

WPŁYW ZASTOSOWANIA WSKAŹNIKÓW WODNYCH STERNA I BOLOMEYA NA KLASY KONSYSTENCJI MIESZANKI BETONOWEJ

Konrad Podawca, Bartłomiej Kalinowski

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

Streszczenie. Głównym zagadnieniem, jakiemu poświęcony został artykuł, było badanie konsystencji mieszanek betonowych zaprojektowanych zgodnie z normą PN-B-06250, a następnie odniesienie otrzymanych wyników do przedziałów klas konsystencji zawartych w normie PN-EN 206-1. Kolejnym celem było zweryfikowanie zasadności stosowania wskaźników wodnych Sterna i Bolomeya w kontekście otrzymania założonej klasy konsystencji mieszanek betonowych. Prace laboratoryjne poprzedzone zostały wykonaniem szczególnych obliczeń, dotyczących doboru poszczególnych składników betonu.

Słowa kluczowe: beton; mieszanka betonowa, konsystencja, Ve-Be, opad stożka

WSTĘP

Norma PN-EN 206-1:2003, której pełna nazwa brzmi „Beton – Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność” wprowadziła podział mieszanek betonowych ze względu na klasy konsystencji zależnie od wykorzystanej metody badania tej cechy. Natomiast projektowanie mieszanki betonowej odbywa się z zastosowaniem wskaźników wodnych dla kruszywa i cementu wyznaczonych dla konsystencji ujętych w normie PN-B-06250. W literaturze przedmiotu odnaleźć można tablice z wartościami wskaźników wodnych opracowane niezależnie przez dwóch naukowców – Bolomeya oraz Sterna.

Celem badań była wstępna weryfikacja zasadności stosowania literaturowych wskaźników wodnych w kontekście otrzymania założonej klasy konsystencji mieszanek betonowych zawartych w normie PN-EN 206-1.

METODY BADAŃ

Założony cel badań zdecydował o dość klasycznym postępowaniu, biorąc pod uwagę rozpatrywany problem. Konieczne było zastosowanie w badaniach zarówno metod doświadczalnych, jak i obliczeniowych, opartych na normach lub znanej literaturze przedmiotu. Koncepcja badań zakładała taki dobór kruszywa, aby na podstawie identycznego stosu okruszowego zaprojektować mieszanki z różnymi wskaźnikami wodnymi dostępnymi w literaturze.

Zakres badań sprowadzał się do:

1. Doboru kruszywa do mieszanki betonowej z wykorzystaniem:
 - analizy sitowej, w celu sprawdzenia składu ziarnowego piasku i możliwości zastosowania go w mieszance betonowej zgodnie z PN-EN 933-1/2000,
 - metody iteracji (kolejnych przybliżeń), w celu znalezienia optymalnego stosu okruszowego kruszywa pod względem jamistości i wodożądności [Gantner i in. 2000, Mizera i in. 2000, Jamroży 2008],
 - metody krzywych granicznych, w celu sprawdzenia poprawności zaprojektowanego udziału procentowego poszczególnych frakcji kruszywa.
2. Zaprojektowania składu mieszanki betonowej (o konsystencji plastycznej i gęsto-plastycznej) metodą trzech równań (Kluza-Eymana).
3. Zbadania konsystencji mieszanek betonowych z wykorzystaniem:
 - metody opadu stożka zgodnie z PN-EN 12350-2:2001,
 - metody Ve-Be zgodnie z PN-EN 12350-3:2001.

Badania laboratoryjne zostały przeprowadzone w laboratorium budowlanym Katedry Inżynierii Budowlanej Wydziału Inżynierii i Ochrony Środowiska SGGW.

PRZEGLĄD LITERATURY

Norma PN-EN 206-1 podaje przedziały dla poszczególnych klas konsystencji w zależności od zastosowanej metody badania tej konsystencji. Jeżeli porównamy je ze stosowanymi przedziałami według normy PN-B-06250, to zostaną uwidocznione różnice między konsystencjami oznaczanymi od K1 do K5 a klasami V0–V4 czy S1–S5 (tab. 1).

W związku z tym pojawia się problem odniesienia „dawnych” i obecnych konsystencji mieszanek betonowych oraz prawidłowość ich projektowania na podstawie wskaźników wodnych odnoszących się do konsystencji oznaczanej słownie, a stosowanych przy obliczaniu wodożądności kruszywa.

W literaturze przedmiotu można znaleźć pewne próby „automatycznego przejścia” ze słownych określeń konsystencji na klasy konsystencji (tab. 2). W jakim zakresie jest to prawidłowe? – wstępnie powinny odpowiedzieć badania zaprezentowane w artykule.

Opracowanie zestawu tabel 3, 4 i 5, zawierających wskaźniki wodożądności kruszywa naturalnego, możliwe było dzięki zastosowaniu wzorów matematycznych opracowanych przez dwóch naukowców [Brandt 1998, Stefańczyk i in. 2005]:

$$- \text{wzór Sterna } w_k = \left[\frac{1}{0,5(\log d_1 + \log d_2)} \right]^3 \cdot N$$

– wzór Bolomey’a $w_k = \frac{N}{3\sqrt{d_1 d_2}}$

gdzie: w_k – wodożądność frakcji kruszywa,

d_1, d_2 – średnice oczek sit normowych, ograniczających frakcje kruszywa [mm],

N – współczynnik doświadczalny zależny od konsystencji mieszanki betonowej.

Tabela 1. Klasyfikacja konsystencji mieszanki betonowej według PN-EN 206-1 i PN-88/B-06250 dla metody Ve-Be i opadu stożka

Table 1. The classification of the concrete mix consistency according to the PN-EN 206-1 and PN-88/B-06250 for Ve-Be method and a cone drop method

Konsystencja wg PN-88/B-06250 Consistency according to the PN-88/B-06250	Czas Ve-Be Ve-Be time [s]	Klasa konsystencji wg PN-EN 206-1 Consistency according to the PN-EN 206-1	Klasa konsystencji wg PN-EN 206-1 Consistency according to the PN-EN 206-1	Opad stożka A A drop cone [mm]	Konsystencja wg PN-88/B-06250 Consistency according to the PN-88/B-06250
WILGOTNA DAMP K1	35	V0	S1	0	GĘSTOPLASTYCZNA STIFF K2
	34				
	33				
	32				
	31				
	30				
	29				
	28				
	27				
	26				
GĘSTOPLASTYCZNA STIFF K2	25	V1	S2	60	PÓLCIEKŁA HALF-FLUID K4
	24				
	23				
	22				
	21				
	20				
	19				
	18				
	17				
	16				
PLASTYCZNA PLASTIC K3	15	V2	S3	120	CIEKŁA FLUID K5
	14				
	13				
	12				
	11				
	10				
	9				
	8				
	7				
	6				
PÓLCIEKŁA HALF-FLUID K4	5	V3	S4	160	
	4				
	3				
	3				
	3	V4	S5	210	
	2				
	1				
	0				
	0				
	0				

Tabela 2. Konsystencja a klasy konsystencji [Stefańczyk i in. 2005]

Table 2. Consistency and class consistency

Konsystencja Consistency	Metoda badania i klasa konsystencji – Method and consistency class	
	Opad stożka – A cone drop [mm]	Czas Ve-Be – Ve-Be time [s]
Wilgotna – damp	–	V0 >31
Gęstoplastyczna – stiff	–	V1 <21–30>; V2 <11–20>
Plastyczna – plastic	S1 <10–40>	V3 <6–10>
Półciekła – half-fluid	S2 <50–90>	V4 <3–4>
Ciekła – fluid	S3 <100–150>	–

Tabela 3. Współczynnik N [Stefańczyk 2005]Table 3. The index N

Wartość współczynnika N Value of index N	Konsystencja – Consistency				
	K1	K2	K3	K4	K5
Według Sterna	0,95	1,20	1,45	1,70	1,95
Według Bolomeya	0,080	0,085	0,095	0,105	0,120

Tabela 4. Wskaźniki wodne piasku, żwiru i cementu opracowane przez Sterna [Zieliński 2009]

Table 4. Water requirement of sand, gravel and cement at consistency to Stern

Frakcje Fractions [mm]	Wskaźniki wodne przy konsystencji – Water requirement of consistency				
	wilgotnej damp	gęstoplastycznej stiff	plastycznej plastic	półciekłej half-fluid	ciekłej fluid
0–0,125	0,184	0,215	0,239	0,255	0,296
0,125–0,25	0,094	0,109	0,122	0,137	0,151
0,25–0,5	0,064	0,076	0,084	0,095	0,112
0,5–1,0	0,045	0,053	0,058	0,065	0,077
1,0–2,0	0,033	0,039	0,043	0,048	0,058
2,0–4,0	0,025	0,029	0,032	0,037	0,044
4,0–8,0	0,020	0,023	0,026	0,029	0,034
8,0–16,0	0,015	0,018	0,020	0,023	0,027
16,0–32,0	0,013	0,015	0,016	0,018	0,022
32,0–63,0	0,0085	0,012	0,013	0,015	0,016
Cement klasy 32,5	0,23	0,25	0,27	0,29	0,31
Cement klas 42,5 i 52,5	0,26	0,28	0,30	0,32	0,34

Tabela 5. Wskaźniki wodne kruszywa opracowane przez Bolomeya [Jamróży 2008]

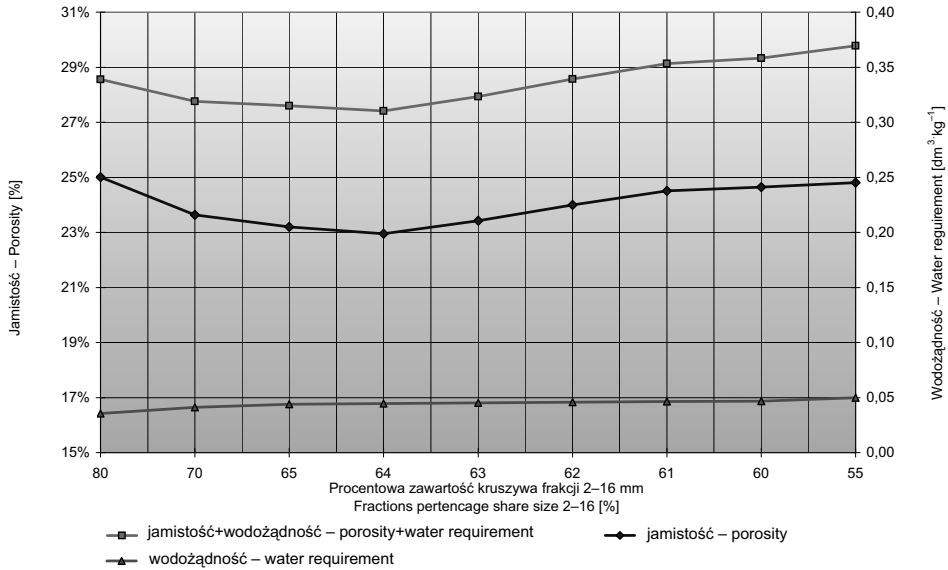
Table 5. Water requirement of aggregate at consistency to Bolomey

Frakcje Fractions [mm]	Wskaźniki wodne przy konsystencji – Water requirement of consistency				
	wilgotnej damp	gęstoplastycznej stiff	plastycznej plastic	półciekłej half-fluid	ciekłej fluid
0–0,125	0,3140	0,3450	0,3660	0,3880	0,4310
0,125–0,25	0,2320	0,2540	0,2700	0,2860	0,3180
0,25–0,5	0,1460	0,1600	0,1700	0,1800	0,2000
0,5–1,0	0,0921	0,1010	0,1070	0,1130	0,1260
1,0–2,0	0,0580	0,0635	0,0675	0,0714	0,0794
2,0–4,0	0,0365	0,0400	0,0425	0,0450	0,0500
4,0–8,0	0,0214	0,0234	0,0248	0,0263	0,0292
8,0–16,0	0,0125	0,0137	0,0145	0,0154	0,0171
16,0–32,0	0,0079	0,0086	0,0091	0,0097	0,0108
32,0–63,0	0,0050	0,0054	0,0058	0,0061	0,0068

WYNIKI BADAŃ

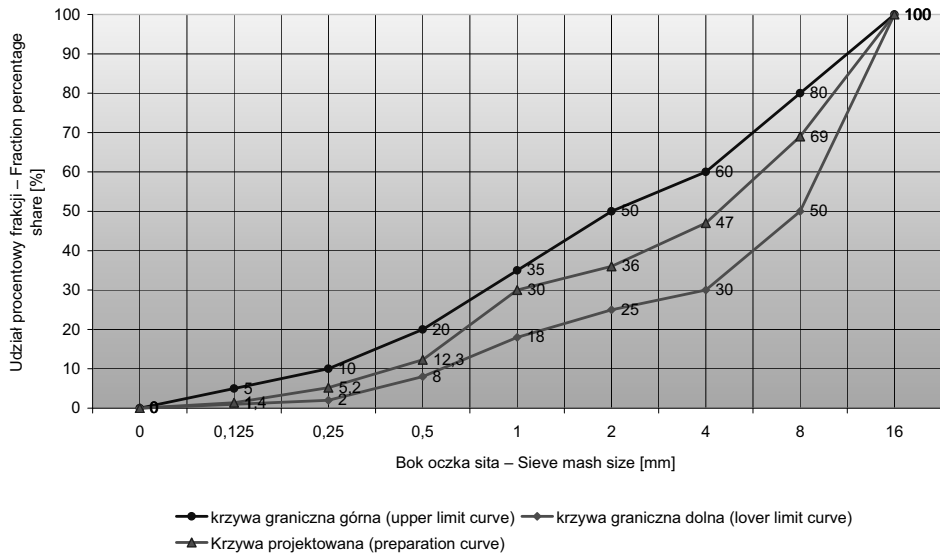
Dobór kruszywa do mieszanki betonowej

Kruszywo dobrano metodą iteracji z jednoczesnym sprawdzeniem uzyskanej krzywej uziarnienia z krzywymi granicznymi (rys. 1 i 2).



Rys. 1. Wykres jamistości i wodożądności kruszywa dla badań serii III

Fig. 1. Diagram of porosity and water requirement aggregate for III series analysis



Rys. 2. Krzywa optymalnego uziarnienia dobrana metodą iteracji

Fig. 2. Aggregate optima grading curve to iteration method

W kolejnych seriach badania, polegającego na określeniu optymalnego procentowego udziału poszczególnych frakcji kruszywa grubego, uzyskano następujące wyniki:

- I seria dla frakcji 8–16 (G_1) i 4–8 (G_2), najkorzystniejszy stosunek zmieszania uzyskano przy stosunku $G_1 : G_2 = 54 : 46$,
- II seria dla mieszaniny 4–16 (G_{1-2}) i frakcji 2–4 (G_3), optymalnym połączeniem mieszaniny frakcji 8–16 i 4–8 (G_{1-2}) i frakcji 2–4 (G_3) będzie stosunek $G_{1-2} : G_3 = 82 : 18$,
- III seria pokazała, że najlepszym procentowym stosunkiem zmieszania kruszywa 2–16 mm (G_{1-2-3}) z piaskiem (G_4) metodą iteracji, zgodnie z zasadą minimalnej sumy jamistości i wodożądności, będzie $G_{1-2-3} : G_4 = 65 : 35$.

Projektowanie mieszanki betonowej

Przyjęto następujące założenia dla projektowanej mieszanki betonowej: beton klasy wytrzymałości C 20/25, konsystencja gęstoplastyczna i plastyczna (tab. 6), kruszywo naturalne o uziarnieniu dobranym w trakcie badań, gęstość objętościowa kruszywa $\rho_k = 2,65 \text{ kg}\cdot\text{dm}^{-3}$, punkt piaskowy PP = 36%, cement CEM I 32,5, gęstość cementu $\rho_c = 3,1 \text{ kg}\cdot\text{dm}^{-3}$, wskaźniki wodożądności kruszywa i cementu zgodnie z tabelami Sterna i Bolomeya [Szymański 2002, Nocuń-Wczelik i in. 2003, Jamróży 2008].

Tabela 6. Skład mieszanki betonowej o konsystencji gęstoplastycznej i plastycznej
Table 6. The concrete mix composition with the stiff and plastic consistency

Składniki Components	Skład mieszanki betonowej – The concrete mix composition [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]			
	według wskaźników wodnych Bolomeya according to Bolomey's water requirement		według wskaźników wodnych Sterna according to Stern's water requirement	
	gęstoplastyczna stiff	plastyczna plastic	gęstoplastyczna stiff	plastyczna plastic
Wodożądność – Water requirement [$\text{dm}^3\cdot\text{kg}^{-1}$]	0,06673	0,0708	0,04018	0,0446
Cement – Cement [kg]	440,13	457,03	327,90	376,14
Woda – Water [dm^3]	214,95	223,20	160,14	183,70
Kruszywo – Aggregate [kg]	1704,15	1667,84	1945,33	1841,67

Obliczenia wykonano na podstawie metody Kluza-Eymana z grupy metod „trzech równań” [Neville 2000, Szymański 2002, Nocuń-Wczelik 2003, Stefańczyk i in. 2005, Jamróży 2008].

Badanie konsystencji

Badania konsystencji zostały przeprowadzone na 32 próbkach o następującej charakterystyce:

- 8 próbek o konsystencji plastycznej z mieszanki betonowej zaprojektowanej z wykorzystaniem wskaźników Bolomeya, a zbadanych metodą Ve-Be (4 próbki) i opadem stożka (4 próbki),

- 8 próbek o konsystencji plastycznej z mieszanki betonowej zaprojektowanej z wykorzystaniem wskaźników Sterna, a zbadanych metodą Ve-Be (4 próbki) i opadem stożka (4 próbki),
- 8 próbek o konsystencji gęstoplastycznej z mieszanki betonowej zaprojektowanej z wykorzystaniem wskaźników Bolomeya, a zbadanych metodą Ve-Be (4 próbki) i opadem stożka (4 próbki),
- 8 próbek o konsystencji gęstoplastycznej z mieszanki betonowej zaprojektowanej z wykorzystaniem wskaźników Sterna, a zbadanych metodą Ve-Be (4 próbki) i opadem stożka (4 próbki).

Badanie konsystencji próbek betonowych metodą Ve-Be przedstawia fotografia na rysunku 3.



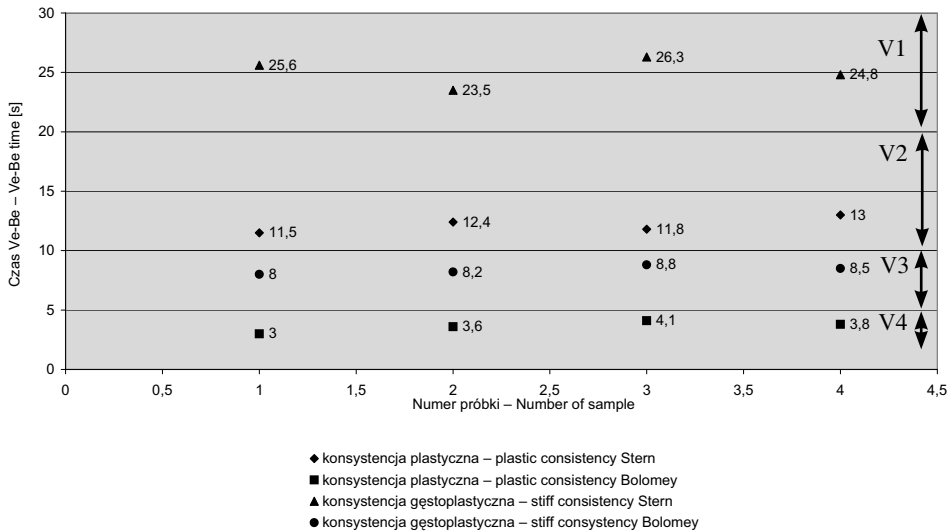
Rys. 3. Badanie konsystencji metodą Ve-Be [fot. B. Kalinowski]

Fig. 3. Consistency test Ve-Be method

DYSKUSJA WYNIKÓW BADAŃ

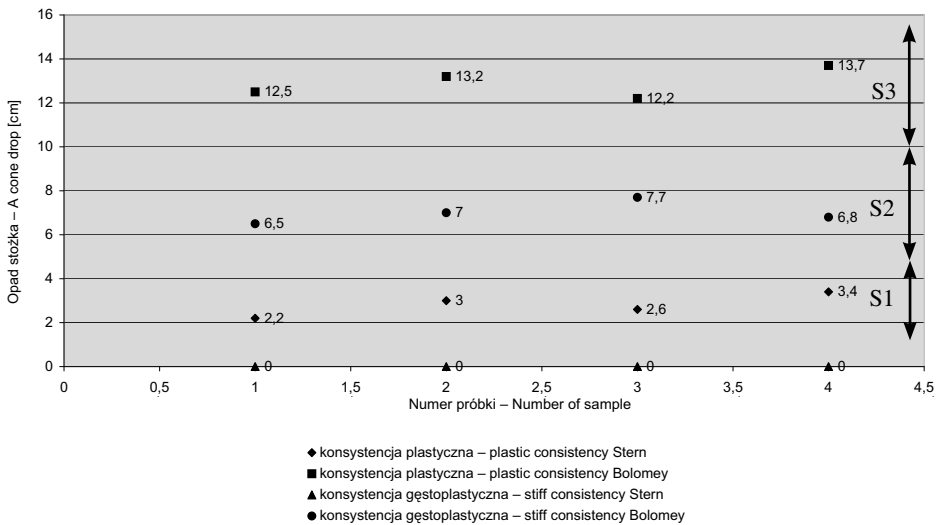
Wyniki badań przedstawiono na wykresach (rys. 4 i 5) na tle obecnie obowiązujących klas konsystencji. Na ich podstawie zauważyć można, w jaki sposób układają się wyniki pomierzonych wielkości w przeprowadzonych badaniach laboratoryjnych. Wyniki te odniesione zostały do normowych granic konsystencji mieszanki betonowej zawartych w normie betonowej PN-EN 206-1.

Na rysunku 4 przedstawiono wyniki pomiaru Ve-Be dla mieszanek o zaprojektowanych konsystencjach plastycznej i gęstoplastycznej, z wykorzystaniem wskaźników wodnych według Sterna. Pomierzony czas opadu mieszanki o konsystencji plastycznej znajduje się w środkowym paśmie klasy konsystencji V1. Czas opadu mieszanki o konsystencji gęstoplastycznej zawiera się w dolnym paśmie klasy konsystencji V2. Na rysunku 4 zaprezentowano również wyniki pomiaru Ve-Be dla mieszanek zaprojektowanych przy wykorzystaniu wskaźników Bolomeya. Ich ciekłość była znacznie większa, a otrzymane



Rys. 4. Zestawienie wyników badania konsystencji plastycznej i gęstoplastycznej według wskaźników wodnych Bolomeya i Sterna metodą Ve-Be

Fig. 4. The results of the examination of the plastic and thick-plastic consistency according to Bolomey's and Stern's water requirement of Ve-Be method



Rys. 5. Zestawienie wyników badania konsystencji plastycznej i gęstoplastycznej według wskaźników wodnych Bolomeya i Sterna metodą stożka opadowego

Fig. 5. The results of the examination of the plastic and thick-plastic consistency according to Bolomey's and Stern's water requirement of a cone drop method

wyniki pomiaru okazały się przesunięte względem przedziałów klas konsystencji V1 oraz V2 do klasy V3 i V4.

Na rysunku 5 przedstawiono wyniki pomiaru stożka opadowego dla dwóch mieszanek – na konsystencję plastyczną oraz gęstoplastyczną zaprojektowanych przy wykorzystaniu wskaźników Sterna. Opad mieszanki o konsystencji plastycznej okazał się przesunięty na wykresie w stosunku do przedziału klasy konsystencji S3 do klasy S1, a mieszanka o konsystencji gęstoplastycznej wręcz nie wykazywała opadu (był mniejszy od 0,5 cm). Rysunek 5 prezentuje ponadto wyniki pomiaru konsystencji mieszanek betonowych metodą stożka opadowego zaprojektowanych przy wykorzystaniu wskaźników Bolomeya. Wyniki te zawierają się w środkowych pasmach przedziałów klas konsystencji. Mieszanka zaprojektowana jako plastyczna znajduje się w środkowym przedziale klasy konsystencji S3, natomiast mieszanka gęstoplastyczna – w środkowym paśmie klasy konsystencji S2.

WNIOSKI I PODSUMOWANIE

Opierając się na uzyskanych wynikach, można pokusić się o sformułowanie ogólne, że projektując mieszankę betonową na podstawie literaturowych wskaźników wodnych nie można z całą pewnością określić klasy konsystencji, jaką się osiągnie według PN-EN 206-1.

Dodatkowo należy stwierdzić, że:

- zaprojektowane mieszanki z wykorzystaniem wskaźników wodożądności kruszywa opracowanych przez Sterna przy zastosowaniu metody Ve-Be mieściły się granicach klas konsystencji V1 – gęstoplastyczna (K2), i V2 – plastyczna (K3),
- mieszanki oparte na wskaźnikach Bolomeya wykazywały większą płynność, a wyniki badania Ve-Be zaliczały je do klas V3 i V4,
- w przypadku badania metodą stożka opadowego mieszanki opracowywane na podstawie wskaźników wodożądności kruszywa Bolomeya zaliczały się do klas konsystencji S2 (projektowana jako gęstoplastyczna) i S3 (projektowana jako plastyczna), a więc według normy PN-B-06250:1988 odpowiadałyby konsystencji półciekłej,
- mieszanki opracowywane według wskaźników Sterna, a badane metodą stożka opadu zaliczały się do klasy konsystencji S1, czyli w dużej mierze odpowiadającej konsystencji plastycznej i gęstoplastycznej.

PIŚMIENNICTWO

- Brandt A.M., 1998. Optimization methods for material design of cement-based composites. Modern Concrete Technology 7, E&FN SPON, London.
- Czarnecki L., 2005. Beton według normy PN-EN 206-1 – komentarz. Wydawnictwo Polski Cement, Kraków.
- Gantner E., Wrońska Z., Wędrychowski W., Nicewicz S., 2000. Materiały budowlane z technologią betonu. Ćwiczenia laboratoryjne. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa.
- Jamroży Z., 2008. Beton i jego technologie. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Mizera J. i inni, 2000. Ćwiczenia laboratoryjne z materiałów budowlanych i technologii betonu. Politechnika Opolska, Opole.

- Neville A.M., 2000. Właściwości betonu. Wydawnictwo Polski Cement, Kraków.
- Nocuń-Wczelik W. i inni, 2003. Laboratorium materiałów wiążących. Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków.
- PN-B-06250:1988. Beton zwykły.
- PN-EN 933-1:2000. Badania geometryczne właściwości kruszyw. Oznaczanie składu ziarnowego. Metoda przesiewania.
- PN-EN 12350-3:2001. Badania mieszanki betonowej. Część 3: Badanie konsystencji metodą Vebe.
- PN-EN 12350-5:2001. Badania mieszanki betonowej. Część 2: Badanie konsystencji metodą opadu stożka.
- PN-EN 206-1:2003. Beton. Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.
- PN-EN 12620:2004. Kruszywa do betonu.
- Stefańczyk B. i inni, 2005: Budownictwo ogólne. T. I. Materiały i wyroby budowlane. Wydawnictwo Arkady, Warszawa.
- Szymański E., 2002. Materiałoznawstwo budowlane z technologią betonu. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa.
- Zieliński K., 2009: Podstawy technologii betonu. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań.

IMPACT OF APPLICATION OF STERN AND BOLOMEY WATER REQUIREMENT FORMULAS ON CONCRETE MIXTURE CONSISTENCY CLASSES

Abstrakt. The main subject of the present thesis was an examination of concrete mixtures designed in accordance with the PN-B-06250 standard. The obtained results were referred to the ranges of consistency classes in accordance with the PN-EN 2006-1 standard. The subsequent objective of the thesis was the verification of legitimacy of use of literature water indicators in the context of obtaining assumed consistency classes of concrete mixtures. The research carried out in a laboratory was preceded by detailed calculations concerning selection of particular ingredients of concrete.

Key words: concrete, concrete mix, consistency, the Ve-Be method, the cone drop method

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 22.12.2010