

## **Badania wpływu poziomu naprężeń na zmiany szybkości rozchodzenia się fali ultradźwiękowej w wybranych rodzajach betonu**

### **A Study on the effect of stress level on ultrasonic pulse velocity in selected types of concretes**

#### **1. Wprowadzenie**

Wykorzystanie metod nieniszczących, dzięki którym można ocenić właściwości / stan konstrukcji betonowych staje się coraz bardziej popularne. Najlepszym z możliwych przypadków z jakimi możemy się zetknąć jest element betonowy bez rys, jednak najczęściej w konstrukcjach betonowych powstają rysy, które mogą mieć ogromny wpływ na ich żywotność. Rysy powstałe w różnych miejscach w betonie mogą się powiększać i przyspieszać zniszczenie betonu. Przykładowo, mikrorysy powstałe na skutek obciążeń mechanicznych mogą sprzyjać wnikaniu nadmiaru wody, a tym samym zwiększać podatność na zniszczenia w wyniku cyklicznego zarażania i rozmrażania, co z kolei może niekorzystnie wpłynąć na nośność konstrukcji. Starzenie się konstrukcji oraz zmienne warunki obciążeń wpływają na szczelność betonu. Wszelkie tego rodzaju zmiany właściwości betonu w konstrukcji należy sprawdzać w regularnych odstępach czasu, zgodnie z ogólnymi zasadami bezpieczeństwa konstrukcji. W celu dokładnego odwzorowania aktualnego stanu konstrukcji, należy określić zmiany stopnia zarysowania betonu, co można przeprowadzić za pomocą metod nieniszczących.

Zwykle do oceny i śledzenia prawidłowego stanu konstrukcji wykorzystuje się metody nieniszczące, do których należą młotek Poldiego, szybkość rozchodzenia się fali ultradźwiękowej oraz emisja akustyczna. Wcześniej metodę opisującą zmiany szybkości rozchodzenia się fali ultradźwiękowej stosowano w celu badania przebiegu hydratacji cementu (2, 7) oraz do oceny stopnia uszkodzenia betonu zbrojonego włóknami i betonu zawierającego rozdrobnioną gumę, ze zużytych opon samochodowych (1, 3 – 6), jak również w celu określenia ich wpływu na wytrzymałość. W pracy przedstawiono wyniki badań związanych z wykorzystaniem metody ultradźwiękowej jako narzędzia do śledzenia wewnętrznych uszkodzeń konstrukcji betonowych, a zatem do wyznaczenia wartości progowych stopnia uszkodzenia konstrukcji.

#### **2. Ocena stopnia uszkodzeń betonu**

Określenie poziomu uszkodzenia betonu może być trudne, a nawet niemożliwe bez zastosowania skomplikowanych metod, do

#### **1. Introduction**

It is becoming increasingly popular to utilize nondestructive methods to predict the performance / condition of concrete structures. While uncracked concrete exists as the best case scenario, frequent cracking occurs in real structures that could have a profound impact on life cycle performance. Cracks from several sources may accumulate and interact accelerating the deterioration of concrete. For example, micro-cracks due to mechanical loading may permit the ingress of excessive water, thereby increasing the susceptibility to freeze/thaw damage and an increase in freeze/thaw damage may reduce the load carrying capacity of concrete. The aging of structures and frequent change in the loading pattern affects the integrity of concrete. Any such changes in integrity of concrete material within a structure need to be assessed at regular intervals as part of the overall safety of structures. To accurately simulate the performance of actual concrete condition, it is required to know the changes in the integrity of concrete using the nondestructive methods.

Normally nondestructive tests (NDT) such as rebound hammer, ultrasonic pulse velocity (UPV) and acoustic emission (AE) techniques are used in condition assessment or health monitoring of structures. Earlier the changes in UPV were correlated with the process of hydration (2, 7) and for assessment damage in FRP and rubber create concretes (1, 3 – 6) and establishing strength relations. In this paper the use of ultrasonic pulse velocity test as a tool to monitor the internal damage of concrete structures and hence to introduce a threshold limit for possible failure of the structures, is presented.

#### **2. Damage assessment**

The determination of the level of failure may be difficult and unreliable without the use of complicated methods and procedures such as the load test. Sometimes, special procedures and methods have to be designed, tried and then applied to the element under consideration. Such methods are usually slow and costly. However, no final conclusions can be drawn without the application of such

których należy między innymi obciążenie próbne. Zdarza się, że takie specjalne metody muszą być opracowane dla konkretnego elementu konstrukcyjnego i są zazwyczaj czasochłonne i kosztowne. Jednakże, bez ich zastosowania nie można wyciągnąć ostatecznych wniosków. Ocena poziomu zaawansowania zniszczeń jest użyteczna, zwłaszcza w przypadku, gdy inżynierowie muszą zdecydować się na wykorzystanie różnych metod zaradczych, w tym rozbiórkę konstrukcji.

Metoda omówiona w pracy może być zastosowana do oceny stanu zarysowanych elementów konstrukcyjnych, w celu łatwej analizy badanego obszaru. Podstawowym założeniem jest pomiar szybkości rozchodzenia się fali ultradźwiękowej w betonie, w obszarach zarysowanych i nie mających rys. Oczywiście, szybkość rozchodzenia się fali ultradźwiękowej w betonie jest mniejsza w przypadku występowania rys wewnętrznych, co pokazano na rysunku 1, ponieważ rozchodzenie się ultradźwięków w betonie jest szybsze niż w powietrzu lub w wodzie, a te media mogą wypełniać rysy. A zatem, można mierzyć zmniejszenie szybkości rozchodzenia się fali ultradźwiękowej w spękanym betonie. Jednakże, w przypadku dużej rozwartości rys, fale dźwiękowe ulegają całkowitemu odbiciu, a utworzony przez nie sygnał nie jest odbierany. Ciągły pomiar szybkości rozchodzenia się fali ultradźwiękowej w betonie podczas jego obciążania pozwala na ocenę stopnia rozwoju wewnętrznych uszkodzeń. Przedstawione wyniki opisują zmiany szybkości rozchodzenia się fali ultradźwiękowej w próbkach betonowych wraz z narastającym poziomem naprężeń.

### 3. Materiały

Do pomiaru wytrzymałości na ściskanie stosowano sześciennie kostki betonowe o wymiarach 150x150x150 mm oraz beleczki do badania zależności pomiędzy naprężeniem i szybkością rozchodzenia się fali ultradźwiękowej o wymiarach 100x100x200 mm. W badaniach tych zastosowano różne rodzaje betonów: zwykły o wytrzymałości w zakresie 20-30 MPa [BZ-30] oraz beton o dużej wytrzymałości w zakresie 50-60 MPa [BWW-60]. Wykorzystano także beton samozagęszczający się [BSZ-30 i BSZ-60] oraz beton ze spoiwa bez klinkieru [BBK-30 i BBK-50]. Wyniki pomiarów wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach twardnienia podano w tablicy 1. Stosowano cement portlandzki klasy 53 oraz kruszywo drobne kategorii II, zgodnie z odpowiednimi normami indyjskimi. Wykorzystano także popiół lotny klasy F.

### 4. Metody

Do pomiaru wytrzymałości stosowano prasę Tinus-Olsen, o zakresie obciążeń do 2000 kN. Przetworniki ułożono dokładnie w oznakowanych miejscach w połowie wysokości próbki, a za pomocą plastycznego materiału zapewniono właściwe sprzężenie głowicy pomiarowej z powierzchnią betonu. Fala ultradźwiękowa rozchodziła się więc w połowie wysokości beleczek [rysunek 1]. Stosowano ultradźwięki o bardzo małej częstotliwości. Czas rozchodzenia się fali ultradźwiękowej rejestrowano w regularnych

metodach. The assessment of level of damage is useful especially when the engineer has to decide on various remedial measures including the demolition of the structure.

The method presented in this paper is a technique that can be applied to structurally cracked elements in order to obtain a simple conclusion about the tested region. The basic idea is to measure the velocity through concrete in cracked and regions without cracks. It is obvious that the ultrasound velocity in concrete is reduced when there is an internal crack. This is because velocity through concrete is higher than velocity through air or water [the cracks are either filled with air or water]. Hence, a reduction in the measured velocity can be noticed when the concrete cracks. However, when the cracks are wide, the sonic waves are wholly reflected and no signal is received. The continuous measurement of UPV while loading of concrete enables the assessment of internal damage. The experimental investigation presented consists of changes in UPV in concrete specimens with the level of induced stress.

### 3. Present investigation

The experimental investigation consists of casting and testing of concrete cubes (used for compressive strength assessment) of 150x150x150 mm size and prisms (used for assessment of stress vs UPV) of 100x100x200 mm using different concretes. The concretes used were normal strength concrete (NSC) with strength range from 20-30 MPa (NSC-30) and the high strength concrete (HSC) with strength range 50-60MPa (HSC-60). The other concretes used include self compacting concrete (SCC30 and SCC-60) and geopolymer concrete (GPC-30 and GPC-50). The details 28 day compressive strength obtained are given in Table 1. The cement used was 53 grade OPC and the fine aggregate was conforming to zone-II. Fly ash used was Class-F. The coarse aggregate used consisted of 20 mm down size and was of crushed type.

### 4. Testing of specimens

The prism was tested under compression using 2000 kN-Tinus-

Tablica 1 / Table. 1

WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCISKANIE PO 28 DNIACH  
COMPRESSIVE STRENGTH AFTER 28 DAYS

Beton/Concrete	Wytrzymałość na ściskanie kostek Cube compressive strength MPa
NSC-30 zwykły	35
SCC-30 samozagęszczający się	38
GPC-30 bezklinkierowy	32
HSC-60 o dużej wytrzymałości	63
SCC-60 samozagęszczający się	66
GPC-50 bezklinkierowy	54

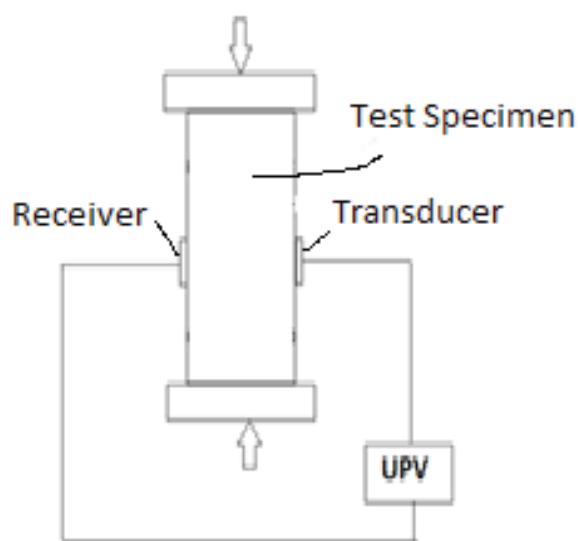


Fig.1. Test Setup

Rys. 1. Stanowisko pomiarowe

odstępach czasu, w trakcie obciążania próbek betonowych. Zmiany czasu rozchodzenia się fali ultradźwiękowej mierzone na dwóch prostopadłych do siebie powierzchniach próbki. Z zarejestrowanego obciążenia i czasu rozchodzenia się fali ultradźwiękowej obliczono naprężenie ściskające  $[\sigma]$  oraz zmiany prędkości fali ultradźwiękowej  $[V]$ . Na podstawie uzyskanych wyników określono zależność zmiany prędkości rozchodzenia się fali ultradźwiękowej od poziomu naprężeń ściskających.

## 5. Dyskusja wyników

Uzyskane wyniki pozwoliły na określenie zależności zmiany prędkości rozchodzenia się fali ultradźwiękowej od poziomu naprężeń ściskających, co pokazano na rysunkach 2-9. Pozwalają one na sformułowanie kilku uogólnień.

### 5.1. Ogólne spostrzeżenia związane z zmianami prędkości rozchodzenia się fali ultradźwiękowej

1. W przypadku naprężeń mniejszych od 25-30% obciążenia maksymalnego, szybkość rozchodzenia się fali ultradźwiękowej utrzymuje się na podobnym poziomie dla wszystkich badanych betonów. Może to być związane ze zmniejszaniem się rozwartości mikropęknięć na granicy pomiędzy kruszywem grubym i zaczynem cementowym pod obciążeniem.

2. Gdy naprężenia osiągają od 30% do 60% obciążenia maksymalnego, wielkość i ilość rys rośnie, co powoduje niewielkie zmniejszenie szybkości rozchodzenia się fali ultradźwiękowej.

-Olsen testing system. For each variation three identical samples were tested thus making the total number of samples as 18. The transducers were placed firmly at marked locations on the mid height of the specimen with high viscosity ultrasonic couplant. The travel path of ultrasonic wave therefore was through the body of the prism at its mid height (Fig.1). The ultrasonic equipment used in this study was a very low frequency system. The ultrasonic wave travel time (UST) was noted at regular intervals of load. The changes in UST were noted on two perpendicular faces of the specimen. From the observed readings of load, UST the compressive stress ( $\sigma$ ), ultrasonic pulse velocity ( $V$ ) was calculated. From the test results, the variation or change in UPV with the level of compressive stress was plotted for different concretes tested in the present investigation.

## 5. Discussion of test results

From the test results, the average variation or change in UPV with the level of compressive stress was plotted and the same is shown in Figs. 2-9. The following are some observations.

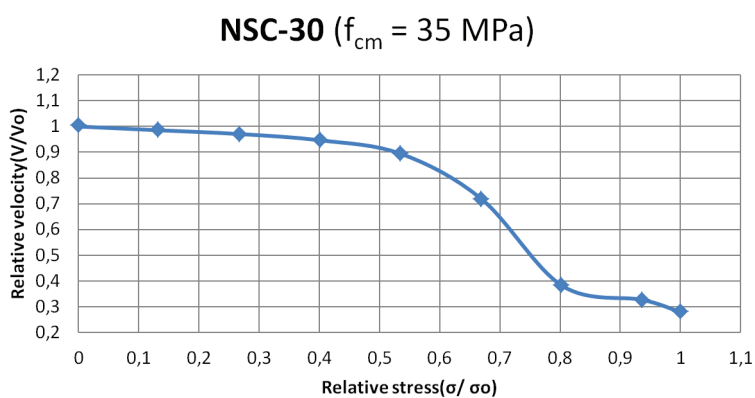


Fig. 2. Change in UPV with increase in stress level in normal strength concrete class  $\approx$  C25/30

Rys. 2. Zmiany szybkości rozchodzenia się fali ultradźwiękowej w betonie  $\approx$  C25/30

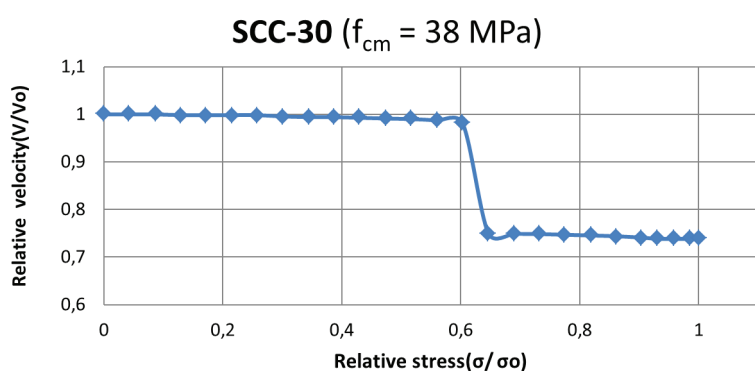
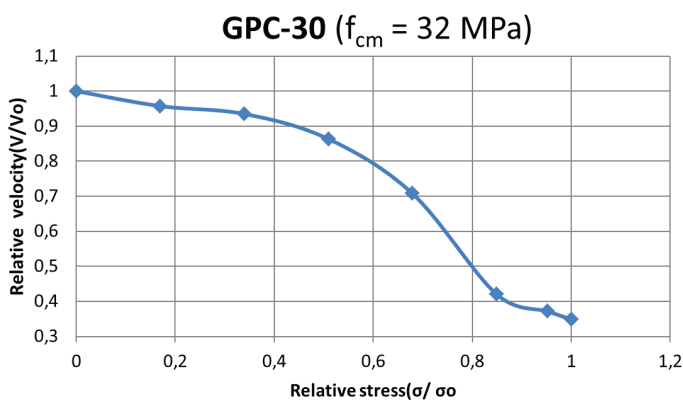


Fig. 3. Change in UPV with increase in Stress level in Self compacting concrete class  $\approx$  C25/30

Rys. 3. Zmiany szybkości rozchodzenia się fali ultradźwiękowej w samozagęszczającym się betonie klasy  $\approx$  C25/30 ze wzrostem naprężeń



Rys. 4. Zmiany szybkości rozchodzenia się fali ultradźwiękowej w betonie bez klinkieru klasy ≈ C25/30

Fig. 4. Change in UPV with increase in Stress level in Geopolymer concrete – class ≈ C25/30

3. W przypadku naprężeń o wielkości 60% i 85% obciążenia maksymalnego, rysy stają się nietrwałe i ulegają propagacji, wydłużając sygnał. Wpływ na odbierany sygnał staje się bardziej wyraźny.

4. Gdy naprężenia przekraczają 85% obciążenia maksymalnego, rozwarcie rys jest coraz większe i ulegają one coraz szybszej propagacji. W związku z tym szybkość rozchodzenia się fali ultradźwiękowej szybko maleje.

### 5.2. Zmiany szybkości rozchodzenia się fali ultradźwiękowej w betonie zwykłym o małej i dużej wytrzymałości [BZ-30 i BW-60]

Beton zwykły o małej wytrzymałości wykazuje bardzo niewielki spadek prędkości rozchodzenia się fali ultradźwiękowej o około 10% w początkowym etapie, do 40% poziomu naprężenia. Po przekroczeniu 40% poziomu naprężenia szybkość spadku prędkości rozchodzenia się fali ultradźwiękowej wzrasta i staje się on wyraźnie nieliniowy. W chwili, gdy poziom naprężenia osiąga 80%, prędkość rozchodzenia się fali ultradźwiękowej spada do około 30% [rysunek 2].

W przypadku betonu o dużej wytrzymałości, spadek prędkości rozchodzenia się fali ultradźwiękowej jest bardzo niewielki aż do poziomu naprężeń wynoszącego 60%. Następnie prędkość ta spada do poziomu 50% w momencie, gdy poziom naprężeń wynosi około 90%. Gdy poziom naprężeń przekracza 90%, prędkość rozchodzenia się fali ultradźwiękowej nagle spada poniżej 15% [rysunek 5].

A zatem, na schemacie opisującym beton zwykły można zidentyfikować trzy odmienne obszary spadku prędkości rozchodzenia się fali ultradźwiękowej.

### 5.1. General observations of change in UPV

1. For stresses below 25-30% of the ultimate load, the pulse velocity remains almost stable for all tested materials. This may be attributed to the fact that the micro-cracks at the interface between coarse aggregate and cement paste tend to be closed under the load.

2. For stresses between 30% and 60% of the ultimate load, the size and number of cracks increase, resulting in a slight decrease in the pulse velocity.

3. For stresses between 60% and 85% of the ultimate load, cracks become unstable and grow and propagate more, making the path of the ultrasonic signal longer. The effect on the received signal becomes more pronounced.

4. For stresses above 85% of ultimate load, crack widths increase and the cracks grow much faster. Therefore, the velocity decreases rapidly.

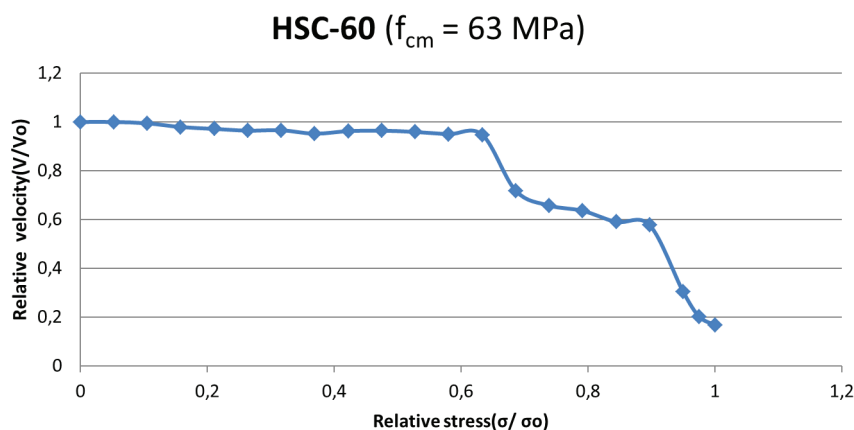


Fig. 5. Change of UPV with increase of stress level in high-strength concrete class ≈ C55/67

Rys. 5. Zmiany szybkości rozchodzenia się fali ultradźwiękowej w betonie klasy ≈ C55/67 ze wzrostem naprężeń

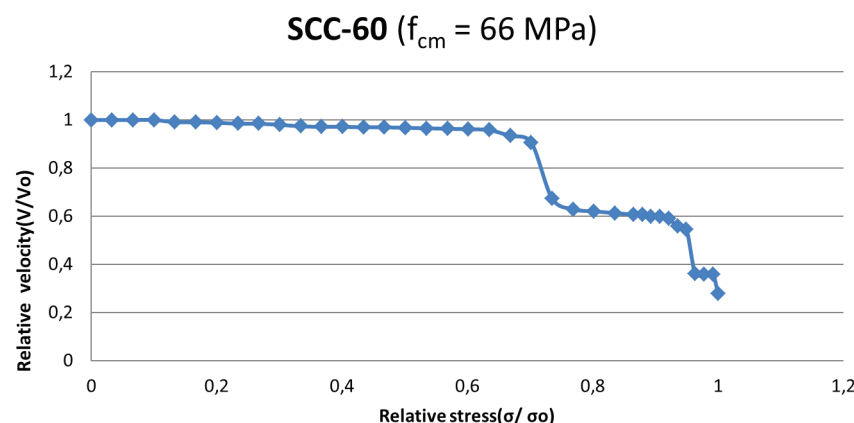


Fig. 6. Change in UPV with increase in stress level in self-compacting concrete class ≈ C55/67

Rys. 6. Zmiany szybkości rozchodzenia się fali ultradźwiękowej w samozagęszczającym się betonie klasy ≈ C55/67 ze wzrostem naprężeń



### 5.3. Zmiany szybkości rozchodzenia się fali ultradźwiękowej w betonie samozagęszczającym się [BSZ]

Beton samozagęszczający się zarówno o małej jak i dużej wytrzymałości wykazuje brak lub niewielką zmianę prędkości rozchodzenia się fali ultradźwiękowej do poziomu naprężenia wynoszącego około 60%. Po osiągnięciu tego naprężenia następuje nagły spadek prędkości rozchodzenia się fali ultradźwiękowej do 65% w zakresie naprężeń pomiędzy 60% a 70%. Następnie prędkość rozchodzenia się fali ultradźwiękowej pozostaje na stałym poziomie, praktycznie do końca badania [rysunki 3 i 6].

Tak więc, w betonie samozagęszczającym się powstaje mniej rys w porównaniu do betonu zwykłego, o małej wytrzymałości.

### 5.4. Zmiany szybkości rozchodzenia się fali ultradźwiękowej w betonie ze spoiwa bez klinkieru [BBK]

Beton ze spoiwa bez klinkieru wykazuje ciągłe zmniejszanie się szybkości rozchodzenia się fali ultradźwiękowej wraz z rosnącym poziomem naprężeń [rysunek 4]. Jednakże, spadek ten jest mniejszy w przypadku BBK o dużej wytrzymałości na ściskanie [rysunek 7].

A zatem w przypadku BBK następuje stopniowy spadek prędkości rozchodzenia się fali ultradźwiękowej wraz z rosnącym poziomem naprężeń.

Krzywe zależności prędkości rozchodzenia się fali ultradźwiękowej od poziomu naprężeń mogą być wykorzystane do oszacowania uszkodzeń wewnętrznych betonu i szybkości ich zmian, ze wzrostem poziomu naprężeń. Na tych krzywych uwidaczniają się trzy odmienne obszary charakterystyczne dla wzrastających obciążeń, którym poddawane są próbki.

**Zakres-1:** Początkowe obciążenie o wielkości naprężeń do około 60% obciążenia maksymalnego, ze zmianą szybkości rozchodzenia się fali ultradźwiękowej o około 10%

**Zakres-2:** Pośrednie obciążenie lub strefa przejściowa do poziomu naprężeń pomiędzy 60% a 85%, powoduje zmianę prędkości rozchodzenia się fali ultradźwiękowej o około 70%

### GPC-50 ( $f_{cm} = 54 \text{ MPa}$ )

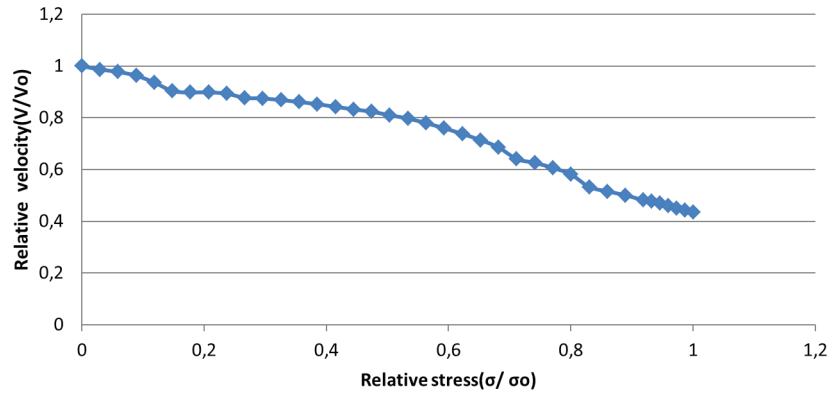


Fig. 7. Change in UPV with increase in stress level in geopolymer concrete class  $\approx C40/50$

Rys. 7. Zmiany szybkości rozchodzenia się fali ultradźwiękowej w betonie bez klinkieru klasy  $\approx C40/50$

### Concretes with low strength

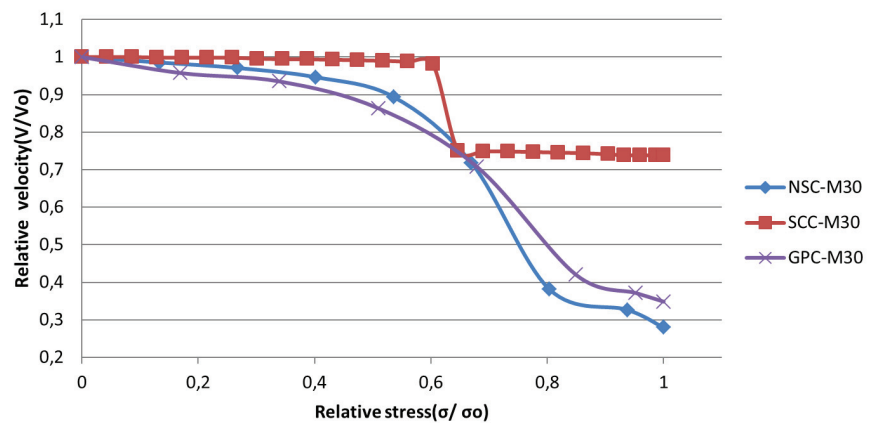


Fig. 8. Comparison of change in UPV with increase in stress level in different concretes of low class

Rys. 8. Porównanie zmian szybkości rozchodzenia się fali ultradźwiękowej ze wzrostem naprężeń w przypadku betonów o małej wytrzymałości

### Concretes with high strength

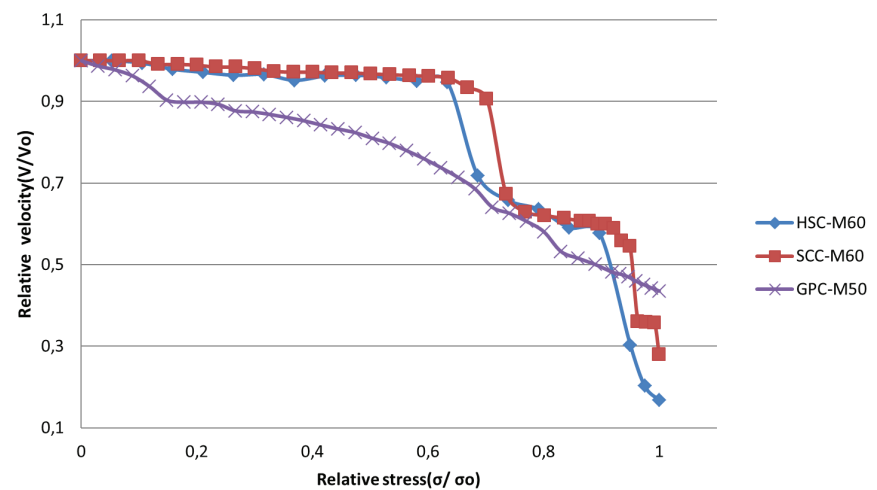


Fig. 9. Comparison of change in UPV with increase in stress level in different concretes of high class.

Rys. 9. Porównanie zmian szybkości rozchodzenia się fali ultradźwiękowej ze wzrostem naprężeń w przypadku betonów o dużej wytrzymałości

**Zakres-3:** Obciążenie końcowe dla poziomu naprężeń przekraczających 85%, gdy nastąpiło już maksymalne uszkodzenie, a zmiana prędkości rozchodzenia się fali ultradźwiękowej osiąga około 90%.

Powyższe obserwacje wskazują na większy wpływ szybkości rozchodzenia się ultradźwięków w zakresie naprężeń pomiędzy 60% a 85%, to jest powyżej zakresu obciążenia występującego w praktyce. Aby potwierdzić te zależności należy przeprowadzić więcej badań.

## 6. Wnioski

Z przeprowadzonych ograniczonych badań można wyciągnąć następujące wnioski.

1. Szybkość rozchodzenia się fali ultradźwiękowej maleje ze wzrostem poziomu uszkodzeń.
2. Beton zwykły wykazuje niewielkie zmniejszenie szybkości rozchodzenia się ultradźwięków w początkowej fazie badania, a większy po przekroczeniu poziomu naprężeń przekraczających 60%.
3. Zmniejszenie szybkości rozchodzenia się ultradźwięków jest nagłe w przypadku betonu samozagęszczającego się. Jednakże, w betonie tym powstaje mniej rys niż w przypadku betonu zwykłego o małej wytrzymałości.
4. Beton ze spoiwa bez klinkieru wykazuje stopniowy spadek prędkości rozchodzenia się fali ultradźwiękowej ze wzrostem poziomu naprężeń, właściwie już od początkowej fazy obciążania.
5. Szybkość zmiany prędkości rozchodzenia się fali ultradźwiękowej jest większa w przypadku betonu ze spoiwa bez klinkieru w porównaniu do betonu zwykłego oraz samozagęszczającego się.
6. Maksymalna zmiana szybkości rozchodzenia się fali ultradźwiękowej występuje w przypadku poziomu naprężeń pomiędzy 60% a 85%, w zakresie, w którym występuje maksymalne prawdopodobieństwo zniszczenia betonu.
7. Krzywa zależności szybkości rozchodzenia się fali ultradźwiękowej od poziomu naprężeń ma trzy różne obszary, wykazujące różny stopień uszkodzeń.

## 7. Podziękowanie

Autorzy pragną podziękować za wsparcie wydziałowi / personelowi i studentom Oddziału Konstrukcji Narodowego Instytutu Technologii w Warangal.

## Literatura / References

1. A. Mirmiran, Y. Wei, 'Damage assessment of FRP encased concrete using Ultrasonic pulse velocity', J. of Engineering Mechanics, **127**, 2, 126-135 (2001).

## 5.2. UPV Changes in normal and high-strength concretes (NSC-30 and HSC-60)

The normal concrete of low strength has shown very little drop of about 10% in UPV initially up to a stress level of 40%. When the stress level is more than 40% the rate of drop in UPV has increased and it becomes distinctly non-linear. By the time stress level reaches 80% the UPV has dropped to about 30%. (Fig. 2)

In the case of high compressive strength concrete, the drop in UPV is very low up to a stress level of 60%. Thereafter the UPV has dropped to 50% level by the time the stress level reaches about 90%. When the stress level is more than 90% the UPV has dropped suddenly to less than 15% level. (Fig.5)

Thus in NSC three distinct regions can be identified from the pattern of drop in UPV. In general the NSC has a higher aggregate content in where the matrix tends to be more heterogeneous and the cracks formed during the progressive damage may have been interrupted by the aggregate. The discontinuity between the cracks leads to gradual damage and thus caused gradual decrease in UPV.

## 5.3. UPV Changes in self-compacting concrete (SCC)

The SCC of both low and high strengths has showed no or little sign of distress as evidenced by the constant UPV up to a stress level of about 60%. However there is a sudden drop in UPV to 65% within a stress range between 60% and 70%. Thereafter the UPV remained constant up to nearly ultimate (Fig.3 and Fig.6). Thus the SCC maintains the integrity of concrete more uniformly compared to normal strength concrete. In case of SCC being more homogeneous due to relatively high fine-content than NSC, the cracks formed due to progressive damage might have been connected continuously or coalesce at higher stress ratios thus leading to sudden decrease of UPV.

## 5.4. UPV changes in geopolymer concrete (GPC)

The geopolymer concrete has indicated continuous reduction in UPV with increase in stress level (Fig. 4). However the reduction level is less in case of GPC of high compressive strength (Fig. 7). Hence in case of GPC there is a gradual increase of distress with increase of stress level. This may be attributed to the gradual loss of bond between matrix and aggregate. The behavior of GPC is more or less similar to that of NSC irrespective of low or high strength.

The UPV vs stress plots can be used to identify the onset of internal damage and its rate of change as the stress level increases. From the above plots three distinct regions can be recognized from the point of behavior of prisms under compression.

**Region-1:** An initial loading for stress ratios up to about 60% of the ultimate strength, with a rate of change of UPV as 10%

**Region-2:** An intermediate loading phase or the transition zone for stress ratios between 60% and 85%, with a rate of change of UPV as about 70%.

2. W. Chen, Z. Shui, W. Li, Early age hydration of cement paste monitored with ultrasonic velocity and numerical simulation, *J. of Wuhan University of Technology-Mat. Sci. Ed.*, **25**, 4, 704-707 (2010).
3. Chong Chooi Yeng, 'The effect of compressive stress in concrete on UPV', Thesis is submitted to Faculty of Engineering, University Malaysia Sarawak, Bachelor of Engineering With Honors (Civil Engineering) (2010).
4. R. Demirboga, I. Türkmen, M. B. Karako, Relationship between ultrasonic velocity and compressive strength for high-volume mineral-admixed concrete, *Cem. Concr. Res.*, **34**, 2329-2336 (2004).
5. B. S. Mohammed, N. J. Azmi, M. Abdullahi, Evaluation of rubbercrete based on ultrasonic pulse velocity and rebound hammer tests, *Constr. Build. Mat.*, **25**, 1388-1397 (2011).
6. I. H. Nash't, S. H. A'bour, A. A. Sadoon, Finding an united relationship between crushing strength of concrete and non-destructive tests, *Proceedings of Middle East Nondestructive Testing Conference & Exhibition, Bahrain, 2005*
7. J. Zhang, L. Qin, Z. Li, Hydration monitoring of cement-based materials with resistivity and ultrasonic methods, *Mat. Struct.*, **42**, 15-24 (2009).
8. I. Hager, T. Tracz, K. Krzemień, Usefulness of selected non-destructive and destructive methods in the assessment of concrete after fire, *Cement Wapno Beton*, **81**, 3, 145-151 (2014).
9. S. Popovics, J. S Popovics, Effect of stresses on the ultrasonic pulse velocity in concrete, *Mat. Struct.*, **24**, 15-23 (1991).

**Region-3:** A final phase of loading for the stress ratios above 85%, where maximum damage already occurred with a rate of change of UPV is about 90%.

The above observation indicates more sensitivity of UPV values in the stress range of 60% and 85% i.e after the service range of loading, which is more practical. More experimental investigations are required to confirm the above observation.

## 6. Conclusions

From the limited experimental investigation the following conclusions are drawn.

1. The ultrasonic pulse velocity decreases with increase of stress in concrete i.e the ultrasonic pulse velocity decreases with increase of degree of damage.
2. The normal strength or high strength concrete have shown about small drop in UPV initially and more drop in UPV after the stress level becomes higher than 60%.
3. The drop in UPV is more sudden in SCC. However The SCC maintains the integrity of concrete more uniformly compared to normal strength concrete.
4. The GPC experienced a gradual decrease of UPV with increase of stress level right from the initial stages of loading.
5. The rate of change of UPV is higher in case of GPC compared to NC and SCC.
6. The maximum change in the case of UPV occurs between the stress ratios of 60% and 85%, the range within which maximum possibility of damage in concrete.
7. The relative UPV vs Stress ratio variation has three distinct regions, indicating different degrees of damage.

## 7. Acknowledgement

The authors wish to acknowledge the support of faculty / staff and students of Structures division, NIT, Warangal.