

· 施 工 ·



混凝土成熟度法预测早期强度 在连锁片施工中的应用

尹家春, 周志峰

(上海交通大学建设总承包有限公司, 上海 200136)

摘要: 介绍了混凝土成熟度的概念、原理以及发展过程, 阐述了混凝土成熟度原理在连锁片施工中的应用方法, 根据收集的试验数据建立了强度关系式并进行数据分析, 即用计算法、图解法等方法估算混凝土的早期强度, 以达到在预制构件施工特别是冬期施工时能够及时拆模、起吊, 达到加快模板周转、提高施工效率, 当连锁片采用人工加热养护时能够实时估算构件的即时强度, 判定是否需要继续供热达到节约能源之效果。

关键词: 成熟度; 早期强度; 等效龄期; 模板周转

中图分类号: TU 528.7

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)01-0191-05

Application of concrete maturity theory in predicating early strength of concrete in construction of interlocking pieces

YIN Jia-chun, ZHOU Zhi-feng

(Shanghai Communications Construction Contract Co., Ltd., Shanghai 200136, China)

Abstract: This paper introduces the concept, theory and development of concrete maturity, expounds the application method of concrete maturity theory in the chain construction, and sets up the strength formula by collecting experimental data to estimate the early strength of concrete by the calculating method and graphical method. By this method, we can remove the form and crane the prefabricated part timely, especially in the winter. We can not only speed up the revolution of the module, but also improve the efficiency by this theory. When maintaining the prefabricated parts by artificial heating, we can estimate the immediate strength of the parts. This can help us determine whether we should heat the parts, which can save energy.

Keywords: maturity; early strength; equivalent age; template turnover

混凝土拌合物入模经充分振捣成型后, 在合适的气温条件下会随着时间的推移而逐渐硬化, 其强度的增长与它的内在因素和外部养护条件息息相关。用于拌合混凝土的各种原材料的品质以及配合比是它的内在因素, 养护温度和时间则是它的外部条件。当混凝土的原材料、组成比例固定时, 其强度的增长和养护温度(正温条件)与养护时间是正相关的, 其数学模型符合指数型方程。1951年, 英国学者绍耳(A. Saul)就提出了

混凝土成熟度的概念, 即温度与时间的乘积。一定配合比的混凝土, 不管温度与时间如何组成, 只要成熟度相等, 其强度大致相同。国内外大量学者的长期试验研究和工程实践表明, 混凝土在自然条件下养护与在标准条件, 即温度 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 、湿度95%下养护, 在强度相同的情况下, 二者的成熟度是一致的^[1-2]。因此, 就一种已知混凝土, 可以根据它的养护历程、养护的温度与硬化时间来估算它达到的强度。

收稿日期: 2014-05-23

作者简介: 尹家春(1971—), 男, 高级工程师, 从事港口航道施工、管理工作。

混凝土成熟度原理在工程实践中有很重要的意义。混凝土工程施工安排基本都受到混凝土强度发展制约,特别是冬期施工时,施工人员迫切需要及时了解混凝土强度发展情况。例如当采用蓄热养护工艺时,混凝土冷却到 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 前是否已具有足够的早期抗冻能力;当采用人工加热养护时,在停止加热前混凝土是否已达到预定的强度;当采用综合养护时,混凝土的预养时间是否足够等。虽然获取混凝土抗压强度值的方法很多,但基本上是在实验室试压后获取,或者是利用现场回弹等其他方法间接获取。这些方法不但不能简便实时掌握混凝土的强度增长情况,而且有它们各自的局限性。例如通过施工现场留置同条件试块或钻芯取样作抗压强度试验,但由于施工因素所取得的试块很难与原构件保持完全相同的强度,样品数量少时其代表性就较差,不能反映普遍情况。而使用一般强度回弹仪时,不仅需要将回弹值进行后期数据修正,而且不适用于混凝土前期 10 MPa 以下强度时的测量。相比而言,应用成熟度原理来估算混凝土的早期强度是一种方便有效的方法。

1 成熟度理论及推算混凝土早期强度方法

1.1 成熟度理论的提出

国内外学者的长期研究和大量的工程实践证明,了绍耳(A. Saul)成熟度理论的正确性。Geert DeSchutter等通过化学热力学、数学模型的方法证明了水泥水化程度与硅酸盐水泥成熟度的概念等价,水泥水化程度是最基本的方法,但对于硅酸盐水泥来说,水泥成熟度和水泥水化程度预测混凝土强度是等效的,为成熟度概念提供了理论依据^[1-2]。

1.2 成熟度法的适用范围^[3]

根据JGJ/T 104—2011《建筑工程冬期施工规程》,成熟度法的适用范围及条件应符合下列规定:1) 本法适用于不掺外加剂在 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下正温养护和掺外加剂在 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下养护的混凝土,也可用于掺防冻剂负温养护法施工的混凝土。2) 本法适用于预估混凝土强度标准值 60% 以内的强度值。3) 应采用工程实际使用的混凝土原材料和配合

比,制作不少于5组混凝土立方体标准试件在标准条件下养护,测试1、2、3、7、28 d的强度值。4) 采用本法应取得现场养护混凝土的连续温度实测资料。

1.3 成熟度法计算混凝土早期强度方法^[3]

1.3.1 用计算法确定混凝土强度的步骤

1) 用标准养护试件的各龄期强度数据,经回归分析拟合成下列形式曲线方程:

$$f = ae^{-\frac{b}{D}} \quad (1)$$

式中: f 为混凝土立方体抗压强度(MPa); D 为混凝土养护龄期(d); a 、 b 为参数。

2) 根据现场的实测混凝土养护温度资料,用式(1)计算混凝土已达到的等效龄期(相当于 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 标准养护的时间)。

$$D_e = \sum (\alpha_T \Delta t) \quad (2)$$

式中: D_e 为等效龄期(h); α_T 为温度为 T 的等效系数,按JGJ/T 104—2011表B.0.2采纳; Δt 为某温度下的持续时间(h)。

3) 以等效龄期 D_e 作为 D 代入式(1),计算混凝土的强度。

1.3.2 用图解法确定混凝土强度的步骤

1) 根据标准养护试件各龄期强度数据,在坐标纸上画出龄期-强度曲线;2) 根据现场实测的混凝土养护温度资料,计算混凝土达到的等效龄期;3) 根据等效龄期数值,在龄期-强度曲线上查出相应强度值,即为所求值。

2 工程实例

长江南京以下 12.5 m 深水航道一期工程白茆沙工程联锁片预制总量多且平均日需求强度大,但联锁片钢模板费用较高,预制场地面积有限,且由于联锁片所用丙纶绳防老化要求较高,并不适宜长时间暴晒和储存且长期储存成本费用高昂,因此,加快联锁片模板的周转成了事半功倍且经济效益较高的选择。

经综合测算,为提高模板周转效率,在长江下游地区必须基本保证联锁片能在 32 h (夏季)内或 48 h (冬季)内起吊。因此,需建立有效方

法来获得连锁片早期 (32 ~ 48 h) 的强度。

2.1 混凝土连锁片的早期起吊强度

2.1.1 连锁片的起吊强度要求

大量工程实践证明, 由于连锁片上部混凝土承压厚度不同, 12 cm 连锁片起吊难度比 16 cm 及 20 cm 大, 因此本文以 12 cm 连锁片作为试验对象。

按照设计要求, 无论是设计等级为 C20 还是 C25 的混凝土连锁片强度需达到设计强度的 70% 才能进行起吊, 即达到分别 14、17.5 MPa 才能起吊, 但在施工起吊过程中发现, 这两种强度的连锁片质量基本相当, 起吊转堆一概以设计强度的 70% 要求并不合理, 从经济效益角度而言, 对于连锁块这种单块体积较小、仅作为护底压载作用的构件, 达到设计强度 70% 的起吊转堆要求显然过于保守。

2.1.2 连锁片起吊强度测定及施工配合比设计强度要求

1) 起吊强度测定方法。

在连锁片施工时制作同条件养护试块, 连锁片起吊不破损时试块强度为有效强度, 通过延长或缩短起吊转堆时间获得某保证率的连锁片不吊损的强度值。根据现场实测同条件试块数据及以往工程经验, 连锁片混凝土强度达 8 MPa 以上即可进行起吊, 鉴于混凝土强度的不均匀性、模板结构形式且新旧有别、工人操作熟练程度等因素, 工程初期宜将起吊强度设定为 10 MPa, 可保证连锁片的吊损率控制在一个比较低的水平上, 后期

取得实测数据后可逐步将起吊强度调至 8 MPa, 本文以 10 MPa 起吊强度为例进行说明。

2) 施工配合比设计强度。

根据混凝土强度与时间和温度增长经验, 混凝土强度发展在前期在 4、13、21、38 °C 情况下 32 h 相对强度分别能达到最终强度的 20%、25%、33%、42%, 48 h 相对强度分别能达到 24%、33%、42%、50%, 因此, 可反推出在各种温度条件下混凝土施工参考控制强度值 (与设计要求相比取大值), 见表 1^[4]。

表 1 连锁片起吊强度及施工参考控制强度

时间/h	温度/°C	相对强度/%	起吊强度/MPa	施工控制强度/MPa
32	4	20	10	50
	13	25	10	40
	21	33	10	30
	38	42	10	24
48	4	24	10	42
	13	33	10	30
	21	42	10	24
	38	50	10	20

2.2 用计算法确定混凝土的早期强度

在某连锁片工程中, 取起吊强度 10 MPa, 施工强度 30 MPa 以上, 夏季 32 h 起吊, 冬季 48 h 起吊, 设计配合比为: 水泥:砂:石:水 = 281:762:1 191:183, 原材料为普通硅酸盐水泥 (PO 42.5), 中砂、5 ~ 25 mm 连续级配碎石。水泥等材料的主要试验指标见表 2 ~ 4。

表 2 水泥主要试验指标

检验项目	安定性	标准稠度/%	凝结时间/min		抗折强度/MPa		抗压强度/MPa	
			初凝	终凝	R3	R28	R3	R28
检验结果	合格	27.2	160	215	5.7	8.4	24.1	47.9

表 3 细骨料主要试验指标

检验项目	细度模数	含泥量/%	泥块含量/%	密度/(kg·m ⁻³)			氯离子含量/%
				表观密度	堆积密度	紧密密度	
检验结果	2.4	0.6	0.2	2 630	1 400	1 580	0.008

表 4 粗骨料主要试验指标

检验项目	颗粒级配/mm	含泥量/%	泥块含量/%	密度(kg·m ⁻³)			压碎指标/%	针片状/%
				表观密度	堆积密度	紧密密度		
检验结果	5 ~ 25	0.5	0.2	2 660	1 330	1 560	5.3	6

根据 JGJ/T 104—2011 《建筑工程冬期施工规程》 B.0.1, 准备了 5 组混凝土立方体标准试件在标准条件下养护, 测得 1、2、3、7、28 d 的强度 (表 5)。

表 5 标准养护条件下各龄期混凝土强度

龄期 D/d	强度/MPa			抗压强度值 f/MPa
1	9.2	8.9	9.0	9.0
2	15.9	16.5	14.5	15.6
3	20.5	20.0	20.8	20.5
7	23.0	23.0	24.1	23.4
28	34.4	34.6	31.7	33.6

将上表统计数据 f 、 D 进行相关分析, 相关系数计算公式如下:

$$r_{fD} = \frac{L_{fD}}{\sqrt{L_{ff}L_{DD}}} = \frac{\sum_{i=1}^n (f_i - \bar{f})(D_i - \bar{D})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (f_i - \bar{f})^2 \sum_{i=1}^n (D_i - \bar{D})^2}} \quad (3)$$

相关系数计算结果为 0.891, 范围在 $[-1, 1]$ 且绝对值接近 1, 说明 f 、 D 的线性关系较好, 选择《建筑工程冬期施工规程》推荐的方程 $f = ae^{-\frac{b}{D}}$, 将表 5 中 f 、 D 数据代入, 共计拟合出 5 个方程如下:

$$\begin{cases} 9.0 = ae^{-\frac{b}{1}} \\ 15.6 = ae^{-\frac{b}{2}} \\ 20.5 = ae^{-\frac{b}{3}} \\ 23.4 = ae^{-\frac{b}{7}} \\ 33.6 = ae^{-\frac{b}{28}} \end{cases} \quad (4)$$

以上 5 个方程, 两两组合求得 10 组解, 取其平均值, 得出该配合比参数 a 、 b 分别为: $a = 31.866$, $b = 1.497$ 。

该联锁片工程 5 月 10 日混凝土浇筑后测温记录及等效龄期 D_e 计算见表 6^[3]。

取等效龄期 D_e 作为龄期 D 代入式 (1), 求得混凝土 24 ~ 48 h 的强度值: $f_{24} = 6.8$ MPa、 $f_{26} = 8.1$ MPa、 $f_{28} = 9.2$ MPa、 $f_{30} = 10.3$ MPa、 $f_{32} = 11.2$ MPa、 $f_{48} = 15.5$ MPa, 由以上数据可看出, 联锁片强度在 26 ~ 30 h 内即达到 8 MPa 以上, 32 h 强度为 11.2 MPa, 满足 10 MPa 起吊强度要求。

根据表 6, 等效龄期 $D_e(32 \text{ h}) = 34.46 \text{ h}$, $D_e(48 \text{ h}) = 50.06 \text{ h}$ 。

表 6 混凝土浇筑后测温记录及等效龄期计算

从浇筑起算的时间/h	温度/℃	持续时间 Δt /h	平均温度 T /℃	α_T	$\alpha_T \Delta t$
0	19.1				
2	19.5	2	19.3	0.95	1.90
4	22.4	2	21.0	1.05	2.10
6	24.0	2	23.2	1.15	2.30
8	20.7	2	22.4	1.10	2.20
10	18.9	2	19.8	1.00	2.00
12	18.2	2	18.6	0.95	1.90
14	18.0	2	18.1	0.90	1.80
16	18.0	2	18.0	0.90	1.80
18	17.5	2	17.8	0.90	1.80
20	17.3	2	17.4	0.86	1.72
22	18.5	2	17.9	0.90	1.80
24	21.5	2	20.0	1.00	2.00
26	27.6	2	24.6	1.45	2.90
28	28.8	2	28.2	1.41	2.82
30	27.9	2	28.4	1.41	2.82
32	23.7	2	25.8	1.30	2.60
34	20.4	2	22.1	1.10	2.20
36	19.1	2	19.8	1.00	2.00
38	18.8	2	19.0	0.95	1.90
40	18.5	2	18.7	0.95	1.90
42	18.2	2	18.4	0.90	1.80
44	17.7	2	18.0	0.90	1.80
46	19.4	2	18.6	0.95	1.90
48	23.4	2	21.4	1.05	2.10

注: $D_e = \sum (\alpha_T \Delta t)$, 得 $D_e(24 \text{ h}) = 23.32$, $D_e(26 \text{ h}) = 26.22$, $D_e(28 \text{ h}) = 29.04$, $D_e(30 \text{ h}) = 31.86$, $D_e(32 \text{ h}) = 34.46$, $D_e(48 \text{ h}) = 50.06$ 。

2.3 用图解法确定混凝土的早期强度

根据表 5 数据在坐标系上画出强度-龄期曲线 (图 1)。

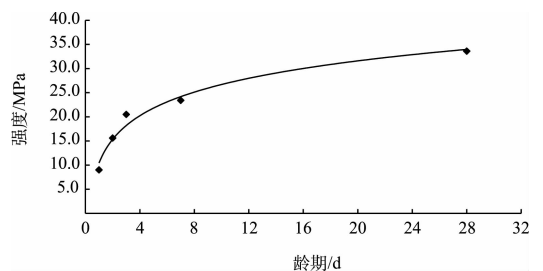


图 1 混凝土强度-龄期曲线

以等效龄期 D_e 作为龄期, 在图 1 上查得 32 h 和 48 h 相应强度值分别为 $f_{32} = 12.5$ MPa 和 $f_{48} = 15.5$ MPa。

2.4 同条件混凝土试块强度对比

制作同条件试块与预测值作对比试验, 同条件试块抗压强度值见表 7。表中 32 h 和 48 h 的各组强

度值以及 32 h 和 48 h 的抗压强度平均值, 与上述计算法和图解法的预测结果均比较吻合, 表明用成熟度原理预测混凝土早期强度可以满足现场施工需要。

表 7 混凝土同条件试块强度与预测强度对比

试块或预测方法	强度值/MPa	
	32 h	48 h
同条件第 1 组	12.9	16.0
同条件第 2 组	12.9	16.1
同条件第 3 组	12.2	16.3
计算法	11.2	15.5
图解法	12.5	15.5

2.5 经济效益

在工程开工前, 可以试配不同配合比, 并根据成熟度原理取得预测混凝土强度参数, 后续施工时就可以根据气温变化实时预测混凝土强度, 选择合适的配合比, 能取得明显的经济效益。

1) 节约模板制作、场地等费用。

冬季混凝土强度增长缓慢时, 通过选择合适的混凝土施工配合比可以保证模板及预制场地的周转效率, 从而达到节约模板制作等费用。根据成熟度法计算表明, 相同配合比连锁片在平均气温为 25 °C 时可在 30 h 左右起吊, 而同一施工配合比在平均气温为 10 °C 时则需要 70 h 左右才能起吊。根据成熟度法计算结果选择能保证在 48 h 内起吊的施工配合比, 可提高模板周转效率 50% 以上。以白崩沙工程为例, 为满足施工进度需要可选择调整配合比和增加模板 2 种方案: 调整配合比每方混凝土增加费用约 15 元, 冬季 3 个月每个月按照平均 2 万 m³ 计算, 总增加约 90 万元; 若增加模板则费用约为 1 200 × 50% × 0.8 万元 + 1 200 × 50% / 3.5 × 1.2 万元 = 685.7 万元 (上模与下模按 1:3.5 配备), 此外附带节约场地租金、管理费等经济效益。

2) 根据成熟度原理指导胶凝材料经济用量。

在保证连锁片强度 (28 d 强度基本在 25 MPa 以上) 以及模板周转效率的前提下, 根据成熟度原理指导及时调整混凝土配合比, 并通过试验验证初步得出了在不同温度范围水泥 (P. O. 42.5) 的经济使用量, 达到降低成本的目的。例如在 5 ~ 15 °C 施工时, 281 kg 单方水泥用量可基本保证连锁片强度在 32 h 内起吊, 见表 8, 在本文前例中

5 月份预测 32 h 强度已经超出起吊强度约 10% ~ 20%, 属于有明显富裕, 可在后续施工中及时改进以达节约之目的, 相反当气温降低时可通过及时预测强度避免构件吊损。另外, 夏季施工时针对起吊强度有富裕的情况下, 采用 S95 矿粉取代部分水泥, 不仅节约了成本, 而且能够降低初期水化热, 并改善混凝土和易性。

表 8 不同温度范围水泥经济用量

温度范围/°C	水泥经济用量/kg	说明
0 ~ 10	295	48 h 起吊
5 ~ 15	281	32 h 起吊
10 ~ 20	261	矿粉 20 kg
15 ~ 25	250	矿粉 30 kg
>20	250	矿粉 30 kg

3 结语

1) 在连锁片施工过程中, 成功地利用成熟度法随时推算固定养护时间的混凝土强度情况, 判定混凝土强度是否满足施工需求或是否富余太多, 及时指导选用合适的混凝土配合比以达到经济节约的目的, 能够实时为施工决策提供参考。

2) 通过选配不同的连锁片混凝土配合比, 利用成熟度法初步验证不同温度范围内的水泥经济使用量。

3) 成熟度法特别适合用于距离实验室较远、施工时间较长的工程, 本例实施过程中结合使用自动温度记录仪, 温度记录周期可任意调节, 等效龄期的取值更加准确。

4) 成熟度法应用中要注意其使用范围及条件, 且初期使用时应制作一定数量的同条件试块进行复核。只有经过同条件混凝土试块强度与成熟度方法计算值对比, 二者具有很好的一致性, 应用效果才能保证。

参考文献:

- [1] 方光秀, 李发千, 郑文忠. 混凝土成熟度新论及新成熟度准则应用[J]. 低温建筑技术, 2002(2): 2-4.
- [2] 黄玉华, 刘松. 混凝土成熟度的原理与应用[J]. 国外建材科技, 2004(6): 14-16.
- [3] JGJ/T 104—2011 建筑工程冬期施工规程[S].
- [4] JGJ 55—2011 普通混凝土配合比设计规程[S].