

V.V. Praveen Kumar, D. Ravi Prasad

Department of Civil Engineering, National Institute of Technology, Warangal, Telangana- India.

Badania zależności naprężenie zginające - odkształcenie betonu zbrojonego z cementu zawierającego dodatki mineralne

Investigation on moment - curvature relationship of quaternary blended reinforced cement concrete

Słowa kluczowe: wytrzymałość, popiół lotny, pył krzemionkowy, szlam wapienny, beton ze spoiwa czteroskładnikowego, zależność naprężeniem - odkształcenie, zależność moment zginający - krzywizna

Keywords: Strength characteristics, fly ash, silica fume, lime sludge, quaternary blended concrete, stress- strain characteristics, moment curvature relationship.

1. Wstęp

Beton jest powszechnie stosowanym materiałem budowlanym na świecie. Ma on dobrą wytrzymałość i trwałość (1). Wzrastające zapotrzebowanie na cement prowadzi do zwiększenia ilości uwalnianych gazów cieplarnianych (2). Przy produkcji cementu uwalnia się duża ilość dwutlenku węgla, który stanowi 7% całej antropogenicznej emisji dwutlenku węgla. Zgodnie z zasadami zrównoważonego rozwoju ilość dwutlenku węgla wytwarzanego przez przemysł cementowy musi zostać zmniejszona (3-4). Doprowadziło to do badań dodatków mineralnych do cementów portlandzkich, które pozwalają na uzyskanie zbliżonej, bądź lepszej wytrzymałości, nie wpływając negatywnie na trwałość betonu. Popiół lotny jest, ze względu na swoje właściwości puco-lanowe, jednym z szeroko stosowanych dodatków mineralnych jako częściowy zamiennik cementu. Prowadzi się wiele badań zastępowania cementu przez dodatki mineralne, od dawna stosowany granulowany żużel wielkopiecowy, a także metakaolinit, pył krzemionkowy czy popiół lotny w betonach zwykłych jak i wysokiej wartości (5). Pył krzemionkowy to bardzo dobry dodatek mineralny zawierający aktywną krzemionkę, w postaci małych kulistych czą-

1. Introduction

Concrete is one of the most commonly used material in construction industry all over the world, possessing good strength and durability properties (1). It is reported that the increase in demand for the production of cement has leading to huge emission of greenhouse gases (2). Production of cement is producing huge amount of CO₂ which is about 7 % of all man made carbon emissions and there is a definite need to reduce the emissions so as to maintain the sustainability (3-4). This point led to research on supplementary cementitious materials, which gives same strength like that of Portland cement without compromising durability aspects. Fly ash is the most common material that is being used as a partial replacement of cement in concrete due to its pozzolanic property. Lot of research is carrying out on supplementary cementitious materials like ground granulated blast furnace slag, metakaolinite, silica fume, fly ash etc. as a partial replacement for normal and high strength concrete (5). Silica fume is very efficient supplementary cementitious material rich in silica and consisting of very small solid spherical particles. Fly ash is also popular pozzolana of high fineness, which improves concrete properties in both fresh and hardened state.

stek. Również popiół lotny jest pucolaną o dużym rozdrobnieniu, znany z korzystnego wpływu na właściwości mieszanki betonowej i betonu. Popiół z łusek ryżowych, stosowany jako zamiennik cementu w betonie w ilości do 20%, pozwala na produkcję betonu o dużej wytrzymałości, który ma lepszą trwałość, a także bardzo dobrą odporność na wnikanie chlorków, w porównaniu do betonu z cementu portlandzkiego (6-9). Z danych literaturowych wynika, że beton z dodatkiem popiołu z łusek ryżowych wykazuje lepszą wytrzymałość, natomiast dodatek pyłu krzemionkowego poprawia trwałość betonu, zmniejszając przepuszczalność jonów chlorkowych (10). Badania prowadzone przez Vanchai Sata i in. (11) wykazały, że beton w którym jako zamiennik cementu zastosowano nie więcej niż 20% popiołu z oleju palmowego może osiągnąć wytrzymałość taką jak beton z 5%-10% dodatkiem pyłu krzemionkowego. Stwierdzono również, że wspólny dodatek niektórych naturalnych pucolan i pyłu krzemionkowego może poprawić wytrzymałość betonu w porównaniu do betonów, w których składniki te zastosowano osobno (11). Wiele badań wskazuje na to, że zastosowanie dodatków pucolanowych znacznie poprawia trwałość betonu poprzez zmniejszenie przepuszczalności, w tym zwiększenie odporności na wnikanie chlorków do elementów konstrukcyjnych, w których utrata plastyczności świeżej mieszanki i duży na skurcz plastyczny podczas wstępnego dojrzewania są najważniejsze. To chroni z kolei przed korozją stali zbrojeniowej w konstrukcjach żelbetowych (12-14).

Nowoczesne konstrukcje wymagają zastosowania materiałów o lepszych właściwościach w kontekście wytrzymałości, twardości, trwałości, nośności i sztywności.

Stosowanie materiałów pucolanowych przynosi wiele korzyści, poprawiając trwałość betonu w środowiskach agresywnych. Betony wysokiej wartości ze spoiwem mieszanym dwuskładnikowym, zawierające popiół lotny lub metakaolinit, w których zastosowano odpowiedni proces dojrzewania normowego i/lub w powietrzu mają lepszą wytrzymałość, trwałość i małą szybkość karbonatyzacji oraz dobre przyrosty wytrzymałości (15,16). Badania betonów z mieszanym trójskładnikowym spoiwem zawierającym cement, popiół lotny i pył krzemionkowy przeprowadzone przez Ali Sadrmomtazi (17) wykazały znaczną poprawę wytrzymałości i lepszą trwałość w porównaniu do betonu z cementu portlandzkiego. W tym ostatnim stwierdzono mikropęknięcia, jeszcze przed badaniem wytrzymałości, powstałe w wyniku skurczu wysychania i wystąpieniu innych czynników, powodujących zmiany objętości. W betonach zawierających w składzie spoiwa dodatki pucolanowe, stosunek naprężenie-odkształcenie jest korzystniejszy w porównaniu z betonem bez tych dodatków. Beton ze spoiwa wieloskładnikowego ma większe odkształcenia pod naprężeniem maksymalnym. Betony wykonane ze spoiwa o dużej zawartości pucolany mają większy moduł Younga z uwagi na dużą elastyczność cząstek popiołu lotnego (18-20).

W niniejszym artykule omówiono badania wpływu dodatków mineralnych na zależność odkształcenia od naprężeń betonu. W ciągu ostatnich kilku dziesięcioleci przeprowadzono wiele badań dotyczących zależności naprężenie - odkształcenie ściskanego

Rice husk ash in concrete as partial replacement of cement up to 20% can achieve high strength concrete with better durability characteristics and very good chemical resistance to chlorides, compared to control mix (6 – 9). It is evident from literature that rice husk ash concrete shows better strength properties and silica fume concrete enhances durability characteristics like reduction in chloride ions penetrability (10). Investigation by Vanchai Sata et al. (6) found that materials like palm oil fuel ash, when used as partial replacement of cement up to 20%, can achieve strength like that of 5%-10% silica fume concrete. It was also concluded that certain natural pozzolanic and silica fume combinations can improve the strength of concrete more than natural pozzolana or silica fume concrete alone (11). Studies were performed and results inferred that pozzolanic materials substantially improve the durability of concrete, like impermeability, resistance to chloride ions penetration into the structural members, which protect corrosion of reinforcement steel inside concrete buildings in which loss of plasticity of concrete in fresh state and the great sensitivity to plastic shrinkage during the initial curing are utmost important (12 –14).

The construction of modern structures calls for the attention of the use of materials with improved concrete properties chiefly strength, stiffness, toughness, durability, moment carrying capacity and corresponding curvature.

Incorporation of pozzolanic materials is very beneficial and it greatly performs against degradation in an aggressive environment and also is enhancing durability. Binary blended cement concrete with pulverized fly ash and metakaolinite with various optimizations of curing process involving conventional curing and air curing showed enhanced strength, durability, carbonation depth and development of high-performance concrete (15, 16). Investigation of ternary blended concrete from cement, fly ash and silica fume was done by Ali Sadrmomtazi et al. (17) which concluded that there is a significant increase in strength and enhanced durability, compared to control mix. In control mix, micro-cracks are formed, even before it is loaded, because of the drying shrinkage and other causes of volume change. The presence of silica rich materials as an inclusion in the total binder content performs relatively better in stress-strain relationship of blended concrete compared to control mix, possessing higher strains at peak stress. High volume pozzolanic paste gives higher Young's modulus due to the contribution of high modulus of elasticity of the fly ash particles (18 - 20).

The influence of the mineral additives on the stress-strain characteristics is discussed in these papers (18 - 20). From the past few decades, the huge amount of research is going on stress-strain characteristics of concrete in compression. Although, it is simple investigation, it is one of the most important parametric study in any investigation or research for the establishment of any concrete as a structural grade of concrete. Although, there is a huge demand for high strength concrete in the construction industry, the response of stress-strain relationship is also taken into consideration and there is also increase in the usage of various types of mineral additions in concrete. Significance of these mineral additions in the stress-strain relationship needs to be verified by doing the

betonu. Choć jest to proste badanie, należy do najważniejszych przy projektowaniu i badaniu betonu, który ma być zastosowany jako element konstrukcyjny. W przypadku betonów o dużej wytrzymałości, których zastosowanie w budownictwie wciąż się zwiększa, zależność między naprężeniem, a odkształceniem jest również brana pod uwagę. Ze względu na zwiększający się udział dodatków mineralnych w betonie, ich wpływ na zależność naprężenie-odkształcenie betonu powinien być badany doświadczalnie. Poprzednie badania autorów dotyczyły ustalenia korzystnych warunków stosowania dodatków mineralnych z punktu widzenia wytrzymałości i trwałości betonu trójskładnikowego (21). Niniejsze badania stanowią kontynuację poprzednich doświadczeń, koncentrując się na zależności naprężenie – odkształcenie betonu i doświadczalnie wyznaczonej zależności moment zginający - ugięcie.

2. Znaczenie badań

W oparciu o dostępne dane literaturowe stwierdzono, że wiele prac badawczych dotyczyło zmniejszenia zawartości cementu portlandzkiego w betonie poprzez zastąpienie go dodatkami mineralnymi, co powodowało poprawę wytrzymałości i trwałości betonu. W badaniach wykorzystywano głównie popiół lotny, pył krzemionkowy, metakaolinit, popiół z łusek ryżowych, popiół z oleju palmowego i granulowany żużel wielkopiecowy. Jedynie nieliczne prace wykorzystywały szlam wapienny jako jeden z dodatków mineralnych do betonu ze spoiwem wieloskładnikowym (22). W niniejszym opracowaniu podjęto próbę zastosowania szlamu wapiennego jako jednego z dodatków mineralnych w betonie ze spoiwa wieloskładnikowego w celu oceny zależności naprężenie - odkształcenie oraz moment zginający - ugięcie.

3. Materiały i metody

3.1. Materiały

W badaniach stosowano cement portlandzki zgodny z normą IS: 12269-1987. Gęstość cementu wynosiła 3,14 g/cm³, powierzchnia właściwa 225 m²/kg. Początek i koniec wiązania wynosiły odpowiednio 40 minut i 560 minut.

Kruszywo drobne zgodne z IS: 383- 1970 pozyskano z okolicznej rzeki. Jego gęstość właściwa wynosiła 2650 kg/m³, a gęstość nasypowa 1450 kg/m³.

Kruszony granit o nominalnej wielkości ziaren 20 mm, zgodny z IS: 383- 1970 pochodził z lokalnego zakładu produkcji kruszywa. Jego gęstość właściwa wynosiła 2800 kg/m³, a gęstość nasypowa 1500 kg/m³.

Dodatkiem mineralnym był popiół lotny o małej zawartości tlenu wapnia [klasa F wg. ASTM], który pochodził z elektrociepłowni Ramagundam w Indiach. Gęstość i powierzchnia właściwa popiołu lotnego wynosiły odpowiednio 2100 kg/m³ i 320 m²/kg.

Pył krzemionkowy zgodny z IS: 15388- 2003 dostarczyła firma Elkem; jego gęstość właściwa wynosiła 2200 kg/m³.

experimentation of stress strain relationship. Previous studies were conducted on optimization of mineral additives, strength and durability characteristics of ternary blended cement concrete (21) and in continuation to the previous investigation, stress-strain relationship and experimental moment-curvature relationship have been developed in the present investigation.

2. Research significance

Based on the available literature, it was noticed that lot of researchers have focused on supplementary cementitious materials in order to reduce the content of cement in concrete and to replace it with other materials, attaining better strength and durability properties. Many researchers have used fly ash, silica fume, metakaolinite, rice husk ash, palm oil fuel ash, ground granulated blastfurnace slag and other materials as supplementary cementitious materials [SCM's] but only very few emphasized on incorporation of lime sludge as one of the supplementary cementitious materials in blended concrete (22). In this study an attempt was made to incorporate lime sludge as one of SCM's in ternary blended cement concrete to evaluate stress-strain characteristics and moment-curvature relationship.

3. Experimental

3.1. Materials

Cement used in the investigation was 53 Grade Ordinary Portland cement conforming to IS: 12269- 1987. The specific gravity of cement was 3.14 and specific surface area was 230 m²/kg, having initial and final setting time of 40 min and 560 min respectively.

The fine aggregate conforming to Zone-2 according to IS: 383-1970 was used. The fine aggregate used was obtained from a nearby river source. The specific gravity was 2.65, the bulk density of fine aggregate was 1450 kg/m³.

Well graded crushed granite having 20 mm nominal size was obtained from a local crushing unit having 20 mm nominal size according to IS: 383- 1970. The specific gravity was 2.80 and the bulk density was 1500 kg/m³.

For the present investigation, fly ash with low calcium conforming Class F fly ash was used. It was obtained from Ramagundam Thermal Power Plant, India. Specific gravity and fineness of fly ash used are 2.12 and 320 m²/kg respectively.

Silica fume conforming to IS: 15388- 2003 obtained from Elkem Company having a specific gravity of 2.22 was used.

Lime sludge contained cellulose fibres and its moisture content was nearly about 40%. The material is hard to dry, sticky, viscous and can vary in lumpiness and viscosity. Lime sludge was obtained from ITC Badrachalam [India] and stored properly. The initial setting time, final setting time, specific gravity and normal consistency, are respectively 42 min, 780 min, 1.98 and 32%, respectively.

Tablica 1 / Table 1

SKŁAD CHEMICZNY DODATKÓW MINERALNYCH

CHEMICAL COMPOSITION OF MINERAL ADDITIVES

Składnik / Ingredient	Cement	Popiół lotny / Fly ash	Pył krzemionkowy / Silica fume	Szlam wapienny / Lime sludge
CaO	61,90	4,32	1,40	40,30
SiO ₂	18,50	61,28	81,80	1,12
Fe ₂ O ₃	3,65	4,18	1,20	1,32
Al ₂ O ₃	4,18	24,93	4,60	1,48
MgO	2,38	1,38	1,40	6,08

Szlam wapienny z ITC Badrachalam [Indie] zawierał włókna celulozowe. Zawartość wody w szlamie wynosiła około 40%. Materiał był trudny do wysuszenia, kleisty, lepki i łatwo ulegający zbrylaniu. Początek i koniec wiązania, ciężar właściwy i konsystencja wynosiły odpowiednio 42 minuty, 780 minut, 1980 kg/cm³ i 32%.

Do wytwarzania i pielęgnacji betonów stosowano wodę pitną zgodną z IS: 456-2000.

Urabialność betonu regulowano superplastyfikatorem polikarboksyłanowym zgodnym z wymaganiami normy ASTM C 494.

Skład chemiczny popiołu lotnego, pyłu krzemionkowego i szlamu wapiennego podano w tablicy 1.

3.2. Ustalenie zawartości dodatków mineralnych

Niezależnie od klasy betonu największą wytrzymałość otrzymano w przypadku 15% zastąpienia cementu popiołem lotnym. Przy stałej zawartości popiołu lotnego, pył krzemionkowy dodawano od 15% do 10% masy cementu. Korzystny dodatek pyłu krzemionkowego do spoiwa, obok popiołu lotnego wynosił 8%. Przy stałej zawartości popiołu lotnego i pyłu krzemionkowego, dodawano szlam wapienny w ilościach od 10% do 20% masy cementu. Największą wytrzymałość uzyskano przy 15% zastąpieniu cementu szlamem wapiennym. Biorąc pod uwagę powyższe zawartości popiołu lotnego, pyłu krzemionkowego i szlamu wapiennego, ustalono skład betonu ze spoiwem czteroskładnikowym. Następnie badano wytrzymałość na ściskanie oraz osobno wytrzymałość na rozciąganie i zginanie betonów wszystkich klas. Do przeprowadzenia badań wytrzymałości betonów ze spoiwem czteroskładnikowym dojrzewających przez 28 dni przygotowano normowe kostki o wymiarach 150 mm x 150 mm x 150 mm, walce o średnicy 150 mm i wysokości 300 mm oraz belki o wymiarach 500 mm x 100 mm x 100 mm. Po zbadaniu mieszanek próbnych, otrzymano betony o założonej wytrzymałości 30 MPa, 50 MPa i 70 MPa. Optymalne składy betonów wzorcowych i betonów wieloskładnikowych podano w tablicy 2.

Właściwości mechaniczne betonów przedstawione są w artykule (21). W tym artykule skupiono się na zależnościach naprężenie - odkształcenie i moment zginający - ugięcie.

3.3. Metody

W niniejszym badaniu podjęto próbę równoczesnego zastosowania kilku dodatków mineralnych, mianowicie popiołu lotnego, pyłu krze-

For curing and mixing potable water was used as per IS: 456-2000.

Polycarboxylate based high range water reducing admixture conforming to ASTM C 494 was used as a superplasticizer to improve workability throughout the investigation.

The chemical composition of mineral additives namely fly ash, silica fume and lime sludge is given in Table 1.

3.2. Optimization of mineral additives content

The highest strength of concrete was found at 15% replacement of cement with fly ash in all the three grades concrete. Keeping the fly ash content as constant, silica fume was varied up to 10% replacement of cement and optimum dosage in concrete with optimised fly ash was observed at 8%. Further keeping the fly ash and silica fume as constant, lime sludge was varied up to 20% replacement of cement and the highest strength was found at 15% replacement level. Taking into account the optimised content of fly ash, silica fume and lime sludge a composition of quaternary blended concrete was established. Strength properties were examined for quaternary mixes of all grades concrete by testing the specimens to measure the compressive, split tensile and flexural strength. Standard cubes of 150 mm x 150 mm x 150 mm, standard cylinders of 150 mm diameter and 300 mm height and beams of 500 mm x 100 mm x 100 mm were used for strength measurements of quaternary mixes which were water cured for 28 days. After attempting various trial mixes as per required target strength of 30 MPa, 50 MPa and 70 MPa strength control mix was achieved and the optimum compositions of materials and mix proportions used in control mix and blended mixes are given in Table 2.

The mechanical properties were evaluated in the previous research paper (21) and in this paper, the research is focussed on stress-strain relationship and moment-curvature relationship.

3.3. Methods

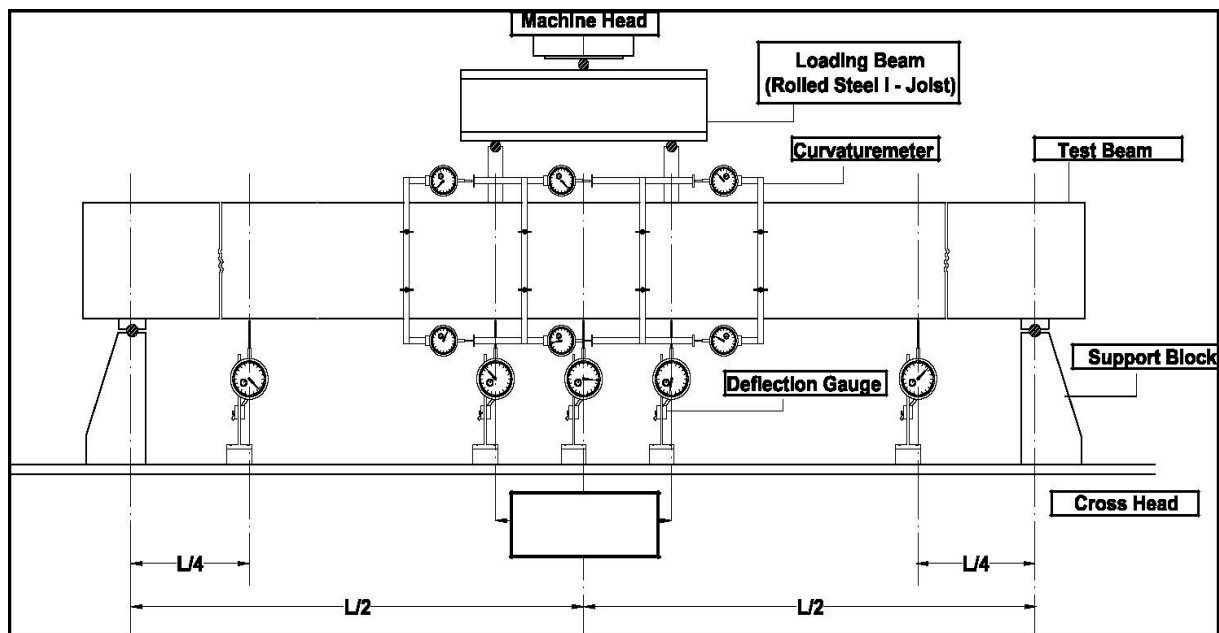
In the present investigation, an attempt was made to incorporate mineral additives namely fly ash, silica fume and lime sludge as replacement of cement. Concrete mix proportions of target compressive strength of 30 MPa, 50 MPa and 70 MPa concrete designed without mineral additives in the series of investigation was carried out (21) using the guidelines of IS 10262:2009. Quaternary blended concrete mix design was developed using all

Tablica 2 / Table 2

SKŁAD BETONU WZORCOWEGO ORAZ BETONÓW ZE SPOIWA MIESZANEGO, KG/M³

DETAILS OF MIX PROPORTIONS OF CONTROL MIX AND BLENDED MIXES, KG/M³

Klasy / Grades	Cement	Popiół lotny Fly ash	Pył krzemionkowy Silica fume	Szlam wapienny Lime sludge	Kruszywo drobne Fine aggregate	Kruszywo grube Coarse aggregate	Woda Water
30 MPa beton wzorcowy / control mix	394	-	-	-	775	1140	197
30 MPa beton ze spoiwa z dodatkami / blended mix	264	59,1	31,5	39,4	775	1140	197
50 MPa beton wzorcowy / control mix	418	-	-	-	816	1082	167
50 MPa beton ze spoiwa z dodatkami / blended mix	280	62,7	33,4	41,8	816	1082	167
70 MPa beton wzorcowy/ control mix	440	-	-	-	847	1045	144
70 MPa beton ze spoiwa z dodatkami / blended mix	294,8	66	35,2	44	847	1045	144



Rys. 1. Schemat stanowiska doświadczalnego (23)

Fig. 1. Schematic diagram of the test setup (23)

mionkowego i szlamu wapiennego, jako zamienników cementu. Przy wykorzystaniu wytycznych IS 10262: 2009 zaprojektowano składy mieszanin kontrolnych o docelowej wytrzymałości na ściskanie 30 MPa, 50 MPa i 70 MPa (21). Proporcje składników betonów wieloskładnikowych zostały opracowane przy zachowaniu korzystnych zawartości popiołu lotnego, pyłu krzemionkowego i szlamu wapiennego jako zamienników cementu.

Aby uzyskać zależność naprężenie-odkształcenie dla betonów wzorcowych i betonów z dodatkami zaformowano walce o średnicy 100 mm i wysokości 200 mm. Następnie cylindry ściskano przy użyciu prasy sterowanej komputerowo o maksymalnej sile nacisku 1000 kN kontrolując szybkość odkształcenia zgodnie z IS 516:1959. Wartości modułu Younga obliczono z krzywych naprężenie-odkształcenie betonu wzorcowego i betonu ze spoiwa z dodatkami.

Aby lepiej poznać właściwości betonu z dodatkami mineralnymi wykonano badanie zależności moment zginający - ugięcie. Zmien-

the optimized contents of fly ash, silica fume and lime sludge, as partial replacement of cement.

Stress-strain relationship was determined for control mix and quaternary blended concrete by casting specimens of 100 mm diameter and 200 mm height. The cylinders were tested in compression using 1000 kN capacity computer controlled UTM at a strain rate control as per IS 516:1959 to get the stress-strain characteristics. The values of Young's modulus were calculated from the stress-strain curves of control and quaternary blended concrete.

Experimental moment-curvature relationship investigation was performed in order to understand the flexural performance of blended cement concrete compared to control concrete. The variables in the investigation included grade of concrete and longitudinal reinforcement percentage. The experimental program primarily consisted of casting 12 reinforced concrete [RC] beams 1800 mm x 100 mm x 200 mm size out of which six beams were cast for control mix and six were of established quaternary blended cement

nymi w badaniu były klasa betonu oraz pole przekroju zastosowanego zbrojenia. Badanie polegało na zaformowaniu 12 belek żelbetowych o wymiarach 1800 x 100 x 200 mm, z których sześć było próbkami wzorcowymi, bez dodatków, a pozostałe sześć badanymi betonami ze spoiwa czteroskładnikowego. Dodatkowo dwie z czterech zaformowanych belek z betonu o zaprojektowanej wytrzymałości 30 MPa były przezbrojone [pole przekroju zbrojenia użytego w tych belkach było większe niż wymagane] zaś dwie nie-dobrobrojone [pole przekroju zbrojenia użytego w tych belkach było mniejsze od wymaganego]. Takim samym schematem posługiwano się w przypadku betonów o wytrzymałości 50 MPa i 70 MPa. Wytrzymałość na ściskanie każdego z betonów użytych do wykonania belek została zmierzona na trzech kostkach o wymiarach 150 mm x 150 mm x 150 mm. Szczegółowe dane dotyczące przygotowanych belek pokazano w tablicy 3. Przy określeniu zależności moment zginający - ugięcie przyjęto podobny schemat postępowania jak w pracy (22). Belki zostały poddane badaniu przy użyciu prasy o maksymalnej sile nacisku 1000 kN przy równomiernym obciążeniu 1 mm/min. W górnej części belek zainstalowano mierniki odkształcenia w celu zarejestrowania odkształcenia w betonie, a w dolnej, aby zarejestrować odkształcenie stali. Ugięcie mierzono w punkcie środkowym belek. Dla porównania momentu zginającego wybrane zostały trzy najważniejsze punkty: moment maksymalny i odpowiadające mu ugięcie, moment równy 0,85 wartości maksymalnej momentu zginającego i odpowiadające mu ugięcie

concrete beams. Specifically, four beams were cast for 30 MPa, out of which two beams were over reinforced control mix and blended cement concrete mix and two were under reinforced control mix and blended cement concrete mix. The same was applied in the case of 50 MPa and 70 MPa concrete beams. Three companion cubes as a specimen of size 150 mm x 150 mm x 150 mm were also cast along with the beams to determine the compressive strength of concrete. The details of the specimens cast are shown in Table 3. Experimental moment curvature relationship determination procedure was adopted similar to the work done previously (23). The cast beams were tested using dynamic testing machine of 1000 kN capacity at an uniform rate of loading of 1 mm/min. Curvature meters were used at the top region to record the strain in concrete and in the bottom region to record the strain in steel using rectangular frames. Deflection was measured at the mid-point of the beam. For the comparison of moment and curvature three significant points were taken which are ultimate moment and corresponding curvature moment and corresponding curvature of 0.85 ascending portion and moment and corresponding curvature 0.85 descending portion. The following are the formulae used to determine the experimental moment-curvature relationship of reinforced concrete beams:

- 1) moment(M) = (load/2) x distance,
- 2) strain in concrete (ϵ_c) = (curvature meter reading x least count)/depth of beam,

Tablica 3 / Table 3

DANE DOTYCZĄCE BELEK ŻELBETOWYCH

DETAILS OF REINFORCED CONCRETE BEAMS

Klasa betonu / Grade of concrete	Oznaczenie belki Designation of beam	Górny pręt Top bar	Dolne pręty Bottom bars	Wymagana stal Required steel (mm ²)	Użyta stal Provided steel (mm ²)	Rozstaw strzemion 8 mm stirrup spacing
30 MPa beton wzorcowy / control mix	30 P UR	2 x 8Ø	2 x 10Ø	229	160	135
30 MPa beton wzorcowy / control mix	30 P OR	2 x 8Ø	2 x 12 Ø 1 x 10 Ø	229	297	135
30 MPa beton z dodatkami / blended mix	30 T UR	2 x 8Ø	2 x 10Ø	229	160	135
30 MPa beton z dodatkami / blended mix	30 T OR	2 x 8Ø	2 x 12 Ø 1 x 10 Ø	229	297	135
50 MPa beton wzorcowy / control mix	50 P UR	2 x 8Ø	2 x 10 Ø 1 x 12 Ø	367	256	135
50 MPa beton wzorcowy / control mix	50 P OR	2 x 8Ø	2 x 16 Ø 1 x 10 Ø	367	477	135
50 MPa beton z dodatkami / blended mix	50 T UR	2 x 8Ø	2 x 10 Ø 1 x 12 Ø	367	256	135
50 MPa beton z dodatkami / blended mix	50 T OR	2 x 8Ø	2 x 16 Ø 1 x 10 Ø	367	477	135
70 MPa beton wzorcowy / control mix	70 P UR	2 x 8Ø	2 x 12 Ø 1 x 10 Ø	524	368	135
70 MPa beton wzorcowy / control mix	70 P OR	2 x 8Ø	2 x 20 Ø 1 x 10 Ø	524	683	135
70 MPa beton z dodatkami / blended mix	70 T UR	2 x 8Ø	2 x 12 Ø 2 x 10 Ø	524	368	135
70 MPa beton z dodatkami / blended mix	70 T OR	2 x 8Ø	2 x 20 Ø 1 x 10 Ø	524	689	135

na części wstępującej krzywej i analogicznie na części zstępującej. Poniżej przedstawiono wzory zastosowane do obliczenia momentu zginającego oraz ugięcia belek betonu zbrojonego.

1) moment (M) = (obciążenie/2) x odległość

2) odkształcenie w betonie (ϵ_c) = (odczyt licznika ugięcia x najmniejsza wartość licznika (dokładność licznika)) / wysokość belki

3) odkształcenie w stali (ϵ_s) = (odczyt z licznika ugięcia x najmniejsza wartość licznika (dokładność licznika)) / wysokość belki

4) ugięcie (δ) = $\{(\epsilon_c) + (\epsilon_s)\}$ / efektywna wysokość belki

Wzory te zostały użyte do obliczeń momentu zginającego oraz ugięcia belek z betonów wzorcowych oraz betonów z dodatkami.

4. Wyniki i dyskusja

4.1. Wpływ dodatków mineralnych na zależność między naprężeniem a odkształceniem

Moduł Younga obliczony dla betonu z dodatkami był nieznacznie większy w porównaniu do betonu wzorcowego, a wartości przedstawiono w tabelicy 4. Krzywe przedstawiające zależność naprężenie-odkształcenie dla betonu z dodatkami [rys. 2] są mniej liniowe i wykazują większe wartości naprężeń maksymalnych w porównaniu z mieszanką odniesienia [tablica 4]. Betony o mniejszych klasach wytrzymałości mają mniejsze odkształcenie przy maksymalnym obciążeniu w porównaniu do betonów o większych klasach wytrzymałości. Betony z dodatkami odkształcają się w większym stopniu w porównaniu do betonów wzorcowych. Odkształcenie przy naprężeniu maksymalnym jest jedną z najważniejszych właściwości badanych dla betonów konstrukcyjnych. Zagadnienie „odkształcenia przy naprężeniu maksymalnym” budzi kontrowersje [T. H. Whee et al], ponieważ część badaczy potwierdziło, że parametr ten zależy od wytrzymałości na ściskanie betonu. Inni badacze są temu przeciwni. Przeprowadzone przez Autorów badania potwierdzają zależność odkształcenia przy naprężeniu maksymalnym od wytrzymałości betonu na ściskanie. Odkształcenie przy maksymalnym obciążeniu zwiększa się wraz ze zwiększaniem się klasy betonu niezależnie od użycia dodatków mineralnych w mieszance betonowej. Z przeprowadzonych w pracy badań wynika, że zwiększenie wytrzymałości betonu na ściskanie wydłuża liniową część wykresu naprężenie – odkształcenie na wznoszącej części krzywej a następnie zwiększa nachylenie części opadającej krzywej naprężenie – odkształcenie. Nachylenie krzywej po osiągnięciu maksymalnego naprężenia jest tym większe im większa jest wytrzymałość betonu na ściskanie. Betony ze spoiwem wieloskładnikowym w porównaniu do odpowiadających im betonów wzorcowych mają większe odkształcenia przy maksymalnym obciążeniu oraz samo obciążenie maksymalne jest dla nich większe. Może być to spowodowane występowaniem ziaren popiołu lotnego, które ograniczają powstawanie spękań wokół nich jaki i propagację spękań, wpływając na zwiększenie odkształcenia przy maksymalnym obciążeniu. Dodatek bardzo drobnych cząstek pyłu krzemionkowego jest również jedną z przyczyn zwiększenia naprężenia maksymalnego, ponieważ ma on tendencję do wypełniania mikroporów występujących w betonie. Podobnie jak w przypadku popiołu lotnego, cząstki pyłu krzemionkowego

3) strain in steel (ϵ_s) = (curvature meter reading x least count)/ depth of beam,

4) curvature(δ) = $\{(\epsilon_c) + (\epsilon_s)\}$ / effective depth of beam.

These formulae were used in order to determine the moment and curvature for control mix and blended concrete mixes.

4. Results and discussion

4.1. Effect of mineral additives on the stress-strain characteristics

Young's modulus obtained for blended concrete was marginally better compared to control mix and values are shown in Table 4. The stress-strain curves for the quaternary blended concrete shown in Fig. 2 are less linear and taking higher peak stress compared to control mix. The lower grades have lower strain at peak stress compared to higher grade. Quaternary blended cement concrete has a higher strain value compared to control mix. The strain at peak stress is one of the most important parameters to be quantified. From the literature, it is identified that there is a lot of controversy on this parameter [T. H. Whee et al. (16)] "strain at peak stress" as some researchers have confirmed that this parameter is dependent on concrete compressive strength and some are against this. However, in the current investigation the strain at peak stress is dependent on concrete cube compressive strength. The strain at peak stress increased with the increase in the grade of concrete irrespective of presence or absence of mineral additives in the concrete mix. From the current investigation it is noticed that the increase in the compressive strength of concrete is having influence on the increase in the linear portion of ascending portion in the stress strain response and then the drop of the curve become steeper. However, this curve becomes even steeper in higher compressive strength concrete. The quaternary blended cement concrete specimens have taken more peak stress and strain at peak stress compared to control mix may be due to the presence of fly ash particles which restricts the cracks around it and minimizes the crack propagation and hence leading to increase of peak strain. The presence of ultra-fine particles size of silica fume is also one of the important reasons for the increase in the peak stress as these particles have a tendency to fill the micro voids present in the concrete specimens. As the silica fume particles are capable of restricting the crack propagation up to certain extent due to the load application on to the concrete specimens. The presence of lime sludge as one of the supplementary cementitious materials having a fine particles size as that of fly ash again possessing a similar characteristics feature of not allowing the crack to propagate and tries to restrict to as much as possible is also another reason of higher peak stress and strain at peak stress. This combination of fly ash, silica fume and lime sludge in their optimum content presence as a partial replacement of cement have shown enhancement of this parametric study of the investigation. The densification of concrete matrix of quaternary blended cement concrete due to the presence of mineral additives lead to increase in peak stress and strain at peak stress.

Tablica 4 / Table 4

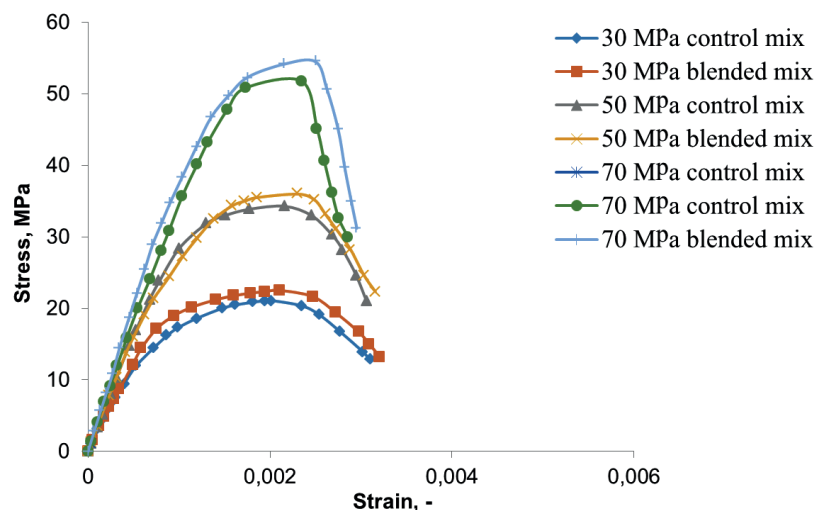
NAPRĘŻENIE, ODKSZTAŁCENIE PRZY NAPRĘŻENIU MAKSYMALNYM I MODUŁ YOUNGA BETONÓW WZORCOWYCH I BETONÓW Z DODATKAMI
 STRESS, STRAIN AT PEAK LOAD AND YOUNG'S MODULUS OF CONTROL AND BLENDED CEMENT CONCRETE

Mieszanka betonowa / Concrete Mix	Naprężenie maksymalne Peak Stress, MPa	Odkształcenie przy naprężeniu maksymalnym Strain at Peak stress, -	Modułu Younga Young's Modulus, GPa
30 MPa beton wzorcowy / control mix	21,1	0,0020	25,2
30 MPa beton z dodatkami / blended mix	22,5	0,0021	26,3
50 MPa beton wzorcowy / control mix	34,3	0,0021	32,7
50 MPa beton z dodatkami / blended mix	36,0	0,0023	33,1
70 MPa beton wzorcowy / control mix	51,8	0,0023	38,9
70 MPa beton z dodatkami / blended mix	54,5	0,0024	40,2

mają do pewnego stopnia zdolność do ograniczenia propagacji spękań. Szlam wapienny o uziarnieniu zbliżonym do popiołu lotnego również przyczynia się do ograniczenia propagacji pęknięć i jest przyczyną większych naprężeń maksymalnych i odkształceń przy naprężeniu maksymalnym. Zastąpienie części cementu odpowiednio dobraną mieszaniną popiołu lotnego, pyłu krzemionkowego i szlamu wapiennego spowodowało poprawę właściwości betonu. Zagęszczenie matrycy betonu ze spoiwa wieloskładnikowego ze względu na dodatki mineralne spowodowało wzrost naprężenia maksymalnego i odkształcenia przy naprężeniu maksymalnym.

4.2. Zależność naprężenie zginające - odkształcenie

Ze względu na korzystny wpływ zastosowanych dodatków mineralnych na właściwości betonu przeprowadzono ocenę zachowania się betonu ze spoiwa



Rys. 2. Zależność naprężenie – odkształcenie betonów wzorcowych i betonów ze spoiwa z dodatkami mineralnymi

Fig. 2. Stress strain relationship of control mix and quaternary blended cement concrete

Tablica 6 / Table 6

DOŚWIADCZALNE WIELKOŚCI NAPRĘŻENIA ZGINAJĄCEGO I ODKSZTAŁCENIA PRZY OBCIĄŻENIU MAKSYMALNYM BELEK Z BETONU Z CEMENTU Z DODATKAMI I BETONU WZORCOWEGO

EXPERIMENTAL VALUES OF MOMENT AND CURVATURE AT ULTIMATE LOAD OF SIMPLY SUPPORTED TERNARY BLENDED CEMENT CONCRETE AND CONTROL MIX BEAMS

Concrete	M, kN·m	ϕ , x 10 ⁻⁶	ϵ_c , x 10 ⁻⁶	ϵ_s , x 10 ⁻⁶
30P UR	15,95	71,97	2515	10341
30P OR	28,67	50,51	5165	3927
30T UR	22,35	77,47	2725	11221
30T OR	38,65	54,2	5494	4262
50P UR	27,74	65,18	2893	8841
50P OR	49,63	48,34	5518	3184
50T UR	36,24	71,9	3241	9701
50T OR	70,65	52,67	6226	3256
70P UR	38,12	53,86	3462	6234
70P OR	72,31	48,15	6462	2205
70T UR	46,88	57,87	3825	6593
70T OR	86,37	50,63	6658	2457

4.2. Experimental moment-curvature relationship

With the superior performance of mineral additives, the study was further continued to assess the flexural behaviour of quaternary blended cement concrete by performing experimental moment-curvature relationship determination. The results indicated that there is a significant improvement in the ultimate moment carried by the blended concrete beams compared to that of control mix beams. In Table 5 companion cubes compressive strength is given. Incorporation of mineral additives resulted in the increase of compressive strength of concrete up to 45%. Figs. 3-5 show the moment-curvature relationship for 30 MPa, 50 MPa and 70 MPa control and blended concrete. The increase in the moment carrying capacity can be evident from Fig. 3 and the corresponding curvature was also increased indicating the beneficiary effect of incorporation of mineral additives, which replace cement. Similar trend was noticed in the other two grades of concrete indicating the superior performance of quaternary blended cement concrete compared to that of control concrete.

The value of moment, and curvatures of beam, concrete and reinforcement at ultimate load, 0.85 ascending portion and 0.85 descending portion are given in Tables 6-8 respectively.

Tablica 5 / Table 5

WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCISKANIE PRÓBEK SZEŚCIENNYCH WYKONANYCH Z BETONU WZORCOWEGO I BETONU Z CEMENTU Z DODATKAMI MINERALNYMI

COMPRESSIVE STRENGTH OF COMPANION CUBES OF CONTROL AND QUATERNARY BLENDED CEMENT CONCRETE

Klasa / Grade	Mieszanka / Mix	Wytrzymałość na ściskanie / Compressive strength, MPa
30MPa	Beton wzorcowy / Control Mix	30,5
	Beton z cementu z dodatkami / Blended Mix	43,6
50MPa	Beton wzorcowy / Control Mix	50,8
	Beton z cementu z dodatkami / Blended Mix	67,3
70MPa	Beton wzorcowy / Control Mix	70,2
	Beton z cementu z dodatkami / Blended Mix	86,2

wieloskładnikowego przy zginaniu, poprzez doświadczalne wyznaczenie zależności naprężenie zginające – odkształcenie. Wyniki wskazują na duże zwiększenie maksymalnego naprężenia zginającego przenoszonego przez belki wykonane z betonu z cementu z dodatkami mineralnymi w porównaniu z belkami wzorcowymi.

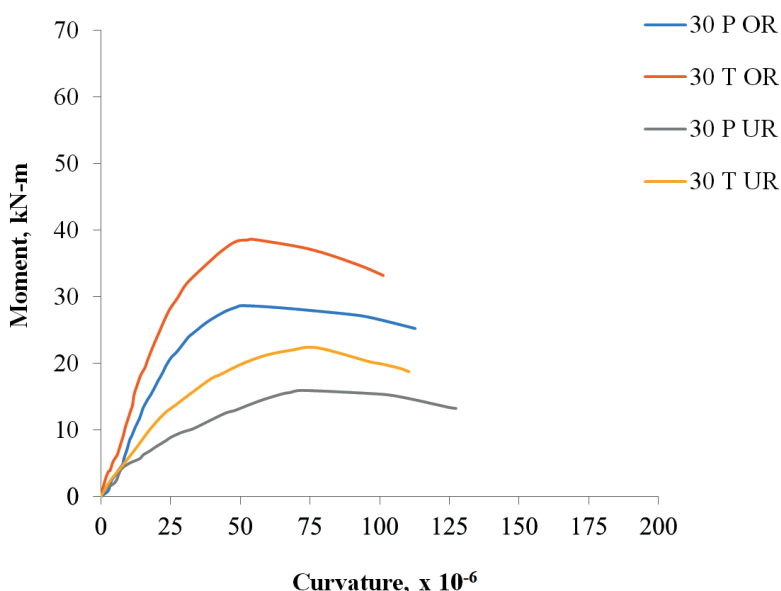
W tablicy 5 podano oznaczoną na próbkach sześciennych wytrzymałość na ściskanie betonów, z których wykonano belki. Beton ze spoiwa z dodatkami mineralnymi ma wytrzymałość na ściskanie nawet 45% większą w porównaniu do betonu wzorcowego. Rysunki 3-5 przedstawiają zależność: naprężenie zginające - odkształcenie dla betonów wzorcowych oraz betonów z cementu z dodatkami klas 30 MPa, 50 MPa i 70 MPa. Zwiększenie zdolności przenoszenia naprężenia zginającego widoczne jest na rysunku 3, na

Tablica 7 / Table 7

DOŚWIADCZALNE WIELKOŚCI NAPRĘŻENIA ZGINAJĄCEGO I ODKSZTAŁCENIA PRZY 0,85 MAKSYMALNEGO NAPRĘŻENIA ZGINAJĄCEGO NA WSTĘPUJĄCEJ CZĘŚCI KRZYWEJ NAPRĘŻENIE - ODKSZTAŁCENIE BELEK Z BETONU Z CEMENTU Z DODATKAMI I BETONU WZORCOWEGO

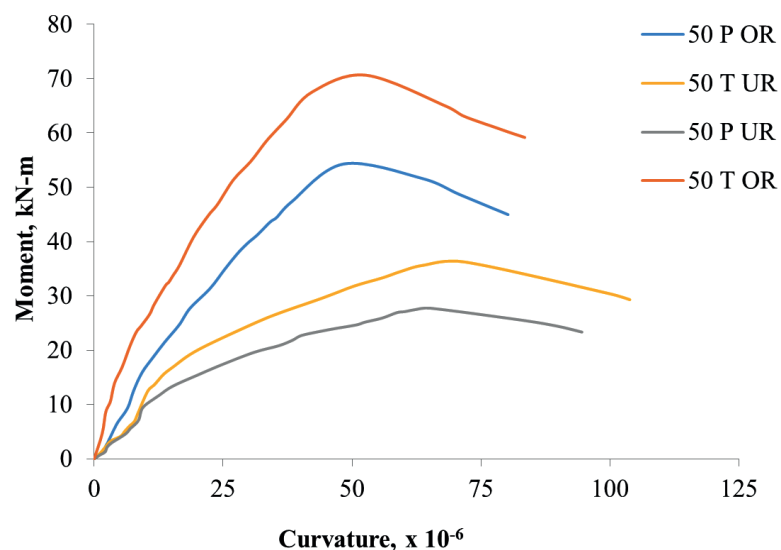
EXPERIMENTAL VALUES OF MOMENT AND CURVATURE AT 0.85 ASCENDING PORTION OF SIMPLY SUPPORTED TERNARY BLENDED CEMENT CONCRETE AND CONTROL MIX BEAMS

Concrete	M, kN·m	ϕ , x 10 ⁻⁶	ϵ_c , x 10 ⁻⁶	ϵ_s , x 10 ⁻⁶
30P UR	13,14	39,24	1834	5230
30P OR	23,87	35,05	3674	2635
30T UR	19,20	41,40	1942	5511
30T OR	32,47	37,04	3748	2920
50P UR	23,54	35,38	2105	4265
50P OR	45,61	33,90	3974	2128
50T UR	30,63	40,33	2385	4875
50T OR	65,07	35,61	4170	2241
70P UR	32,41	33,87	3259	2838
70P OR	60,75	31,94	4180	1570
70T UR	39,85	36,07	3468	3025
70T OR	73,42	34,86	4550	1725



Rys. 3. Zależność naprężenie zginające – odkształcenie belek z betonu o klasie wytrzymałości 30 MPa

Fig. 3 Moment-curvature relationship of 30 MPa grade concrete beams



Rys. 4. Zależność naprężenie zginające – odkształcenie belek z betonu o klasie wytrzymałości 50 MPa

Fig. 4 Moment-curvature relationship of 50 MPa grade of concrete beams

którym odpowiadające mu odkształcenia również wzrastają, wskazując na korzystny efekt wprowadzenia dodatków mineralnych do spoiwa. Taką tendencję znaleziono również dla dwóch pozostałych klas betonu, wskazującą na lepsze właściwości betonów z cementu z dodatkami w porównaniu do betonów wzorcowych [rysunki 4 i 5].

Wielkości naprężenia zginającego i odkształcenia betonu oraz odkształcenia zbrojenia przy obciążeniu maksymalnym pokazano w tablicy 6. Te same właściwości w przypadku 0,85 naprężenia zginającego na wznoszącej części krzywej pokazano w tablicy 7, zaś dla 0,85 naprężenia zginającego na krzywej opadającej w tablicy 8.

4.3. Spostrzeżenia wynikające z badań

- 1) Wraz ze zwiększaniem się wytrzymałości na ściskanie zwiększa się także maksymalne naprężenie zginające przenoszone przez belki betonowe.
- 2) Odkształcenie odpowiadające maksymalnemu naprężeniu zginającemu zmniejsza się wraz ze zwiększaniem wytrzymałości na ściskanie betonu.
- 3) Wraz ze zwiększaniem się wytrzymałości betonu na ściskanie odkształcenie zbrojonych belek betonowych zwiększa się.
- 4) Odkształcenie stali w belkach zbrojonych zmniejsza się wraz ze zwiększaniem się wytrzymałości na ściskanie betonu.

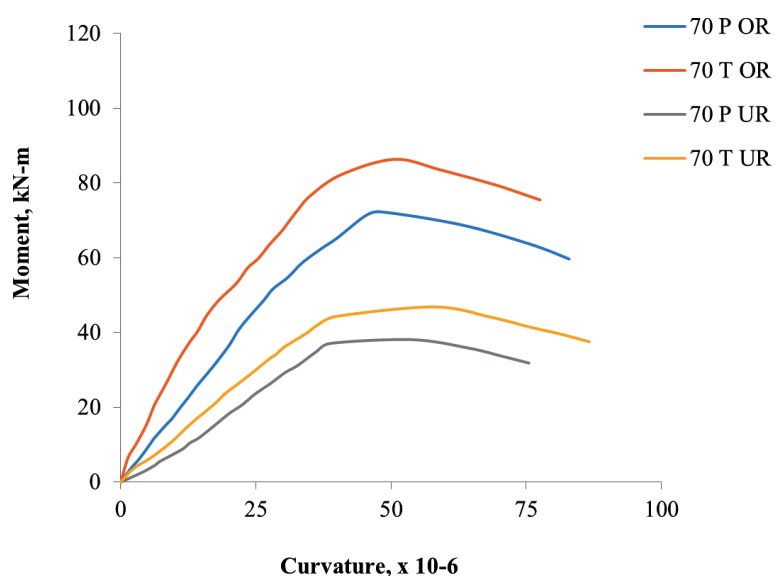
5. Wnioski

Z przeprowadzonych badań wyciągnięto następujące wnioski:

1. Beton z cementu, w którym zastosowano dodatki mineralne przenosi większe naprężenia maksymalne i odkształcenia przy tych naprężeniach w porównaniu z betonami wzorcowymi. Ten korzystny wpływ wynika ze równoczesnego zastosowania wybranych dodatków mineralnych.
2. Zmierzono znaczny wzrost przenoszonego maksymalnego naprężenia zginającego w betonie z cementu z dodatkami mineralnymi w porównaniu z betonem wzorcowym.
3. Większa odkształcalność belek z betonu z cementu z dodatkami w porównaniu z belkami z betonu wzorcowego wskazuje na korzystny wpływ zastosowanych dodatków mineralnych.
4. Dodatki mineralne wpływają korzystnie na właściwości betonów. Dlatego dodatki mineralne, jako częściowy zamiennik cementu w betonie, mogą być stosowane w przemyśle cementowym, szczególnie biorąc pod uwagę zasady zrównoważonego rozwoju.

Literatura / References

1. M.A Rahman, P.K. Sarker, F.U.A. Shaikh, A.K Saha, Soundness and compressive strength of Portland cement blended with ground granulated ferronickel slag, *Constr. Build. Mater.*, **140**, 194-202, (2017).
2. M.S Imbabi, C. Carrigan, S. McKenna, Trends and developments in green cement and concrete technology, *Int J of Sust Built Env.*, **1**, 194-216, (2012).



Rys. 5. Wpływ naprężenia zginającego na odkształcenie belek z betonu o klasie wytrzymałości 30 MPa

Fig. 5. Moment-curvature relationship of 70 MPa grade concrete beams

Tablica 8 / Table 8

DOŚWIADCZALNE WIELKOŚCI NAPRĘŻENIA ZGINAJĄCEGO I ODKSZTAŁCENIA PRZY 0,85 MAKSYMALNEGO NAPRĘŻENIA ZGINAJĄCEGO NA OPADAJĄCEJ CZĘŚCI KRZYWEJ MOMENTU NAPRĘŻENIE - ODKSZTAŁCENIE BELEK Z BETONU Z CEMENTU Z DODATKAMI I BETONU WZORCOWEGO

EXPERIMENTAL VALUES OF MOMENT AND CURVATURE AT 0.85 DESCENDING PORTION OF SIMPLY SUPPORTED TERNARY BLENDED CEMENT CONCRETE AND CONTROL MIX BEAMS

Concrete	M, kN·m	Ø, x 10 ⁻⁶	ε _c , x 10 ⁻⁶	ε _s , x 10 ⁻⁶
30P UR	13,40	127,53	5514	17430
30P OR	25,38	82,36	6696	8176
30T UR	19,21	139,10	6470	18623
30T OR	35,42	91,46	7756	8628
50P UR	23,44	103,02	5745	12819
50P OR	47,50	67,77	7150	5050
50T UR	31,50	120,97	6806	14970
50T OR	59,63	79,32	7964	6332
70P UR	35,64	73,54	6497	6721
70P OR	64,21	57,77	7243	3156
70T UR	43,15	79,71	7331	6952
70T OR	73,50	64,49	8108	3565

4.3. Important observations drawn from the investigation

- 1) As the compressive strength of concrete increases, the moment carrying capacity of the concrete increases.
- 2) Curvature corresponding to moment carrying capacity decreases with the increase in the compressive strength of concrete.

3. M. Schneider, M. Romer, M. Tschudin, H. Bolio, Sustainable cement production-present and future, *Cem. Concr. Res.*, **41**,642–650, (2011).
4. T.R Naik, S.S Singh, M.M Hossain, Properties of high performance concrete systems incorporating large amounts of high-lime fly ash, *Constr. Build. Mater.*, **9**,195–204, (1995).
5. M.C.G. Juenger, R. Siddique, Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete, *Cem. Concr. Res.*, **78**, 71-80, (2015).
6. V. Sata, C.Jaturapitakkul, K.Kiattikomol, Influence of pozzolan from various by-product materials on mechanical properties of high-strength concrete, *Constr. Build. Mater.*, **21**, 1589-1598, (2007).
7. A. Muthadhi, S.Kothandaraman, Experimental Investigations of Performance Characteristics of Rice Husk Ash-Blended Concrete, *J. Mater. Civil. Eng.*, **25**, 1115-1118, (2013).
8. M.H Zhang, V.M Malhotra, High-performance concrete incorporating rice husk ash as a supplementary cementing material, *ACI. Mater. J.*, **93**, 629–636, (1996).
9. M.S Ismail, A.M Waliuddin, Effect of rice husk ash on high strength concrete, *Constr. Build. Mater.*, **10**, 521–526, (1996).
10. M. Nehdi, J. Duquette, A.El Damaty, Performance of rice husk ash produced using a new technology as a mineral admixture in concrete, *Cem. Concr. Res.*, **33**, 1203-1210, (2003).
11. V. Sata, C. Jaturapitakkul, K. Kiattikomol, Utilization of palm oil fuel ash in high-strength concrete, *J. Mater. Civil. Eng.*, **16**, 623-628, (2004).
13. K. Ganesan, K.Rajagopal, K.Thangavel, Rice husk ash blended cement: Assessment of optimal level of replacement for strength and permeability properties of concrete”, *Constr. Build. Mater.*, **22**, 1675–1683, (2008).
14. R. Duval, E.H Kadri, Influence of silica fume on the workability and the compressive strength of high-performance concretes, *Cem. Concr. Res.*, **28**, 533–547, (1998).
15. A. Joshaghani, M.A Moeini, M.Balapur, Evaluation of incorporating metakaolin to evaluate durability and mechanical properties of concrete, *Adv. Concrete. Constr.*, **5**, 241-255, (2017).
16. T. H. Wee, M. S Chin, M. A Mansur. Stress-strain relationship of high-strength concrete in compression. *J. of Materials in Civil Engineering*, **8**, pp.70-76 (1996).
17. A. Sadrmomtazi, B. Tahmouresi, M. Amooie, Permeability and mechanical properties of binary and ternary cementitious mixtures, *Adv. Concrete. Constr.* **5**, 423-436, (2017).
18. T. S Babu, J. Pavitra, Effect of Fly Ash and Silica Fumes on Strength, Stress Strain Behaviour of M25 Concrete Mix, *Intern. J. of Civil and Structural Engineering Research*, **3**, 62-69, (2017).
19. T.S Babu , M.V.S Rao, D. Ramaseshu, Mechanical properties and stress-strain behaviour of self-compacting concrete with and without glass fibres, *Asian journal of civil engineering*, **9**, 457-472, (2008).
20. M.H Zhang, Microstructure, Crack Propagation, and Mechanical Properties of Cement Pastes Containing High Volumes of Fly Ashes, *Cem, Concr, Res.*, **25**, 1165-1178, (1995).
21. D. Ravi Prasad, V.V. Praveen Kumar, A study of concrete strength and durability by mineral additives Optimization in conventional low, medium and high grades concretes, *Cement Wapno Beton*, **84**, 299-310, (2017).
22. D. Ravi Prasad, Badanie właściwości mechanicznych betonu zawierającego odpady z przemysłu papierniczego – szlam wapienny zastępujący częściowo cement, *Cement Wapno Beton*, **83**, 298-307, (2018).
23. M.L.V Prasad, P. Rathish Kumar, Moment-curvature relationship of glass fiber reinforced self compacting recycled aggregate concrete, *J. Environ. Res. Develop.*, **7**, 1061-1070, (2012).

Standards/Normy

IS: 456- 2000, Plain and reinforced concrete- code of practice.

IS: 10262- 2009, Guidelines for concrete mix proportioning.

IS: 383- 1970, Specification for Coarse and Fine Aggregates from Natural Sources for Concrete.

- 3) As the compressive strength of the concrete increases, the strain in concrete of reinforced concrete beams increased.
- 4) Strain in steel in the reinforced concrete beams decreases with the increase in the compressive strength of concrete.

5. Conclusions

From the investigation the following conclusions can be drawn.

1. Inclusion of mineral additives have resulted in the enhancement of peak stress and strain at peak stress in quaternary blended concrete specimens compared to control mix due to the presence of overall combination effect of mineral additives.
2. There was a significant increase in the moment carrying capacity of quaternary blended cement concrete compared to that of control mix.
3. The corresponding curvature of blended concrete reinforced beams has shown superior performance indicating the positive effect of mineral additives.
4. There is a significant influence of supplementary cementitious materials on performance characteristics of the investigation of quaternary blended cement concrete compared to control mix. Therefore supplementary cementitious materials may be used in concrete to maintain sustainability.