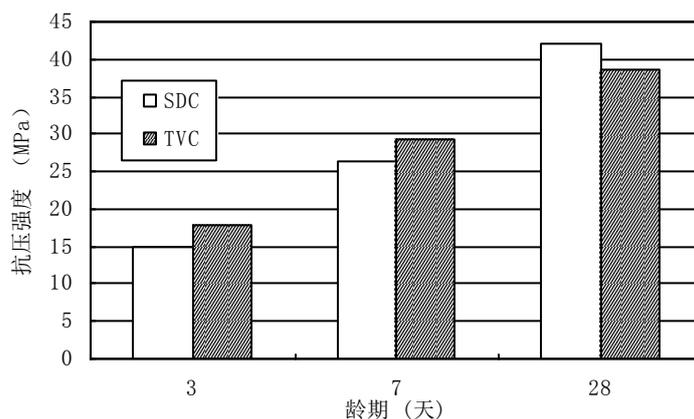


图 3 混凝土抗压强度

4.3 收缩性能

图 4 是混凝土过筛的砂浆收缩性能图。由图可见与 TVC 相比，SDC 的收缩性能有显著改善，这是因为 Glenium 6000 SDC 本身有一定的减少收缩性能，另外，在 SDC 配合比中减少了水泥用量，而掺合料用量有所增加，尤其是粉煤灰掺量的增加会降低混凝土的收缩，还有，用水量的下降也有利于混凝土收缩性能的改善。

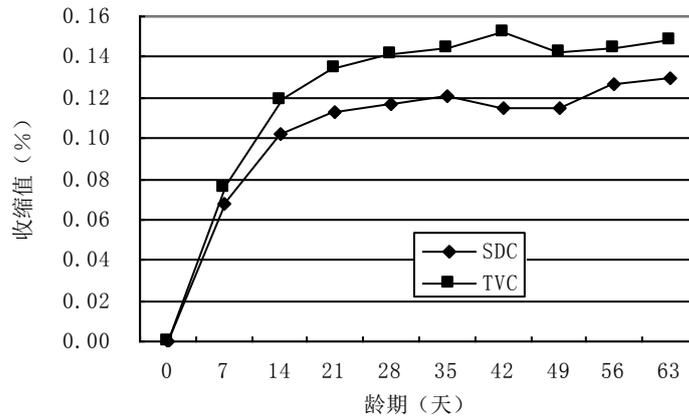


图 4 砂浆收缩对比图

4.4 弹性模量

图 5 是混凝土静力弹性模量示意图。由图可见 SDC 的弹性模量与 TVC 基本相同，虽然此时掺合料的增加可能会导致弹模下降，但是高效减水剂的使用使混凝土水灰比下降，从而间接弥补了混凝土弹性模量的损失。若在 SDC 配合比中继续增加粉煤灰的掺量可能会导致弹性模量的下降，因为混凝土作为非均质多相材料，其主要组分的密度与所占体积的百分比以及过渡区的特性决定其弹性特征，当大掺量粉煤灰时，单位体积的混凝土密度降低，因而可能会使弹模减小。

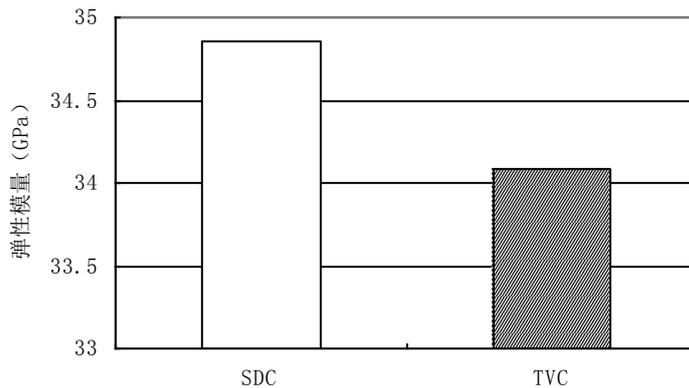


图 5 混凝土弹性模量图

5 结论

(1) 商品混凝土是迄今为止主要的混凝土生产形式，而其中 70% 以上的商品混凝土为低强度等级混凝土，为了解决这种低强度等级混凝土的自密实及聚羧酸减水剂在低标号混凝土中应用的敏感性问题，BASF 提出了智能动力混凝土 (SDC) 的概念和解决方案。

(2) 智能动力混凝土 (SDC) 通过优化混凝土配合比，使混凝土材料总成本与普通振捣型混凝土相当，但性能优势明显。

(3) 以 BASF 的 RheoMATRIX® 外加剂新技术为主导的智能动力混凝土 (SDC)，其新拌混凝土性能优于普通系混凝土，与更高胶材用量的自密实混凝土性能接近。

(4) 智能动力混凝土 (SDC) 的早期强度与普通混凝土相当，28 天强度略高于普通混凝土，Glenium 6000 SDC 通过直接和间接的双重抗收缩作用，使混凝土的收缩性能有一定的改善，弹性模量与传统振捣混凝土相近。

参考文献:

- [1] 2008 年中国各省市商品混凝土产量, 中国混凝土网.
- [2] 崔源声. 08 年中国混凝土市场分析及前景预测, 建筑材料工业技术情报研究所.
- [3] Recommendation for Self-Compacting Concrete – Japan Society of Civil Engineers, Tokyo, Japan, August 1999.
- [4] Mario Corradi. A new Viscosity Modifying Agent (VMA) for low fines content Self-Consolidating Concrete (SCC), Proceedings of the 2nd International Symposium ON Design, Performance and use of Self-Consolidating Concrete SCC's 2009, Rilem, Beijing, China, June 2009, P. 246-254.
- [5] 杨静. 低强度自密实混凝土及其收缩性能的试验研究[D], 河北农业大学, 2008.