

Sidney Mindess

Department of Civil Engineering
University of British Columbia
Vancouver, B.C., Canada

Odporność fibrobetonu na uderzenia

Impact resistance of fibre reinforced concrete

1. Wstęp

Fibrobeton (beton zbrojony włóknami) staje się coraz częściej powszechnie stosowanym materiałem budowlanym. Od dawna wiadomo, że włókna mogą znacznie poprawić właściwości betonu. W szczególności, włókna mogą nadać znaczną "pseudo ciągliwość" kruchej matrycy betonowej, umożliwiając przenoszenie przez fibrobeton dużych obciążeń przy ugięciach znacznie przekraczających potrzebne do spowodowania pęknięcia matrycy niezbrojonej. Pod statycznym obciążeniem włókna (w przypadku ich ilości zwykle stosowanej w praktyce, to jest objętościowo poniżej ok. 1%) nie powodują znaczącego zwiększenia wytrzymałości betonu, aczkolwiek mała poprawa wytrzymałości na rozciąganie i na zginanie może mieć miejsce. Jednakże pod obciążeniem udarowym włókna mogą zwiększyć równocześnie i wytrzymałość (na ściskanie, na rozciąganie i zginanie) i odporność na pęknięcie (energię pęknięcia) kompozytu w porównaniu do właściwości niezbrojonej matrycy pod podobnym obciążeniem (1). Oczywiście, uzyskana poprawa właściwości zależy od udziału objętościowego włókien, ich kształtu oraz wytrzymałości matrycy. Te czynniki w dużym stopniu decydują o tym czy włókna ulegną zerwaniu lub zostaną wywleczone z matrycy. Ponieważ zużycie energii na zrywanie włókien jest małe, to ten

1. Introduction

Fibre reinforced concrete (FRC) is becoming an increasingly common building material. It has long been known that fibres can greatly enhance the properties of concrete. In particular, fibres may impart considerable „pseudo-ductility” to the brittle concrete matrix, enabling the FRC to carry significant loads at deflections far beyond those required to crack the plain matrix. Under static loading, fibres (at the addition rates normally used in commercial practice, that is at volume fractions less than about 1%) do not contribute much to the strength of the concrete, though small improvements in tensile and flexural strengths may be found. Under impact loading, however, fibres may well increase both the strength (compressive, tensile and flexural) and the toughness (or fracture energy) of the composite, compared to the behaviour of the plain matrix under similar loading conditions (1). Of course, the increases obtained depend upon the fibre volume, the fibre geometry and the matrix strength. These parameters largely determine whether the fibres will break, or be pulled out of the matrix. Since not much energy is consumed in breaking fibres, this mode of failure will not lead to significant increases in material toughness. The pull-out of fibres, on the other hand, is accompanied by conside-

mechanizm zniszczenia nie będzie prowadził do znaczącego zwiększenia odporności materiału. Z drugiej strony, wywlekaniu włókien towarzyszy powstanie licznych mikropęknięć na granicy włókno/matryca, co może pochłaniać znaczną ilość energii, pociągając za sobą większą odporność układu na pęknięcie.

Przyczyny poprawy właściwości fibrobetonu pod obciążeniem udarowym nie są w pełni zrozumiałe. Częściowo może to być spowodowane faktem, że w przypadku fibrobetonu coraz większy wpływ ma prędkość odkształcania przy większej zawartości włókien i większych współczynnikach kształtu włókien. Jest to na ogół przypisywane wpływowi prędkości odkształcania na przyczepność włókien do matrycy (2). Analogicznie, dodatek włókien do matrycy betonowej znacznie poprawia przyczepność betonu do konwencjonalnego zbrojenia prętami stalowymi pod obciążeniem udarowym. W tym przypadku kompozyt wykazuje również większą przyczepność, staje się bardziej ciągliwy i absorbuje więcej energii (3,4).

Wpływ włókien jest jeszcze wyraźniejszy, gdy beton jest narażony na uderzenia przy bocznym ograniczeniu. Jak to szczegółowo wyjaśnił Sukontasukkul ze współautorami (5, 6), jeżeli ściskane próbki nie mają możliwości odkształceń poprzecznych, to obraz zniszczenia ulega zmianie ze stożków powstałych w wyniku ścinania na słupowe lub pionowe rozłupywanie, któremu towarzyszy wzrost wytrzymałości i odkształcenia przy największym obciążeniu. Jeżeli belki lub płyty nie mają możliwości odkształceń poprzecznych, to mechanizm zniszczenia ulega stopniowej zmianie od zginania do ścinania w miarę jak stopień ograniczenia wzrasta, z równoczesnym wzrostem wytrzymałości i odporności na pęknięcie. Im wyższe naprężenie ograniczające i/lub większa zawartość włókien, tym większe jest pochłanianie energii przez próbkę.

Trzeba stwierdzić, że niestety nasze zrozumienie zachowania się, tak betonu niezbrojonego jak i fibrobetonu, przy obciążeniu udarowym jest niedostateczne. W znacznym stopniu jest to spowodowane faktem, że dostępne wyniki badań zależą w znacznym stopniu od zastosowanej metody badania, jak i od użytej aparatury. Można nieomal powiedzieć, że dostępne dane są bardziej artefaktami zastosowanej metody badawczej. Jak dotąd nie ma ustaleń co do tak podstawowych warunków badań jak wielkość i kształt próbki, rodzaj aparatury badawczej, wartość siły uderzeniowej itd. Ponieważ nie ma dwóch laboratoriów, które posiadałyby taką samą aparaturę, to brakuje bazy danych, do której można byłoby się odnieść w celu porównania lub zweryfikowania wyników. Okazuje się więc, że prawdopodobnie nie będzie w przewidywalnej przyszłości wiarygodnej i uniwersalnej metody badań udarności; trzeba więc opracować specjalne metody badania, które powinny odtwarzać każdy szczególny problem udarności. Obecnie musimy się ograniczyć do uogólnień podanych wyżej, które nie mogą dać dokładnych wyników ilościowych.

Celem niniejszej pracy jest bardziej szczegółowe omówienie trudności doświadczalnych związanych z otrzymaniem pożytecznych danych, dotyczących udarności betonu niezbrojonego i fibrobetonu.

2. Modele obliczeniowe a wyniki doświadczalne

Wiele równań numerycznych i wzorów używanych w klasycznym projektowaniu konstrukcji betonowych wynikły z udanego porów-

nable microcracking at the fibre/matrix interface, which can consume a great deal of energy, leading to a tougher system.

The reasons for the improved FRC behaviour under impact loading are not completely understood. In part, this may be due to the fact that FRC becomes increasingly strain rate sensitive at higher fibre contents and higher fibre aspect ratios. This is generally attributed to the strain rate sensitivity of the fibre-matrix bond strength (2). Similarly, adding fibres to the concrete matrix will significantly improve the bond between the concrete and conventional steel reinforcing bars under impact loading. Again, the composite exhibits a higher bond stress, becomes more ductile and absorbs more energy (3, 4).

The effects of fibres are even more dramatic when the concrete is subjected to impact while under lateral confinement. As has been shown in detail by Sukontasukkul et. al. (5, 6), when compression specimens are laterally confined, the mode of failure changes from the normal shear cone type to a columnar or vertical splitting type, accompanied by increases in strength and strain at peak load. When beams or plates are laterally confined, the failure mode gradually changes from flexure to shear as the degree of confinement increases, again accompanied by increases in strength and toughness. Higher confining stresses and/or higher fibre contents lead to higher energy absorption by the specimen.

Unfortunately, our understanding of the impact behaviour of plain concrete and FRC remains imperfect, to say the least. In large part, this is due to the fact that the available test data are all highly dependent upon both the type of test, and on the particular equipment. One might almost say that the available data are mostly artifacts of the particular test procedure. As yet, there is no agreement on such basic test parameters such as specimen size, specimen geometry, type of test equipment, magnitude of the impact force, and so on. Since no two laboratories anywhere have the same experimental set-up, there is no data base to which one can refer in order to compare or verify results. Indeed, it appears that there is no likelihood of ever devising a "universal" impact test; for the foreseeable future, special impact tests will have to be devised to try to simulate any particular impact problem. At present, we are left only with the generalizations described above, which cannot be used to provide precise quantitative results.

The aim of the present work is to explore, in greater detail, the experimental difficulties involved in obtaining useful impact data on plain concrete and FRC.

2. Analytical models vs. experimental results

Many of the numerical equations and formulae used in the normal design of concrete structures have resulted from the successful validation of an analytical (or theoretical) relationship by comparison with experimental results. Some of these relationships have a strong theoretical basis (such as the load vs. deflection relationships for beams); others are purely empirical (such as the assumed relationship between compressive strength and elastic modulus of concrete). However, both types of relationships in the end depend on a large body of reliable experimental data against which they can be tested. In the case of plain concrete, however, there

niania zależności obliczeniowych lub teoretycznych z wynikami doświadczalnymi. Niektóre z tych zależności mają mocną teoretyczną podstawę (takie jak zależność obciążenie-ugięcie belki); inne są czysto empiryczne (takie jak przyjęta zależność między wytrzymałością na ściskanie a modułem Younga betonu). Jednakże oba rodzaje zależności zależą w końcu od dużej liczby prawidłowych wyników doświadczalnych, które mogą służyć do ich sprawdzania. W przypadku betonu niezbrojonego występują poważne trudności w opracowaniu równań modelujących obciążenie udarowe. Po pierwsze, jak wykazują niedawne sympozja poświęcone obciążeniom udarowym i wybuchowym (7 - 9), nie ma zgodności między różnymi modelami komputerowymi, które zostały opracowane na podstawie rozważań teoretycznych i opisują zachowanie betonu pod obciążeniem dynamicznym – mogą one dawać znacznie różniące się wyniki przy tych samych wartościach wejściowych. Jeżeli zostanie to połączone z podobnymi rozbieżnościami w wynikach doświadczalnych (jak to zostało wykazane w literaturze dotyczącej betonu niezbrojonego i fibrobetonu), to nie można się dziwić, że niezawodne metody projektowe nie zostały jeszcze opracowane. Innymi słowy, nie mamy jeszcze możliwości poprawnego modelowania ani właściwości materiału ani jego zachowania się w konstrukcji.

3. Zachowanie materiału pod obciążeniem udarowym

Reakcja niezbrojonego betonu w przypadku dużej prędkości odkształcenia pod obciążeniem jest bardzo skomplikowana i złożoność tej reakcji wzrasta gdy beton jest zbrojony albo nieciągłymi włóknami lub konwencjonalną stalą. Wzrastająca kruchość nowej generacji betonów o bardzo dużej wytrzymałości (> 100 MPa) stanowi dalszą komplikację. Niestety, brakuje niesprzecznego zbioru prawidłowych wyników dotyczących udarności, na podstawie których moglibyśmy poprawnie przewidzieć zachowanie betonu. Jest to spowodowane szeregiem następujących przyczyn (10, 11).

- 1) Nie ma ogólnie przyjętych „standardowych” metod badań, dotyczących uderzeń lub innych obciążeń wywołujących szybkie odkształcenie. Stosuje się szereg różnych technik doświadczalnych, obejmujących: oprzyrządowane maszyny udarowe różnych wymiarów; pręt Hopkinsona; oprzyrządowane młoty Charpy'ego, urządzenia udarowe z pociskami o różnych masach, kształcie i szybkościach uderzenia, a także obciążenia wybuchowe z ładunkami o różnej intensywności. Różne nieopryrządowane, bardziej subiektywne metody badawcze także są stosowane, takie jak powtarzane uderzenia spadającym ciężarem aż do pewnego umownego stopnia uszkodzenia. W następstwie tej sytuacji nie było żadnego, systematycznego programu między laboratoryjnych badań udarności. Dane literaturowe nie są porównywalne, a często okazują się sprzeczne.
- 2) Nie ma „standardowych” materiałów wiążących, które mogłyby być stosowane jako wzorzec w celu sprawdzenia stosowanych technik i aparatury. Oznacza to, że nie ma materiału opartego na cemencie, którego właściwości w zależności od szybkości odkształcania i energii pęknięcia są „znane”.
- 3) Wszystkie zaproponowane metody badań udarowych, zależą od określonych warunków konkretnego badania. W szczególności zależne są w dużym stopniu od następujących czynników:

are real problems in developing design equations for impact loading. First, as evidenced by recent symposia on impact and blast loading (7-9), there is little agreement amongst the various computer codes which have been developed (from theoretical considerations) to model concrete behaviour under dynamic loading - they may give quite different results for the same input data. When this is combined with similar discrepancies in experimental data (as evidenced by the impact literature on plain concrete and FRC), it is small wonder that reliable design procedures are still not available. In other words, we are still unable to model successfully either the material behaviour or the structural response.

3. Material behaviour under impact

Plain concrete responds in a very complex way to high strain rate loading, and this complexity increases when the concrete is reinforced either with discontinuous fibres or with conventional steel. The increased brittleness of the new generation of very high strength (> 100 MPa) concretes is a further complication. Unfortunately, there are no consistent sets of reliable experimental impact data from which we can successfully predict concrete behaviour. There are a number of reasons for this (10, 11):

- 1) There are no generally accepted "standard" impact or other high strain rate tests. A number of different test techniques are being used, including: Instrumented impact machines of various sizes; Split Hopkinson Pressure Bar; instrumented Charpy machines; projectile impact, with projectiles of different masses, geometries and impact velocities; and blast loading, with explosive charges of various intensities. Various non-instrumented, more subjective, tests are also available, such as repeated drop weight tests to some arbitrary degree of damage. Consequently, there have not been any systematic inter-laboratory impact test programs. The data in the literature are not comparable, and often appear to be contradictory.
- 2) There are no "standard" cementitious materials that we can use as a benchmark to verify our techniques and equipment. That is, there is no cement-based material whose strain-rate behaviour and fracture energy are "known".
- 3) All of the impact tests that have been proposed depend upon the exact details of the particular test procedure. In particular, they are very sensitive to:
 - The specimen supports
 - The rigidity of the impact machine
 - The velocity of impact
 - The impact energy
 - The specimen geometry
 - The size and nature of the contact zone between the specimen and the impacting device
 - Nature of the data acquisition system
 These test parameters will be discussed in greater detail below.
- 4) There remains a lack of agreement on which parameters should be used to best characterize the response of the concrete to impact loading:
 - Peak load or stress?
 - Fracture energy?

- podparcia próbki,
- sztywności maszyny udarowej,
- prędkości udaru,
- energii udaru,
- kształtu próbki,
- wymiaru i rodzaju strefy kontaktowej między próbką i uderzającym przyrządem,
- rodzaju układu rejestrującego wyniki.

Te parametry metod badawczych zostaną omówione szczegółowo w dalszej części pracy.

- 4) Brak jest porozumienia co do wyboru parametrów, które powinny być użyte, aby najlepiej określić reakcje betonu na obciążenie udarowe:
- maksymalne obciążenie lub naprężenie?
 - energia pęknięcia?
 - prędkość pęknięcia?
 - stopień zniszczenia lub rozbicia na kawałki?
 - resztkowa wytrzymałość po udarze?

Również te zagadnienia są niżej omówione.

- 5) Wysoki koszt badania udarności jest nieunikniony, co powoduje, że w rzeczywistości nie jest możliwe zorganizowanie należytego międzylaboratoryjnego programu badawczego.

4. Wpływ parametrów metody badawczej na wyniki udarności

4.1. Podparcie próbki

Powinno się zasadniczo przyjmować tak sztywny układ podpór, jak to tylko możliwe. Jednakże, jeżeli układ jest zbyt sztywny do tego stopnia, że wymagany czas do osiągnięcia przez zastosowane obciążenie jego maksymalnej wartości jest mniejszy niż około połowa częstotliwości drgań własnych próbki, to wówczas powinno być brane pod uwagę wygaszanie fal naprężenia podczas uderzenia (12), a to bardzo komplikuje analizę. Tak więc, aby uniknąć konieczności wykonywania tego rodzaju korekt, Gopalaratnam i in. (13) stosowali gumowe podkładki na podporach próbki w ich oprzyrządowanych próbach Charpy'ego. To jednakże spowodowało znaczne zmniejszenie prędkości obciążenia.

Dodatkowo nieuniknione jest pewne lokalne skruszenie lub uszkodzenie w punktach podparcia, szczególnie w próbach z belką, która jest powszechnie używana w celu scharakteryzowania betonu zbrojonego włóknami. Choć nie było to przedmiotem systematycznych badań, to jest oczywiste, że kształt i wymiar podpór mają pewien wpływ na mierzone wartości.

4.2. Sztywność maszyny udarowej

Z warunkami podparcia związana jest ogólna sztywność całej maszyny udarowej. I znowu nie było systematycznych badań wpływu sztywności maszyny na odporność udarową betonów zbrojonych włóknami. Jednakże, podczas gdy sztywność maszyny ma prawdopodobnie mały, lub nie ma wcale wpływu na maksymalne obciążenie, to może wpływać na zachowanie się betonu po szczytowym obciążeniu, jak to stwierdzono w badaniach statycznych.

- Crack velocity?
- Degree of damage or fragmentation?
- Residual strength after impact?

These too will be discussed further below.

- 5) Impact testing is inherently very expensive, which makes it virtually impossible to organize a proper "round-robin" test program.

4. Effects of test parameters on impact data

4.1. Specimen supports

In principle, one would want as rigid a support system possible. However, if the system is too rigid, such that the time required for the applied load to reach its maximum value is less than about one-half the natural frequency of the specimen, then the stress waves set up during the impact event should be taken into account (12), and this complicates the analysis enormously. Thus, to try to avoid having to make these kinds of corrections, Gopalaratnam et al. (13) used rubber pads at the specimen supports in their instrumented Charpy tests. This, however, has the effect of considerably reducing the loading rate.

In addition, there is inevitable some local crushing or damage at the support points, particularly for the beam test which are most commonly used to characterize FRC. Though this has not been studied in any systematic way, clearly the shape and size of the supports will have some effect on the measured values.

4.2. Rigidity of the impact machine

Related to the support conditions is the overall rigidity of the entire impact machine. Again, there have been no formal studies of the effect of machine stiffness on the impact behaviour of FRC. However, while the stiffness of the machine would probably have little or no effect on the peak load, it might well affect the post-peak behaviour, as is found in static tests.

4.3. Impact velocity and energy of impact

Given the lack of any standard test procedures, the impact tests that have been reported in the literature have involved different impact velocities and different impact energies. However, from the few systematic tests that have been done, both the velocity and energy have a significant effect on the material behaviour. For instance, Table 1 shows some test results obtained using two different instrumented drop weight machines on steel fibre reinforced beams. The tests were carried out in the Civil Engineering Laboratories at the University of British Columbia, using similar drop hammers (except for their weights) and the same data acquisition system. Tests 1 and 2 have both different velocities of impact and hence different impact energies; tests 1 and 3 have the same impact energies but different velocities; and test 2 and 3 have the same impact velocities but different impact energies. In all cases, the beams failed completely during the impact events. It may be seen that there are no clear relationships amongst the

Tablica 1 / Table 1

WYNIKI BADANIA UDARNOŚCI BELEK BETONOWYCH O DUŻEJ WYTRZYMAŁOŚCI.

IMPACT TEST DATA FOR HIGH STRENGTH CONCRETE BEAMS.

Próba Test	Masa młotka Hammer Weight (kg)	Wysokość spadania Drop Height (mm)	Maksymalne obciążenie Maximum Load (kN)	Połowa wielkości ugięcia przy maksymalnym obciążeniu Mid-span Deflection at Maximum Load (mm)	Energia pęknięcia Fracture Energy (N.m)
1	578	156	75.3	12.43	318
2	578	1500	253.6	2.57	373.1
3	60	1500	190.5	2.05	258.4

4.3. Prędkość udaru i jego energia

Ze względu na brak znormalizowanych metod badań, w próbach udarności opisanych w literaturze występowały różne prędkości i różne energie uderzenia. Jednakże z niewielu systematycznych badań, które zostały przeprowadzone, wynika że i prędkość i energia mają znaczący wpływ na zachowanie materiału. Na przykład, w tablicy 1 pokazano kilka wyników badań otrzymanych w przypadku belek zbrojonych włóknami stalowymi za pomocą dwóch różnych oprzyrządowanych maszyn z masami udarowymi. Badania zostały przeprowadzone w laboratoriach Wydziału Budownictwa Lądowego na Uniwersytecie Brytyjskiej Kolumbii za pomocą podobnych młotów opadowych (z wyjątkiem ich masy) i tego samego układu rejestracji wyników. W badaniach 1 i 2 zastosowano różne prędkości uderzenia i w związku z tym różne jego energie; w badaniach 1 i 3 były te same energie, ale różne prędkości; natomiast w badaniach 2 i 3 były te same prędkości, ale różne energie. We wszystkich przypadkach belki uległy całkowitemu zniszczeniu podczas badania udarności. Można stwierdzić, że nie ma wyraźnej zależności pomiędzy prędkością uderzenia, energią, masą spadającego młota, ugięciem w połowie rozpiętości a energią pęknięcia. Który z parametrów badania próby najlepiej charakteryzuje materiał?

impact velocity, the impact energy, the weight of the drop hammer, the mid-span deflection, and the fracture energy. Which test parameters would best characterize the material?

Similarly, Table 2 shows the results of tests on steel fibre reinforced beams, using the same 60 kg drop hammer as above, in which the drop height (and hence the impact velocities and impact energies) was varied. It may be seen that with increasing drop height, the strength increased, while the fracture energy decreased. All of the specimens here also failed completely. Again, is there a "best" or "correct" drop height to describe the material?

Tablica 2 / Table 2

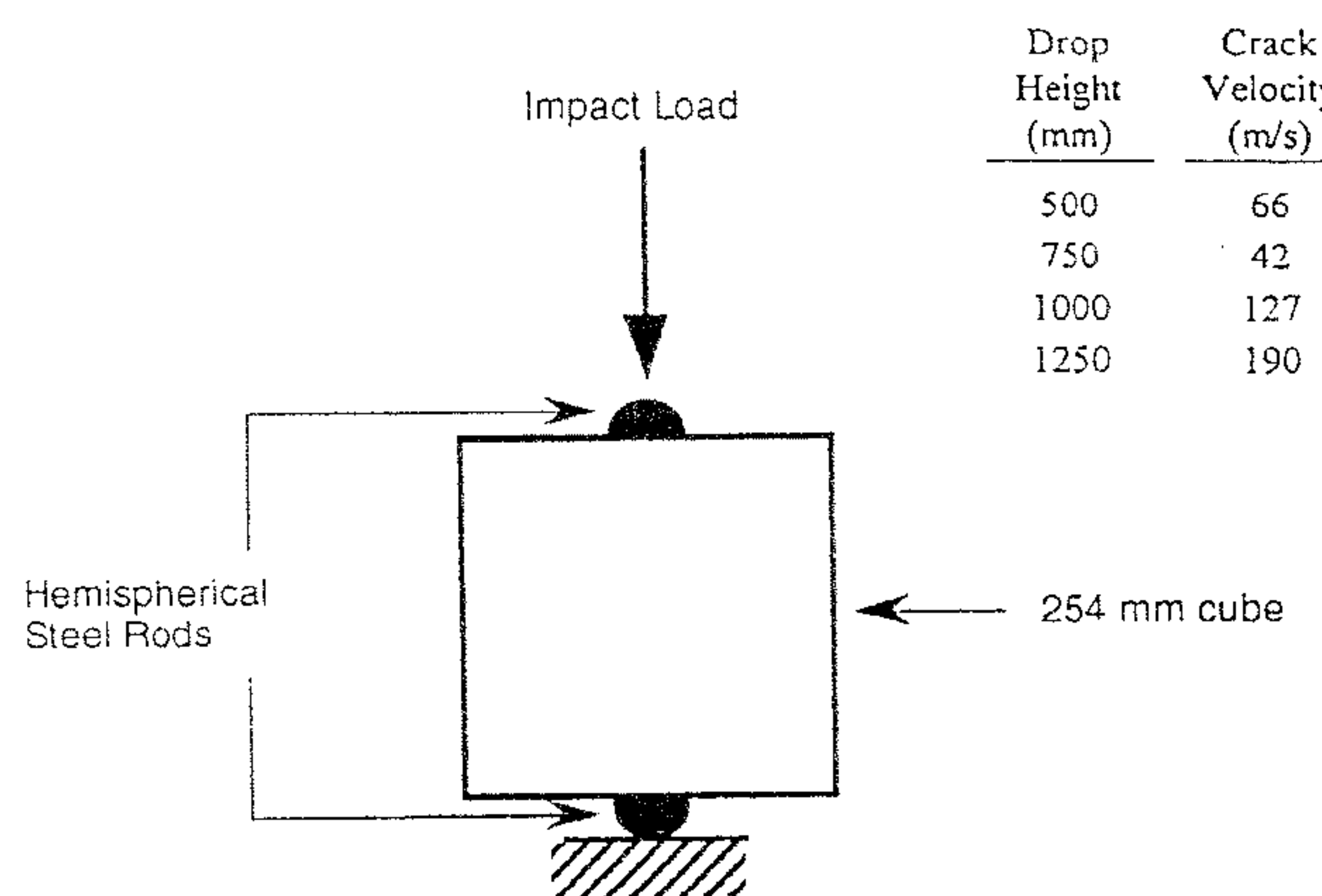
WYNIKI UDARNOŚCI BELEK BETONOWYCH ZBROJONYCH WŁÓKNAMI STALOWYMI.

IMPACT DATA FOR STEEL FIBRE REINFORCED CONCRETE BEAMS.

Wysokość opadania Drop height (mm)	Statyczne Static	1000	1100	1200	1300
Maksymalne obciążenie Maximum Load, kN	59.1	281.5	291.4	299.2	307.0
Nominalna wytrzymałość na zginanie Nominal flexural strength, MPa	17.2	81.8	84.7	87.0	89.2
Energia pęknięcia Fracture energy, N.m	263	489	450	386	353

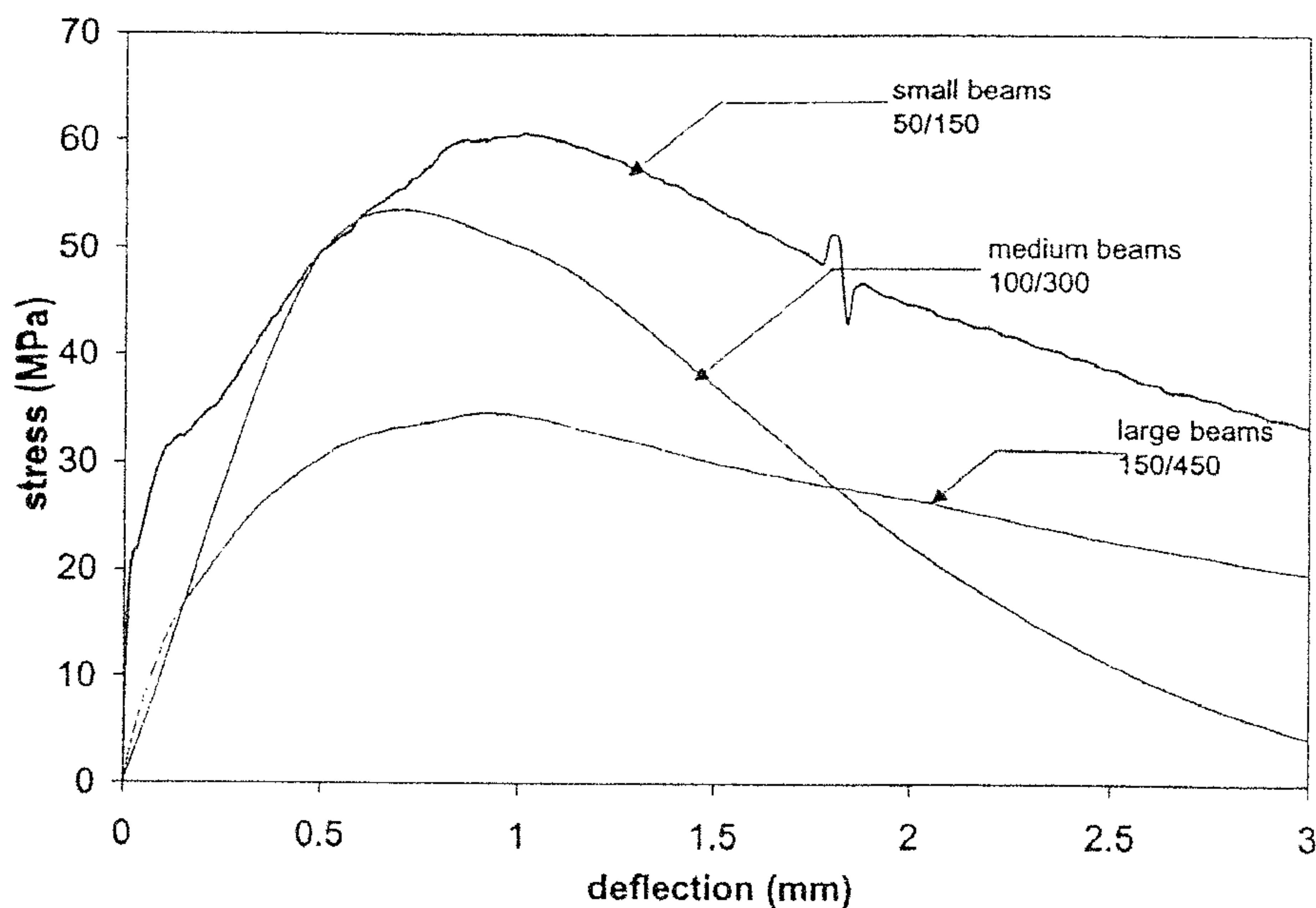
Analogicznie, w tablicy 2 zebrano wyniki badań belek zbrojonych włóknami stalowymi za pomocą tego samego spadającego młota o masie 60 kg jak poprzednio, w którym zmieniano wysokość opadania (a stąd prędkość uderzeń i ich energie). Można zauważyć, że z rosnącą wysokością opadania, wzrasta wytrzymałość, natomiast energia pęknięcia maleje. W tych badaniach wszystkie próbki uległy całkowitemu zniszczeniu. Znowu powstaje pytanie czy można wybrać „najlepszą” lub „prawidłową” wysokość spadania do scharakteryzowania materiału?

Na rysunku 1 pokazano wyniki badań za pomocą naprężenia rozłupującego (ściskanie w płaszczyźnie średnicy) kostek betonowych, zbrojonych włóknami stalowymi (14). Wszystkie kostki uległy całkowitemu zniszczeniu w wyniku pionowego rozłupania. Na ogół prędkość pęknięcia rosła ze wzrostem prędkości lub energii



Rys. 1. Udarność sześciątów zbrojonych włóknami przy naprężeniach rozłupujących.

Fig. 1. Impact of fibre reinforced cubes in splitting tension.



Rys. 2. Naprężenie i odkształcenie jako reakcja belek o różnych wymiarach wysokość/rozpiętość 50/150, 100/300 i 150/450 (15).

Fig. 2. Stress vs. Deflection responses of beams of different sizes with beam.

uderzenia. Czy istnieje „prawidłowa” wysokość spadania, która najlepiej charakteryzuje zachowanie materiału?

Ostatnio Bindiganavile (15) wykazał, że nawet zachowanie warunków takiej samej energii uderzenia nie jest wystarczające dla znormalizowania prób udarności. Badał on betony zbrojone dwoma rodzajami włókien: stalowymi i polipropylenowymi za pomocą tych samych oprzyrządowanych maszyn z masą uderową opisaną poprzednio. W przypadku dużej masy uderowej beton zbrojony włóknami stalowymi okazał się bardziej odporny; odwrotna sytuacja wystąpiła w badaniach przeprowadzonych z mniejszą masą i w związku z tym z większą prędkością uderzenia. Który materiał jest więc bardziej odporny na uderzenia – beton zbrojony włóknami stalowymi czy polipropylenowymi?

4.4. Kształt próbek

Zarówno wymiary jak i kształty próbek powinny być brane pod uwagę. Wpływ wymiarów został szczegółowo zbadany przez Bindiganavile'a (15). Badał on belki z fibrobetonu o podobnych kształtach, ale o trzech rozmiarach za pomocą oprzyrządowanej maszyny z masą uderową. Jak pokazano na rysunku 2, nie tylko wytrzymałość belek, lecz także kształt krzywych naprężenie - ugięcie zależą od wielkości próbki. Stwierdził również, że dobrze znany efekt wymiarów próbki betonowej był większy przy większych prędkościach obciążania. Podobnie, Krauthammer i Elfahal (16) na podstawie badań prób z masą uderową walców różnych wymiarów z niezbrojonego betonu, stwierdzili, że jednym z ważniejszych czynników wpływających na udarność jest zależność pomiędzy wymiarami i masą młota uderowego oraz wymiarami i wytrzymałością próbki. Niestety, nie możemy dotychczas ująć ilościowo tych zależności.

Wpływ kształtu próbki nie był wyczerpująco badany. Najczęściej próbkami badanymi na udarność są belki lub płyty, ale niektóre prace dotyczyły także próbek ściskanych (16). Na podstawie tych

Fig. 1 shows the results of splitting tension (diametral compression) tests carried out on steel fibre reinforced concrete cubes (14). All cubes failed completely in vertical splitting. In general, the crack velocity increased with increasing impact velocity (or impact energy). Is there a "correct" drop height to characterize the material behaviour?

More recently, Bindiganavile (15) has shown that even maintaining a condition of identical impact energy is insufficient to standardize impact tests. He tested both steel fibre and polypropylene fibre concretes, using the same instrumented drop-weight machines referred to above. With a large drop mass, the steel FRC appeared to be tougher; the reverse was true for tests carried out with a smaller mass (and hence a higher impact velocity). Which, then, is tougher under impact - steel FRC or polypropylene FRC?

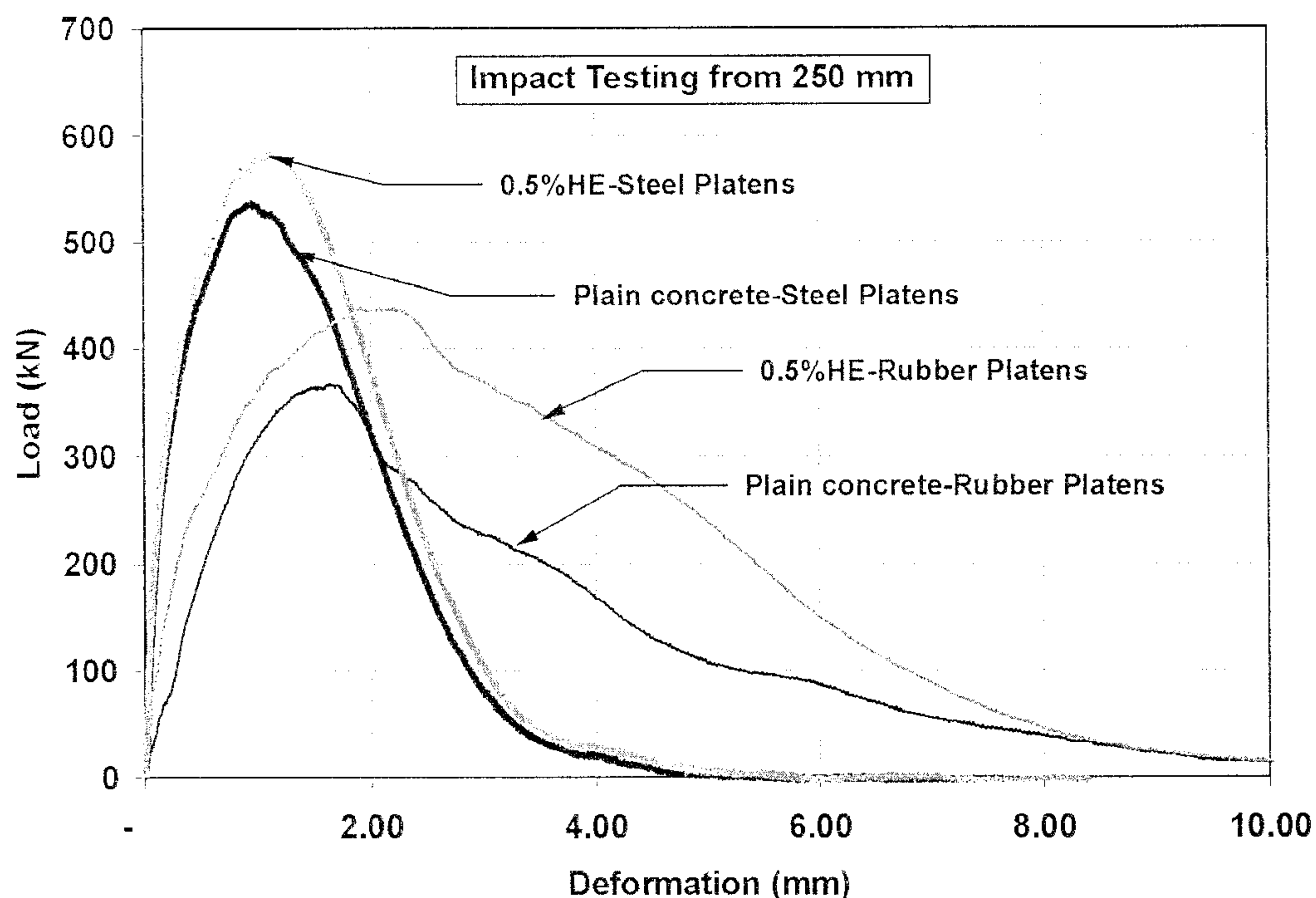
4.4. Specimen geometry

Both the size and the shape of the specimen must also be taken into consideration. The effects of size have been examined in some detail by Bindiganavile (15). He tested three different sizes of geometrically similar steel FRC beams using an instrumented drop-weight machine. As may be seen in Fig. 2, not only the strengths of the beams, but also the shapes of the stress vs. deflection curves depend on the specimen size. As well, he found that the well-known size effects for concrete were more pronounced at higher loading rates. Similarly, Krauthammer and Elfahal (16), from drop-weight impact tests on plain concrete cylinders of various sizes, concluded that one of the most important factors affecting impact tests is the relationship between the size and weight of the impacting hammer, and the specimen size and strength. Unfortunately, we cannot yet quantify these relationships.

The effects of specimen geometry have not been extensively studied. The most common impact specimens are beams or plates, but some work has also been carried out using compression specimens (16). With these tests, however, the effectiveness of different fibre types does not necessarily follow the same trends as found with flexural tests.

4.5. Contact between specimen and impacting device

As indicated above (13), the type of contact between the specimen and the supports may have a considerable effect on the specimen behaviour. Sukontasukkul (17) carried out a large series of tests on confined FRC prisms (in compression), beams and plates. In some tests the specimens were confined by heavy steel plates, while in others stiff rubber pads were interposed between the steel plates and the specimens. Typical results showing the



Rys. 3. Wyniki uderowych badań ściskających graniastosłupów ograniczonych czterostronnie płytkami stalowymi lub z twardej gumy (17).

Fig. 3. Compressive impact results for concrete prisms confined on all four sides by either steel or hard rubber plates (17).

badań okazało się, że efektywność różnych rodzajów włókien niekoniecznie zależy od tych samych czynników, jak to zostało stwierdzone w przypadku zginania.

4.5. Rodzaj kontaktu próbki z urządzeniem uderowym

Jak wspomniano powyżej (13), rodzaj kontaktu z podporami może mieć znaczny wpływ na zachowanie się próbki. Sukontasukkul (17) przeprowadził dużą serię badań na ściskanie próbek z fibrobetonu w kształcie graniastosłupów, belek i płyt. W niektórych badaniach elementy próbne były ograniczone przez użycie grubych stalowych przekładek, podczas gdy w innych pomiędzy płytkami stalowymi a próbkami umieszczono sztywne gumowe podkładki. Typowe wyniki pokazujące wpływ materiału ograniczającego na reakcję próbek przedstawiono na rysunku 3.

Sukontasukkul (17) przeprowadził także próby uderowe na ograniczonych płytach z fibrobetonu za pomocą dwóch różnych kolistych bijaków uderzeniowych, o średnicach wynoszących 1 i 3/8 rozpiętości płyt swobodnie podpartych. W przypadku mniejszego bijaka w obrazie zniszczenia przeważało ścinanie. W przypadku większego – wystąpił mieszany obraz zniszczenia złożony ze ścinania i zginania. Zmienia to umowną odporność betonu na obciążenie uderowe.

4.6. Rodzaj układu rejestrującego wyniki

W większości badań udarności opisanych w literaturze szczytowe obciążenie zostaje osiągnięte w czasie krótszym od 1 ms i czas trwania całej próby udarności jest z reguły krótszy niż około 10 ms. Tak więc konieczne jest stosowanie bardzo szybkiego układu rejestracji wyników. Równocześnie próba udarnościowa o dużej

effect of the confining material on the response are shown in Fig. 3.

Sukontasukkul (17) also carried out impact tests on confined FRC plates using two different circular load tups, with diameters of 1 and 3/8 of the clear span of the simply supported plates. For the smaller tup, the failure mode was dominated by shear. For the larger one, mixed shear and flexure failure modes were found. This too changes the apparent resistance of the concrete to impact loading.

4.6. Nature of the data acquisition system

In most of the impact studies reported in the literature, the peak loads are reached in less than 1 ms, and the duration of the entire impact event is typically less than about 10 ms. Thus, a very high speed data acquisition system is necessary. As well, large scale impact tests inevitably induce stress waves in the specimens and vibrations in the sensing apparatus (load cells, accelerometers, etc.). This may necessitate careful attention to both the sampling rate and the frequency response of the system being employed.

5. Which parameters best characterize the response of FRC to impact loading?

As stated above, different investigators have used different parameters to try to characterize the response of both plain concrete and FRC to impact loading. However, there is no agreement as to how best to do this – the choices appear to be governed as much by the available equipment as by the problem that is being modeled. The most common parameters are:

skali w sposób nieunikniony wywołuje fale naprężeń w próbkach i wibracje w czujnikach aparatu (czujniki obciążenia, mierniki przyspieszenia itp.). Może to wymagać szczególnej uwagi, tak w zakresie częstości próbkowania, jak i częstotliwości odpowiedzi stosowanego układu.

5. Jakie czynniki najlepiej charakteryzują reakcję fibrobetonu na obciążenie udarowe

Jak stwierdzono powyżej, różni badacze stosowali rozmaite parametry próbując scharakteryzować reakcję betonu niezbrojonego i fibrobetonu na obciążenia udarowe. Jednak nie ma zgodności jak można to zrobić najlepiej - wybór wydaje się być w znacznym stopniu zależny od dostępnej aparatury, jak również od problemu, który staramy się modelować. Najczęściej stosowane parametry opisane są poniżej.

5.1. Maksymalne obciążenie (lub naprężenie)

Większość badań udarności obejmuje pewne pomiary maksymalnego obciążenia lub naprężenia, które może przenieść próbka. Trzeba podkreślić, że w wyniku efektu bezwładności oznaczenie maksymalnego obciążenia może nie być proste. Podczas gdy często jest to ważna informacja, to w przypadku fibrobetonu właściwości po maksymalnym obciążeniu są najważniejsze. Jednak, niezależnie od trudności doświadczalnych i to zarówno w wyznaczaniu pełnej krzywej obciążenie - ugięcie w przypadku fibrobetonu poddanego udarowi, jak i w zastosowaniu korekty dotyczącej bezwładności, jest trudno zdefiniować ilościowo krzywą, co ułatwiłoby jej wykorzystanie do projektowania konstrukcji. Jest przypuszczalnie lepiej zarejestrować resztkową nośność próbki (lub elementu konstrukcyjnego) przy różnych ugięciach, które odpowiadają szczególnym warunkom eksploatacyjnym. W przypadku próbek, które nie uległy całkowitemu zniszczeniu pod uderzeniami, może być także pożyteczne oznaczenie resztkowej wytrzymałości pod statycznym obciążeniem (18) jako miarę uszkodzenia. Badania masą udarową i wybuchami trudniej jest interpretować jako wytrzymałość próbki, niż w badaniach ze spadającym ciężarem lub za pomocą pręta Hopkinsona. W przypadku takich badań, pewne umowne miary uszkodzeń mogą być niezbędne, lecz to znowu pokazuje trudności w porównywaniu wyników, otrzymanych za pomocą różnych układów pomiarowych.

5.2. Energia pęknięcia

Poza szczytowym obciążeniem także energia pęknięcia jest często mierzona w próbach udarności. Najczęściej przyjmuje się, że jest to powierzchnia pod całą krzywą obciążenie - ugięcie lub pod tą krzywą do pewnego określonego ugięcia. Niestety, jak to wspomniano powyżej, energia pęknięcia lub odporność wyznaczone w ten sposób silnie zależą od masy i szybkości młota udarowego (lub masy udarowej) i od względnych mas elementu próbnego i młota udarowego. Nie ma więc obecnie możliwości porównywania różnych badań.

Prób zastosowania standardowych metod mechaniki pęknięcia do badania udarności (np. 13, 15) było niewiele. Jednak, ze względu

5.1. Peak load (or stress)

Most impact tests include some measure of the peak load or maximum stress that the specimen can withstand. (It should be noted that, because of inertial effects, the determination of the peak load may not be at all straightforward). While this is often useful information, for FRC it is the post-peak behaviour that is most important. However, apart from the experimental difficulties both in determining the complete load vs. deflection curve for FRC under impact and in applying the inertial corrections, it is difficult to quantify the curve for easy use in structural design. It is probably more useful to record the residual load-bearing capacity of the specimen (or structural member) at different deflections which reflect the particular service conditions. For specimens that do not fail completely under a particular impact event, it may also be useful to determine the residual strength of the specimen under static loading (18) as a measure of the damage.

Projectile impact tests and blast tests are more difficult to interpret than drop-weight or Split Hopkinson Pressure Bar tests in terms of specimen strength. For these test, some arbitrary measure of damage may be necessary, but this again shows up the difficulties in comparing the results obtained from different test arrangements.

5.2. Fracture energy

In addition to the peak load, the fracture energy is also very commonly measured in impact tests. Most commonly, this is taken as the area either under the complete load vs. deflection curve, or under this curve out to some particular deflection. Unfortunately, as indicated above, the fracture energy (or toughness) determined in this way depends strongly upon the mass and velocity of the impact hammer (or projectile), and upon the relative masses of the specimen and the impact hammer. It is thus essentially impossible at the present time to compare different tests.

There have been a few attempts to carry out standard fracture mechanics tests under impact (e.g. 13, 15). However, for all of the same reasons, these values too depend on the details of the experimental conditions, and thus are not really comparable.

5.3. Crack velocity

There have been a few attempts to measure crack velocities in both plain and fibre reinforced concretes under impact loading by using high speed photography (e.g. 14, 19-21). While such measurements provide invaluable information regarding the nature of the fracture in FRC, and may be used to compare qualitatively the effectiveness of different fibre types, they do not provide any useful design information. Needless to say, such measurements are also highly machine/specimen dependent.

5.4. Degree of damage or fragmentation

The degree of damage, or the amount of fragmentation, are generally more qualitative measures of fibre effectiveness. These rather subjective measures may provide comparisons amongst dif-

na te same powody, wyniki zależą także od określonych warunków doświadczalnych i z tego powodu nie są w istocie porównywalne.

5.3. Prędkość pękania

Mało było podejmowanych prób zmierzenia prędkości pękania tak w przypadku betonu niezbrojonego jak i zbrojonego włóknami, poddanego obciążeniu udarowemu przy wykorzystaniu szybkiej fotografii (np. 14, 19-21). Aczkolwiek te pomiary dostarczają wartościowych informacji o rodzaju pęknięć fibrobetonu i można je wykorzystać do jakościowego porównania skuteczności różnych rodzajów włókien, to nie dostarczają użytecznych informacji do projektowania. Nie trzeba przypominać, że pomiary te zależą także w dużym stopniu od stosowanej aparatury i próbek.

5.4. Stopień uszkodzenia lub rozdrobnienia

Stopień uszkodzenia lub wielkość rozdrobnienia są na ogół jedynie jakościową miarą skuteczności włókien. Takie raczej subiektywne miary mogą służyć do porównań między różnymi włóknami, lecz nie dostarczają danych, które mogłyby być wprost wykorzystane w projektowaniu lub analizach.

6. Uwagi podsumowujące

Nie ma wątpliwości, że włókna mogą być niezwykle skuteczne w poprawie wytrzymałości betonu na obciążenie udarowe. Mogą one znacznie zwiększyć odporność betonu i zapewnić przeniesienie obciążenia po przekroczeniu maksimum. W szczególności, zastosowane równocześnie (a nie zamiast) z konwencjonalnym zbrojeniem stalowym mogą polepszyć odporność konstrukcji na obciążenia sejsmiczne, udarowe i wybuchowe. Istnieje wiele dowodów doświadczalnych na poparcie takiego poglądu. Niestety, jesteśmy wciąż daleko od umiejętności racjonalnego wykorzystania właściwości fibrobetonu w projektowaniu konstrukcji, które mogą być narażone na takie rodzaje obciążeń dynamicznych. Jest to spowodowane szeregiem następujących czynników:

1. Jak wykazano powyżej, nie ma zgodności jak zmierzyć lub scharakteryzować odporność fibrobetonu na uderzenia.
2. Modele projektowe i obliczeniowe opierające się na wytrzymałości nie mogą prawidłowo uwzględniać głównej właściwości fibrobetonów, mianowicie odporności na pęknięcie.
3. Doświadczalne badanie zachowania się fibrobetonów w przypadku udaru jako materiału i ich reakcję na uderzenia konstrukcji betonowych, tak niezbrojonych jak i zbrojonych włóknami, stawiają zupełnie odmienne wymagania co do skali i złożoności.
4. Badanie udarności może obejmować duży zakres różnych mas i prędkości. W związku z tym, że w wyniku takiego badania mogą powstawać rozmaite obrazy zniszczenia, to często nie jest możliwe znalezienie wzajemnych związków.
5. Cały układ pomiarowy, obejmujący maszynę, podpory próbki i samą próbkę musi być modelowany w przypadku przeprowadzania analizy numerycznej; lecz rzadko się tego dokonuje.

ferent fibres, but do not provide values that can be used directly in design or analysis.

6. Concluding remarks

There is no doubt that fibres can be extremely effective in improving the resistance of concrete to impact loading. They may toughen the concrete considerably, and provide a reliable load-bearing capacity beyond the peak load. In particular, when used in conjunction with (and not instead of) conventional steel reinforcement, they can improve structural resistance to seismic, impact or blast loading. There is a great deal of empirical evidence to support these views.

Unfortunately, we are still far from being able to use the properties of FRC rationally in the design of structures that may be subjected to these types of dynamic loading. There are a number of reasons for this:

1. As shown above, there is no agreement on how to measure or characterize the impact resistance of FRC.
2. Strength-based design codes and analytical procedures cannot properly take into account the chief characteristic of FRC, namely its toughness.
3. Experimental studies into the impact behaviour of FRC as materials and the impact response of concrete structures containing both conventional steel reinforcement and fibres have quite different requirements, in scale and in complexity.
4. Impact events may cover a very wide range of masses and velocities. Since these events may result in different failure modes, it is often not possible to relate them to each other.
5. The entire experimental system, including the testing machine, the specimen supports and the specimen itself must be modeled when carrying out numerical analysis, but this is rarely done.
6. The response of the data acquisition system itself may influence the results which are obtained.
7. At the moment, there is rather poor correlation between the existing numerical models and the available experimental studies.

Clearly, there is a great potential for a true partnership between the people carrying out numerical studies, and those carrying out experimental studies. At the moment, the modelers and the experimentalists appear to exist as two "solitudes". Only when they begin to work together will we be able to exploit the use of FRC in the design and construction of structures better able to resist blast and impact loading.

6. Zachowanie się układu rejestrującego pomiary może samo wpływać na otrzymywane wyniki.
7. Trzeba stwierdzić, że obecnie jest raczej zła korelacja istniejących modeli numerycznych oraz dostępnych danych doświadczalnych.

Istnieje wielkie zapotrzebowanie na prawdziwą współpracę ludzi prowadzących studia numeryczne, z tymi którzy prowadzą badania doświadczalne. Obecnie, opracowujący modele i eksperymetatorzy wydają się działać jak "samotnicy". Jedynie wówczas, gdy zaczną oni pracować razem, będziemy mogli wykorzystać fibrobeton w projektowaniu konstrukcji o lepszej odporności na obciążenia wybuchami i uderzeniami.

Literatura / References

1. N. Banthia, C. Chokri, Y. Ohama, and S. Mindess, Fiber reinforced cement-based composites under tensile impact. *Advanced Cement-Based Materials* 1 (3), 131-141, (1994).
2. A. E. Naaman, and V. S. Gopalaratnam, Impact properties of steel fiber reinforced concrete in bending. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*. 5 (40), 225-233, (1983).
3. C. Yan, and S. Mindess, Bond between concrete and steel reinforcing bars under impact loading. In A.M. Brandt and I.H. Marshall (eds.), *Brittle Matrix Composites 3*, Elsevier Applied Science, pp. 184-192, 1991.
4. C. Yan, and S. Mindess, Bond between epoxy coated reinforcing bars and concrete under impact loading. *Canadian Journal of Civil Engineering* 21 (1), 89-100, (1994).
5. P. Sukontasukkul, *Impact Behaviour of Concrete under Multiaxial Loading*. Ph. D. Thesis, University of British Columbia, Vancouver, Canada, 2001.
6. P. Sukontasukkul, S. Mindess, N. Banthia, and T. Mikami, Impact resistance of laterally confined fibre reinforced concrete plates. *Materials and Structures (RILEM)* 34, 612-618, 2001.
7. T. Krauthammer, A. Jenssen, and M. Langseth, (eds.), *Precision Testing in Support of Computer Code Validation and Verification*, Workshop Report, Norwegian Defence Construction Service, Fortifikatorisk Notat Nr 234/96, (1996).
8. D. Z. Yankelevsky, and Y. Sofrin, (eds.), *Specialty Symposium on Structures Response to Blast and Impact*, Proceedings, Technion, Israel Institute of Technology, Haifa, Israel, 1996.
9. M. Langseth, and T. Krauthammer, (eds.), *Transient Loading and Response of Structures*, Proceedings of an International Symposium Honouring Mr. Arnfinn Jensen, Norwegian Defence Construction Service, Fortifikatorisk Notat Nr 257/98, (1998).
10. N. Jones, and S. Mindess, Experience and capabilities in precision impact testing, pp. 35-51 in Ref. 7, (1996).
11. P. H. Bischoff, Role of physical testing in impact analysis of concrete structures. pp. 241-259 in W. Bounds (ed.), *Concrete and Blast Effects*, ACI SP-175, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, (1998).
12. E. P. Chen, and G. C. Sih, Transient response of cracks to impact loads. pp. 1-58 in *Mechanics of Fracture, Vol. 4: Elasto-dynamic Crack Problems*, Noordhoff, Groningen, The Netherlands, 1997.
13. V. S. Gopalaratnam, S. P. Shah, and R. John, A modified instrumented Charpy test for cement based composites. *Experimental Mechanics*, Vol. 24, No. 2, pp. 102-111, 1984.
14. S. Mindess, Crack velocities in concrete subjected to impact loading. *Canadian Journal of Physics*, Vol. 73, pp. 310-314, (1995).
15. V. S. Bindiganavile, *Dynamic Fracture Toughness of Fiber Reinforced Concrete*. Ph.D. Thesis, University of British Columbia, Vancouver, Canada, 2003.
16. T. Krauthammer, and M. M. Elfahal, *Size Effect in Normal and High Strength Concrete Cylinders Subjected to Static and Dynamic Axial Compressive Loads*. Protective Technology Center, The Pennsylvania State university, PTC-TR-003-2002, 2002.
17. P. Sukontasukkul, *Impact Behaviour of Concrete under Multiaxial Loading*. Ph.D. Thesis, University of British Columbia, Vancouver, Canada, 2001.
18. S. Mindess, and K. -A. Rieder, Fracture behavior of biaxially confined concrete due to impact loading. pp. 151 -160 in Ref. 9, (1998).
19. S. Mindess, and A. Bentur, A preliminary study of the fracture of concrete beams under impact loading using high speed photography. *Cement and Concrete Research*, Vol. 15, No. 3, pp.474-484. (1985).
20. S. Mindess, N. Banthia, J. P. Skalny, and A. Ritter, (1986). Crack development in cementitious materials under impact loading. pp. 217-224 in *Materials Research Society Symposia, Vol. 64, Cement-Based Composites: Strain Rate Effects on Fracture*, Materials Research Society, Pittsburgh, (1986).
21. N. P. Banthia, *Impact Resistance of Concrete*. Ph.D. Thesis, University of British Columbia, Vancouver, Canada, 1987.