

МЕТОДИКИ РАСЧЕТА И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПРОЧНОСТИ БЕТОНА

С.Б. Коваль, М.В. Молодцов

CALCULATION AND FORECASTING METHODS OF CONCRETE STRENGTH

S.B. Koval, M.V. Molodtsov

Описаны основные методики расчета и прогнозирования прочности монолитного бетона. Исследовано влияние состава бетона на конечное значение прочности, получаемое теоретическим расчетом по разным методикам и экспериментально.

Ключевые слова: методика расчета, прочность бетона, прогнозирование прочности, кинетика твердения, клинкерные бетоны, портландцемент, шлакопортландцемент, шлакощелочные бетоны, темп твердения бетона

The main methods of calculation and forecasting of strength of mass concrete was described. Influence of concrete composition on final value of strength obtained by theoretical calculation using different methods and by experiment is analyzed.

Keywords: calculation method, concrete strength, forecasting of strength, hardening kinetics, clinker concrete, Portland cement, portland-slag cement, slag-lime concrete, speed of concrete hardening.

В последнее время значительно увеличилось количество различных видов бетонов и их модификаций. Основными причинами этой тенденции, на наш взгляд, являются поиск более дешевых по себестоимости бетонов, стремление получить более качественные материалы и возрастающее с каждым годом загрязнение окружающей среды. Все вышеперечисленные причины привели к появлению таких бетонов, как шлакощелочные, глиноземистые, пуццолановые и бетоны на шлако-

портландцементе, а также многих других видов. В этих бетонах в качестве компонентов используются отходы различных производств, загрязняющих окружающую среду. Почти у всех «новых» бетонов кинетика твердения значительно отличается от кинетики твердения «старых» клинкерных бетонов, поэтому в настоящее время возникла необходимость поиска новых универсальных методов контроля и прогнозирования прочности, способных охватить все виды бетонов (см. рисунок).

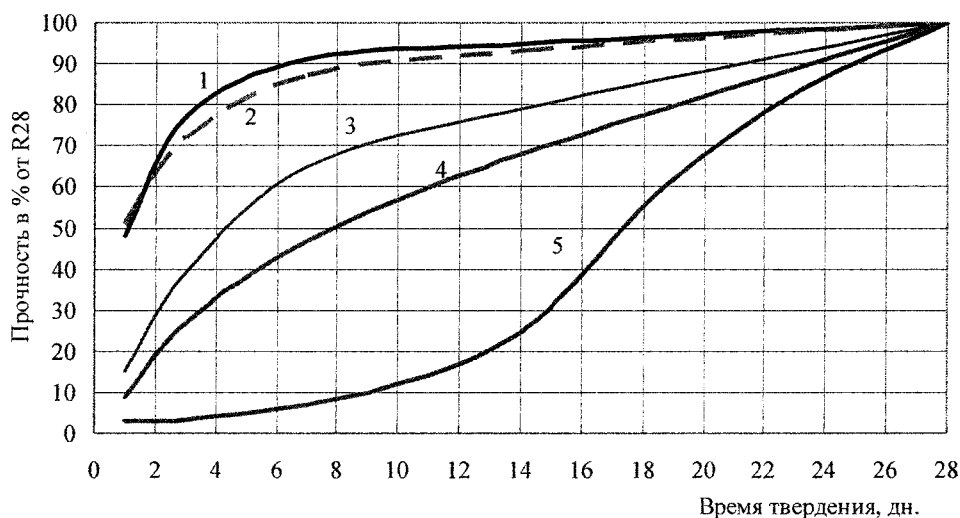


Рис. 1. Кривые кинетики твердения бетонов на различных видах вяжущего: 1 – шлакощелочной бетон (состав вяжущего: шлак нейтральный, щелочной компонент метосиликат натрия), 2 – бетон на глиноземном цементе марки 200, 3 – бетон на шлакопортландцементе марки 400, 4 – бетон на портландцементе марки 250, 5 – шлакощелочной бетон (состав вяжущего: шлак кислый, щелочной компонент сода кальцинированная)

Прогнозированием и контролем прочности бетонов в разное время занимались многие ученые и научные организации как за рубежом, так и у нас в стране. В частности кафедра «Технология строительного производства» Южно-Уральского государственного университета в разное время предложила несколько методик контроля прочности различных видов бетонов, которые были запатентованы в Государственном комитете по делам изобретений и открытий и успешно применялись при разработке различных методов зимнего бетонирования [1, 2].

По первой методике расчёт прочности осуществляется по формуле

$$R_x = R_{28} - A e^{-\frac{\tau_{ост}^x B(0,6+0,02t_{б.ср}^x)^n}{24}}, \quad (1)$$

где R_x – прочность бетона в рассматриваемой точке, % от R_{28} ; R_{28} – прочность бетона, которую он набирает за 28 суток твердения при 20 °С; A – коэффициент начальной прочности бетона; B – коэффициент темпа твердения; n – показатель степени; $\tau_{ост}^x$ – время остывания бетона; $t_{б.ср}^x$ – средняя температура бетона за период остывания $\tau_{ост}^x$.

В свою очередь, коэффициенты A , B и n определяются по формулам:

$$A = \frac{292}{\sqrt[3]{R_3}}, \quad (2)$$

$$B = \frac{7,3}{100 - R_3}, \quad (3)$$

$$n = 1,4 + \frac{50}{R_3}, \quad (4)$$

где R_3 – трёхсуточная прочность бетона нормального твердения.

Вторая методика предназначена для бетонов с низкой на начальной стадии интенсивностью твердения. На кривых роста прочности близких к «5» (см. рисунок) ярко выражена точка перегиба, которая совпадает с моментом набора бетоном прочности 25 % от R_{28} (τ_{25}). При этом на участке $0 \leq \tau < \tau_{25}$ темп твердения бетона возрастает, а на

участке $\tau_{25} < \tau \leq 28$ – убывает. На остальных кривых точка перегиба отсутствует и её условно принимают в момент времени τ_{25} . На участке $\tau_{25} < \tau$ происходит снижение скорости набора прочности. При $\tau > 28$ суток прочность бетона, хотя и медленно, продолжает расти. Перечисленными выше свойствами обладает функция $\ln t$ [3]. В связи с этим графики изменения прочности бетона, находящиеся в области, ограниченной кривыми «1» и «5» (см. рисунок), на участке $\tau_{25} < \tau \leq 28$ описываются функцией вида:

$$R(\tau) = 25 + A \cdot \ln(1 + \alpha(\tau - \tau_{25})). \quad (5)$$

Участок $0 \leq \tau < \tau_{25}$ этих кривых также удобно описывать с помощью функции $\ln t$

$$R(\tau) = 25 - B \cdot \ln(1 + \beta(\tau_{25} - \tau)). \quad (6)$$

Параметры A , α , B , β , входящие в формулы (5) и (6), имеют вид:

$$\begin{cases} A = 1,94 \cdot \tau_{25} + 11,53; \\ \alpha = e^{-1,182 \cdot \ln \tau_{25} + 2,36}; \\ B = \frac{A \cdot \alpha}{\beta}; \\ \beta = e^{-0,962 \cdot \ln \tau_{25} + 3,037}. \end{cases} \quad (7)$$

Сравнение расчетных данных представленных методик с экспериментальными значениями прочности на сжатие представлены в таблице.

Анализируя приведенные в таблице данные, можно сделать следующие выводы:

- по первой методике наиболее точно описывается набор прочности бетонов на портландцементе, шлакопортландцементе, глиноземистом цементе и некоторых видах шлакощелочных бетонов, для этих видов бетонов расхождение между прогнозируемыми значениями прочности и истинными составляет не более 10 % от R_{28} ;

- для шлакощелочных бетонов, в состав вяжущего которых входят нейтральные и кислые шлаки, использование для прогнозирования прочности первой методики нежелательно, так как значения прочности, полученные с ее помощью для данных бетонов, отличаются от экспериментальных величин в некоторых случаях на 20...25 % от R_{28} ;

Сравнительная таблица результатов расчетов по двум методикам с экспериментальными данными

Вид бетона	Сутки	I методика	II методика	Экспериментальные данные
1	2	3	4	5
1. Бетон марки 200 на портландцементе марки 300. $\tau_{25}=1,6$	3	$\frac{40,7}{4,1}$	$\frac{58,8}{5,8}$	$\frac{40}{4}$
	7	$\frac{63,4}{6,7}$	$\frac{73,4}{7,3}$	$\frac{65}{6,5}$
	14	$\frac{84,4}{8,4}$	$\frac{88,4}{8,8}$	$\frac{80}{8}$
	28	$\frac{97,2}{9,7}$	$\frac{99,4}{9,9}$	$\frac{100}{10}$
	180	–	–	–

Продолжение таблицы

1	2	3	4	5
2. Бетон марки 300 на портландцементе марки 400. $\tau_{25}=1,1$	3	$\frac{48,9}{9,8}$	$\frac{65,2}{13}$	$\frac{50}{10}$
	7	$\frac{71,5}{14,3}$	$\frac{80,2}{16}$	$\frac{75}{15}$
	14	$\frac{89,8}{18}$	$\frac{90,7}{18,2}$	$\frac{90}{18}$
	28	$\frac{98,7}{19,7}$	$\frac{100,7}{21}$	$\frac{100}{20}$
	180	–	–	–
3. Бетон марки 400 на портландцементе марки 500. $\tau_{25}=25,09$	3	$\frac{56,9}{14,2}$	$\frac{68,4}{17,1}$	$\frac{60}{15}$
	7	$\frac{79,1}{19,8}$	$\frac{82,2}{20,6}$	$\frac{82}{20,5}$
	14	$\frac{94,2}{23,6}$	$\frac{92,3}{23,1}$	$\frac{92}{23}$
	28	$\frac{99,7}{29,9}$	$\frac{102,6}{25,5}$	$\frac{100}{30}$
	180	–	–	–
4. Бетон марки 500 на портландцементе марки 600. $\tau_{25}=0,8$	3	$\frac{58,5}{17,8}$	$\frac{70,1}{21}$	$\frac{62}{18,6}$
	7	$\frac{81}{24,3}$	$\frac{83,3}{25}$	$\frac{85}{25,5}$
	14	$\frac{95}{28,5}$	$\frac{93,1}{27,9}$	$\frac{95}{28,5}$
	28	$\frac{99,7}{29,9}$	$\frac{102,6}{30,8}$	$\frac{100}{30}$
	180	–	–	–
5. Бетон марки 200 на шлакопортландцементе марки 300. $\tau_{25}=2,5$	3	$\frac{31,3}{3,1}$	$\frac{41,8}{4,2}$	$\frac{30}{3}$
	7	$\frac{54,6}{5,5}$	$\frac{71,6}{7,2}$	$\frac{55}{5,5}$
	14	$\frac{78,1}{7,8}$	$\frac{86,3}{8,6}$	$\frac{75}{7,5}$
	28	$\frac{94,6}{9,5}$	$\frac{99,2}{9,9}$	$\frac{100}{10}$
	180	–	–	–
6. Бетон марки 300 на шлакопортландцементе марки 400. $\tau_{25}=1,6$	3	$\frac{40,7}{8,2}$	$\frac{58}{11,6}$	$\frac{40}{8}$
	7	$\frac{63,4}{12,6}$	$\frac{73,4}{15,6}$	$\frac{65}{13}$
	14	$\frac{84,4}{16,8}$	$\frac{88,4}{17,6}$	$\frac{80}{16}$
	28	$\frac{97,2}{19,4}$	$\frac{99,4}{19,8}$	$\frac{100}{20}$
	180	–	–	–

Строительные материалы, изделия и конструкции

Продолжение таблицы

1	2	3	4	5
7. Бетон на глиноземистом цементе марки 300. $\tau_{25}=0,5$	3	$\frac{67,9}{19,7}$	$\frac{76,4}{22,2}$	$\frac{72}{21}$
	7	$\frac{88,7}{25,7}$	$\frac{88,2}{25,6}$	$\frac{89}{25,8}$
	14	$\frac{98,2}{28,5}$	$\frac{97,3}{28,2}$	$\frac{97}{28,1}$
	28	$\frac{100}{29}$	$\frac{106}{30,1}$	$\frac{100}{29}$
	180	–	–	$\frac{100}{29}$
8. Шлакощелочной бетон, состав вяжущего: – шлак основной; – щелочный компонент дисиликат натрия. $\tau_{25}=0,7$	3	$\frac{50,4}{49,4}$	$\frac{71,9}{70,5}$	$\frac{52}{51}$
	7	$\frac{73}{71,6}$	$\frac{84,3}{83}$	$\frac{85}{83}$
	14	$\frac{90,6}{88,8}$	$\frac{94,3}{92,4}$	$\frac{90}{88}$
	28	$\frac{98,9}{96,9}$	$\frac{103,5}{101,5}$	$\frac{100}{98}$
	180	–	–	$\frac{111}{112}$
9. Шлакощелочной бетон, состав вяжущего: – шлак основной; – щелочный компонент метасиликат натрия. $\tau_{25}=0,7$	3	$\frac{55,2}{50,3}$	$\frac{71,9}{65,4}$	$\frac{58}{53}$
	7	$\frac{77,8}{70,8}$	$\frac{84,7}{77,1}$	$\frac{82}{75}$
	14	$\frac{93,4}{85}$	$\frac{94,3}{85,8}$	$\frac{87}{79}$
	28	$\frac{99,4}{90,5}$	$\frac{103,5}{94,2}$	$\frac{100}{91}$
	180	–	–	$\frac{119}{108}$
10. Шлакощелочной бетон, состав вяжущего: – шлак нейтральный; – щелочный компонент содощелочной плав. $\tau_{25}=2$	3	$\frac{42}{25}$	$\frac{51,8}{30,6}$	$\frac{42}{25}$
	7	$\frac{65,4}{38,6}$	$\frac{74,3}{43,8}$	$\frac{70}{41}$
	14	$\frac{85,7}{50,5}$	$\frac{87,4}{51,6}$	$\frac{81}{48}$
	28	$\frac{97,5}{57,5}$	$\frac{99,2}{58,5}$	$\frac{100}{59}$
	180	–	–	$\frac{139}{82}$

Окончание таблицы

1	2	3	4	5
11. Шлакощелочной бетон, состав вяжущего: – шлак нейтральный; – щелочный компонент сода кальцинированная. $\tau_{25} = 8$	3	–	$\frac{1,3}{0,6}$	$\frac{7}{3,5}$
	7	$\frac{11,3}{5,5}$	$\frac{13,3}{6,5}$	$\frac{20}{10}$
	14	$\frac{48}{23,9}$	$\frac{75,5}{37}$	$\frac{47}{23}$
	28	$\frac{82,9}{40,6}$	$\frac{104,9}{51,4}$	$\frac{100}{49}$
	180	–	–	$\frac{163}{80}$
12. Шлакощелочной бетон, состав вяжущего: – шлак кислый; – щелочный компонент дисиликат натрия. $\tau_{25} = 3,5$	3	$\frac{21,3}{17,3}$	$\frac{9,4}{7,6}$	$\frac{22}{18}$
	7	$\frac{45,8}{37,2}$	$\frac{66,1}{53,5}$	$\frac{55}{45}$
	14	$\frac{31,9}{58,2}$	$\frac{84,8}{68,7}$	$\frac{64}{52}$
	28	$\frac{92,4}{74,9}$	$\frac{100}{81}$	$\frac{100}{81}$
	180	–	–	$\frac{142}{115}$
13. Шлакощелочной бетон, состав вяжущего: – шлак кислый; – щелочный компонент метасиликат натрия. $\tau_{25} = 3,8$	3	$\frac{12,8}{10,6}$	$\frac{4,4}{3,7}$	$\frac{17}{14}$
	7	$\frac{38,6}{32,1}$	$\frac{64,4}{53,5}$	$\frac{59}{49}$
	14	$\frac{67,2}{55,8}$	$\frac{84,6}{70,2}$	$\frac{66}{55}$
	28	$\frac{90,4}{75,1}$	$\frac{100,5}{83,4}$	$\frac{100}{83}$
	180	–	–	$\frac{134}{111}$

Примечание. Над чертой прочность указана в % от R_{28} , а в знаменателе – в Мпа.

• вторая методика также хорошо прогнозирует прочность, которую набирают бетоны на портландцементе и шлакопортландцементе, но при расчете трехсуточной прочности методика дает несколько завышенные значения прочности, причем практически для всех видов и марок бетонов, это расхождение находится в пределах 15...20 %, на более поздних стадиях твердения значения прочности не расходятся более чем на 10 %;

• описание прочности по второй методике для шлакощелочных бетонов тоже не дает достоверных результатов, получаемые значения прочности отличаются в некоторых случаях от экспериментальных на 30 %.

• Каждая методика имеет свою ограниченную область применения, а следовательно, необходимы дальнейшие исследования по поиску более уни-

версальных методов определения прочности различных видов бетонов.

Литература

1. Головнев, С.Г. Технология зимнего бетонирования. Оптимизация параметров и выбор методов / С.Г. Головнев. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 1999. – 156 с.

2. А.с. 1734013 СССР, Кл. G01. Способ контроля за нарастанием прочности бетона при тепловой обработке / А.Б. Вальт, С.Б. Коваль, А.В. Хомутский, М.М. Гольденберг. – № 33/38; заявл. 18.06.90; опубл. 15.05.92, Бюл. № 18.

3. Вальт, А.Б. К вопросу о контроле прочности бетона / А.Б. Вальт, С.Б. Коваль, А.Ю. Бакин // Совершенствование управления в условиях становления рыночных отношений: темат. сб. науч. тр. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 1997. – 86 с.

Поступила в редакцию 1 февраля 2011 г.