

关于水泥混凝土发展方向的几点认识

唐明述

(南京化工大学, 南京 210009)

[摘要] 根据在加拿大观察到的重大混凝土工程破坏实例, 反复强调我国在基建工程中必须十分重视耐久性问题。为实现可持续发展, 应逐步将水泥工业转变为“绿色胶凝材料工业”。阐述了根据混凝土的技术进步重新审议水泥的标准与组成。最后建议把水泥的生产、流通与使用协调起来, 以获得更大的经济和社会效益。

[关键词] 水泥; 混凝土; 耐久性; 分类; 混合材; 标准

[中图分类号] TQ172.71; TU528.45 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2002)01-0041-06

2000年我国水泥产量已达 5.97×10^8 t, 占全世界总产量的1/3以上。以每 m^3 混凝土平均用水泥250 kg计, 混凝土用量将达 $24 \times 10^8 m^3$, 约需集料 $40 \times 10^8 \sim 50 \times 10^8$ t。这与世界上与任何国家相比都是遥遥领先的。西方国家从1965年以来建筑业一直走下坡路。他们重点发展的是信息产业和高科技工业。但我国情况不同, 必须在信息产业等方面赶上同时重视基础农业、基础工业和基础设施。在未来20~30年内我国将新建大量的公路、桥梁、港口、机场、隧道、大坝以及满足城市化的设施建设。因此对水泥的需求将持续增长。当前既要吸收国外的先进经验和技木, 同时也要吸取他们的教训。在大规模建设的实践中, 我们有必要也有可能出现大量创造性的新成就, 反过来也可对其他国家产生一定的影响。

1 必须反复强调要“重视耐久性”

现在最热门话题是执行可持续发展。大家一致认为这是21世纪世界各国的重要任务。就水泥工业而言, 在生产过程中尽量节约资源、能源, 保护环境虽是十分必要, 但应注意其局限性。以能耗而言, 要把熟料热耗从700 kcal/kg (约3 000 kJ/kg)

再往下降, 难度很大。改变矿物组成(如降低 C_3S 含量, 增加 C_2S 含量)最多也只能减少15%左右热耗和 CO_2 排放量, 而同时要设法补偿 C_3S 的早强特性, 并非易事。相比之下若能延长混凝土建筑物的寿命, 譬如提高1倍, 则相应地资源、能源、资金和对环境污染的影响就减少一半。若能将寿命提高5~6倍, 则获益也将成倍增长。因此应将提高混凝土工程的耐久性作为执行可持续发展方针的最关键措施。

国外的经验教训十分值得注意。根据美国的最新资料^[1]表明, 在今后20年内, 美国每年用于混凝土基建工程的维修费用将高达750亿美元。若再加上重建和新建, 则每年基建工程的费用可达数千亿美元。国内情况也是十分惊人的。机场道面有在10年之内严重破坏的。水泥混凝土公路有在3~5年内损坏的。立交桥、港口、码头短寿命工程者也为数不少。近来国外专家已反复强调必须重视耐久性, 提出桥梁寿命应按125年设计, 公路路面应有40年寿命。我们一定要想方设法将重大混凝土工程的寿命提高到100年以上, 力争20~30年内不大修, 为此建议国家立项综合研究“基础设施百年工程战略规划”。

[收稿日期] 2001-07-16

[作者简介] 唐明述(1929-), 男, 四川安岳县人, 中国工程院院士, 南京化工大学材料与工程学院教授

现再以作者亲自考察的实例来说明重大混凝土工程耐久性的重要性。2000年6月作者参加了加拿大魁北克城召开的第十一届国际碱集料反应(alkali-aggregate reaction, AAR)会议。会后考察了魁北克和蒙特利尔地区混凝土工程遭受AAR的破坏情况。这包括公路桥梁、隧道、输电塔基础、船闸、大坝以及蒙特利尔的奥林匹克中心。现仅介绍其中3例。

1) 魁北克城的 Vallon-Charest 公路跨线桥 该桥建于1966年。混凝土芯样的岩相分析证实,所用粗集料为魁北克城区典型硅质石灰石活性集料。这座桥是魁北克城区所有混凝土工程破坏最引人注目的典型事例之一。特别值得注意的是,过去在该地区所发现的破坏仅限于构筑物中受干湿循环和冻融循环的构件,但此桥所有构件均遭严重的AAR破坏,虽然程度有所不同(见图1)。

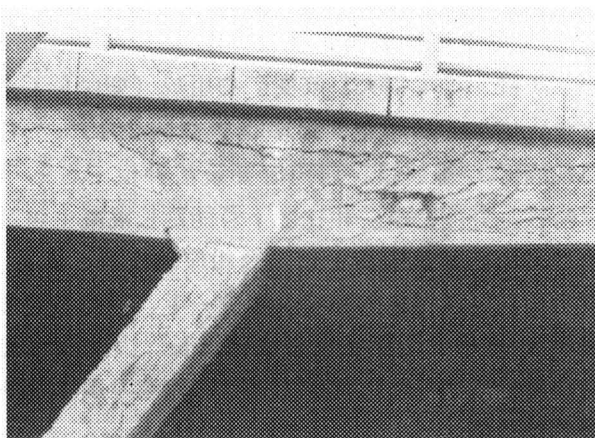


图1 Vallon-Charest 公路桥的开裂破坏

Fig.1 The cracking and deterioration of Vallon-Charest highway bridge

2) St-Lambert 船闸 该船闸建于1956~1959年,位于魁北克省圣劳伦斯河东部的通海道,蒙特利尔港与 St-Francois 湖之间。AAR 是船闸开裂的主要因素。在建成后约20年,即70年代中期发现最明显的AAR特征,走向位移记录以及肉眼观察到表面开裂均与AAR的特征相一致(见图2)。岩相检测证明,粗集料90%为黑灰色活性硅质石灰石和10%的辉绿岩。混凝土中碱的质量浓度 $\rho_{\text{碱}}$ 为 $3.03\sim 4.84\text{ kg/m}^3$ 。由于AAR引起的破坏不得不进行机器的重新安装和修补,到1999年已用去250万加元。

3) 博赫尔洛依斯水电站 (Beauharnois Power

Station) 位于蒙特利尔西南约40 km处,在魁北克的 Melocheville, 处于 Saint-Francois 湖和 Sint-lodxis 湖之间。它是加拿大东部最大的发电站之一,同时也是对AAR研究最多的工程。作者曾于1986年考察过,这是第二次考察。电站总装机容量为 $167.3\times 10^4\text{ kW}$ 。该电站从1940年起一直在修补,预计今后的维修费将达15亿加元。图3所示为厂房的加固。

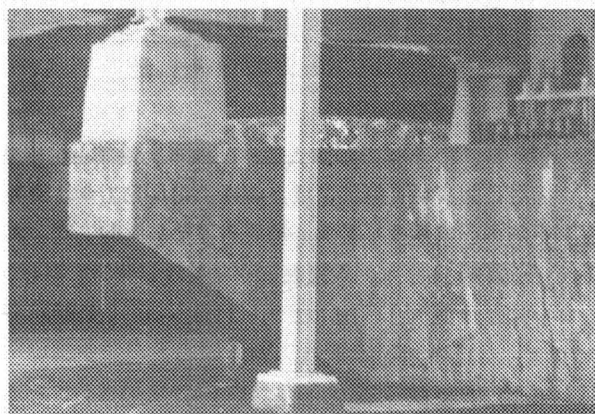


图2 St-Lambert 船闸的开裂

Fig.2 The cracking of St-Lambert ship lock

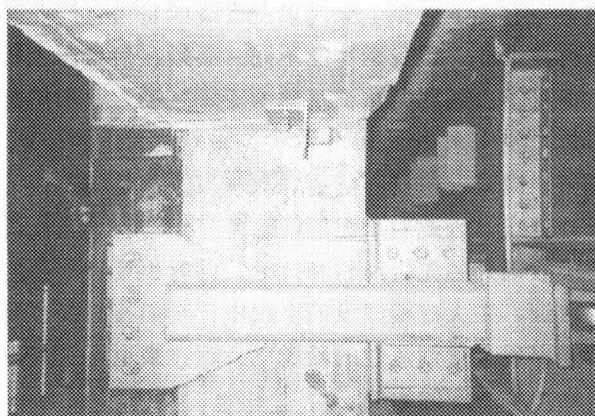


图3 厂房构筑物因AAR而位移不得不重新加固

Fig.3 The factory building was reinforced due to displacement caused by AAR

从以上实例可看出问题的严重性。当前我国的建设规模正从蓬勃发展走向高峰,应从国外若干混凝土工程的破坏实例中吸取教训。否则沉重的维修费将不是我们本不富裕的发展中国家所能承受的。

2 水泥的分类

前几年我国下大功夫改革水泥的试验方法，使之与国际接轨，以迎接加入WTO的到来，这是非常必要的和正确的。作者建议水泥的分类也必须和国际接轨，取消“普通硅酸盐水泥”这一名称。理由如下：

1) 首先回顾一段历史。实际上到现在为止，除国外世界各国均无“普通硅酸盐水泥”这一名词。而通称波特兰水泥 (Portland cement)。在解放初期，传说前苏联将把波特兰水泥改为硅酸盐水泥，我们就改为硅酸盐水泥。但后来，前苏联并未改，而我国却沿用至今，成为世界上唯一称硅酸盐水泥的国家。“普通硅酸盐水泥”一词按意译即相当于国外的普通波特兰水泥 (ordinary Portland cement)。但在西方国家普通波特兰水泥中是不掺混合材的。我国则在50年代学习前苏联，在其中允许掺入质量分数不超过15%的混合材，并一直沿用至今。实际上无论是实验室研究或生产实践均证明掺加 $w_{\text{混合材}} = 15\%$ ，对水泥的所有性能并无突出影响。我国几十年的实践也证明了这一点。但近10~20年来，混凝土工业最显著的变化是广泛采用减水剂和发展商品混凝土。近年来我国商品混凝土站采用磨细掺合料（主要是矿渣和粉煤灰）的越来越多。掺量甚至高达 $w_{\text{混合材}} = 20\% \sim 30\%$ 以上。而混凝土工作者往往不太注意普通硅酸盐水泥中已掺有质量分数为15%的混合材。这样一来若原水泥中掺有 $w_{\text{粉煤灰}} = 15\%$ ，再在商品混凝土站掺 $w_{\text{粉煤灰}} = 15\% \sim 30\%$ ，则力学行为和其他性能将有显著变化。特别是有可能增大混凝土的干缩，并因而造成早期开裂。但若原水泥中掺的是质量分数为15%的矿渣，再在商品混凝土中掺粉煤灰则性能变化要小得多。双掺是有利的，这已由相关研究工作和生产实践经验证明了的。因此标明原有水泥所掺混合材的品种和数量是十分必要的。混合材品种不同对外加剂的适应性也不相同。在广泛采用减水剂和超塑化剂的今天，让混凝土使用者充分了解原水泥的组成和性能，特别是混合材的品种和数量是大有裨益的。不标明混合材的品种，通称为普通硅酸盐水泥对使用及提高混凝土施工性能和耐久性都是不利的。

2) 近年来国内外都推崇在水泥混凝土中掺填充性混合材，主要是石灰石粉，掺量甚至可达质量

分数20%~35%。最重要的是在我国普通硅酸盐水泥的标准中规定可掺入质量分数10%以下的非活性混合材，即可以掺入 $w_{\text{石灰石粉}} = 10\%$ 。这在一般使用情况下问题不大。但近几年研究证明^[2]在有石灰石粉存在的情况下，当混凝土用于低温潮湿有硫酸盐腐蚀的环境中，可生成碳硫硅钙石 (thaumasite, $\text{Ca}_3\text{Si}(\text{CO}_3)(\text{SO}_4)(\text{OH})_6 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ，又名硅灰石膏、风硬石)，导致混凝土破坏。故法国规定在这种条件下，不得使用掺石灰石粉质量分数高于5%的水泥。当我们把掺量 $w_{\text{石灰石粉}} = 10\%$ 的水泥通称为“普通硅酸盐水泥”时，使用者根本不了解混合材的品种和数量，也就无法进行选择。

3) 更为严重的是，近年来有的水泥厂将多掺混合材作为获取利润的一种手段。由于普通硅酸盐水泥的价格高于矿渣硅酸盐水泥和粉煤灰硅酸盐水泥，有的厂的掺量 $w_{\text{混合材}} > 15\%$ ，甚至大于20%~25%的仍以普通硅酸盐水泥出售。且混合材掺量这一标准规定一般为人们所忽视，若在这种情况下，再在商品混凝土站掺质量分数20%~30%的磨细掺合料，而不采取措施，必然造成混凝土工程质量低劣。当前我国水泥产量为 $5.97 \times 10^8 \text{ t}$ ，具有世界前所未有的规模巨大的基本建设，因此对这一问题必须引起高度重视。

4) 反观国外标准，如表1所示为德国标准^[3]，无论是矿渣、粉煤灰、石灰石、烧页岩掺入质量分数量为6%~20%，从其代号中均可一目了然。事实上欧洲标准和日本标准都有这样的特点。

根据以上理由，建议取消“普通硅酸盐水泥”这一名称。无论混合材掺量为多少均应通过对水泥的命名与代码让混凝土使用者了解其品种和掺量。若能得到大多数人的同意，最好将硅酸盐水泥改为波特兰水泥，以便与国际接轨。

3 把水泥工业转变为“绿色胶凝材料工业”

国外学者 Aitcin^[4]写了一篇综述，题为“昨天和今天的水泥，明天的混凝土”。文中提出21世纪水泥工业应改名为水硬性胶凝材料工业，而且应是一种绿色工业。这一概念可能是极重要的。水泥和混凝土堪称为世界上耗用量最大的材料，在我国尤其如此。从可持续发展的战略出发，水泥工业有着特殊重要的作用。水泥工业耗用大量能源、资源，排放 CO_2 、 SO_3 、 NO_x 和粉尘，这对可持续发展和

环保是十分不利的。但另一方面无论是在水泥的生产过程或混凝土的使用过程,都是处理工业废渣(甚至有些是有毒的)有可能达到巨量的工业,是很值得发展的领域。例如当水泥厂用污泥或有害废渣为原料时,这一过程本身就有利可图,还不计成

品的使用价值在内。在水泥和混凝土中尽可能多地掺用工业废渣,不仅保护环境,还能改善性能,这将是今后长期奋斗的目标。但在生产和使用过程中要注意以下几个问题。

表1 德国水泥的分类和组成

Table 1 Classification and component of cement in Geproary

w/%

类型	名称	缩写代码	熟料	矿渣	天然火山灰	硅质粉煤灰	烧页岩	石灰石	次要组分
I	波特兰水泥	I	95~100						0~5
II	波特兰矿渣水泥	II/A-S	80~94	6~20					0~5
		II/B-S	65~79	21~35					0~5
	波特兰火山灰水泥	II/A-P	80~94		6~20				0~5
		II/B-P	65~79		21~35				0~5
	波特兰粉煤灰水泥	II/A-V				6~20			0~5
	波特兰烧页岩水泥	II/A-T	80~94					6~20	0~5
		II/B-T	65~79					21~35	0~5
	波特兰石灰石水泥	II/A-L	80~94					6~20	0~5
波特兰粉煤灰矿渣水泥	II/B-SV	65~79	10~20		10~20				
III	高炉水泥	III/A	35~64	36~65					0~5
		III/B	20~34	66~80					0~5

1) 使用分流。一般说来,多掺混合材,早期强度要降低,这对加快施工速度,提高模板使用周期是很不利的。这也是有的工程乐于使用不掺混合材的硅酸盐水泥的主要原因。但特别应注意的是有的工程,如堤坝等并不需要早强。故分流使用将各得其所。早强高的水泥多用于建筑工程,其他,如农田灌溉、堤坝等工程就可以使用早强不高而后期强度高的水泥。

2) 转变观念。我们决不能把所有早强不高的水泥一律称之为低劣水泥。目前水泥的品质主要根据28天之内的强度划分成不同的等级。这对纯硅酸盐水泥是正确的。因为这种水泥在28天之内水化程度可达75%~90%,即化学能转变为机械强度的过程已基本完成。但是对于掺混合材的水泥或混凝土,28天之后强度还可大幅度增加。这样仅根据28天之内的强度来定标准、评优劣是很不科学的。所以现在有的大坝工程就以90天或180天的强度作为评定指标。我们应设法使28之后的强度高低也与经济价值关联起来。

3) 大掺量混合材宜逐步推广。现在国内主张采用大掺量混合材的文章很多,意图是好的。但在

工程中应用一定要注意使用条件。特别要注意在水泥中掺加大量混合材后,化学反应速度显著减慢,冬季尤为显著,必须加强养护。其次国外的很多文章证明大掺量是十分有利的,但其试验条件是长期湿养护,并掺有高效减水剂,使水灰比大幅度降低。没有这些条件,盲目强调多掺,很容易出问题。目前很多大型工程对高掺有顾虑,不是没有道理的。正如上面所述,特别还应注意的是,我国普通硅酸盐水泥中已掺有一定量的混合材,一定要注意它的叠加效应。

4 水泥标准、组成与混凝土的技术发展

水泥标准主要是为混凝土应用而制定的。因此水泥工作者必须了解混凝土工程的新进展。近年来混凝土领域最突出的变化是广泛使用减水剂和高效减水剂,使水灰比大幅度降低,甚至达0.3~0.4以下。其次是在商品混凝土站和大型工程中大量使用磨细掺合料,主要是矿渣、粉煤灰,硅灰也有少量应用。这些措施使我们不得不重新思考水泥的标准如何适应这种新的变化。下面将举例分别予以说

明。

1) SO_3 含量。在国标中所有水泥的 SO_3 质量分数规定不得超过 3.5%，只有矿渣硅酸盐水泥规定不得超过 4.0%。之所以限制 SO_3 的含量，主要是防止后期形成钙矾石引起膨胀开裂。在水泥生产过程中掺入石膏主要是调节凝结时间，同时适量的石膏也可提高强度。且对不同的水泥，最适宜的石膏掺量还有所不同。现在的问题是当我们在混凝土搅拌站掺入大量掺合料，如矿渣和粉煤灰（譬如掺 $w = 30\% \sim 50\%$ ），则应有相应的石膏量与之相配合。或许通过试验可确定获得最佳性能时混凝土中最宜石膏掺入量。

2) 游离 CaO 。在国标中对用于大坝、道路、抗硫酸盐腐蚀工程的水泥规定游离 CaO 的质量分数应小于 1.0% 或甚至 0.8%。从理论上讲，控制游离 CaO 越低越好，因为 1% 的游离 CaO 就相当于减少 4.07% 的 C_3S 。若熟料中存在质量分数为 3%~5% 的游离 CaO ，就等于是大量浪费热量并大大减少对强度最有利的 C_3S 的量。但是若就性能而言，当用纯硅酸盐水泥进行对比试验，游离 CaO 为 1.2% 和 0.8% 的水泥，性能可能是有差异的。但在大坝用水泥中，常常掺入 $w_{\text{粉煤灰}} = 20\% \sim 30\%$ ，在这种条件下，游离 CaO 质量分数为 1.2%（或 1.5%）和 0.8% 的水泥，究竟性能有多大差异？此外，还应了解把游离 CaO 限制过严，工厂往往难于做到。特别是现在，即使是道路混凝土或抗硫酸盐水泥混凝土，都在研究掺入一定量的混合材或掺合料。因此这一指标值得重新审定。

3) MgO 含量。国标规定熟料中 MgO 质量分数不得超过 5.0%，压蒸合格可放宽到 6.0%。限制 MgO 含量主要是防止后期膨胀引起开裂。在这里首先要回顾一下为防止碱集料反应限制水泥碱含量的标准。开始时一致认为限制水泥中碱的质量分数低于 0.6% 是最好的预防措施。但其后发现水泥在混凝土中的配合比变化很大，可以从 100 kg/m^3 ，直到 600 kg/m^3 。若水泥碱含量相同，水泥用量不同，混凝土中碱含量将显著不同，故近来一致认为限制混凝土中碱含量为 3 kg/m^3 更为合理。

虽然 MgO 的情况与碱集料反应不好类比，膨胀机理和过程也不相同。但确也存在这样一个问题：在水泥用量差异悬殊的情况下， MgO 的限量是否应该相同？能否在这方面做点工作，探讨是否可以直接用混凝土试验来限定 MgO 的极限含量。

4) 水泥的 C_3S 含量和细度。最近我国修改标准，使水泥试验方法与国际标准接轨，发现我国水泥强度明显偏低。因而众多文章认为应提高水泥的 C_3S 含量和细度。看来这在一定程度内是必要的。但我们也应该注意另外一个趋势。国外较多专家认为增加 C_3S 含量和细度，虽能提高早强，但对混凝土的耐久性并无好处。而要提高混凝土的早期强度，也不一定需要 C_3S 含量高和增加细度，依靠掺高效减水剂减少水灰比也能达到这一目的^[4]。所以在发展高 C_3S 含量和细度的同时，也不应忘记其负面影响。

综上所述，我们一定要注意，从严格意义讲，水泥只是半成品，最终形成的混凝土或构件才是真正使用的产品。水泥工作者一定要了解混凝土的发展现状和发展趋势。为此提出以下建议：

1) 协调水泥的生产、流通与使用。当前很多水泥厂组成大型集团公司。这是市场经济发展的必然结果。但希望这一趋势能进一步延伸，使水泥集团公司与混凝土公司相结合，或水泥集团公司与商品混凝土站或大型工程相结合。这将从技术和经济两方面均可获得极大好处。例如当前大力推广应用高掺量粉煤灰混凝土，在工程中掺入的质量分数可高达 35% 以上。但在水泥厂中，掺入 $w_{\text{粉煤灰}} > 25\%$ ，早强就很难达标。还应注意在水泥厂测试时水灰比是固定的，而在混凝土应用中已广泛推广应用减水剂，可大幅度降低水灰比。在这种情况下，究竟生产什么样的水泥最有利，应该根据混凝土的技术发展和需要来确定。否则就是人为设置障碍，而出现可以使用高掺量粉煤灰混凝土，却无法生产高掺量粉煤灰水泥。

优质外加剂也存在与水泥的匹配问题，大型集团最好也包括外加剂厂和集料供应站。当前集料供应很不规范，非法采砂问题严重。供应完全合格的砂、石材料是提高混凝土耐久性的重要措施。

2) 水泥的研究要与混凝土的技术进步相结合。水泥发明一百余年来，由于水泥化学家的艰苦努力，现在已充分了解熟料中各矿物的作用和性能，并依靠调整矿物组成生产出早强水泥、抗硫酸盐水泥等。但最重要的是我们现在来考虑改变矿物组成以适应混凝土工程的需要时，一定要考虑到这种需要是改变矿物组成合算还是改变混凝土的配合比、组成或采用外加剂合算。切忌停留在用纯硅酸盐水泥的对比研究中。例如用增加 C_2S 含量、减少 C_3S

含量的办法来减少生产过程中 CO_2 的排放量和提高耐久性的研究。若用纯硅酸盐水泥进行对比, C_2S 含量高的水泥肯定 CO_2 的排放量减少和耐久性有所提高。但若用混凝土对比, C_3S 含量高可多掺混合材, 在这种情况下究竟什么样的方案有利就需要反复试验来进行对比了。特别还应考虑到减水剂对混凝土的巨大影响, 这在水泥厂的标准试验中是反映不出来的。这里特别要提到 Powers^[5] 的名言: 相同的化学成分, 可形成不同的物理结构, 意即水泥石的性能主要决定于物理结构。在第七届国际水泥化学会议上已提出混凝土的密实程度对耐久性的影响比矿物组成的影响大得多。特别是近年来采用超塑化剂, 水灰比可降到 0.2~0.3。在高掺量混合材及低水灰比的情况下, 熟料矿物组成的影响程度及意义值得重新评估。应反复强调的是不能仅靠纯硅酸盐水泥来进行对比和下结论。

参考文献

- [1] Bognack C J, Malsano J, Baumann W C. Spending dollars effectively[A]. Concrete International[C]. 2000, September, 51~55
- [2] Harshorn S A, Sharp J, Swamy R N. Reply to the discussion by J. Bensted and J. Munn of the paper "Thaumate formation in Portland-limestone cement pastes"[J]. Cement and Concrete Research, 2001, 31(3), 513
- [3] Zement, Taschenbuch 2000, 49. Ausgabe, Verein, Deutscher Zementwerke e. v., Dusseldorf, Mai, 2000
- [4] Aitcin Pierre-Claude. Cements of yesterday and today, Concrete of tomorrow[J]. Cement and Concrete Research, 2000, 30, 1349~1359
- [5] Taylor H F W. The Chemistry of Cements[J], Academic Press, 1964, 392

Some Considerations on the Developments of Cement and Concrete

Tang Mingshu

(Nanjing University of Chemical Technology, Nanjing 210009, China)

[Abstract] According to the cases of deterioration of big concrete structures investigated in Canada, it was repeatedly emphasized to pay attention to durability. In the respect of cement classification it was suggested to cancel "ordinary silicate cement". The cement industry should be gradually changed to "green industry of cementitious materials". The standards and compositions of cement should be reviewed on the basis of technical advances of concrete. Finally it was suggested to bring the production, circulation and utilization of cement into line in order to obtain great economic and social benefits.

[Key words] cement; concrete; durability; classification; standard