

混凝土抗裂能力的评价

李光伟

(国家电力公司成都勘测设计研究院科学研究所, 四川 成都 610071)

摘要:分析影响混凝土抗裂能力的主要因素,包括混凝土的强度、弹性模量、徐变、线膨胀系数、水化温升和自身体积变形等,提出以混凝土的荷载变形与自由体积变形的比值——抗裂变形指数作为评价混凝土抗裂能力的相对指标,并对各种人工骨料混凝土的抗裂能力进行评价。

关键词:混凝土;抗裂性能;骨料;变形指数

中图分类号:TU528

文献标识码:A

文章编号:1006-7647(2001)02-0033-04

水工混凝土体积庞大,受自身和周围介质的影响,在温度、湿度变化和周边基础约束的作用下,会产生很大的约束应力,容易产生裂缝。混凝土的裂缝是由多种因素综合作用的结果,它包括外荷载所产生的拉应力;混凝土硬化时的干燥收缩及自缩受到约束产生的收缩应力;混凝土内水化热温升及环境温度变化所引起的不均匀温度变形等。它涉及结构设计、施工工艺及混凝土材料等许多学科。近年来,许多工程为防治混凝土产生裂缝采取了很多措施,取得了不少的经验。但如何评价混凝土的抗裂性能亦即混凝土抗裂性能指标应该如何确定,还有不同的看法。因此制定一个合理的混凝土抗裂性能评定指标,对混凝土的抗裂性能进行评价,以便更有效地提高混凝土抗裂能力,防止混凝土裂缝是十分必要的。

1 影响混凝土抗裂能力的因素

a. 混凝土的抗拉强度。混凝土的抗拉强度是大体积混凝土抗裂性的重要指标,它主要是由水泥浆的抗拉能力及水泥浆与骨料的胶结能力组成,混凝土的抗拉强度越高,其混凝土的抗裂能力越强。

b. 混凝土的弹性模量。混凝土的弹性模量是指混凝土产生单位变形所需要的应力。混凝土的弹性模量取决于骨料本身的弹性模量及混凝土的灰浆率。混凝土的弹性模量越高,对混凝土的抗裂能力越不利。一般而言,混凝土的拉伸弹性模量比压缩弹性模量略小,使用时可假定两者相同。

c. 混凝土的徐变。混凝土的徐变是指混凝土在持续荷载下随时间推移而产生的变形。混凝土的徐变对混凝土温度应力有着很大的影响,混凝土的徐

变增大,其温度徐变应力将减小,有利于混凝土的抗裂。混凝土徐变与混凝土温度、水泥品种、龄期、粉煤灰掺量及灰浆率有关。混凝土的拉伸徐变一般小于压缩徐变,对于早龄期而言,拉伸徐变为其压缩徐变的0.8左右。

d. 混凝土的线膨胀系数。混凝土线膨胀系数越小,温度变形越小,所产生的温度应力也越小,抗裂能力越高;相反,则抗裂能力越低。混凝土的线膨胀系数主要取决于骨料的线膨胀系数。骨料的线膨胀系数随岩性而变化;以石英质骨料为最大,其次是砂岩、花岗岩、玄武岩和石灰岩,依次减小。一般而言,水泥净浆的线膨胀系数比骨料的线膨胀系数大,因此,水泥用量多的混凝土线膨胀系数一般较大,反之,骨料用量多的混凝土线膨胀系数一般较小。

e. 混凝土的水化温升。混凝土的水化温升是坝块温变的主要因素。水化温升高的混凝土,其与稳定温度之差大,产生的温度应力也大,混凝土的抗裂性则差。影响混凝土水化温升的主要因素是水泥矿物成分、混合材的品质与掺量,混凝土的单位用水量与水泥用量。

f. 混凝土的自身体积变形。混凝土的力学性能,包括强度、弹性模量、徐变等对裂缝产生的影响已为大家共识,自身体积变形对裂缝的影响也越来越受到重视。混凝土的自身体积变形主要取决于水泥中的矿物组成及化学成分,膨胀型自身体积变形有利于防止裂缝,收缩型自身体积变形会給大体积混凝土裂缝带来不利的影响。根据计算,龙羊峡电站混凝土膨胀型的自身体积变形,在基础及先浇块上的混凝土底部可产生0.1~0.7 MPa的压应力;乌江

渡电站混凝土收缩型的自身体积变形,在基础及先浇块上的混凝土底部可产生 0.1~0.7 MPa 的拉应力。由此可见自身体积变形对混凝土抗裂性的影响很大。

2 混凝土抗裂性指标的研究

混凝土抗裂性的评定指标目前已提出了很多,有些指标比较简单,如极限拉伸、拉压比、抗裂度及热强比等,有些则比较繁杂,如抗裂安全系数、抗裂能力指数等。每种指标各有自己的优点,但都存在着种种不足,如混凝土极限拉伸是混凝土受拉临界断裂时的相对伸长,在 SDJ21-78《混凝土重力坝设计规范》中规定,为防止大坝裂缝,温控设计中必须提出混凝土中心受拉的极限拉伸值性能指标。试验研究证明,混凝土极限拉伸值受许多因素影响。在原材料一定的条件下,减小水灰比,增大水泥浆体含量及混合材用量可以提高极限拉伸值。而实际上,这势必增加混凝土的水泥用量而使混凝土发热量增大,温控负担增加。实践证明,极限拉伸值未满足规范要求的混凝土并不一定开裂,极限拉伸值较大的普通混凝土也并不一定比极限拉伸值较小的掺入适量粉煤灰的混凝土抗裂性好,因此,混凝土极限拉伸值仅仅反映了混凝土抗裂性的一个侧面,不能作为全面评定混凝土抗裂性优劣的唯一指标。另外,混凝土抗裂安全系数指标考虑的因素比较全面,也能较好地反映混凝土抗裂性的优劣,但计算繁杂,需要较多的基础资料及条件,如结构物尺寸、基础条件、入仓温度、环境温度及混凝土性能指标等。因此,在选择混凝土配合比阶段,作为评定混凝土抗裂性指标使用不便。

因此,需要选用一个合理的指标来评判混凝土的抗裂能力。前已说明,混凝土的抗裂能力主要由混凝土抗拉强度、弹性模量、徐变、自身体积变形、线膨胀系数和水化温升等因素综合决定。这几种因素有的是独立的,不受别的影响(或影响很小),如线膨胀系数;有的则是相互关联和制约的,如抗拉强度与徐变,提高混凝土抗拉强度有利于混凝土抗裂,但其徐变相应减小,不利于抗裂;同时提高混凝土抗拉强度,势必增加混凝土的水泥用量,使混凝土水化温升相应增高,这也不利于混凝土抗裂,因而混凝土的抗裂能力综合指标应能全面、合理地反映混凝土抗裂能力的各个主要因素。

众所周知,混凝土的特性是多方面的,但就其结构物的破坏条件而言,关键是变形性能。控制混凝土变形的目的就是防止混凝土产生裂缝,以保持结构物的整体性及稳定性。

混凝土的变形一般可以分为荷载变形和自由体

积变形两大类。

a. 荷载变形。混凝土由荷载引起的变形有弹性变形和徐变变形,可以表示为:

$$\epsilon_t = R_L(1/E + C) \quad (1)$$

式中: ϵ_t 为混凝土由荷载引起的变形, 10^{-6} ; R_L 为混凝土的抗拉强度,MPa; E 为混凝土的弹性模量,MPa; C 为混凝土的徐变变形, 10^{-6} /MPa。

b. 混凝土的自由体积变形。混凝土由于水化热温度变化及物理化学作用所产生的非应力变形,称为自由体积变形。自由体积变形 ϵ_0 可以表示为

$$\epsilon_0 = T_r \alpha - G \quad (2)$$

式中: ϵ_0 为混凝土自由体积变形, 10^{-6} ; G 为混凝土由于物理化学因素引起的自身体积变形, 10^{-6} ; T_r 为混凝土的水化温升值, $^{\circ}\text{C}$; α 为混凝土的线膨胀系数, $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。

混凝土的自由体积变形主要是由于混凝土温度变化而引起的,是混凝土温度变形的主要因素,它产生的变形,使得混凝土抵抗变形能力被消耗,是负的抗裂能力。

因此,笔者建议以混凝土的抗裂变形指数,亦即混凝土在外荷载的作用下的荷载变形与自由体积变形之比作为混凝土的综合抗裂能力指标,抗裂变形指数 B 可表示为

$$B = \epsilon_t / \epsilon_0 \quad (3)$$

由于混凝土的性能指标不尽相同,所以每一种混凝土都有各自的抗裂变形指数,抗裂变形指数越大,说明混凝土的抗裂能力越强。

3 混凝土抗裂能力的评价

在大体积混凝土中,80%~85%的体积为砂石骨料,砂石骨料的性能对混凝土抗裂性能有着重大影响。目前,水电工程中优质的天然骨料贫乏,因而,很多水电工程的混凝土采用人工骨料。人工骨料由于自身性能存在着许多差异,因而对混凝土抗裂能力的影响也就不同。现结合几个水电工程实例,探讨不同种类人工骨料、不同强度等级混凝土的抗裂能力。表1至表4^[1-3]为计算所得的几个水电工程不同种类人工骨料、不同强度等级混凝土的抗裂变形指数(表中混凝土指标轴拉强度、弹性模量和自身体积变形均为90d龄期的实测值,混凝土徐变为3d龄期加荷、持荷90d的压缩徐变实测值)。由表中可见:

a. 骨料的线膨胀系数对混凝土的抗裂能力影响显著。骨料的线膨胀系数越小,其混凝土的抗裂能力越强。二滩水电站的白云岩人工骨料混凝土的抗裂能力低于正长岩和玄武岩人工骨料混凝土,其根

表1 二滩水电站大坝混凝土抗裂变形指数

强度等级	骨料种类	岩石弹性模量 /GPa	轴拉强度 /MPa	弹性模量 /GPa	压密徐变 /(10 ⁻⁶ ·MPa ⁻¹)	绝热温升 /℃	自身体积变形 /10 ⁻⁶	线膨胀系数 /(10 ⁻⁶ ·℃ ⁻¹)	B
C25	正长岩	30~60	1.86	27.5	119.9	28.9	30.0	7.96	1.45
C30	正长岩	30~60	2.11	29.2	101.7	30.1	32.0	7.96	1.38
C35	正长岩	30~60	2.36	31.0	88.3	31.6	36.0	7.96	1.32
C25	玄武岩	79~130	1.88	36.4	114.0	26.5	8.2	7.96	1.31
C30	玄武岩	79~130	2.13	37.9	96.5	27.5	8.2	7.96	1.24
C35	玄武岩	79~130	2.36	39.9	83.8	29.3	8.2	7.96	1.14
C25	白云岩	74~94	2.10	46.8	73.5	24.8	18.2	9.66	0.90
C30	白云岩	74~94	2.45	49.6	60.4	25.8	16.0	9.66	0.85
C35	白云岩	74~94	2.70	52.7	54.1	26.2	17.0	9.66	0.83

表2 官地水电站大坝混凝土抗裂变形指数

强度等级	骨料种类	岩石弹性模量 /GPa	轴拉强度 /MPa	弹性模量 /GPa	压密徐变 /(10 ⁻⁶ ·MPa ⁻¹)	绝热温升 /℃	自身体积变形 /10 ⁻⁶	线膨胀系数 /(10 ⁻⁶ ·℃ ⁻¹)	B
C20	灰岩	65~85	2.5	33.3	83.6	23.0	17.0	7.2	1.91
C15	灰岩	65~85	2.4	31.3	103.2	22.2	13.1	7.2	2.21
C20	玄武岩	82~87	2.6	34.7	98.8	24.8	17.8	8.4	1.74
C15	玄武岩	82~87	2.3	32.8	117.7	23.7	13.4	8.4	1.84
C20	粗灰细灰	—	2.7	29.1	84.0	24.0	17.4	7.4	1.99

表3 东风水电站大坝混凝土抗裂变形指数

强度等级	骨料种类	粉煤灰掺量 /%	轴拉强度 /MPa	弹性模量 /GPa	压密徐变 /(10 ⁻⁶ ·MPa ⁻¹)	绝热温升 /℃	自身体积变形 /10 ⁻⁶	线膨胀系数 /(10 ⁻⁶ ·℃ ⁻¹)	B
C30	灰岩	30	3.15	38.2	39.8	27.1	-23.4	5.6	1.19
C30	灰岩	40	3.02	37.8	47.4	25.7	-28.1	5.6	1.30

表4 碾压混凝土抗裂变形指数

电站名称	骨料种类	强度等级	轴拉强度 /MPa	弹性模量 /GPa	压密徐变 /(10 ⁻⁶ ·MPa ⁻¹)	绝热温升 /℃	自身体积变形 /10 ⁻⁶	线膨胀系数 /(10 ⁻⁶ ·℃ ⁻¹)	B
普定	灰岩	C20	2.5	40.1	52.0	22.9	29.0	5.22	2.12
		C15	1.7	32.9	65.0	19.8	38.0	5.37	2.37
		C20	2.9	30.2	43.8	17.7	20.0	4.93	3.32
龙潭	灰岩	C15	2.3	28.1	50.4	16.2	18.0	4.42	3.69
		C20	1.6	14.7	130.7	17.5	40.0	9.10	2.67
沙坪	花岗岩	C20	1.5	16.0	123.2	17.3	24.0	9.30	2.04
		C15	1.2	18.1	145.6	16.8	35.8	8.40	2.29

本原因在于白云岩人工骨料的线膨胀系数(9.66)要大于正长岩和玄武岩人工骨料(7.96),所以二滩水电站混凝土采用线膨胀系数较小的正长岩(和少量的玄武岩)作为混凝土的人工骨料,其混凝土的抗裂能力大为提高,使得电站大坝混凝土裂缝产生较少。官地水电站的玄武岩人工骨料的线膨胀系数(8.4)要大于灰岩(7.2),因而其混凝土的抗裂能力要逊于灰岩人工骨料混凝土。对国内几个碾压混凝土坝的混凝土抗裂变形指数的计算所得也可看出,低线膨胀系数的人工骨料,其混凝土的抗裂能力较高。因而,在工程中宜选用低膨胀系数的骨料,提高混凝土的抗裂能力。

b. 骨料的自身弹性模量对混凝土的抗裂能力有着较大的影响。总的来看,在骨料线膨胀系数差异不大时,骨料的自身弹性模量越低,其混凝土的抗裂能力越强。这是因为随着骨料的弹性模量减小,混凝土

的弹性模量也将减小。另外,骨料对混凝土的徐变起着约束作用,骨料的弹性模量越低,混凝土的徐变变形越大,这都有利于提高混凝土的抗裂能力。对二滩水电站混凝土而言,正长岩与玄武岩人工骨料的线膨胀系数一致,但玄武岩的自身弹性模量要大于正长岩的自身弹性模量,因而,玄武岩人工骨料混凝土的抗裂能力要逊于正长岩人工骨料混凝土的抗裂能力。所以在骨料的线膨胀系数适宜的前提下,水电工程中宜选用低弹性模量的岩石作为混凝土的人工骨料,有利于提高混凝土的抗裂能力。

c. 选用不同种类的岩石分别作为粗细人工骨料可以改善混凝土的抗裂能力。官地水电站选用玄武岩作为粗骨料、灰岩作为细骨料,其混凝土的抗裂能力要好于单一人工骨料(灰岩或玄武岩)混凝土的抗裂能力。这是由于采用灰岩人工砂可以提高混凝土的抗拉强度、降低混凝土弹性模量,从而提高混凝土的

抗裂能力。由于灰岩具有线膨胀系数小,易于加工等优点,因而一般水电工程都首选灰岩作为人工骨料,但对于缺乏优质灰岩人工骨料的水电工程,也可以采用当地的岩石作粗骨料,而采用部分灰岩作细骨料,这样既可以发挥其它骨料的骨架作用,又可以利用灰岩的优良特性来改善混凝土的抗裂能力。

d. 随着混凝土的强度提高,混凝土的抗裂能力有所降低。虽然混凝土强度的提高,可以提高混凝土的抗拉能力,有利于混凝土抗裂,但混凝土强度提高的同时,混凝土的弹性模量也将增大,徐变将减小,不利于混凝土抗裂。另外混凝土的强度提高,势必会增加混凝土的水泥用量,增大混凝土的水化热温升,这更不利于混凝土的抗裂,其综合效果是使混凝土抗拉能力降低。由不同种类人工骨料混凝土的抗裂能力计算结果来看,提高混凝土的强度对于混凝土的抗裂能力而言,是利小弊大,得不偿失。

e. 增加混凝土中的粉煤灰掺量有利于提高混凝土的抗裂能力。东风水电站灰岩人工骨料混凝土的粉煤灰掺量由 30% 增加到 40%,其混凝土的抗裂能力得到明显提高。这是由于随着粉煤灰掺量增加,混凝土的绝热温升得以降低,弹性模量减小,徐变增大。虽然随着粉煤灰掺量增加,混凝土的抗拉强度有所降低,但总的效果来看,增加粉煤灰掺量,可以提高混凝土的抗裂能力。

f. 混凝土的自身体积变形对混凝土的抗裂能力有着一定的影响。混凝土不同的自身体积变形对混凝土抗裂能力的影响各不相同。混凝土的自身体积变形主要取决于水泥中的矿物组成及化学成分,收缩型自身体积变形使得混凝土产生一定的拉应力,这对混凝土的抗裂是不利的,而膨胀型自身体积变形却能产生一定的预压应力改善混凝土的应力状态,有利于防止混凝土温度应力所产生的裂缝,提高混凝土的抗裂能力。沙坪水电站人工骨料混凝土的水泥分别掺有 3% 和 4% MgO ,其自身体积变形有所差异,反映到混凝土抗裂变形指数上,自身体积膨胀变形越大的混凝土抗裂能力越强。因而,在水工混凝土中应尽量选用自身体积变形为膨胀的水泥或掺料,以提高混凝土的抗裂能力。

4 结 语

a. 影响混凝土抗裂能力的因素主要有混凝土的抗拉强度、弹性模量、徐变、线膨胀系数、水化温升和自生体积变形等,另外,不同的粗细骨料组合对混

凝土的抗裂能力也有着一定的影响。

b. 影响混凝土的抗裂能力有多种因素,这些因素有的是独立的,不受到别的因素影响(或影响很小),有的则是相互关联和相互制约的。用混凝土的抗裂变形指数即混凝土的荷载变形与自由体积变形之比值作为混凝土的综合抗裂能力指标,能全面、合理地反映混凝土抗裂能力的各个主要因素。

c. 提高混凝土的抗裂能力,可以从提高混凝土的粉煤灰的掺量和选用自身体积变形为膨胀变形的品种两方面进行。另外选用低强度等级混凝土或将混凝土设计龄期定为晚龄期也有利于混凝土的抗裂能力。

参考文献:

- [1] 戴镇潮.大坝混凝土的抗裂能力及防裂措施[J].水利水电技术,1980(4):
- [2] 李光伟.官地水电站人工骨料及混凝土性能试验研究[J].水电工程研究,1997(2):22~36.
- [3] 杨忠义,黄绪通.提高碾压混凝土抗裂性研究[J].混凝土坝技术,1997(4):35~42.

(收稿日期:2000-03-01 编辑:熊水斌)

(上接第 25 页)

表 2 一期移民住房状况调查比较

住房	无房	草房	土房	瓦房	平房	楼房
原住房	3	17	7	9	4	0
现住房	0	0	0	10	15	15

表 3 一期移民家庭收入调查比较

收入	2000 元以下	2000 ~ 5000 元	5000 ~ 10000 元	10000 ~ 20000 元	20000 元以上	同 避
原收入	7	26	4	0	0	3
现收入	0	2	9	19	7	3

(本文为纪念 1950 年 10 月 14 日中央人民政府政务院《关于治理淮河的决定》颁布 50 周年而作。)

参考文献:

- [1] 汪恕诚.认清形势理清思路扎实工作努力开创水利工作的新局面[J].政策研究,2000(4):1~11.
- [2] 刘树坤.21 世纪的中国大水利建设[J].水利水电科技进展,2000,20(2):6~9.
- [3] 淮河水利委员会.中国江河防洪丛书淮河卷[M].北京:中国水利水电出版社,1996,1~3.

(收稿日期:2000-07-12 编辑:熊水斌)