

# Kształtowanie struktury i wytrzymałości ekologicznego betonu

*Aleksander Świtoński*  
*Politechnika Koszalińska*

## 1. Wstęp

Ze względu na olbrzymie straty materialne problemy zagrożenia trwałości elementów betonowych poddanych wpływom czynników klimatycznych spotykają się z bardzo dużym zainteresowaniem. Najbardziej racjonalnym rozwiązaniem optymalizacji kosztów użytkowania elementów poddanych wpływom obciążenia i czynników środowiska zewnętrznego jest zastosowanie ekologicznego betonu do ich wykonania. Jednak bezpośrednie oddziaływanie obciążenia oraz czynników środowiska zewnętrznego powoduje, że taki beton musi spełniać szczególnie wysokie wymagania techniczne i eksploatacyjne. Zmienność oddziaływującego obciążenia w szerokim zakresie wielkości i czasu oddziaływania, od statycznych długotrwałych, poprzez zmienne, a często również wyjątkowe sprawia, że problem trwałości betonu, decydujący o niezawodności użytkowania elementów, przy uwzględnieniu okresu eksploatacji staje się zagadnieniem bardzo złożonym. Ponieważ beton jest kompozytem dlatego zasadniczą cechą tego tworzywa jest struktura, czyli rodzaj tworzących go elementów i charakter związków występujących między nimi. Wynika stąd, że każda zmiana właściwości użytkowych wynika z przebudowy jego struktury.

Uwzględniając warunki eksploatacyjne elementów w umiarkowanym klimacie należy stwierdzić, że struktura betonu, ukształtowana w wyniku doboru składników i ostatecznie uformowana pod wpływem zagęszczenia, podlega ciągłym zmianom wywołanym wpływem czynników obiektywnych, a zwłaszcza obciążenia oraz destrukcyjnego oddziaływania otaczającego środowiska. Czynniki obiektywne, związane z eksploatacją elementów oddziałują destrukcyjnie na strukturę betonu. Zatem w betonie ekologicznym należy tak ukształtować strukturę betonu pod wpływem doboru składu i zagęszczenia mieszanki

aby stwardniały materiał skutecznie przeciwstawiał się wpływowi czynników obiektywnych.

Z powyższego wynika, że trwałość betonu ekologicznego jest funkcją zarówno zastosowania czynników subiektywnych jak i wpływu oddziaływań obiektywnych. Jednak analityczne przedstawienie tej zależności w postaci ogólnej wydaje się niemożliwe do zrealizowania ze względu na złożony wieloskładnikowy charakter struktury betonu, a zwłaszcza nie w pełni zdeterminowany wpływ czynników obiektywnych. Jednak z obserwacji wiadomo, że niszczące działanie środowiska może być skutecznie zredukowane przez czynniki subiektywne. Dlatego, obok metodyki doboru składu mieszanki i wpływu procesu dojrzewania, ustalenie zależności między parametrami struktury a właściwościami eksploatacyjnymi należy zaliczyć do istotnych problemów, które wymagają rozwiązania. Ponieważ każda zmiana właściwości użytkowych betonu wynika z przebudowy struktury dlatego ilościowy opis struktury spełnia szczególną rolę zarówno w aspekcie scharakteryzowania jego właściwości, jak i oceny odporności na wpływ czynników środowiska zewnętrznego. Jeżeli więc właściwości użytkowe betonu wynikają z jego charakterystyk strukturalnych, to badanie jego cech fizyko-mechanicznych oraz użytkowych powinny zaczynać się od wyznaczenia parametrów struktury. Znajomość charakterystyk strukturalnych nie tylko umożliwi określenie podstawowych cech fizyko-mechanicznych, lecz także ułatwia przewidywanie właściwości eksploatacyjnych betonu.

Należy stwierdzić, że badania zmierzające do racjonalnego wykorzystania energochłonnych spoiw budowlanych przyczyniły się do rozpoznania zjawiska intensyfikacji przyrostu wytrzymałości dwuskładnikowych układów dyspersyjnych utworzonych w procesie ciśnieniowego zagęszczenia spoiwa mineralnego z wodą. Zasadniczym zadaniem tego sposobu formowania wyrobów jest kształtowanie struktury zaczynu cementowego w wyniku obniżenia zawartości fazy ciekłej i zmiany początkowej konfiguracji przestrzennego układu ziaren fazy stałej. Ten sposób zagęszczenia mieszanki składników znajduje szerokie zastosowanie w nowoczesnych technologiach produkcji elementów przeznaczonych do użytkowania w warunkach otwartego środowiska.

Uwzględniając potrzeby bardziej wnikliwego wyjaśnienia zjawisk fizycznych zachodzących w zaczynie cementowym w czasie ciśnieniowego zagęszczania mieszanki betonowej autor uogólnił zaproponowany w pracy [1] model geometryczny struktury mieszanki betonowej. Pozwala to określić jakościowe i ilościowe zależności pomiędzy parametrami struktury a czynnikami zewnętrznymi oddziałującymi na mieszankę betonową.

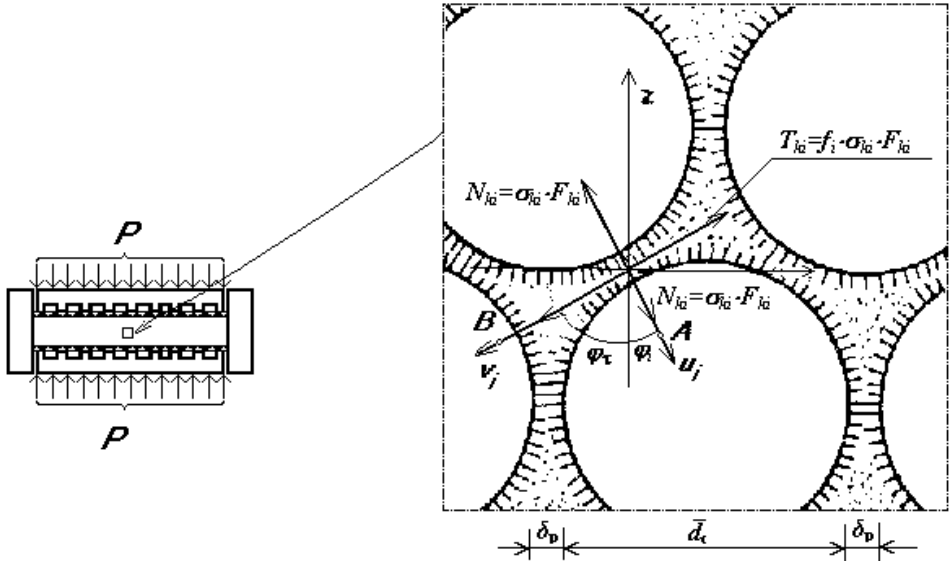
Potrzeba wyznaczenia powyższych relacji wynika z istniejących uwarunkowań właściwości fizycznych betonu od jego struktury wewnętrznej. Dlatego zasadniczym celem poniższej analizy jest podanie funkcji opisu zjawisk kształto-

wania struktury, które wywierają największy wpływ na właściwości fizyko-mechaniczne i trwałość betonu. Znajomość tych relacji ma istotne znaczenie poznawcze oraz aplikacyjne, gdyż stwarza możliwość doboru optymalnych parametrów ciśnieniowego zagęszczenia mieszanek betonów ekologicznych.

## 2. Ogólne założenia

Analizę zjawisk zachodzących w procesie ciśnieniowego zagęszczenia mieszanki betonowej przeprowadzimy na poziomie makroskopowym. W pisie mechanizmu zagęszczenia mieszanki przyjmiemy model geometryczny zawiesiny ziaren kruszywa w zacynie cementowym, który stanowi tu fazę ciągłą. Poszczególne elementy fazy stałej są rozdzielone cieczą. Przy wzajemnym zbliżaniu się elementów fazy stałej ich warstwy dyfuzyjne przenikają się w miarę zbliżania ziaren.

W mieszance betonowej ziarna kruszywa nie są połączone ze sobą, stąd mają względną swobodę wzajemnych przesunięć. Jednak w porównaniu z fazą ciągłą nie mają możliwości takiej swobody przemieszczeń jak zawieszina cementu. Pod wpływem statycznego obciążenia ośrodka, w warunkach otwartego układu, następuje odprowadzenie fazy ciekłej, co prowadzi do zbliżenia ziaren mieszanki betonowej, głównie w wyniku zagęszczenia ziaren cementu w zawieszinie.



**Rys. 1.** Rozkład sił wzajemnego oddziaływania elementów fazy stałej w procesie ciśnieniowego zagęszczenia mieszanki betonowej

**Fig. 1.** Resolution of forces of interaction of solid phase elements in the process of pressure consolidation of concrete mix

W rzeczywistym układzie ziarna fazy stałej są zawieszane w cieczy, która otacza je i wypełnia jamy pomiędzy ziarnami. W początkowym okresie część obciążenia oddziałującego na mieszankę przejmują ciecz znajdująca się w przestrzeniach międzyziarnowych. Biorąc pod uwagę statyczny proces ciśnieniowego zagęszczenia mieszanki w układzie otwartym, to można przyjąć założenie, że ciśnienie fazy ciekłej w przestrzeniach międzyziarnowych, w wyniku swobody wypływu, powraca do początkowej wielkości ciśnienia hydrostatycznego, natomiast oddziaływania pomiędzy elementami fazy stałej przejmowane są przez tworzący się pomiędzy elementami fazy stałej koagulacyjny szkielet zagęszczonego zaczynu cementowego.

### 3. Zagęszczenie ziaren kruszywa w prasowanej mieszance betonowej

Uwzględniając powyższe założenia problem opisu ilościowego zbliżenia ziaren fazy stałej w procesie ciśnieniowego zagęszczenia mieszanki sformułujemy następująco. Rozważamy dwa sąsiednie ziarna mieszanki, rozdzielone warstwą cieczy (rys. 1). Ziarna te pod wpływem obciążenia zewnętrznego ulegają zbliżeniu. Skutki tego zbliżenia analizujemy od chwili oddziaływania czynnika zagęszczającego. Zakładamy, że od tego momentu wraz z przyrostem obciążenia wzrastać będzie pole powierzchni kontaktów obydwu elementów.

Rozwiązaniem w taki sposób postawionego problemu będzie związek opisujący wielkość zbliżenia ziaren fazy stałej w prasowanej mieszance betonowej, który zdefiniujemy następującą zależnością [15]:

$$u_k = \chi \cdot \frac{\bar{F}_k}{\bar{d}_k} \quad (1)$$

gdzie:

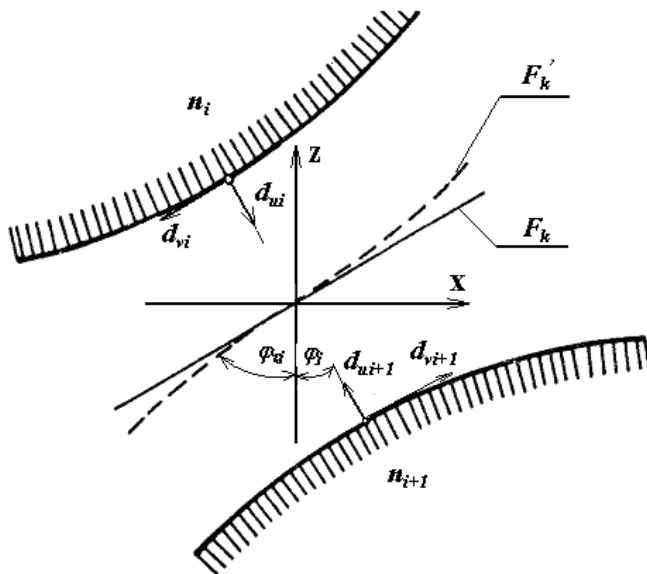
$u_k$  – wielkość zbliżenia ziaren fazy stałej w prasowanej mieszance betonowej,

$\chi$  – współczynnik proporcjonalności,

$\bar{F}_k$  – średnia powierzchnia kontaktu, wyrażona wielkością rzutu powierzchni styku ziaren fazy stałej na płaszczyznę prostopadłą do ich wspólnej normalnej,

$\bar{d}_k$  – średnia statystyczna wielkość ziarna kruszywa w mieszance betonowej.

Określając wielkości przemieszczeń powierzchni ziaren kruszywa wprowadzimy lokalne układy współrzędnych [15].



**Rys. 2.** Lokalny układ współrzędnych w strefie kontaktów ziaren kruszywa  
**Fig. 2.** Local coordinate systems in the contact zone of aggregate granules

Z analizy rozkładu sił wzajemnego oddziaływania ziaren kruszywa, przedstawionego na rys. 1. wynika, że parametr  $\varphi_n$  określa kąt pomiędzy osią Z, zgodną z przemieszczeniem stempla oddziałującego na mieszankę betonową i kierunkiem normalnym do powierzchni wzajemnego oddziaływania elementów, a symbol  $\varphi_r$  wyznacza kąt pomiędzy współrzędną Z i kierunkiem przemieszczenia ziaren.

W tym układzie odniesienia przyrosty przemieszczeń powierzchni ziaren, wywołane wpływem sił jakich doznają w wyniku oddziałującego ciśnienia prasowania wynoszą:  $du$ ,  $du_{i+1}$ ,  $dv_i$  i  $dv_{i+1}$ . W układzie współrzędnych odniesionych do powierzchni kontaktu ziaren zdefiniujemy je następująco:

$$du_i + du_{i+1} = du_k, \quad (2)$$

$$dv_i + dv_{i+1} = 2dv_c. \quad (3)$$

W wyrażeniu (2) składowe  $du_i$  i  $du_{i+1}$  określają wielkość przemieszczeń powierzchni będących wynikiem zmniejszenia odległości pomiędzy ziarnami.

Natomiast składowe  $dv_i$  oraz  $dv_{i+1}$  wyznaczają elementarne przemieszczenia ziaren w płaszczyźnie stycznej do powierzchni kontaktu.

Uwzględniając zbliżenie ziaren w miejscu kontaktu oraz wpływ parcia bocznego elementarne przemieszczenie sąsiednich ziaren wywołane przyrostem nacisku stempla  $dP$  odniesione do kierunku oddziaływania obciążenia będzie wynosiło:

$$dh_i = -[(du_i + du_{i+1}) \cdot \cos \varphi_i + (dv_i + dv_{i+1}) \cdot \cos \varphi_{\alpha}], \quad (4)$$

gdzie:

$dh_i$  – elementarne przemieszczenie ziaren kruszywa w kontakcie „i”, odniesione do kierunku oddziaływania przyrostu obciążenia  $dP$ ,

$\varphi_i$  – kąt pomiędzy kierunkiem oddziaływania siły normalnej do powierzchni kontaktu ziarna kruszywa a kierunkiem wywieranego nacisku,

$\varphi_{\alpha}$  – kąt pomiędzy kierunkiem oddziaływania siły stycznej w strefie kontaktu a kierunkiem wywieranego nacisku.

W opisie układu ziaren w prasowanej mieszance cementowej przyjmiemy założenie, że ziarna kruszywa ułożone są warstwowo, a liczba ziaren w warstwie jest równa  $n_{wi}$ . Liczbę warstw składających się na wysokość prasowanego elementu określimy jako  $n_h$ . Rozpatrując ogólny przypadek na podstawie zależności (4) elementarne przemieszczenie stempla formy ciśnieniowej, wywołane elementarnym przyrostem siły nacisku  $dP$ , określimy następującą relacją:

$$dh = - \sum_{i=1}^{n_h} \left\{ \frac{1}{n_{wi}} \sum_{i=1}^{n_{wi}} \left[ \frac{1}{l_{ki}} \sum_{i=1}^{l_{ki}} (du_i + du_{i+1}) \cdot \cos \varphi_i + (dv_i + dv_{i+1}) \cdot \cos \varphi_{\alpha} \right] \right\}, \quad (5)$$

gdzie:

$h$  – wysokość zagęszczanego elementu,

$n_h$  – liczba warstw kruszywa w wysokości elementu,

$n_{wi}$  – liczba ziaren kruszywa w analizowanej warstwie,

$l_{ki}$  – liczba oporowych kontaktów analizowanego ziarna kruszywa.

Dla wielkości średnich wyrażenie (5), po uwzględnieniu wyrażeń (2) i (3), przyjmuje postać:

$$dh = -n_h \cdot \cos \varphi \left( 1 + 2 \frac{dv_c}{du_k} \frac{\cos \varphi_\tau}{\cos \varphi} \right) du_k. \quad (6)$$

W wyrażeniu (6)  $du_k$  określa elementarne zbliżenie ziaren kruszywa w prasowanej mieszance betonowej w miejscu kontaktu.

Wprowadzając w wyrażeniu (6) następujące oznaczenia:

$$2 \frac{dv_c}{du_k} = \psi \quad \text{oraz} \quad \frac{\cos \varphi_\tau}{\cos \varphi} = \varphi_t, \quad (7)$$

wielkość odkształcenia prasowanej mieszanki betonowej wyniesie:

$$dh = -n_h (1 + \psi \cdot \varphi_t) \cos \varphi \cdot du_k. \quad (8)$$

Liczbę warstw ziaren kruszywa składającą się na wysokość prasowanego elementu wyrazimy poprzez całkowity zbiór ziaren  $N$  oraz średnią statystyczną liczbę elementów w rozpatrywanej warstwie  $n_w$ , z następującej zależności:

$$n_h = \frac{N}{n_w}. \quad (9)$$

Związek pomiędzy liczbą ziaren kruszywa i stopniem zagęszczenia prasowanej mieszanki betonowej określimy następującym równaniem:

$$N \cdot A_k \cdot \bar{d}_k^3 = F_n \cdot h \cdot s_k, \quad (10)$$

gdzie:

$A_c$  – współczynnik konfiguracji objętościowej ziarna cementu,

$F_n$  – nominalna powierzchnia przekroju poprzecznego prasowanego elementu,

$s_c$  – szczelność układu ziaren kruszywa w mieszance betonowej.

Przekształcając zależność (10) wyznaczymy ogólną liczbę ziaren kruszywa w prasowanej mieszance betonowej:

$$N = \frac{F_n \cdot h \cdot s_k}{A_k \cdot \bar{d}_k^3}. \quad (11)$$

Średnia liczba ziaren kruszywa w rozpatrywanej warstwie prasowanej mieszanki betonowej jest odpowiednio równa:

$$n_w = \frac{F_n \cdot s}{A \cdot \bar{d}_k^2}, \quad (12)$$

gdzie:

$A$  – współczynnik konfiguracji powierzchniowej przekroju ziarna kruszywa,  
 $s$  – szczelność układu ziaren kruszywa w warstwie.

Z porównania stronami wyrażeń (9), (11) i (12) otrzymujemy zależność określającą średnią liczbę warstw ziaren kruszywa w wysokości prasowanego elementu:

$$n_h = \frac{A \cdot h}{A_c \cdot \bar{d}_k}. \quad (13)$$

Na tej podstawie z wyrażenia (8) określimy elementarne odkształcenie prasowanej mieszanki betonowej w następującej postaci:

$$dh = \frac{A \cdot h}{A_c \cdot \bar{d}_k} (1 + \psi \cdot \varphi_t) \cos \varphi \cdot du_k. \quad (14)$$

Zatem wielkość elementarnego zbliżenia ziaren kruszywa w procesie ciśnieniowego zagęszczenia mieszanki betonowej jest równe:

$$du_k = \frac{A_c \cdot \bar{d}_k}{A(1 + \psi \cdot \varphi_t) \cos \varphi \cdot h} dh. \quad (15)$$

Przy założeniu modelu geometrycznego rozmieszczenia ziaren kruszywa w mieszance betonowej w postaci układu regularnie rozmieszczonych regularnych kul istnieje możliwość matematycznego wyliczenia współczynnika



porowatości oraz liczby kontaktów elementów  $l_k$ , w zależności od sposobu ich rozmieszczenia. Ponieważ rzeczywiste rozmieszczenie ziaren kruszywa w mieszance różni się od idealnego, parametry te określimy na podstawie wyników badań doświadczalnych.

#### 4. Przyrost kontaktów ziaren kruszywa wywołany procesem prasowania mieszanki betonowej

Analizując na poziomie makroskopowym mieszankę betonową jako zawiesinę ziaren kruszywa w zaczynie cementowym przyjmujemy założenie, że średnia liczba wzajemnych kontaktów jest wprost proporcjonalna do względnej gęstości objętościowej ośrodka i może być wyrażona zależnością:

$$l_k = l_{ko} \frac{\rho_{ok}}{\rho_k} = l_{ok} s'_k, \quad (16)$$

w której  $l_{ok}$  określa średnią liczbę kontaktów, a  $s'_k$  szczelność układu ziaren kruszywa w początkowym okresie zagęszczenia mieszanki.

Pomijając zawartość powietrza szczelność układu ziaren kruszywa wyznaczymy z zależności:

$$s'_k = \frac{\rho_{ok}}{\rho_k} = \frac{v_b}{\rho_k} = \frac{m_k}{v_b \cdot \rho_k} = \frac{m_k}{\left( \frac{m_k}{\rho_k} + \frac{m_c}{\rho_c} + \frac{m_w}{\rho_w} \right) \cdot \rho_k}. \quad (17)$$

Przyjmujemy założenie, że w początkowym okresie zagęszczenia mieszanki ziarna kruszywa mają następującą liczbę wzajemnych kontaktów:

$$l_{ko} = l \frac{m_k}{\left( \frac{m_k}{\rho_k} + \frac{m_c}{\rho_c} + \frac{m_{wo}}{\rho_w} \right) \cdot \rho_k} = l \frac{m_k}{v_{bo} \cdot \rho_k}, \quad (18)$$

gdzie  $l$  jest liczbą wzajemnych kontaktów ziaren przy idealnym zagęszczeniu.

W procesie ciśnieniowego zagęszczenia mieszanki liczba kontaktów pomiędzy ziarnami wzrośnie do wielkości:

$$l_k = l_{ko} \cdot s'_k = l \frac{m_k}{v_{bo} \cdot \rho_k} s_k = v \cdot s'_k \cdot l. \quad (19)$$

W opisie mechanizmu zwiększenia kontaktów ziaren kruszywa w prasowanej mieszance przyjmujemy założenie ośrodka dwufazowego. Pozwoli ta na uzyskanie dobrej zgodności rozważań teoretycznych z wynikami badań doświadczalnych.

## 5. Wzrost powierzchni kontaktów ziaren kruszywa w prasowanej mieszance betonowej

Pod wpływem nacisku stempla na mieszankę betonową ziarna kruszywa zbliżają się. W procesie tym następuje wzrost powierzchni wzajemnych kontaktów. Zgodnie z rys. 2. sumę rzutu stref kontaktów ziaren kruszywa na płaszczyznę poziomą, w rozpatrywanym momencie prasowania mieszanki betonowej, wyrazimy zależnością:

$$F_k = \sum_{i=1}^{n_w} \sum_{i=1}^{l_k} F_{ki} \cdot \cos \varphi_i. \quad (20)$$

Zdecydowanie wygodniejszą postać przyjmuje zależność (20) przy uwzględnieniu średniej liczby ziaren kruszywa:

$$F_k = n_w \cdot l_k \cdot \bar{F}_k \cdot \cos \varphi, \quad (21)$$

gdzie  $\bar{F}$  oznacza średnią powierzchnię kontaktów ziaren kruszywa w zagęszczonej pod wpływem prasowania mieszance betonowej.

Rozpatrując łącznie wyrażenia (12), (19) i (21) otrzymujemy zależność:

$$F_k = \frac{F_n \cdot s'_k}{A \cdot \bar{d}_k^3} \cdot v \cdot s'_k \cdot l \cdot \bar{F}_k \cdot \cos \varphi. \quad (22)$$

Z przekształcenia zależności (22) wynika, że średnia powierzchnia kontaktu ziaren kruszywa jest równa:

$$\bar{F}_k = \frac{F_k \cdot A \cdot \bar{d}_k^2}{F_n \cdot s_k'^2 \cdot v \cdot l \cdot \cos \varphi} \quad (23)$$

Dla ułatwienia toku dalszych rozważań wprowadzimy pojęcie względnej powierzchni kontaktów ziaren kruszywa w rozpatrywanym momencie zagęszczenia mieszanki:

$$\Phi = \frac{F_k}{F_n}, \quad (24)$$

a wyrażenie (23) zapiszemy w następującej postaci:

$$\bar{F}_k = \frac{A \cdot \bar{d}_k^2}{v \cdot l \cdot \cos \varphi} \frac{\Phi}{s_k'^2} \quad (25)$$

Z badań przeprowadzonych przez T.W. Lambe i R.V. Whitmana [3] nad ośrodkami gruntowymi wynika, że powierzchnia styku ziaren piasku wynosi około 0,03% całkowitej powierzchni. Wielkość naprężeń stykowych nawodnionego piasku przy średniej średnicy ziaren  $d = 0,6$  mm pod obciążeniem  $p = 0,1$  MPa osiąga wielkość  $\sigma = 343$  MPa. Takie naprężenia kontaktowe są wystarczające do wyparcia wody adsorpcyjnej na powierzchni granicznej.

W mieszance betonowej liczba kontaktów ziaren jest niezmiernie duża. W pracy [3] stwierdza się, że w  $1 \text{ cm}^3$  drobnziarnistego piasku liczba styków dochodzi do 5 milionów. Podobnym ośrodkiem jest mieszanka betonowa. Z tego względu nie ma możliwości zbadania zależności pomiędzy naprężeniem i przemieszczeniem ziaren kruszywa w miejscu kontaktu, nawet w tym przypadku gdyby istniały warunki do określenia wielkości przemieszczeń powierzchni ziaren w strefie kontaktowej. Istnieje więc potrzeba przeprowadzenia analizy teoretycznej tego problemu. Zatem podane powyżej zależności będą punktem wyjścia do opisu mechanizmu zagęszczenia fazy stałej prasowanej mieszanki betonowej.

## 6. Zagęszczenie ziaren kruszywa w prasowanej mieszance betonowej

W procesie prasowania mieszanki betonowej ziarna kruszywa wzajemnie zbliżają się. Wpływ na stopień zbliżenia ziaren wywiera współczynnik tarcia wewnętrznego. W prasowanej mieszance betonowej wielkość współczynnika tarcia wewnętrznego zmienia się, głównie w wyniku obniżenia współczynni-

ka wodno-cementowego. Jednak w dalszej części rozważań przyjmiemy założenie, że średnia wielkość kąta  $\varphi$ , zawartego pomiędzy kierunkiem wywieranego nacisku a normalną do powierzchni wzajemnego kontaktu ziaren nie ulega zmianie pod wpływem przyrostu siły nacisku. Na tej podstawie elementarny przyrost średniej powierzchni kontaktu, wywołany elementarnym przyrostem nacisku stempla wyrazi się zależnością:

$$d\bar{F}_k = \frac{A \cdot \bar{d}_k^2}{v \cdot l \cdot \cos \varphi} d\left(\frac{\Phi}{s_k^2}\right). \quad (26)$$

Z relacji (1) wynika, że elementarny przyrost średniej powierzchni kontaktów odniesiony do elementarnego zbliżenia ziaren jest równy:

$$d\bar{F}_k = \frac{\bar{d}_c}{\chi} du_k. \quad (27)$$

Przekształcając wyrażenie (14) względem wielkości elementarnego zbliżenia ziaren kruszywa otrzymujemy relację:

$$du_k = -\frac{A_c \cdot \bar{d}_k}{A \cdot (1 + \psi \cdot \varphi_t) \cos \varphi} \frac{dh}{h}. \quad (28)$$

Rozpatrując jednocześnie wyrażenia (26) i (27) otrzymujemy równanie różniczkowe w następującej postaci:

$$d\left(\frac{\Phi}{s_k^2}\right) = \frac{A_k \cdot v \cdot l}{A^2 \cdot \chi \cdot (1 + \psi \cdot \varphi_t)} \frac{dh}{h}. \quad (29)$$

Zależności pomiędzy parametrami struktury mieszanki betonowej mogą być wyznaczone na podstawie udziałów objętościowych poszczególnych komponentów [4], [5]. Jednak ciśnieniowy proces formowania wyrobów stosowany jest również w produkcji elementów z mieszanek, które powinny być analizowane jako ośrodki trójfazowe. Z tego względu zależność pomiędzy elementarną zmianą szczelności i odkształceniem prasowanego elementu zapiszemy w następującej postaci:

$$\frac{ds'_k}{s'_k} = \frac{\frac{m_k}{F_n \cdot h_o \cdot \rho_k} - \frac{m_k}{F_n \cdot h \cdot \rho_k}}{\frac{m_k}{F_n \cdot h_o \cdot \rho_k}} = \left( \frac{m_k}{F_n \cdot h_o \cdot \rho_k} - \frac{m_k}{F_n \cdot h \cdot \rho_k} \right) \frac{F_n \cdot h_o \cdot \rho_k}{m_k} = 1 - \frac{h_o}{h} = \frac{h - h_o}{h} = -\frac{dh}{h}. \quad (30)$$

W mieszankach zagęszczanych pod wpływem wibroprasowania zawartość powietrza jest nieznaczna i można uważać, że oddziaływanie ciśnienia prowadzi głównie do odprowadzenia wody zarobowej. Zmienia się przy tym szczelność układu ziaren cementu  $s_c$ . Szczelność układu ziaren cementu wyrazimy zależnością:

$$s'_c = \frac{\frac{c}{\frac{c}{\rho_c} + \frac{w}{\rho_w}}}{\frac{c}{\rho_c}} = \frac{\frac{c}{\rho_c \cdot \rho_w + w \cdot \rho_c}}{\frac{\rho_c \cdot \rho_w}{\rho_c}} = \frac{c \cdot \rho_w}{c \cdot \rho_w + w \cdot \rho_c} = \frac{\rho_w}{\omega \cdot \rho_c + \rho_w}. \quad (30a)$$

Dla tak zdefiniowanej szczelności zależność pomiędzy elementarną zmianą wysokości  $h$  prasowanej mieszanki i współczynnikiem wodno-cementowym  $\omega$  przedstawimy w następującej postaci:

$$\frac{dh}{h} = -\frac{ds'_c}{s'_c} = -\frac{\frac{\rho_w}{\omega_o \cdot \rho_c + \rho_w} - \frac{\rho_w}{\omega \cdot \rho_c + \rho_w}}{\frac{\rho_w}{\omega_o \cdot \rho_c + \rho_w}} = -\left( 1 - \frac{\omega_o \cdot \rho_c + \rho_w}{\omega \cdot \rho_c + \rho_w} \right) = -\frac{\rho_c(\omega - \omega_o)}{\omega \cdot \rho_c + \rho_w} = \frac{d\omega}{\omega + \frac{\rho_w}{\rho_c}}. \quad (31)$$

Uwzględniając w wyrażeniu (2.29) odpowiednio zależność (2.30) oraz (2.31) otrzymujemy równania opisujące mechanizm zagęszczenia mieszanki betonowej w procesie ciśnieniowego formowania elementów w następującej postaci:

– przy uwzględnieniu zagęszczenia ziaren kruszywa:

$$d\left(\frac{\Phi}{s_k'^2}\right) = \frac{A_k \cdot v \cdot l}{A^2 \cdot \chi \cdot (1 + \psi \cdot \varphi_t)} \frac{ds'_k}{s'_k}, \quad (32)$$

– przy uwzględnieniu stopnia obniżenia stosunku  $w/c = \omega$  w mieszance betonowej

$$d\left(\frac{\Phi}{s_k'^2}\right) = \frac{A_k \cdot v \cdot l}{A^2 \cdot \chi \cdot (1 + \psi \cdot \varphi_t)} \frac{d\omega}{\omega + \frac{\rho_w}{\rho_c}}. \quad (33)$$

Równania (32) i (33) opisują przyrost powierzchni kontaktu ziaren kruszywa w mieszance betonowej zagęszczanej pod wpływem prasowania. Podają związek pomiędzy przyrostem powierzchni kontaktów ziaren i współczynnikiem wodno-cementowym mieszanki. Parametrem zmiennym w równaniach różniczkowych (32) oraz (33) jest wielkość względnego przemieszczenia ziaren cementu  $\psi$ . W określeniu wielkości parametru  $\psi$  posłużymy się zasadą zachowania energii w zastosowaniu do zagęszczenia takiego ośrodka dyspersyjnego jakim jest mieszanka betonowa.

## 7. Względne przemieszczenia ziaren kruszywa w mieszance betonowej zagęszczanej pod wpływem prasowania

W celu określenia parametru  $\psi$  wykorzystamy zasadę zachowania energii w odniesieniu do mechanizmu przemieszczeń ziaren kruszywa w prasowanej mieszance betonowej. Zastosujemy tu zasadę przemieszczeń wirtualnych [6], którą dla dowolnie wybranego ziarna kruszywa, w rozpatrywanym momencie prasowania mieszanki betonowej, zdefiniujemy jako sumę prac wszystkich sił zewnętrznych, wewnętrznych i bezwładności, oddziaływujących w miejscu kontaktu, a wykonanych na elementarnych przemieszczeniach jest równa zero.

Powyższą zasadę przemieszczeń wirtualnych wyrazimy w następującej postaci:

$$dL_z = dL_w + dL_g = 0, \quad (34)$$

gdzie:

$dL_z$  – elementarna praca sił zewnętrznych,  
 $dL_w$  – elementarna praca sił wewnętrznych,  
 $dL_g$  – elementarna praca sił bezwładności.

Elementarną pracę sił zewnętrznych wyraża się zależnością [3]:

$$dL_z = \sum_{i=1}^{l_{ki}} (N_{ki} \cdot dv_i + T_{ki} \cdot dh_i), \quad (35)$$

gdzie:

$N_{ki}$  – siła wzajemnego oddziaływania ziaren kruszywa w miejscu kontaktu,  
 $dv_i$  – przemieszczenie wywołane siłą oddziaływania kontaktowego ziarna,  
 $T_{ki}$  – siła styczna do powierzchni kontaktu ziarna,  
 $dh_i$  – przemieszczenie styczne do powierzchni kontaktu ziarna.

Elementarną pracę sił wewnętrznych określimy na podstawie znanego wyrażenia z mechaniki:

$$dL_w = \iiint_{V_i} \sigma_i \cdot d\varepsilon_i \cdot dV_i, \quad (36)$$

gdzie:

$\sigma_i$  – naprężenie w rozpatrywanym ziarnie kruszywa,

$d\varepsilon_i$  – elementarne odkształcenie materiału rozpatrywanego ziarna kruszywa,

$dV_i$  – elementarna objętość rozpatrywanego ziarna kruszywa.

Elementarną pracę sił bezwładności określa zależność:

$$dL_g = \frac{V_i \cdot \rho_k}{g} \sqrt{\left(\frac{dv_z}{dt}\right)^2 + \left(\frac{v_z}{R_k}\right)^2}, \quad (37)$$

gdzie:

$V_i$  – objętość rozpatrywanego ziarna cementu,

$v_z$  – prędkość przemieszczeń ziaren cementu w kierunku osi Z,

$g$  – przyspieszenie ziemskie,

$R_k$  – promień krzywizny trajektorii przemieszczeń ziarna kruszywa.

W przeciwieństwie do zagęszczania mieszanek wapienno-piaskowych i materiałów ogniotrwałych, gdzie stosowany jest proces dynamicznego zagęszczania, formowanie elementów betonowych odbywa się pod wpływem oddziaływania siły statycznej ( $v_z=0$ ). Zatem można przyjąć założenie, że elementarna praca sił bezwładności jest równa zeru:

$$dL_g = 0, \quad (38)$$

a wówczas wyrażenie (34) upraszcza się do postaci:

$$dL_z = dL_w = 0. \quad (39)$$

Analizując mieszanekę betonową jako dyspersyjny ośrodek odkształcalny wielkość elementarnej pracy sił zewnętrznych określimy zależnością:

$$dL_z = P \cdot dh. \quad (40)$$

Wielkość siły nacisku na formowany element, oddziaływującej w rozpatrywanym momencie prasowania, jest równa sumie rzutów wszystkich sił kontaktowych ziaren kruszywa w warstwie, oddziaływujących zgodnie z kierunkiem wywieranego nacisku:

$$P = \sum_{i=1}^{n_w} \sum_{i=1}^{l_k} \sigma_{ki} \cdot F_{ki} (1 + f_i \cdot \varphi_{ii}) \cos \varphi. \quad (41)$$

Przy uwzględnieniu wielkości średnich wyrażenie (41) zapiszemy w następującej postaci:

$$P = n_w \cdot l_k \cdot \sigma_k \cdot \bar{F}_k (1 + f \cdot \varphi_t) \cos \varphi, \quad (42)$$

gdzie  $f$  jest współczynnikiem tarcia międzyziarnowego kruszywa w prasowanej mieszance betonowej.

Porównując stronami wyrażenia (40) i (42) otrzymujemy relację:

$$dL_z = n_w \cdot l_k \cdot \sigma_k \cdot \bar{F}_k (1 + f \cdot \varphi_t) \cos \varphi \cdot dh. \quad (43)$$

Jeżeli pominiemy sprężystość mieszanki betonowej, która jest cieczą lepko-plastyczną, to można uważać, że w procesie ciśnieniowego formowania elementów praca sił wewnętrznych wykorzystana zostaje całkowicie do pokonania oddziaływań i przemieszczeń ziaren fazy stałej. Na podstawie tego Założenia sformułujemy następującą zależność na elementarną pracę sił wewnętrznych:

$$dL_w = \sum_{i=1}^{n_h} \sum_{i=1}^{n_w} \sum_{i=1}^{l_k} \sigma_{ki} \cdot F_{ki} (du_{ki} + 2 \cdot f_i \cdot dV_i). \quad (44)$$

Wyrażenie (44) zdecydowanie prostszą postać przyjmuje w przypadku uwzględnienia wielkości średnich:

$$dL_w = n_h \cdot n_w \cdot l_k \cdot \sigma_k \cdot \bar{F} \cdot du_k \left( 1 + 2 \cdot f \cdot \frac{dV_k}{du_k} \right). \quad (45)$$



Na podstawie ogólnego bilansu zachowania energii, określonego wyrażeniem (39) oraz zależności (7), (43) i (45) otrzymujemy związek:

$$(1 + f \cdot \varphi_t) \cos \varphi \cdot dh = -n_h \cdot du_k (1 + f \cdot \psi). \quad (46)$$

Uwzględniając w wyrażeniu (46) wielkości  $n_h$  i  $du_k$  określone zależnościami (13) oraz (15) otrzymujemy następującą zależność:

$$(1 + f \cdot \varphi_t)(1 + \psi \cdot \varphi_t) \cos^2 \varphi = (1 + f \cdot \psi). \quad (47)$$

Podstawiając następującą zależność trygonometryczną:

$$\cos^2 \varphi = \frac{1}{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}, \quad (48)$$

w wyrażeniu (47) oraz wykonując elementarne przekształcenia wyznaczmy następującą relację określającą poszukiwany parametr:

$$\psi = \frac{\operatorname{tg}^2 \varphi - f \cdot \varphi_t}{\varphi_t (1 + f \cdot \varphi_t) - (1 + \operatorname{tg}^2 \varphi)}. \quad (49)$$

Zagęszczanie mieszanki betonowej pod wpływem ciśnienia odbywa się w sztywnych i nieodkształcalnych formach. Ścianki formy nie ulegają deformacji poprzecznej. Można zatem przyjąć założenie, że ziarna kruszywa przemieszczają się głównie w kierunku działania obciążenia wywieranego stemplem formy. Wobec powyższego dla sił występujących w strefie kontaktu, przedstawionych na rys. 1., słuszne są następujące zależności:

$$\varphi + \varphi_\tau \cong \frac{\pi}{2}; \cos \varphi_\tau \cong \sin \varphi. \quad (50)$$

Analogicznie biorąc pod uwagę zależność (7) oraz (50) można przyjąć następujące przybliżenie:

$$\varphi_t \cong \frac{\cos \varphi_\tau}{\cos \varphi} \cong \frac{\sin \varphi}{\cos \varphi} = \operatorname{tg} \varphi. \quad (51)$$

Rozpatrując jednocześnie równania (7), (49), (50) i (51) wielkość względnego przemieszczenia ziaren kruszywa w procesie ciśnieniowego zagęszczania mieszanki betonowej wyrazimy w następującej postaci:

$$\psi = 2 \frac{dV_c}{du_k} \cong \operatorname{tg} \varphi. \quad (52)$$

Z wyrażenia (52) oraz modelu geometrycznego struktury mieszanki betonowej, przedstawionego na rys. 1. wynika, że elementarne przemieszczenie ziaren kruszywa zachodzi głównie w kierunku normalnym do powierzchni wzajemnych kontaktów. Takie założenie w istotny sposób wpływa na ułatwienie dalszej analizy zależności ilościowego opisu przyrostu kontaktów ziaren kruszywa w zagęszczanej pod wpływem prasowania mieszance betonowej.

## 8. Względna powierzchnia kontaktów ziaren kruszywa

Wiadomo, że w wyniku ciśnieniowego zagęszczania mieszanki betonowej następuje obniżenie stosunku wodno-cementowego. Prowadzi to do zmiany właściwości reologicznych, zagęszczanego w przestrzeniach międzyziarnowych kruszywa, zaczynu cementowego. Jednak w celu uproszczenia toku dalszego rozumowania założymy, na podstawie relacji (52) niezmiennosc parametru  $\psi$ , a równanie różniczkowe (33), opisujące zagęszczenie ziaren kruszywa w procesie prasowania mieszanki betonowej, przedstawimy następująco:

$$d\left(\frac{\Phi}{s_k^2}\right) = s_1 \cdot \frac{d\omega}{\omega + \frac{\rho_w}{\rho_c}}, \quad (53)$$

gdzie stałą  $s_1$  określa zależność:

$$s_1 = \frac{A_k \cdot v \cdot l}{A^2 \cdot \chi \cdot (1 + \psi \cdot \varphi_t)}. \quad (54)$$

Dokonując całkowania wyrażenia (53) otrzymujemy następującą relację:

$$\frac{\Phi}{s_k^2} = s_1 \cdot \ln\left(\omega + \frac{\rho_w}{\rho_c}\right) + C_1. \quad (55)$$

Przed rozpoczęciem procesu ciśnieniowego formowania elementu strukturę mieszanki scharakteryzujemy następującymi parametrami. Przy ciśnieniu prasowania  $p_n=0$ , stosunek wodno-cementowy  $\omega = \omega_o$ , względna powierzchnia kontaktów ziaren kruszywa  $\Phi = \Phi_o$  oraz szczelność układu ziaren kruszywa w mieszance betonowej  $s_k = v$ . Przy tych wielkościach początkowych parametrów struktury prasowanej mieszanki betonowej wielkość stałej w równaniu (55) jest równa:

$$C_1 = \frac{\Phi_o}{v^2} - s_1 \cdot \ln\left(\omega + \frac{\rho_w}{\rho_c}\right) = \frac{\Phi_o}{v^2} - s_1 \cdot [\ln(\omega_o \cdot \rho_c + \rho_w) - \ln \rho_c]. \quad (56)$$

Przy założeniu krytycznego ciśnienia oddziaływania na mieszankę betonową ( $p_n=p_{kr}$ ) parametry struktury ośrodka dyspersyjnego określimy następującymi parametrami:  $\omega = \omega_k$ ,  $\Phi = \Phi_k$ . Dla tych wielkości granicznych stała w równaniu (55) będzie wynosiła:

$$C_1 = \frac{\Phi_k}{s_{kkr}^2} - s_1 \cdot [\ln(\omega_k \cdot \rho_c + \rho_w) - \ln \rho_c]. \quad (57)$$

Stałą równania (53) wyznaczmy z porównania relacji (56) i (57) w następującej postaci:

$$s_1 = \frac{1}{\ln(\omega_o \cdot \rho_c + \rho_w) - \ln(\omega_k \cdot \rho_c + \rho_w)} \left( \frac{\Phi_k}{s_{kkr}^2} - \frac{\Phi_o}{v^2} \right). \quad (58)$$

Rozpatrując jednocześnie zależności (57) i (58) stałą równania (55) wyrazimy relacją:

$$C_1 = \frac{\Phi_o}{v^2} - \left[ \frac{\Phi_k}{s_{kkr}^2} - \frac{\Phi_o}{v^2} \right] \frac{\ln(\omega_k \cdot \rho_c + \rho_w) - \ln \rho_c}{\ln(\omega_o \cdot \rho_c + \rho_w) - \ln(\omega_k \cdot \rho_c + \rho_w)}. \quad (59)$$

Względną wielkość kontaktów ziaren kruszywa wyznaczmy uwzględniając zależności (58) i (59) w wyrażeniu (55). Dokonując przekształceń ogólną postać równania opisującego poszukiwany parametr wyznaczmy w następującej postaci:

$$\Phi = s_k'^2 \left[ \frac{\Phi_o}{v^2} + \left( \frac{\Phi_k}{s_{kk}^2} - \frac{\Phi_o}{v^2} \right) \frac{\ln(\omega \cdot \rho_c + \rho_w) - \ln(\omega_o \cdot \rho_c + \rho_w)}{\ln(\omega_k \cdot \rho_c + \rho_w) - \ln(\omega_o \cdot \rho_c + \rho_w)} \right]. \quad (60)$$

Analizując wyrażenie (60) nietrudno zauważyć, że parametry  $\Phi_o$  i  $\Phi_k$  wyrażają względną wielkość powierzchni kontaktów ziaren kruszywa przy granicznych warunkach zagęszczenia mieszanki betonowej. W dalszych rozważaniach jako początkowe stadium układu ziaren kruszywa w ośrodku przyjmiemy stan zagęszczenia mieszanki betonowej pod wpływem wibracji. Jednak brak odpowiednio ukierunkowanych badań w tym zakresie nie pozwala na przeprowadzenie weryfikacji warunków granicznych wielkości względnej powierzchni kontaktów ziaren kruszywa w mieszance betonowej. Dlatego przyjmiemy czysto teoretyczne założenie maksymalnego zagęszczenia układu ziaren kruszywa w mieszance betonowej zagęszczanej pod wpływem krytycznego nacisku.

Analizując mieszankę betonową jako zawieszinę fazy stałej w cieczy, bez większego wpływu na dokładność dalszych rozważań przyjmiemy założenie, że początkowa wielkość powierzchni kontaktów ziaren kruszywa, przed rozpoczęciem prasowania,  $\Phi_o = 0$ ,  $F_k \cong 0$ .

Pod wpływem krytycznego ciśnienia prasownia ziarna kruszywa zetkną się bezpośrednio. Nastąpi również zagęszczenie fazy stałej zaczynu cementowego i można przyjąć założenie, że  $\omega_{kr} = 0$ , a wówczas zależność (60) zapiszemy następująco:

$$\Phi = s_k'^2 \left[ \frac{\ln(\omega_o \cdot \rho_c + \rho_w) - \ln(\omega_k \cdot \rho_c + \rho_w)}{\ln(\omega_o \cdot \rho_c + \rho_w)} \right] \quad (61)$$

Na podstawie wyników badań [7], [8], [9] i [10] określimy graniczną wielkość współczynnika wodno-cementowego zagęszczonej mieszanki w następującej wielkości  $\omega_k = 0,14 \div 0,16$ . Ponieważ przy krytycznej sile wywieranego nacisku na mieszankę betonową można założyć, że następuje bezpośrednie przekazanie nacisku przez ziarna kruszywa i cementu w miejscach ich wzajemnych kontaktów dlatego z wystarczającą dokładnością można przyjąć następujące przybliżenie:  $\omega_k = 0,15$ .

Z wyrażenia (61) wynika, że bardzo istotnym czynnikiem, który w głównej mierze decyduje o wielkości powierzchni kontaktów w prasowanej mieszance betonowej jest szczelność układu ziaren kruszywa  $s_k'$ . Wielkość tego parametru uzależniona jest w znacznym stopniu od uziarnienia i rodzaju zastosowanego kruszywa. Jednak złożony charakter mechanizmu zagęszczenia zia-

ren kruszywa w mieszance betonowej stwarza potrzebę uściślenia zależności prowadzących do wyznaczenia wielkość tego parametru.

## 9. Szczelność układu ziaren kruszywa w mieszance betonowej

W literaturze podane są szczegółowe sposoby i zalecenia dotyczące doboru uziarnienia kruszywa do betonu z kilku frakcji [2], [4], [12], [13] i [14]. Jednak najczęściej optymalny skład kruszywa dobiera się na podstawie maksymalnej szczelności kompozycji składników [2]. W mieszance betonowej zagęszczonej pod wpływem wibracji szczelność ułożenia ziaren kruszywa jest większa niż w stosie okruchowym suchych komponentów [4]. Na tej podstawie w pracy [4] podany został następujący model matematyczny ilościowego opisu szczelności układu ziaren kruszywa w zagęszczonej pod wpływem wibracji mieszance betonowej:

$$s'_k = \begin{cases} 1 - [j_g + (j_d - 1) \cdot V_d] & \text{gd}y \ 0 \leq V_d \leq j_g, \\ 1 - V_d \cdot j_d, & \text{gd}y \ j_g \leq V_d \leq 1, \end{cases} \quad (62)$$

gdzie:

$V_d$  – objętość kruszywa drobnego w kompozycji kruszywa,

$j_d$  – jamistość kruszywa drobnego w stanie zagęszczonym,

$j_g$  – jamistość kruszywa grubego w stanie zagęszczonym.

Z zależności (62) wynika, że minimalna jamistość, którą może uzyskać układ ziaren kruszywa grubego z drobnym w mieszance betonowej wynosi:

$$j_{k \min} = j_g \cdot j_d. \quad (63)$$

Przyjmując średnie wielkości gęstości nasypowych dla piasku  $\rho_{nd}=1,82 \text{ kg/dm}^3$ , a dla żwiru  $\rho_{ng}=1,78 \text{ kg/dm}^3$  obliczymy szczelność układu ziaren kruszywa w mieszance betonowej:

$$s'_k = 1 - j_{k \min} = 1 - j_{k \min} = 1 - \left(1 - \frac{1,82}{2,65}\right) \left(1 - \frac{1,78}{2,65}\right) = 1 - 0,103 = 0,897. \quad (64)$$

Istotny wpływ na zagęszczenie fazy stałej prasowanej mieszanki betonowej wywiera początkowa zawartość wody zarobowej. W badaniach [4], [7], [9], [11] i in. stwierdza się, że w mieszance betonowej poddanej zagęszczeniu pod wpływem wibroprasowania maksymalne zagęszczenie fazy stałej uzyskuje

się przy stosunku wodno-cementowym mieszanki betonowej odpowiadającym wodożądności normowej zastosowanego cementu. Według Br. Bukowskiego [2] normowa wodożądność krajowych cementów zawiera się w przedziale  $0,23 \leq \omega_n \leq 0,32$ . Można na tej podstawie uważać, że średnia wielkość wodożądności normowej cementów jest równa  $\bar{\omega}_n = 0,275$ .

Dla mieszanki betonowej wykonanej z ilością wody odpowiadającej stosunkowi wodno-cementowemu  $\omega_0 = 0,275$ , względna powierzchnia kontaktów ziaren kruszywa, określona z zależności (61), jest równa:

$$\Phi = s_k^2 \left[ \frac{\ln(\omega_o \cdot \rho_c + \rho_w) - \ln(\omega \cdot \rho_c + \rho_w)}{\ln(\omega_o \cdot \rho_c + \rho_w)} \right] = 0,897^2 \frac{\ln(0,275 \cdot 3,1 + 1) - \ln(0,15 \cdot 3,15 + 1)}{\ln(0,275 \cdot 3,1 + 1)} = 0,306 \quad (65)$$

Wyznaczony, na podstawie warunków granicznych wielkość parametru  $\Phi$  wykorzystana zostanie w toku dalszych rozważań do określenia odległości między ziarnami kruszywa.

## 10. Zbliżenie ziaren fazy stałej w prasowanej mieszance betonowej

Ciśnienie oddziałujące na mieszankę betonową w procesie ciśnieniowego zagęszczenia przenoszone jest przez szkielet stosu okruchowego kruszywa, w wyniku powstania sił na stykach sąsiednich elementów (rys. 1.). Skutkiem oddziaływania tych sił jest zbliżenie ziaren kruszywa i zagęszczenie fazy stałej w zagęszczanej mieszance betonowej.

Związek pomiędzy wielkością zbliżenia ziaren kruszywa i powierzchnią ich wzajemnych kontaktów w mieszance betonowej podaje relacja (1). Wielkość wzajemnych kontaktów ziaren kruszywa wyznacza zależność (25), a względną powierzchnię kontaktów ziaren fazy stałej mieszanki w rozpatrywanym momencie zagęszczania wyznacza równanie (61). Na podstawie tych związków wielkość zbliżenia elementów fazy stałej prasowanej mieszanki betonowej przedstawimy w następującej postaci:

$$u_k = \frac{\chi \cdot A \cdot \bar{d}_k}{l \cdot v \cdot \cos \varphi} \left[ \frac{\ln(\omega_o \cdot \rho_c + \rho_w) - \ln(\omega \cdot \rho_c + \rho_w)}{\ln(\omega_o \cdot \rho_c + \rho_w)} \right]. \quad (66)$$

Analizując układ ziaren fazy stałej w mieszance betonowej to należy stwierdzić, że w procesie ciśnieniowego zagęszczania odległość pomiędzy poszczególnymi elementami zmienia się zgodnie z następującą zależnością:

$$\delta_p = \delta_o - u_k. \quad (67)$$

Przy znanych średnich wielkościach ziaren kruszywo i cementu początkową odległość pomiędzy ziarnami fazy stałej nietrudno wyznaczyć na podstawie ogólnych równań objętości składników. Szerszy opis w tym zakresie podany został w pracach [4], [5], [15]. Z punktu widzenia zagęszczenia fazy stałej mieszanki betonowej i wpływu tego zjawiska na poprawę właściwości fizycznych betonu zagęszczonego pod wpływem prasowania istotna jest znajomość wielkości zbliżenia ziaren fazy stałej pod wpływem wywieranego nacisku. Biorąc pod uwagę zależność (66), określającą odległość między ziarnami kruszywa, można podać następujące warunki graniczne:

- dla ciśnienia prasowania  $p_n = 0$ ,  $\omega = \omega_o$ ,  $\delta_p = \delta_o$ ;
- dla ciśnienia prasowania  $p_n = p_{kr}$ ,  $\omega = 0$ ,  $\delta_p = 0$ .

Uwzględniając powyższe warunki graniczne w równaniu (67) otrzymujemy zależność:

$$\delta_o = \frac{\chi \cdot A \cdot \bar{d}_k}{l \cdot v \cdot \cos \varphi}. \quad (68)$$

Z porównania zależności (68) i (66) określimy wielkość zbliżenia ziaren fazy stałej w prasowanej mieszance betonowej następującą zależnością

$$u_k = \delta_o \left[ \frac{\ln(\omega_o \cdot \rho_c + \rho_w) - \ln(\omega \cdot \rho_c + \rho_w)}{\ln(\omega_o \cdot \rho_c + \rho_w)} \right] = \delta_o \left[ 1 - \frac{\ln(\omega \cdot \rho_c + \rho_w)}{\ln(\omega_o \cdot \rho_c + \rho_w)} \right]. \quad (69)$$

Uwzględniając związek (69) w wyrażeniu (67) wyznaczymy zależność określającą odległość pomiędzy ziarnami fazy stałej w zagęszczanej pod wpływem prasowania mieszance betonowej:

$$\delta_p = \delta_o - \delta_o \left[ 1 - \frac{\ln(\omega \cdot \rho_c + \rho_w)}{\ln(\omega_o \cdot \rho_c + \rho_w)} \right] = \delta_o \frac{\ln(\omega \cdot \rho_c + \rho_w)}{\ln(\omega_o \cdot \rho_c + \rho_w)}. \quad (70)$$

Oceniając wpływ obniżenia stosunku wodno-cementowego na zgęszczenie fazy stałej mieszanki betonowej bardzo ważne znaczenie poznawcze ma względne zmniejszenie grubości warstwy rozdzielającej ziarna fazy stałej. Dzie-

łąc wyrażenie (70) przez początkową grubość otulenia ziaren fazy stałej otrzymujemy zależność:

$$\Delta_p = \frac{\delta_o \frac{\ln(\omega \cdot \rho_c + \rho_w)}{\ln(\omega_o \cdot \rho_c + \rho_w)}}{\delta_o} = \frac{\ln(\omega \cdot \rho_c + \rho_w)}{\ln(\omega_o \cdot \rho_c + \rho_w)}. \quad (71)$$

Zależność (71) daje ogólny pogląd na istotę zagęszczenia fazy stałej w procesie ciśnieniowego zagęszczenia mieszanki betonowej. Zmniejszenie względnej grubości warstw rozdzielających poszczególne ziarna przedstawiono na rys. 3. Z przebiegu krzywych wynika, że cementy o niższej wodozadržności normowej wykazują zdecydowanie większą skłonność do zagęszczenia fazy stałej w procesie ciśnieniowego formowania wyrobów.

Funkcja określająca zmianę odległości między ziarnami fazy stałej, mieszanki betonowej zagęszczanej pod wpływem prasowania, wyprowadzona została przy przyjęciu modelu zawiesziny, w której ziarna kruszywa i cementu są losowo zawieszane w fazie ciekłej. Dlatego wielkość ta odniesiona jest do udziałów objętościowych poszczególnych faz. Praktyczna możliwość wykorzystania powyższych zależności wymaga podania relacji zmiany wielkości współczynnika wodno-cementowego w zagęszczanej mieszance betonowej w zależności od wielkości wywieranego nacisku. Z tego względu rozważania w tym zakresie przeprowadzimy poniżej.

## 11. Zmiana udziału fazy ciekłej w zagęszczanej pod wpływem ciśnienia mieszanki betonowej

Ciśnienie oddziałujące na mieszankę betonową wpływa istotnie na zmniejszenie udziału fazy ciekłej zagęszczonego ośrodka. Jednakże ilość odprowadzonej wody w procesie zagęszczenia zależy nie tylko od wielkości wywieranego nacisku lecz istotny wpływ wywiera tu skład oraz początkowa wielkość współczynnika wodno-cementowego  $\omega_o$  mieszanki. W pracy [15] ustalono, że zmianę wielkości współczynnika  $\omega$  prasowanej mieszanki uzależnioną od ciśnienia prasowania można określić następującą zależnością:

$$\omega = \omega_o \frac{1}{1 + a \cdot \ln 10 p}. \quad (72)$$

W wyrażeniu (72) parametr „a” uzależniony od wymiaru maksymalnej frakcji zastosowanego kruszywa można przyjmować jako:

- przy uziarnieniu kruszywa do 5 mm,  $a = 0,081$ ;
- przy uziarnieniu kruszywa do 10 mm,  $a = 0,065$ ;



– przy uziarnieniu kruszywa do 20 mm,  $a = 0,056$ .

Zmniejszenie zawartości fazy ciekłej, przy zachowaniu stałej objętości pozostałych składników, wpływa na zmniejszenie grubości wodnych otoczek na ziarnach fazy stałej, a zwłaszcza cementu. Prowadzi to do przyspieszenia procesów rozwoju struktury i wzrostu wytrzymałości betonu. Z tego względu przeprowadzimy analizę wpływu ciśnieniowego formowania elementów na zagęszczenie mieszanki betonowej.

## 12. Wpływ ciśnienia zagęszczenia mieszanki na zmianę parametrów struktury betonów ekologicznych

Analizę wpływu ciśnienia na zmianę struktury betonu przeprowadzimy dla mieszanki wykonanej z kruszywa, którego stos okruczowy zestawiony został w następujących proporcjach:

- piasek o uziarnieniu 0÷2 mm 44%,
- żwir o uziarnieniu 2÷8 mm 18%,
- żwir o uziarnieniu 8÷16 mm 38%.

Dla takiego składu granulometrycznego średni wymiar ziaren kruszywa jest równy:

$$r_k = \frac{1}{2} \exp \sum_{i=1}^n \left( p_i \cdot \ln \frac{d_{ki1} + d_{ki2}}{2} \right) =$$

$$= \frac{1}{2} \exp \left( 0,44 \ln \frac{0 + 2,0}{2} + 0,18 \ln \frac{2,0 + 8,0}{2} + 0,38 \ln \frac{8,0 + 16,0}{2} \right) = 1,7 \text{ mm.} \quad (73)$$

Piasek zastosowany w kompozycji stosu okruczowego charakteryzował się przeciętną szczelnością układu ziaren, w stanie zagęszczonym  $s_d = 0,65$ , a żwir  $s_g = 0,63$ . Obliczona na tej podstawie z zależności gęstość nasypowa wynosi odpowiednio:

- dla piasku  $\rho_{nd} = \rho_d(1 - j_d) = 2,65(1 - 0,35) = 1,722 \text{ kg/dm}^3$ ,
- dla żwiru  $\rho_{ng} = \rho_g(1 - j_g) = 2,65(1 - 0,37) = 1,670 \text{ kg/m}^3$ .

Uwzględniając określone wielkości, obliczona z zależności (62) szczelność układu ziaren kruszywa w betonie jest równa:

$$s'_k = 1 - v_d \cdot j_d = 1 - \frac{632,0}{1722,0} \cdot 0,35 = 0,872. \quad (74)$$

Mieszankę betonową wykonano z następujących składników:

- kruszywa, 1870 kg/m<sup>3</sup>,
- cementu 470 kg/m<sup>3</sup>,
- wody 140 l/m<sup>3</sup>.

Analizując stan struktury mieszanki betonowej na poziomie makroskopowym, w początkowym okresie zagęszczenia, grubość warstw zaczynu cementowego otaczających ziarna kruszywa wynosi [5]

$$\delta_z = r_k \left[ \sqrt[3]{\left( \frac{m_k}{\rho_k} + \frac{m_c}{\rho_c} + \frac{m_w}{\rho} \right) s_{kb} \cdot \frac{\rho_k}{m_k} - 1} \right]. \quad (75)$$

$$\delta_z = 1,7 \left[ \sqrt[3]{\left( \frac{1870}{2650,0} + \frac{470}{3100,0} + \frac{140}{1000,0} \right) 0,872 \cdot \frac{2650,0}{1870,0} - 1} \right] = 0,399 \text{ mm} \quad (75a)$$

Uwzględniając średni wymiar ziaren cementu  $d_c = 40 \mu\text{m}$ , określimy grubość warstwy fazy ciekłej na ziarnach cementu [5]:

$$\delta_w = r_c \left[ \sqrt[3]{\left( \frac{m_c}{\rho_c} + \frac{m_w}{\rho_w} \right) \cdot \frac{s_z \cdot \rho_c}{m_c} - 1} \right] = 20 \left[ \sqrt[3]{\left( \frac{470}{3100,0} + \frac{140}{1000,0} \right) \frac{0,747 \cdot 3100,0}{470,0} - 1} \right] = 45,3 \mu\text{m}. \quad (76)$$

Mieszanka betonowa zagęszczona została metodą statycznego prasowania pod naciskiem jednostkowym  $p=2$  MPa. W procesie zagęszczenia, zgodnie z relacją (72), wielkość współczynnika wodno-cementowego będzie wynosiła:

$$\omega = \omega_o \frac{1}{1 + a \cdot \ln 10 p} = \frac{140}{470} \frac{1}{1 + 0,056 \cdot \ln 10 \cdot 2} = 0,255 \quad (77)$$

Zatem w procesie zagęszczenia mieszanki, zgodnie z zależnością (70), grubość warstwy zawiesiny cementu zmniejszy się do wielkości:

$$\delta_{pz} = \delta_{oz} \frac{\ln(\omega \cdot \rho_c + \rho_w)}{\ln(\omega_o \cdot \rho_c + \rho_w)} = 0,399 \frac{\ln(0,255 \cdot 3,1 + 1,0)}{\ln(0,298 \cdot 3,1 + 1,0)} = 0,350 \text{ mm}. \quad (78)$$

W wyniku zmiany współczynnika wodno-cementowego grubość warstwy fazy ciekłej na ziarnach cementu zmniejsza się do wielkości:

$$\delta_{pw} = \delta_{ow} \frac{\ln(\omega \cdot \rho_c + \rho_w)}{\ln(\omega_o \cdot \rho_c + \rho_w)} = 45,3 \frac{\ln(0,255 \cdot 3,1 + 1,0)}{\ln(0,298 \cdot 3,1 + 1,0)} = 40,3 \mu m. \quad (79)$$

Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że ciśnieniowe formowanie elementów prowadzi do zagęszczenia fazy stałej w mieszance betonowej. Prowadzi to do intensyfikacji procesów rozwoju wytrzymałości betonu. Wpływ ciśnieniowego sposobu zagęszczenia mieszanki betonowej ma wytrzymałość betonu przedstawimy poniżej.

### 13. Związki parametrów struktury i wytrzymałości w ekologicznym betonie

Analogiczne jak w przypadku betonów zwykłych wytrzymałość betonów zagęszczonych przez prasowanie uzależniona jest od właściwości kamienia cementowego i kruszywa, udziałów obydwu składników w jednostce objętości, przyczepności warstwy kontaktowej zaczynu do kruszywa, a także od cech geometrycznych ziaren kruszywa. Ze względu na znaczną liczbę różnorodnych i wzajemnie oddziałujących czynników opis wytrzymałości ekologicznego modelu, w postaci ścisłego modelu o wygodnej dla praktycznego wykorzystania postaci, nie został zbudowany. Zdecydowanie bardziej w literaturze z tego zakresu rozpoznane zostały związki struktury z wytrzymałością w betonach zwykłych.

Wyniki wielu prac [7], [8], [9], [15] i in. jednoznacznie potwierdzają zjawisko wzrostu wytrzymałości betonów prasowanych w odniesieniu do betonów zagęszczanych przez wibrację o identycznym współczynnikiem wodno-cementowym. Z tego powodu oddziaływanie ciśnieniowego zagęszczenia na wzrost wytrzymałości betonu wymaga uwzględnienia obok stosunku wodno-cementowego dodatkowego czynnika, wynikającego z wielkości oddziałującego ciśnienia.

Rozpatrując mechanizm zagęszczenia fazy stałej w mieszance betonowej możemy uważać, że w początkowej fazie prasowania współczynnik wodno-cementowy  $\omega = \omega_o$ , grubość warstwy fazy ciekłej na ziarnach cementu  $\delta_{wp} = \delta_{wo}$ , co prowadzi do wytrzymałości betonu  $R_x = R_o$ . Pod wpływem nacisku na mieszankę betonową grubość fazy ciekłej na ziarnach cementu zmniejsza się do wielkości  $\delta_{pw}$ , co wpłynie na wzrost wytrzymałości betonu do wielkości  $R_p$ . Zgodnie z założeniami podanymi w pracy [15] przyjmujemy tezę, że pomiędzy wytrzymałością betonu i grubością otulenia ziaren cementu faza ciekłą zachodzi następująca zależność:

$$R_p = R_o \frac{\delta_{wo}}{\delta_{wp}}, \quad (80)$$

gdzie:

$R_p$  – wytrzymałość betonu zagęszczonego pod wpływem prasowania, przy grubości fazy ciekłej na ziarnach cementu  $\delta_{wp}$ ,

$R_o$  – wytrzymałość betonu wibrowanego, odpowiadająca grubości otulenia ziaren cementu fazą ciekłą  $\delta_{wo}$ ,

$\delta_{wp}$  – grubość warstwy otulenia ziaren cementu fazą ciekłą w prasowanym betonie,

$\delta_{wo}$  – grubość warstwy otulenia ziaren cementu fazą ciekłą w betonie wibrowanym.

Uwzględniając w wyrażeniu zależność (76) relację (80) przedstawimy w następującej postaci:

$$R_p = R_o \frac{r_c \left[ \sqrt[3]{\left( \frac{m_c}{\rho_c} + \frac{m_{wo}}{\rho_w} \right) \cdot \frac{s_z \cdot \rho_c}{m_c} - 1} \right]}{r_c \left[ \sqrt[3]{\left( \frac{m_c}{\rho_c} + \frac{m_{wp}}{\rho_w} \right) \cdot \frac{s_z \cdot \rho_c}{m_c} - 1} \right]} = R_o \frac{\sqrt[3]{\left( 1 + \omega_o \cdot \frac{\rho_c}{\rho_w} \right) \cdot s_z - 1}}{\sqrt[3]{\left( 1 + \omega_p \cdot \frac{\rho_c}{\rho_w} \right) \cdot s_z - 1}}. \quad (81)$$

Dla uproszczenia zapisu wyrażenie (81) przedstawimy w następującej postaci:

$$R_p = \frac{R_o}{d_p}, \quad (82)$$

a względną grubość warstwy fazy ciekłej na ziarnach cementu w prasowanej mieszance betonowej  $d_p$  aproksymujemy funkcją:

$$d_p = a \left( 1 + \frac{\omega_o}{\omega_n} \right) \cdot p^{\frac{b \cdot \omega_n}{\omega + \omega_n}}, \quad (83)$$

w której  $p$  jest ciśnieniem zagęszczania mieszanki betonowej, a  $\omega_o$  początkową wielkością współczynnika wodno-cementowego w betonie.

Wykorzystując zależność (72) oraz wyniki badań doświadczalnych podanych w pracy [10] i [15], na podstawie metody najmniejszych kwadratów wyznaczono wielkości parametrów  $a$  i  $b$ , które po uwzględnieniu w wyrażeniu (83) określają względną grubość warstwy fazy ciekłej na ziarnach cementu w prasowanej mieszance w następującej postaci:

$$d_p = 0,18 \left( 1 + \frac{\omega_o}{\omega_n} \right) \cdot p^{0,36 \frac{\omega_n}{\omega + \omega_n}}. \quad (84)$$

Uwzględniając zależność (84) w wyrażeniu (82) otrzymujemy następujący związek pomiędzy wytrzymałością prasowanego betonu i wytrzymałością betonu o tym samym składzie lecz zagęszczonym przez wibrowanie:

$$R_p = \frac{R_o}{0,18 \left( 1 + \frac{\omega_o}{\omega_n} \right) \cdot p^{0,36 \frac{\omega_n}{\omega + \omega_n}}}. \quad (85)$$

W ogólnym przypadku wytrzymałość betonu zagęszczonego pod wpływem wibracji jest funkcją następujących czynników:

$$R_o = f(R_c, \omega, \omega_n, \alpha_k), \quad (86)$$

gdzie:

$R_c$  – wytrzymałość znormalizowanej zaprawy cementowej,

$\omega$  – współczynnik wodno-cementowy w betonie,

$\omega_n$  – wodożądność normowa zastosowanego cementu,

$\alpha_k$  – Współczynnik uwzględniający przyczepność zaczynu cementowego do kruszywa.

Problem ten szczegółowo przeanalizowany został w pracach [2], [7], [8], [10], [14], [15], [16] i in. Uwzględniając przedstawione w literaturze wyniki badań w pracy [15] wyznaczono wielkość współczynnika przyczepności zaczynu cementowego do kruszywa, a na tej podstawie przyjęto założenie, że wytrzymałość betonu może być jednoznacznie określona poprzez właściwości mechaniczne znormalizowanej zaprawy z następującej zależności:

$$R_o = \alpha \cdot R_c \cdot \exp[2,4(\omega_{zn} - \omega)]. \quad (87)$$

Ponieważ kryteria badań spoiw dotychczas nie zostały ujednoczone w skali międzynarodowej dlatego w wyrażeniu (87) klasa cementu może być wyznaczona przy dowolnej wielkości współczynnika wodno-cementowego znormalizowanej zaprawy  $\omega_{zn}$ .

Biorąc pod uwagę związek pomiędzy wytrzymałością znormalizowanej zaprawy i właściwościami betonu to zgodnie z wynikami badań przedstawionymi w pracy [15] można uważać, że w betonach wykonanych z kruszywa otoczkowego wielkość współczynnika przyczepności zaczynu cementowego do kruszywa  $\alpha_o=0,77$ , a z łamanego  $\alpha_l=0,88$ .

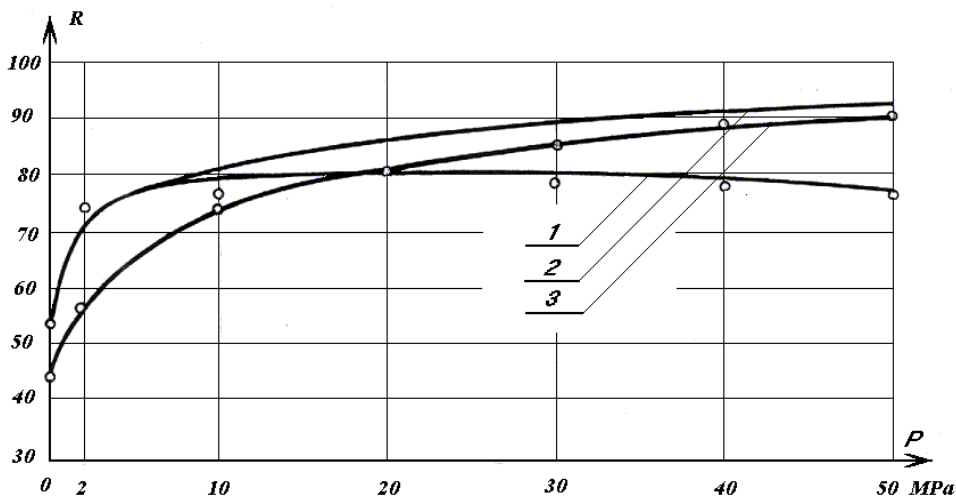
Zatem z porównania zależności (85) i (87) wyznaczmy ogólną postać funkcji wytrzymałości betonu ekologicznego w następującej postaci:

$$R_p = \frac{\alpha \cdot R_c \cdot \exp[2,4(\omega_{zn} - \omega)]}{0,18 \left(1 + \frac{\omega_o}{\omega_n}\right) \cdot p^{0,36 \frac{\omega_n}{\omega + \omega_n}}}. \quad (88)$$

Weryfikację zależności (88) przeprowadzimy w odniesieniu do wyników doświadczalnych przedstawionych w pracy [7] i [15]. Przebieg wytrzymałości betonu określony na podstawie równanie (88) przedstawia krzywa 1 na rys. 3.

Ustalony w pracy [15] wpływ ciśnienia zagęszczania mieszanki o zawartości cementu  $550 \text{ kg/m}^3$  i uziarnieniu kruszywa do 20 mm przedstawia krzywa 1 (rys. 3). Określony w pracy [7] przebieg wytrzymałości prasowanego betonu, o zawartości cementu  $580 \text{ kg/m}^3$ , przedstawia krzywa 3.

Z przebiegu krzywych 1 i 2, przedstawionych na rys. 3. wynika, że w zakresie ciśnienia prasowania mieszanki betonowej do 10 MPa uzyskuje się dobrą zgodność wyników doświadczalnych z obliczeniowymi. Charakter przebiegu wytrzymałości określony krzywą 1 daje podstawę do stwierdzenia, że przy ciśnieniu wywieranym na mieszankę betonową przekraczającym  $p > 10 \text{ MPa}$  ciśnienie wywierane na mieszankę betonową przejmowane jest przez szkielet kruszywa. Z tego względu największą efektywność zagęszczania mieszanki betonowej uzyskuje się przy jednostkowym nacisku do 10 MPa, zwłaszcza przy zastosowaniu kruszywa o uziarnieniu powyżej 10 mm.



**Rys. 3.** Wytrzymałość betonu ekologicznego określona w funkcji ciśnienia zagęszczenia mieszanki: 1 – doświadczalnie przy zastosowaniu cementu w mieszance betonowej  $550 \text{ kg/m}^3$  i uziarnieniu kruszywa do 20 mm [15]; 2 – z zależności (88); 3 – doświadczalnie przy zastosowaniu cementu w mieszance betonowej  $580 \text{ kg/m}^3$  wg badań [7]

**Fig. 3.** Strength of ecological concrete determined as a function of mix consolidation pressure: 1 – from experiment at the cement content in mix of  $550 \text{ kg/m}^3$  and aggregate grading to 20 mm [15]; 2 – from the relationship (88); 3 – from experiment at the cement content of  $580 \text{ kg/m}^3$  by research [7]

## 14. Wnioski

W artykule wykazano, że cechy fizyczne betonu w znacznym stopniu uzależnione są od wieloetapowego procesu kształtowania jego struktury. Racjonalne ukształtowanie struktury w procesie projektowania i zagęszczenia mieszanki betonowej wywiera istotny wpływ na właściwości techniczne oraz eksploatacyjne betonu. Prezentacja powyższych zagadnień miała na celu rozwinięcie i uogólnienie dotychczasowych badań w zakresie projektowania i technologii produkcji betonów ekologicznych.

Zaproponowany model stanowi próbę opisu ilościowego stanu struktury mieszanki betonowej, zagęszczanej pod wpływem prasowania. Wyprowadzone związki porządkują skomplikowaną problematykę, pozwalają analizować wpływ ciśnienia na kształtowanie struktury betonu i wytyczają kierunki dalszych badań w tym zakresie. Mogą on stanowić użyteczne narzędzie w rozwią-

zywaniu wielu zagadnień z zakresu prognozowania nasiąkliwości, mrozoodporności, a zwłaszcza projektowania betonów ekologicznych.

Analiza przeprowadzona w artykule pozwala na potwierdzenie tezy, że jakość betonu jest konsekwencją doboru składu i ukształtowania struktury mieszanki w procesie formowania wyrobów. Przeprowadzona weryfikacja funkcji opisu ilościowego wytrzymałości ekologicznego betonu wykazała dobre odwzorowanie wyników doświadczalnych przez zbudowany model matematyczny. W ten sposób przedstawione wpływy czynników subiektywnych dają znacznie większe możliwości opisu mechanizmów zachodzących przy formowaniu się struktury oraz właściwości fizycznych betonu ekologicznego.

## Literatura

1. **Świtoński A., Gosławski J.:** Model kształtowania struktury betonu plastyfikatorem i mikrowypełniaczem. Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej, Budownictwo Lądowe, Nr 55, Gdańsk, 1998.
2. **Bukowski B.:** Budownictwo betonowe. T.I, cz. 2, Technologia betonu, Arkady, Warszawa 1972.
3. **Lambe T.W., Whitman R.V.:** Mechanika gruntów, Arkady, Warszawa, 1997.
4. **Świtoński A.:** Analityczno-doświadczalny sposób doboru uziarnienia kruszywa w projektowaniu betonu. Inżynieria i Budownictwo, Nr 7, 1994.
5. **Świtoński A.:** Model kształtowania struktury betonu nowej generacji z zastosowaniem odpadowego popiołu lotnego. Cement Wapno Beton Nr 6, 1998.
6. **Жданович Г.М.:** Теория прессования металлических порошков. Металлургия, Москва, 1969.
7. **Ахвердов И.Н.:** Основы физики бетона. Стройиздат Москва, 1981.
8. **Kluz T., Łęcznar F.:** Zjawiska fizyczne w prasowanym betonie. Inżynieria i Budownictwo, Nr 6, 1960, s.204÷211.
9. **Lawrence C.:** The properties of cement paste compacted under high pressure. Cement and Concrete Association Research, Rapport 19, London 1969.
10. **Świtoński A.:** Doświadczalna ocean parametrów zagęszczania mieszanki jako czynników kształtowania właściwości fizycznych betonu prasowanego z równoczesną wibracją. Cement wapno Gips, Nr 2, 1989, s. 20-24.
11. **Dewar J.D.:** The Particle Structure of Fresh Concrete. Institute of Concrete Technology, London 1986.
12. **Блещик Н.П.:** Структурно-механические свойства и реология бетонной смеси и прессвакуумбетона. Минск, наука и техника, 1977.
13. **Ledolf G.F.:** Kussande von die Wes-Kaap en die benutting van superfyn dunsand in beton – PhD Tesis. Universiteit van Stellenbosch, 1985.
14. **Kluz T., Eymann E.:** Projektowanie betonów. Arkady, Warszawa 1969.
15. **Świtoński A.:** Kształtowanie struktury i wytrzymałości betonu. Studia i monografie, z. 68, WSI, Opole, 1993.
16. **Świtoński A.:** Nowa metoda oceny klasy cementu. Cement Wapno Gips, nr 1, 1984, s.26÷28.



## **Relations Between Structure And Strength Of Ecological Concrete**

### **Abstract**

Because of huge financial losses the problems of durability of concrete elements under influence of climate factors meet with big interest. The most rational solution of optimisation of costs of elements under influence of load and environmental factors usage is introduction of ecological concrete for their construction. But direct influence of load and environmental factors causes that such concrete has to fulfil especially high technical and exploitational requirements. Variability of influencing load in a wide range of values and duration of influence: from static long-lasting, through variable and often even exceptional – causes, that problem of concrete durability, deciding about reliability of elements usage, taking into consideration exploitation period, becomes very complicated issue. Concrete is a composite, so its structure, that is type of elements creating it and character of interactions occurring among them, is a fundamental feature of this material. This means, that each change of utilitarian properties results from its structure reconstruction.

In the paper it is pointed out, that in the conditions of the temperate climate the concrete structure, formed in consequence of the selection of components and finally molded as a result of consolidation during elements forming, is subjected to constant changes, which is caused by influence of objective factors, and especially of the destructive action of the surrounding environment. Therefore the structure of ecological concrete should be formed in such a way by selection of the composition and consolidation of mixture that hardened material would effectively oppose to influence of the objective factors. On that ground the paper is dedicated to create a suitable model of the complicated process of concrete structure forming throughout mixture consolidation in the way of pressing. The analysis of phenomena occurring in the process of pressure consolidation of concrete mixture is carried out on the macroscopic level. In the description of mechanism of mix consolidation the geometric model of suspension is adopted, in which aggregate grains are randomly disposed in cement paste setting the continuous phase. External load consolidating concrete mix causes the aggregate grains are approaching, and effects of that approach are

analyzed from the moment of the action of the compacting factor. Taking into consideration the influence of pressure of mix consolidation on decreasing of the initial value of the water-cement coefficient  $\omega_0$ , the relation determining the distance between aggregate grains in the consolidated by pressing concrete mix is determined;

$$\delta_p = \delta_o \frac{\ln(\omega \cdot \rho_c + \rho_w)}{\ln(\omega_o \cdot \rho_c + \rho_w)}$$

Taking advantage of the given relationships the influence of the applied pressing pressure on the approach of aggregate and cement grains in the concrete mix with the determined composition is defined. Considering phenomenon of intensification of material strength increase in the products consolidated by pressing the function of the quantitative description of ecological concrete strength is given in the following form

$$R_p = \frac{\alpha \cdot R_c \cdot \exp[2,4(\omega_{zn} - \omega)]}{0,18 \left(1 + \frac{\omega_o}{\omega_n}\right) \cdot p^{0,36 \frac{\omega_n}{\omega + \omega_n}}}$$

The elaborated model is verified on the grounds of the experimental results given in the literature.

In the paper it is pointed out, that physical features of concrete to a high degree are conditioned by the multistage process of its structure forming. Rational structure forming in the process of design and consolidation of concrete mix exerts essential influence on technical and exploitation concrete properties. The aim of the presentation of the above problems is to evolve and generalize previous researches in the range of design and technology of the ecological concrete production.