

УДК 666.972.16

Шургая А.Г., Чиженко Н.П.

ВЫСОКОПРОЧНЫЙ БЕТОН В ДОРОЖНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ (ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ)

Аннотация. В статье проанализированы теоретические аспекты получения высокопрочных бетонов для дорожного строительства. Усовершенствовано расчет состава высокопрочного дорожного бетона и проведено сравнение с существующим способом.

Ключевые слова: высокопрочный цементный бетон, химические добавки, состав бетона, оптимальность структуры, морозостойкость.

Анотація. У статті проаналізовані теоретичні аспекти отримання високоміцних бетонів для дорожнього будівництва. Удосконалено розрахунок складу високоміцного дорожнього бетону і проведено порівняння із існуючим способом.

Ключові слова: високоміцний цементний бетон, хімічні добавки, склад бетону, оптимальність структури, морозостійкість.

Abstract. The article analyzes the theoretical aspects of producing high-strength concrete for road construction. Improved calculation of high-strength road concrete and a comparison with the existing method.

Keywords: high-strength cement concrete, chemical additives, the composition of the concrete, the optimal structure, frost-resistance.

Преждевременный капитальный ремонт цементобетонных покрытий обусловлен в большинстве случаев поверхностными разрушениями и хаотическим трещинообразованием различной интенсивности. Одной из важнейших причин такого разрушения является формирование недостаточно морозостойкой и прочной структуры бетона.

При решении проблемы повышения долговечности цементобетона учитывают взаимосвязь свойств исходных материалов, состава бетонной смеси, структуры и свойств бетона, технологических факторов, эксплуатационных и природно-климатических воздействий. В связи с этим проблема повышения

долговечности цементобетонных покрытий носит комплексный характер, включающий конструктивные, материаловедческие и технологические аспекты.

Для повышения долговечности покрытий наиболее целесообразно применять высокопрочные дорожные бетоны. При одной и той же толщине плиты применение высокопрочных бетонов позволит снизить уровень напряжений от температурных деформаций и суммарного воздействия транспортных нагрузок и существенно повысить срок службы цементобетонного покрытия.

Оптимизация бетонной смеси: модуль упругости гранитного щебня $70 - 90 \cdot 10^3$ МПа, а растворной части $15 - 26 \cdot 10^3$ МПа. По многолетней практики и материаловедения в СССР, за границы и Украины модуль упругости бетонов дорожного и мостового строительства должен составлять $37 - 42 \cdot 10^3$ МПа (при 5 – 6 % вовлеченного воздуха). Выходя из этого нужно ограничить количество щебня от 1050 – 1250 кг и соотношение между мелким и крупным заполнителем (r). При мелком песке $M_{кр} \leq 1,8$ $r = 0,35 \div 0,37$, при среднем песке $M_{кр} = 1,8 - 2,1$ $r = 0,38 \div 0,40$, при крупном песке $M_{кр} \geq 2,1$ $r = 0,4 \div 0,45$.

Высокопрочный дорожный бетон можно рассматривать как бетон, прочность которого равна или выше чем активность цемента $R_b \geq R_u$.

С учетом сказанного под высокопрочным дорожным бетоном понимается бетон, прочность которого на растяжение при изгибе более 5,5 МПа (класс по прочности на растяжение при изгибе более чем $B_{btb} 4,4$).

Проектирование состава высокопрочного дорожного бетона выполняется в соответствии с методологией, аналогичной для дорожного бетона обычной прочности.

При подборе состава высокопрочного бетона при одинаковой марке цемента М500 решающее значение имеет R_u'' (марка цемента на растяжение при изгибе $R_u'' \geq 6,0$ МПа) [1].

Ориентировочное значение B/C для получения среднего уровня прочности бетона определяют по следующей формуле:

$$B/C = \frac{0,34R_u}{R_b + 0,034R_u}, \quad (1)$$

где R_u – предел прочности цемента при изгибе, определяемый экспериментально;

R_{δ} – средний уровень прочности при растяжении при изгибе бетона
 $R_{\delta} \geq 5,5$ МПа.

Определение количества крупного заполнителя определяется по формуле:

$$\text{Щ} = \frac{1000}{\frac{\kappa_p \cdot V n^{\text{щ}}}{\gamma_0^{\text{щ}}} + \frac{1}{\gamma^{\text{щ}}}}, \quad (2)$$

где κ_p – коэффициент раздвижки;

$\gamma_0^{\text{щ}}$ – насыпная плотность щебня, кг/м³;

$\gamma^{\text{щ}}$ – истинная плотность щебня, кг/м³.

При определении количества воды после определения количества щебня, нами предложено применять формулу А.А. Саканделидзе [2]. Контрольный состав:

$$B = \frac{K_{н.г.} \cdot \text{Ц} \cdot H_{г.} + B_n \cdot \gamma^n (V_p - \text{Ц} / \gamma^{\text{щ}}) + B_{\text{щ}}}{1 + 0,001 B_{\text{п}} \cdot \gamma^n}, \quad (3)$$

где Ц – количество цемента, кг;

$H_{г.}$ – нормальная густота цементного теста;

B_n – водопотребность песка, л (определяются по методу Баженова при составе цементно-песчаного раствора $\text{Ц}:\text{П} = 1:1$);

γ^n – истинная плотность песка, кг/м³;

$K_{н.г.}$ – экспериментальный коэффициент.

Потребность воды на смачивание поверхности зерен щебня определяется по предлагаемой формуле:

$$B_{\text{щ}} = 0,008 \cdot \text{Щ}_{5-10} + 0,005 \cdot \text{Щ}_{10-20} + 0,003 \cdot \text{Щ}_{20-40}, \quad (4)$$

где Щ_{5-10} , Щ_{10-20} , Щ_{20-40} – весовой расход щебня соответственно фр. 5-10 мм, фр.10-20 мм, фр.20-40 мм на 1 м³ виброуплотненного бетона, кг.

$$K_{\text{щ}} = \frac{\text{Щ}}{\gamma_{\text{с}}^{\text{щ}}}, \quad (5)$$

где $\gamma_{\text{с}}^{\text{щ}}$ – плотность щебня в виброуплотненном состоянии, кг/м³.

Объем растворной части определяется по формуле:

$$V_p = k_{щ} \cdot V_{\epsilon}^{щ} + (1 - k_{щ} - V_{\epsilon}), \quad (6)$$

где V_{ϵ} – содержание воздуха в бетоне;

$$V_{\epsilon}^{щ} - \text{пустотность щебня в виброуплотненном состоянии } V_{\epsilon}^{щ} = \frac{\gamma^{щ} - \gamma_0^{щ}}{\gamma^{щ}}.$$

При $V_{\epsilon} = 0$, $V_{\epsilon} = 1000\text{л}$, тогда выражение (6) имеет вид $V_p = k_{щ} \cdot V_{\epsilon}^{щ} + (1 - k_{щ})$.

Содержание песка вычисляется по формуле:

$$П = (V_p - \frac{Ц}{\gamma^u} - \frac{B - B_{щ}}{1000}) \cdot \gamma^n. \quad (7)$$

При применении химической добавки содержание воды:

$$B = \frac{K_{н.г.} \cdot k_{\delta}^2 \cdot Ц \cdot H_{г} + B_n \cdot \gamma^n (V_p^1 - Ц / \gamma^u) + B_{щ}}{1 + 0,001 B_{п} \cdot \gamma^n}, \quad (8)$$

где $k_{\delta} = \frac{H_{г}^1}{H_{г}}$ – коэффициент эффективности добавки;

$H_{г}^1$ – нормальная густота цементного теста с применением химической добавки;

$H_{г}$ – нормальная густота цементного теста.

В отличии от формулы Баломея – Скрамтаева [3], где учитывается количество воды затворения:

$$\begin{aligned} R_{\sigma}^T &= AR_{Ц} (Ц/B - 0,5) Ц/B < 2,5 & A &= 0,55 \dots 0,65 \\ R_{\sigma}^T &= AR_{Ц} (Ц/B + 0,5) Ц/B > 2,5 & A &= 0,35 \dots 0,40 \end{aligned}$$

$Ц/B = Ц/(B - B_{щ})$ - что более точно соответствует реальным результатам.

$$\begin{aligned} Ц &= 350 \text{ кг} & B &= 120 \text{ л} & B_{щ} &= 10,5 \text{ л} & \gamma_{\delta} &= 1167 \text{ кг/м}^3 \\ Ц_{5-10} &= 417 \text{ кг} & Ц_{10-20} &= 965 \text{ кг} & П &= 598 \text{ кг} & \gamma^{щ} &= 2670 \text{ кг/м}^3 & \gamma^n &= 2620 \text{ кг/м}^3 \end{aligned}$$

Авторами статьи предложено вычислять количество воды по формуле:

$$B = B + B_{д/\gamma_{\delta}} - B_{щ}, \quad (9)$$

где $B_{щ}$ - потребность воды на смачивание поверхности зерен щебня, определяется по формуле (4).

$$B_{щ} = 0,008Щ_{5-10} + 0,005Щ_{10-20} = 3,336 + 4,825 \approx 8,2 \text{ л}$$

Тогда $B = 120 + 10,5/1,167 - 8,2 = 120,8 \text{ л}$

По формуле Баломея – Скрамтаева количество воды вычисляется:

$$B = B + B_{д/\gamma_{\delta}} = 120 + 9 = 129 \text{ л}$$

1) $Ц/B = 350 / 129 \approx 2,71$ $B/Ц = 0,369$ (при расчете количества воды по методике Баломея – Скрамтаева)

2) $Ц/B = 350 / 120,8 \approx 2,9$ $B/Ц = 0,345$ (при расчете количества воды по предложенной авторами статьи методике).

Соответственно, при $A = 0,4$ $R_{ц} = 50,0 \text{ МПаВ/В} \approx 2,0 \%$

1) $R_{\sigma}^T = 0,4 \cdot 50 \cdot (2,71 + 0,5) = 64,2 \text{ МПа}$

2) $R_{\sigma}^T = 0,4 \cdot 50 \cdot (2,9 + 0,5) = 68,0 \text{ МПа}$ (при расчете количества воды по предложенной авторами статьи методике).

При содержании вовлеченного воздуха в бетонной смеси более 2,3 %:

$$B/B^{\phi} = B^T/B - 2,35 \% \quad B^T/B = 6,35 \% \quad B/B^{\phi} = 6,35 - 2,35 = 4,0 \%$$

K_{ϕ} – коэф. учета потери прочности, при $B^T/B \geq 2,35 \%$ $K_{\phi} = 0,8$

При $B^T/B \leq 2,35 \%$ $K_{\phi} = 1,0$

1) $R_{\sigma}^T = K_{\phi} \cdot A \cdot R_{ц} (Ц/B + 0,5) = 0,8 \cdot 64,2 = 51,36 \text{ МПа}$

2) $R_{\sigma}^T = K_{\phi} \cdot A \cdot R_{ц} (Ц/B + 0,5) = 0,8 \cdot 68,0 = 54,4 \text{ МПа}$

“Оптимальность структуры ”подбора состава бетонной смеси (κ_p , r , Δ и т.д.) должны определяться не только минимальной пустотностью смеси заполнителей и объемом связующего – но и требуемыми технологическими свойствами, а также экономической целесообразностью с применением отходов производства (например отсева) [4].

Что касается вопроса повышения морозостойкости цементобетона необходимо не только определенный интегральный объем воздуха, но и определенный характер дифференциальной воздушной пористости, которая определяет удельную площадь поверхности воздушных пор и фактор расстояния между ними. Для дорожного бетона высокой морозостойкости фактор расстояния не должен превышать 0,15 мм, а объем резервных пор $d \leq 300$ мкм должен быть не менее 5 %.

По А.М. Шейнину фактическая морозостойкость (с учетом антигололедных реагентов) дорожного бетона гарантирование высокой морозостойкости должна быть существенно выше (ориентировочно в 2,5 - 3 раза от номинального (нормативного)). Нормативные марки по морозостойкости должны использоваться только при подборе состава бетона, контроле его качества в процессе строительства и при приемки цементобетонных покрытий в эксплуатацию.

При испытание дорожного бетона на морозостойкость наилучшие результаты при содержании песка $r = 0,37 \div 0,42$. При использовании мелких и очень мелких песках морозостойкость повышается, что можно объяснить с увеличением:

- межзернового пространства при $\alpha_{цг} \leq 1,0$ и увеличение прослоек цементного теста от $20 \div 40$ мкм до $70 \div 80$ мкм;
- расположение воздушных пузырьков в основном в зоне прослоек цементного теста (растворной части);
- упорядочивание размеров воздушных пузырьков (увеличивается от $10 \div 70$ мкм до $100 \div 200$ мкм) [5,6].

При $t = - 50$ °С в 5 % растворе хлорида натрия по сравнению с $t = - 20$ °С бетон показал весьма низкую морозостойкость (при – 50 °С до 10 циклов, а при – 20 °С $20 \div 40$ циклов).

Следует отметить, что отличительной особенностью пропаренного дорожного бетона (сборный железобетон) при – 50 °С является “взрывной”

характер разрушения проявляющийся в образовании волосяных трещин на гранях, шелушение и т.д.

Результаты сравнительных испытаний показывают, что бетон высокой морозостойкости при $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ разрушился в 5 - 6 раз быстрее чем при $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, а бетон низкой морозостойкости при $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ разрушился приблизительно в 10 раз быстрее без потери массы.

Выводы

Для получения высокопрочных дорожных бетонов нужно учесть следующие факторы:

- использовать цементы высокой прочности при изгибе, желательно мокрого помола с учетом зарубежного опыта (Канады, США, Финляндии, Швеции);
- применять эффективные комплексные добавки на основе суперпластификаторов с воздухововлекающими добавками (с водоредуцированием более 30 %), живучестью бетонной смеси не менее 60 - 120 мин.;
- подбор оптимального состава цементобетонной смеси.

Литература

1. Файнер М.Ш. Высокопрочный бетон. – Черновцы: Изд-во Черновиц. нац. ун-та «Рута», 2007. – 124 с.
2. Саканделидзе А.А. Новый способ рационального проектирования высокопрочных бетонов марок 500-1000. – Тбилиси, 1978.
3. ГОСТ 27006 – 86. Правила подбора состава.
4. Шургая А.Г., Гудименко К.В., Чиженко Н.П. Теоретические и практические аспекты улучшения технологических показателей, экономической целесообразности и долговечности высокопрочных цементобетонов в дорожном строительстве // Будівельні матеріали, вироби та санітарна техніка. – 2013. - №49 – с.154 – 161.
5. Шейнин А.М. Цементобетон для дорожных и аэродромных покрытий. – М.: Транспорт, 1991.- 151 с.
6. Шейкин А.Е., Чеховский Ю.В., Бруссер М.И. Структура и свойства цементных бетонов. – М.: Стройиздат, 1979. – 344 с.

Рецензенти:

Мішутін А.В., д-р техн. наук, Одеська державна академія будівництва і архітектури.
Солодкий С.Й., д-р техн. наук, НУ "Львівська політехніка".

Reviewers:

Mishutin A.V., Dr. Tech. Sci., Odessa State Academy of Construction and Architecture.
Solodkyi S.Yo., Dr. Tech. Sci., NU "Lviv Polytechnic".

Стаття надійшла до редакції: **11.05.2016 р.**