PRACE NAUKOWE POLITECHNIKI SZCZECIŃSKIEJ
Nr 16 Instytut Inżynierii Lądowej 1982

Zofia Wrońska, Janusz Tatar
Politechnika Warszawska

ANALIZA KORELACYJNA WPŁYWU ZMIENNOŚCI WSKAŹNIKÓW TECHNOLOGICZNYCH NA WYTRZYMAŁOŚĆ BETONÓW KERAMZYTOWYCH

Wstęp

Nowoczesne rozwiązania budowlanych konstrukcji inżynierskich w zakresie stosowania betonów z kruszyw keramzytowych oparte są na możliwościach uzyskiwania przez nie wysokich wytrzymałości.

Betony keramzytowe stosowane w tego rodzaju obiektach wykazują wytrzymałości dochodzące do 60 MPa przy gęstości pozornej nie przekraczającej 1800 kg/m^3. Właściwości fizyczne mieszanek betonowych jak również cechy techniczne stwardniałych betonów w dużym stopniu zależą od parametrów kruszyw keramzytowych. Do właściwości kruszyw, które w znacznym stopniu wpływają na cechy mieszanek i stwardniałego betonu należy zaliczyć: zmienną porowatość różnorodność kształtu i wymiary porów , nasiąkliwość, zdolność wymiany wody z zaczynem cementowym oraz wytrzymałość ziarnową kruszywa.

Informacje z tego zakresu podawane w literaturze krajowej i zagranicznej [2, 4, 5, 6] przedstawiono w formie tabeli zamieszczonej poniżej (tab. 1).

Stosując odpowiedni dobór składników i pielęgnację betonu można uzyskać gęstości pozorne w granicach od 300 do 1800 kg/m^3 i odpowiadające im wytrzymałości na ściskanie w zakresie od 3 do 40 MPa.
W przypadku zawartości cementu przekraczającej 550 kg/m^3 przy odpowiedniej jakości kruszywa można uzyskać wytrzymałości nawet do 60 MPa.

Obecnie głównymi kierunkami stosowania konstrukcyjnych betonów keramzytowych w budownictwie światowym są: płyty ścienne i stropowe, przekrycia kopuł, biegi schodowe, dźwigary, mosty, wiadukty, maszty energetyczne, pale fundamentowe i silosy. W RFN, Austrii i Szwajcarii keramzytobetonowe elementy wielkowymiarowe szeroko stosuje się w budownictwie wielo i jednorodzinnym. W Związku Radzieckim 60% produkowanych elementów ściennych wielkopłytowych oraz 90% wielkoblokowych wykonanych jest z betonu keramzytowego. Powszechnie budowane są budynki o 9 kondygnacjach, w których elementy nośne i schody wykonywane są z betonów keramzytowych.

Tabela 1

Wpływ właściwości kruszyw na właściwości betonu lekkiego

Właściwości betonu	Właściwości kruszywa mające wpływ na beton
Urabialność	Kształt ziarn, struktura powierzchni, uziarnienia stosu okruchowego, nasiąkliwość
Wytrzymałość	Wytrzymałość kruszywa, współczynnik sprężystości, struktura powierzchni ziarn, maksymalny wymiar ziarn, uziarnienie stosu okruchowego, zanieczyszczenia, efekt pucolanowy mikrowypełniacza
Gęstość pozorna	Gęstość pozorna ziarn, kształt ziarn, wskaźnik w/c, zawartość zaczynu, skład ziarnowy kruszywa, maksymalny wymiar ziarn
Współczynnik sprężystości betonu	Współczynnik sprężystości ziarn kruszywa, skład ziarnowy kruszywa
Skurcz i pełzanie	Współczynnik sprężystości, wytrzymałość, stosunek w/c, kształt ziarn, maksymalny wymiar ziarna, struktura porów, zawartość porów, stopień napowietrzenia, obecność części ilastych i innych zanieczyszczeń
Mrozoodporność, podatność na zawilgocenie i na odsychanie betonu	Zawartość porów, struktura i przepuszczalność porów, stopień napowietrzenia, wytrzymałość na rozciąganie, skład mineralogiczny, zawartość części ilastych, zawartość CaO i innych zanieczyszczeń
Ognioodporność	Współczynnik rozszerzalności cieplnej, współczynnik sprężystości, współczynnik przewodności cieplnej, ciepło właściwe, gęstość, uziarnienie, stopień napowietrzenia, odporność na rozłupywanie
Przyczepność zbrojenia	Wytrzymałość, współczynnik sprężystości, uziarnienie, nasiąkliwość
Przewodność cieplna	Przewodność cieplna, stopień napowietrzenia

Obecnie w Związku Radzieckim opracowywane są projekty budowy 16-kondygnacyjnych budynków mieszkalnych, w których przewiduje się - w porównaniu do wznoszonych budynków - uzyskanie znacznych oszczędności w zużyciu materiałów, pracomocy i kosztów, mniejsze zużycie cementu o ok. 8%, betonu o około 12%, pracochłonności o około 16%, obniżenie kosztów o około 5% .

Do ciekawszych przykładów zrealizowanych konstrukcji z betonu keramzytowego można zaliczyć:

- 75-kondygnacyjny wieżowiec w Chicago (biurowiec Pan American Aerways),
- 51-kondygnacyjny budynek o przekroju kołowym, o średnicy 41 m w Sydney,
- mosty: w RFN (konstrukcja sprężona o rozpiętości środkowego przęsła 96 m) oraz w ZSRR na rzece Achtubie o rozpiętości około 101 m.

Badania prowadzone w krajowych ośrodkach naukowo-badawczych zajmujących się problematyką betonów z kruszywem keramzytowym potwierdzają przydatność zwłaszcza cięższych odmian keramzytu ($\rho > 700$ kg/m^3) do wykonywania betonów konstrukcyjnych o wytrzymałości powyżej 30 MPa.

W Instytucie Technologii i Organizacji Produkcji Budowlanej Politechniki Warszawskiej w latach 1979-80 wykonano prace badawcze [1] mające na celu optymalizację stosowania do betonów konstrukcyjnych kruszywa keramzytowego produkowanego w Zakładzie Szczecin-Płonie. Przeprowadzono analizę korelacyjną wyników uzyskanych w badaniach własnych oraz w innych ośrodkach krajowych współpracujących w zakresie problematyki betonów keramzytowych z Centralnym Ośrodkiem Badawczo Rozwojowym Przemysłu Kruszyw Budowlanych. Do analizy wykorzystane zostały wyniki badań prowadzonych w Politechnice Szczecińskiej pod kierunkiem prof. T.Matyszewskiego [3].

Ustalenie funkcji regresji jednokrotnej dla zależności wytrzymałości betonu od wskaźników technologicznych

W celu ustalenia zależności statystycznych pomiędzy wytrzymałością betonu i wybranymi wskaźnikami technologicznymi przeanalizowano wyniki badań prowadzonych w pięciu ośrodkach. Dla wytypowanych 9 wskaźników technologicznych (tab. 2) mających wpływ na właściwości wytrzymałościowe betonu ustalono funkcje regresji jednokrotnej $R=f(x)$, wykorzystując wyniki uzyskane dla ponad 82 betonów różniących się składem i zakresem wytrzymałości w granicach od 24,0 do 36,0 MPa. Obliczenia wykonano w maszynie cyfrowej Odra 1204 w oparciu o program "1-a zmienna" opracowany w języku Algol w Instytucie Maszyn Przepływowych PAN. Stwierdzono, że najsilniejsza korelacja istnieje między wytrzymałością betonu a jego gęstością pozorną, współczynnikiem cementowo-wodnym, gęstością pozorną ziarn kruszywa keramzytowego oraz zawartością cementu w 1 m^3 betonu (rys. 1).

Przeprowadzona analiza korelacyjna jednej zmiennej pozwala na ustalenie optymalnych wartości przebadanych wskaźników technologicznych. W oparciu o nią można sformułować następujące spostrzeżenia:

- wytrzymałość betonu wzrasta liniowo wraz ze wzrostem gęstości pozornej betonu $\rho_B > 1500$ kg/m^3;

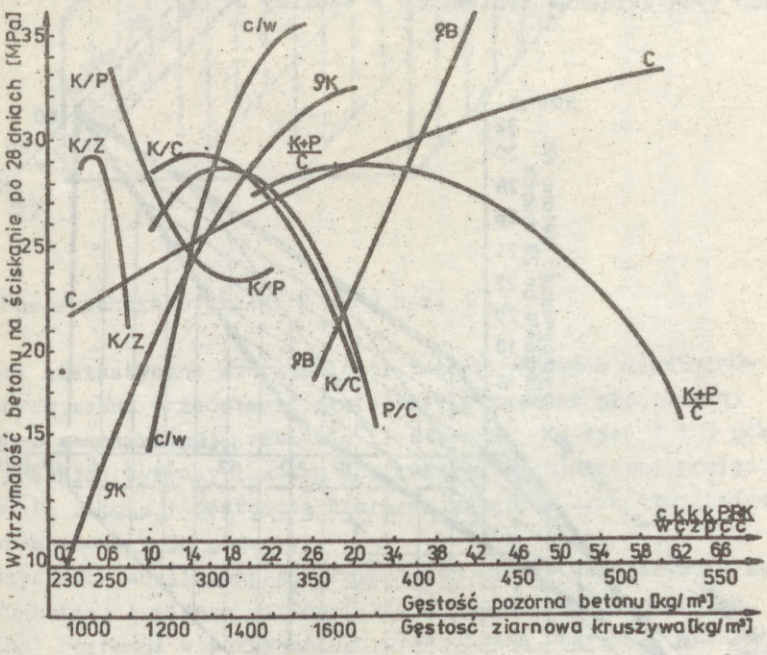
Tablica 1

Zestawienie wskaźników technologicznych

Lp.	Wskaźnik technologiczny	Przedział wartości liczbowych wskaźnika
1.	$\frac{p}{c}$ - stosunek ilości piasku do ilości cementu w 1 m^3 betonu keramzytowego	1,02 - 2,16
2.	ρ_k - gęstość pozorna ziarn kruszywa keramzytowego	916 - 1559
3.	ρ_B - gęstość pozorna betonu	1372 - 1868
4.	$\frac{k}{p}$ - stosunek ilości kruszywa grubego do ilości piasku w 1 m^3 betonu	0,66 - 2,13
5.	$\frac{K}{p+c+w}$ - stosunek ilości kruszywa grubego do ilości zaprawy w 1 m^3 betonu	0,34 - 0,8
6.	$\frac{c}{w}$ - współczynnik cementowo-wodny	1,1 - 2,5
7.	$\frac{k}{c}$ - stosunek ilości kruszywa grubego do ilości cementu w 1 m^3 betonu	1,01 - 3,25
8.	$\frac{K+p}{c}$ - stosunek łącznej ilości kruszywa do cementu w 1 m^3 betonu	1,92 - 4,37
9.	C - masa cementu w 1 m^3 betonu	240 - 511

- wzrost gęstości pozornej ziarn keramzytu przyczynia się do wzrostu wytrzymałości betonu, przy czym dla $\rho_k > 1400$ kg/m^3 przyrost jest mniejszy niż przy ρ_k w granicach 900 ÷ 1400 kg/m^3;
- wytrzymałość betonu wzrasta proporcjonalnie do $\frac{c}{w}$, przy czym wyższy przyrost wytrzymałości obserwuje się przy $\frac{c}{w}$ w granicach 1,2 - 1,8 w porównaniu do $\frac{c}{w} > 1,8$;
- wzrost zawartości cementu w betonie wpływa na wzrost wytrzymałości betonu; zależność ta jest liniowa. Szybszy przyrost występuje przy zwiększaniu cementu do 390 kg/m^3, powolniejszy natomiast przy zwiększaniu od 390 do 520 kg/m^3;
- stosunek zawartości kruszywa keramzytowego do ilości cementu $\frac{k}{c}$, wpływa na przyrost wytrzymałości w zakresie od 1 do 1,5, natomiast po przekroczeniu tej wartości następuje spadek wytrzymałości betonu;

- wytrzymałość betonu wzrasta przy $\frac{p}{c}$ (stosunku piasku do cementu) w granicach od 1 do 1,8, co świadczy o właściwej proporcji składników zaprawy. Dla wartości wyższych od 1,8 wytrzymałość maleje, ponieważ część cementu zostaje zastąpiona piaskiem, co w konsekwencji przyczynia się do mniejszego $\frac{c}{w}$ ze względu na wzrost wodożądności i mniejszą zawartość cementu w betonie;
- stosunek zawartości kruszywa keramzytowego do ilości piasku w betonie $\frac{k}{p}$ nie powinien być niższy od 1,5; powyżej tej wartości wytrzymałość rośnie, natomiast poniżej tej granicy wyraźnie maleje;
- optymalna wartość stosunku kruszywa do ilości zaprawy $\frac{k}{z}$ jest 0,3 do 0,4. Przy przekroczeniu wartości 0,4 wytrzymałość wyraźnie spada;
- $\frac{K+P}{C}$ nie powinien przekraczać wartości 2,9 do 3,0; po przekroczeniu tej wartości wytrzymałość maleje.

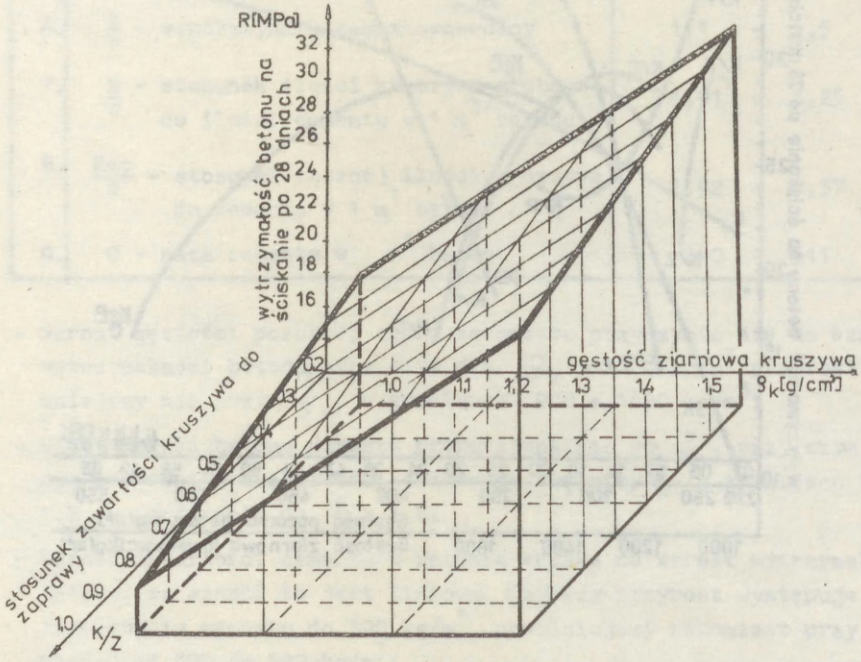


Rys. 1. Zależność wytrzymałości betonu keramzytowego od wybranych wskaźników technologicznych

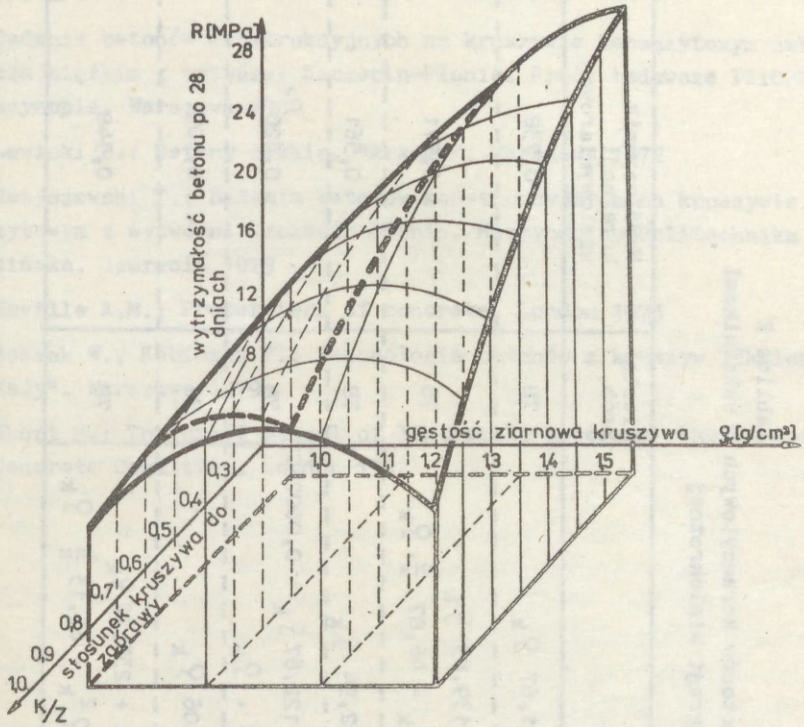
Wielokrotna analiza korelacyjno-regresyjna cech wytrzymałościowych keramzytobetonu

Analizę przeprowadzono przy założeniu jednoczesnego wpływu dwóch oraz pięciu zmieniających się wskaźników technologicznych. Jako zmienną przyjęto wytrzymałość na ściskanie betonu, a jako niezależne kolejno pogrupowano po dwa wskaźniki technologiczne oraz jednocześnie pięć wskaźników, które przy analizie jednokrotnej wykazały najsilniejszą korelację z cechami mechanicznymi betonu. Są to: Gęstość pozorna ziarn kruszywa, zawartość cementu w 1 m^3, współczynnik cementowo-wodny oraz stosunek kruszywa grubego do ilości zaprawy w 1 m^3 betonu. Dla związków statystycznych pomiędzy wytrzymałością betonu, a wyżej wymienionymi wskaźnikami opracowano funkcje regresji I i II stopnia.

Obliczenia wykonano w maszynie cyfrowej Odra 1204. Otrzymane równania regresji wielokrotnej oraz wskaźniki statystyczne ścisłości rozrzutu tych związków zestawiono w tablicy 2.



Rys. 2. Płaszczyzna regresji R = F (k/z, ρ_k)



Rys. 3. Powierzchnia regresji $R = F(k/z, \rho_k)$

Zależności statystyczne wytrzymałości betonu od dwóch wskaźników technologicznych można przedstawić graficznie w postaci płaszczyzny oraz powierzchni zakrzywionej równanie II stopnia . Na rys. 2 i 3 pokazano jako przykład wykresy ilustrujące związek statystyczny pomiędzy wytrzymałością betonu i gęstością ziarnową kruszywa oraz stosunkiem kruszywa keramzytowego do zaprawy.

We wszystkich analizowanych przypadkach wyższy współczynnik korelacji wielokrotnej i niższe wartości błędów kwadratowych uzyskano dla powierzchni regresji w porównaniu z płaszczyzną regresji. Dla wszystkich ustalonych funkcji stwierdzono istotność regresji już na poziomie $\alpha = 0,01$. Równania regresji pozwalają na przewidywanie z prawdopodobieństwem $p = 95\%$ wytrzymałości betonu keramzytowego na podstawie znanych wskaźników technologicznych. Mogą również stanowić istotną pomoc przy określaniu tych wskaźników dla projektowanej wytrzymałości betonu.

Tablica 2

Zależności pomiędzy wytrzymałością betonów keramzytowych i wskaźnikami technologicznymi równania regrsji wielokrotnej

Lp.	Analizowany wskaźnik	Rodzaj funkcji regresji	Równanie regresji	Liczba prób	Współczynnik korelacji wielowymiarowej
1a	$\frac{c}{w}$, ρ_k	I stopnia	$-19,61 + 10,99 \frac{c}{w} + 21,67 \rho_k$	78	0,738
		II stopnia	$-165,14 + 94,91 \frac{c}{w} + 139,89 \rho_k$ $-5,14 \left(\frac{c}{w}\right)^2 - 18,00 \rho^2_k - 46,87 \frac{c}{w} \cdot \rho_k$	78	0,771
2a	C, ρ_k	I stopnia	$-12,52 + 0,025 c + 22,94 \rho_k$	78	0,561
2b		II stopnia	$-74,06 - 0,0099 C + 122,67 \rho_k + 0,00026C^2$ $-20,59 \rho^2_k - 0,12 C \cdot \rho_k$	78	0,620
3a	k/z, ρ_k	I stopnia	$-4,21 - 7,15 \frac{k}{z} + 26,06 \rho_k$	78	0,509
3b		II stopnia	$-177,86 + 115,59 k/z + 235,72 \rho_k$ $-20,91\left(\frac{k}{z}\right)^2 - 64,88 \rho^2_k - 65,13 \frac{k}{z} \rho_k$	78	0,548

Literatura

1. Badanie betonów konstrukcyjnych na kruszywie keramzytowym zwłaszcza ciężkim z wytwórni Szczecin-Płonie. Prace badawcze ITiOPB. Maszynopis. Warszawa 1980

2. Lewicki B.: Betony lekkie. "Arkady". Warszawa 1972

3. Matyszewski T.: Badania betonów konstrukcyjnych na kruszywie keramzytowym z wytwórni Szczecin-Płonie. Maszynopis. Politechnika Szczecińska. Szczecin 1979

4. Neville A.M.: Propertiers of concrete. London 1973

5. Roszak W., Kubiczek F.: Technologia betonów z kruszyw lekkich. "Arkady". Warszawa 1979

6. Short H.: The draft manuel of lihtweight concrete. The European Concrete Committee. London 1972