

# **Badanie cech reologicznych zginanych elementów żelbetowych modyfikowanych włóknami stalowymi**

TESTING OF RHEOLOGICAL PROPERTIES OF STEEL FIBRE REINORCED  
CONCRETE BEAMS

## **Streszczenie**

W pracy poruszono problem odkształcalności żelbetowych belek dodatkowo zbrojonych zbrojeniem rozproszonym w postaci włókien stalowych. Scharakteryzowano czynniki, w tym reologiczne, wpływające na ugięcia belek fibrobetonowych i żelbetowych. Opisano badania ugięć, długotrwałych i doraźnych, belek fibrobetonowych i żelbetowych prowadzone w Instytucie Budownictwa Politechniki Wrocławskiej. Wyniki badań przedstawiono dla belek pracujących w fazie I (niezarysowanej).

## **Abstract**

The problem of deformability of reinforced concrete constructions has been introduced in this paper. Key factors, also the rheological properties, which are connected with deflection of reinforced concrete beams and steel fiber-reinforced concrete beams have been characterized. Investigations of long-term deflections and short-term deflections of reinforced concrete beams and steel fiber-reinforced concrete beams which have taken place in Department of Civil Engineering of Wrocław University of Technology have been characterized. Results of the investigation for the beams working in the first phase have been presented.



## 1. Wstęp

Jednym z czynników decydujących o przydatności użytkowej konstrukcji żelbetowej jest jej odkształcalność. Stosowane obecnie zalecenia odnośnie do wymiarowania konstrukcji metodą stanów granicznych oraz coraz powszechniejsze stosowanie betonów wysoko i bardzo wysoko wartościowych z dodatkiem zbrojenia rozproszonego powodują, że nowo wznoszone konstrukcje żelbetowe charakteryzują się większą rozpiętością przęsł oraz mniejszą wysokością przekroju poprzecznego elementu. W konsekwencji decydującym kryterium w projektowaniu staje się stan graniczny użyteczności. Z tego powodu, rozpoczęte niemal od początku stosowania żelbetu, badania odkształcalności elementów żelbetowych oraz czynników na nie wpływających, prowadzone są do dzisiaj, a w ostatnich latach także w odniesieniu do elementów fibrobetonowych (żelbetowych modyfikowanych włóknami do umacniania betonu w formie zbrojenia rozproszonego).

Mówiąc o odkształcalności w przypadku belek, mamy na myśli ich ugięcia: doraźne (występujące zaraz po obciążeniu elementu) i długotrwałe (występujące po pewnym czasie), z którymi wiążą się pojęcia sztywności giętej odpowiednio: doraźnej i długotrwałej. Przyrost ugięć belek żelbetowych i fibrobetonowych w czasie wynika z faktu, że beton jest materiałem mocno podatnym na odkształcenia reologiczne. Decyduje o tym przede wszystkim charakterystyczna dla betonu cecha – pełzanie, czyli wzrost wartości odkształceń w czasie przy stałym obciążeniu. Jednak problem ugięć belek żelbetowych czy fibrobetonowych jest o wiele bardziej złożony, a sama wartość ugięć doraźnych i długotrwałych zależy nie tylko od wartości pełzania (choć w dużej mierze właśnie od niej), ale również od wielu innych, niżej scharakteryzowanych, czynników.

W przypadku elementów żelbetowych (bez włókien) problem opisu ugięć doraźnych i długotrwałych jest praktycznie rozwiązany, chociaż nadal prowadzone są badania mające na celu uściślenie bądź udoskonalenie istniejących teorii, w których stosuje się różne modele opisujące rozkład sztywności na długości zginanych elementów uwzględniające zjawisko zarysowania [1]. Można tu wymienić m. in.:

- koncepcję stałej sztywności na długości elementu opracowaną m.in. przez Murszowa i Bransona, na której opierają się zalecenia norm: PN-B-03264:2002, ACI i EC2,
- koncepcję kontynuualnej zmiany sztywności opracowaną przez Kuczyńskiego,
- koncepcję skokowej zmiany sztywności opracowaną przez Ryżyńskiego,
- koncepcję falowego rozkładu sztywności Szechińskiego.

Natomiast w przypadku elementów fibrobetonowych brakuje wystarczającej liczby wyników badań pozwalających na stworzenie modelu opisującego przyrost wartości ugięć belek w czasie. Ponadto istniejące propozycje różnych autorów i instytucji odnośnie do szacowania wartości ugięć nie uwzględniają wszystkich czynników wpływających na ugięcia – m.in. losowości rozmieszczenia włókien na długości elementu. Problemem tym zajmowali się ostatnio Lappa, Braam i Walraven [4], którzy wprowadzili pojęcie tzw. głównej liczby orientacji włókien i liczby włókien w analizowanym przekroju. Jednak proponowany w pracy [4] sposób określania rozkładu włókien wymaga potwierdzenia na większej liczbie elementów. Autorzy podjęli również w swoich badaniach problem losowości rozmieszczenia włókien, tworząc symulacyjny model rozkładu włókien na długości elementu belkowego. Model ten został zweryfikowany doświadczalnie na ponad stu belkach fibrobetonowych o wymiarach 150x150x600 mm.

Innym czynnikiem wpływającym na wartość sztywności belek fibrobetonowych, a co za tym idzie, na wartość ugięć, jest zarysowanie. Prowadzone w tej dziedzinie badania

wskazują na to, że proces powstawania i propagacji rys w elementach fibrobetonowych różni się pod względem jakościowym i ilościowym od elementów żelbetowych [5], [6]. W elementach fibrobetonowych, dla obciążenia mniejszego od niszczącego, występuje zjawisko tzw. rozszczepienia rys – powstaje gęsta siatka mikrorys o szerokości rozwarcia każdej rysy zdecydowanie mniejszej w porównaniu z tradycyjnymi elementami żelbetowymi. Jednak wpływ zarysowania elementów fibrobetonowych na ich sztywność giętą nie jest jeszcze w pełni rozpoznany [7].

Mając na względzie wszystkie wyżej opisane czynniki, autorzy rozpoczęli wstępne badania ugięć belek fibrobetonowych, prowadzone w Akredytowanym Laboratorium Badawczym Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej z nadzieją na to, że uzyskane wyniki badań przyczynią się do szybkiego opracowania wytycznych do obliczania ugięć doraźnych i długotrwałych belek żelbetowych modyfikowanych włóknami stalowymi do umacniania betonu oraz, że elementy takie znajdą powszechne zastosowanie w konstrukcjach inżynierskich.

## 2. Opis badań

### 2.1. Zakres badań

Program badań obejmował pomiar ugięć doraźnych i długotrwałych 4 serii belek, z czego 3 serie to belki żelbetowe modyfikowane haczykowymi włóknami stalowymi o średnicy 0,8 mm i długości 50 mm. Serie te różniły się między sobą zawartością włókien w jednostce objętości mieszanki betonowej, która wynosiła:

- seria A – 25 kg/m<sup>3</sup>,
- seria B – 35 kg/m<sup>3</sup>,
- seria C – 50 kg/m<sup>3</sup>.

Natomiast jedna seria – seria D była serią kontrolną (bez dodatku włókien). Każda seria obejmowała 3 elementy, z których 2 pracowały w fazie II (zarysowanej), zaś 1 w fazie I (niezarysowanej). Widok stanowiska badawczego dla belek pracujących w fazie I przedstawiono fot. 1. Ugięcia belek mierzone były w środku rozpiętości przęsła oraz pod siłami skupionymi za pomocą czujników zegarowych. Ponadto pomierzono kąty obrotu na podporach. Dla każdej belki dodatkowo wykonano pomiary odkształceń betonu w strefie ściskanej i stali rozciąganej (na wszystkich prętach) w tych samych miejscach, w których mierzono ugięcia. Pomiary odkształceń wykonywano za pomocą tensometrów i kontrolnie za pomocą czujników zegarowych na bazie długości 250 mm.

Dodatkowo dla każdej serii wykonano oznaczenia następujących cech otrzymanego kompozytu:

- wytrzymałość na ściskanie – na próbkach o wymiarach 150x150x150 mm,
- wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu na próbkach o wymiarach 150x150x150 mm,
- wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu – na próbkach o wymiarach 150x150x700mm,
- współczynnik sprężystości podłużnej – na próbkach walcowych o średnicy 113 mm i wysokości 350 mm,
- skurcz – na próbkach walcowych o średnicy 113 mm i wysokości 350 mm,
- pełzanie – na próbkach walcowych o średnicy 113 mm i wysokości 350 mm – oznaczenie pełzania odbywa się w pełzarkach sprężynowych (fot. 2).



Fot. 1. Belki A1 i D1 podczas badań – faza I

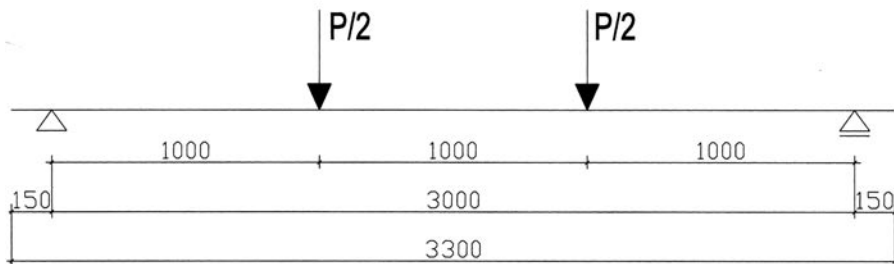


Fot. 2. Pezarki sprężynowe – oznaczanie pezania

Badania wykonywane są dwuetapowo. Etap I (obecnie realizowany) obejmuje serie A i D, zaś etap II serie B i C.

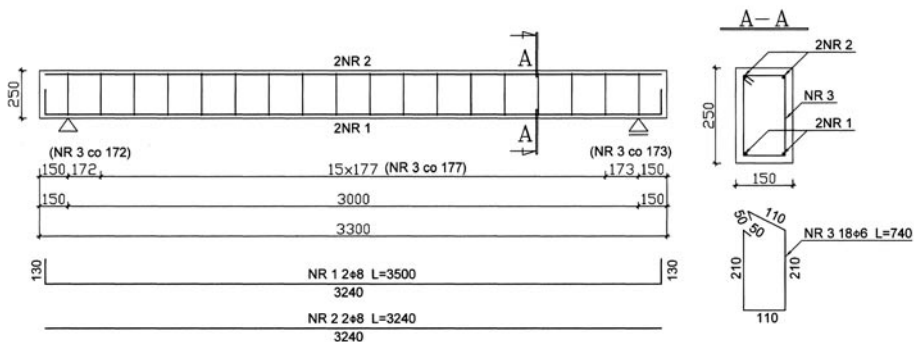
## 2.2. Charakterystyka badanych belek

Wszystkie badane belki miały przekrój 150x250 mm i długość 3300 mm. Rozpiętość w osiach podpór wynosiła 3000 mm. Schemat statyczny belek przedstawiono rys. na 3.



Rys. 3. Schemat statyczny belek

Zbrojenie podłużne belek stanowiły pręty ze stali żebrowanej klasy A-II ( $\varnothing 8$  mm), zaś zbrojenie poprzeczne strzemiona dwuramienna  $\varnothing 6$  mm ze stali A-I (rys. 4). Wszystkie elementy wykonano z betonu klasy B30. Skład wagowy mieszanki betonowej podano w tablicy 1.



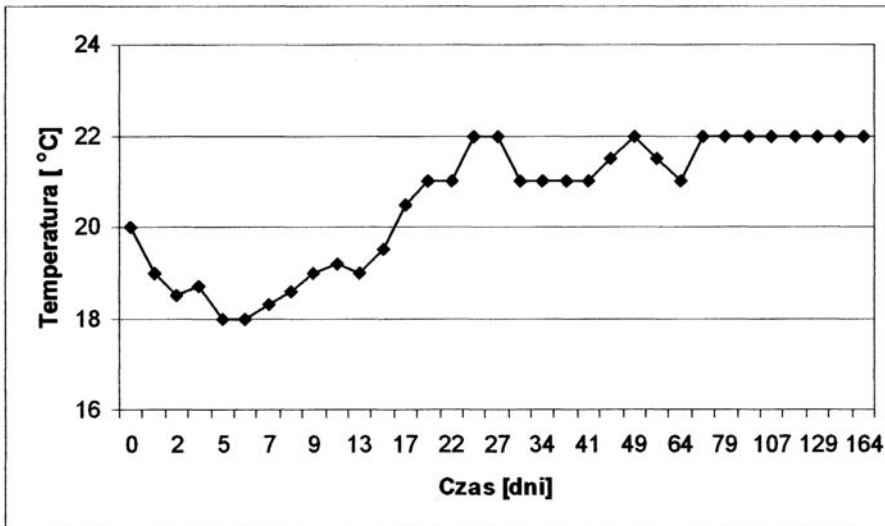
Rys. 4. Zbrojenie belek

Tablica 1. Skład 1 m<sup>3</sup> mieszanki betonowej

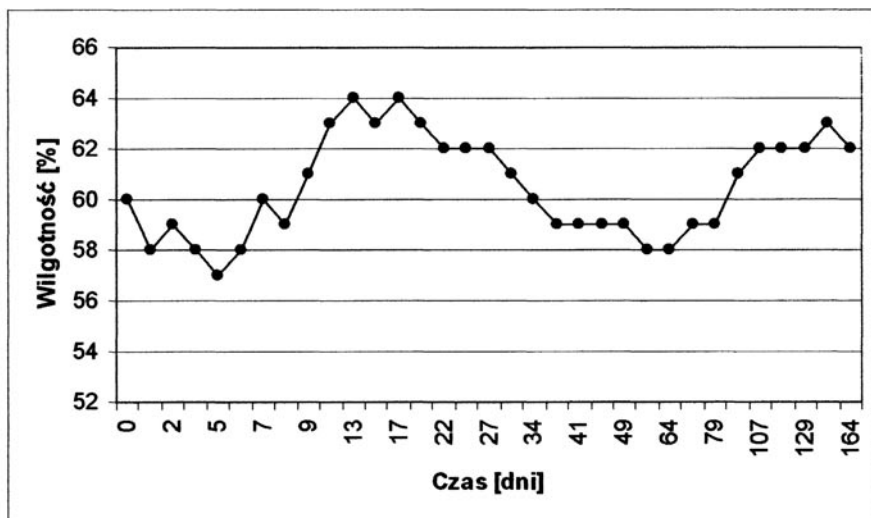
Seria	Włókna stalowe 0,8/50	Piasek 0-2mm	Żwir 2-8mm	Żwir 8-16mm	Superplastyfikator Sikament 400/30	Cement CEM I 32,5	Woda
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]
A	25,00	663,10	568,36	663,08	0,47-2,51	363,00	168,00
B	35,00						
C	50,00						
D	0,00						

### 2.3. Warunki ciepno-wilgotnościowe

Istotnym czynnikiem wpływającym na otrzymywane wyniki cech reologicznych elementów wykonanych z betonu są warunki ciepno-wilgotnościowe. Dlatego przy planowaniu tego typu badań należy zadbać o stałość temperatury i wilgotności powietrza w pomieszczeniu, w którym prowadzone są badania. Wpływ warunków wilgotnościowych środowiska na ugięcia zginanych elementów żelbetowych poruszono w pracy [8]. Dla prowadzonego eksperymentu temperatura powietrza wynosiła 20°C ± 2°C (rys. 6), zaś wilgotność powietrza 60% ± 4% (rys. 6).



Rys. 5. Warunki temperaturowe podczas badań



Rys. 6. Warunki wilgotnościowe podczas badań

### 3. Wyniki badań

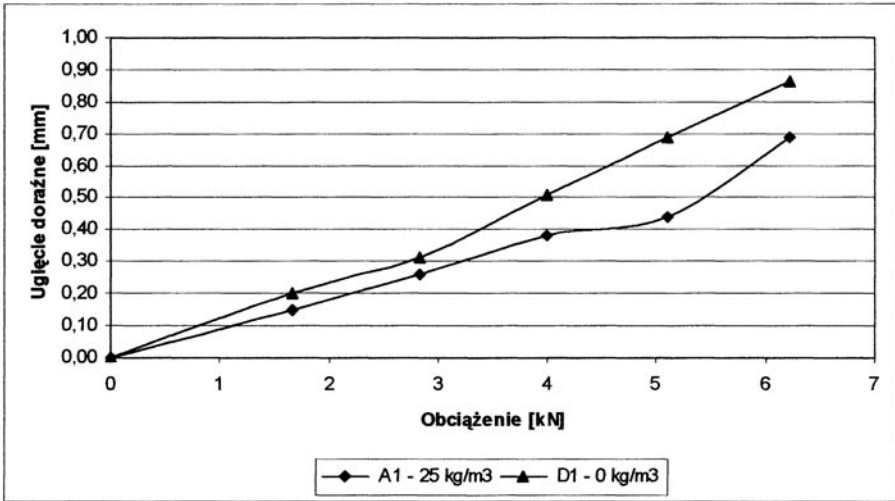
Poniżej przedstawiono wybrane wyniki badań dla belek serii A i D pracujących w fazie niezarysowanej. Ze względu na bardzo obszerne wyniki badań dla każdej serii ich prezentację ograniczono jedynie do ugięć w środku rozpiętości przęsła belek. Na rys. 7 przedstawiono przyrost ugięć doraźnych środkowego przekroju przęsła w funkcji obciążenia, zaś na rys. 8 przyrost ugięć długotrwałych w funkcji czasu przy stałym obciążeniu zewnętrznym  $P = 6,22$  kN. Na rysunku 9 przedstawiono ugięcia całkowite środkowego przekroju przęsła w funkcji czasu. W punkcie 4 oceniono efektywność stosowania włókien w odniesieniu do ugięć belek jako procentową różnicę względną wartości ugięć według wzoru:

$$\Delta u = \frac{u_{if} - u_{iz}}{u_{iz}} \times 100\%$$

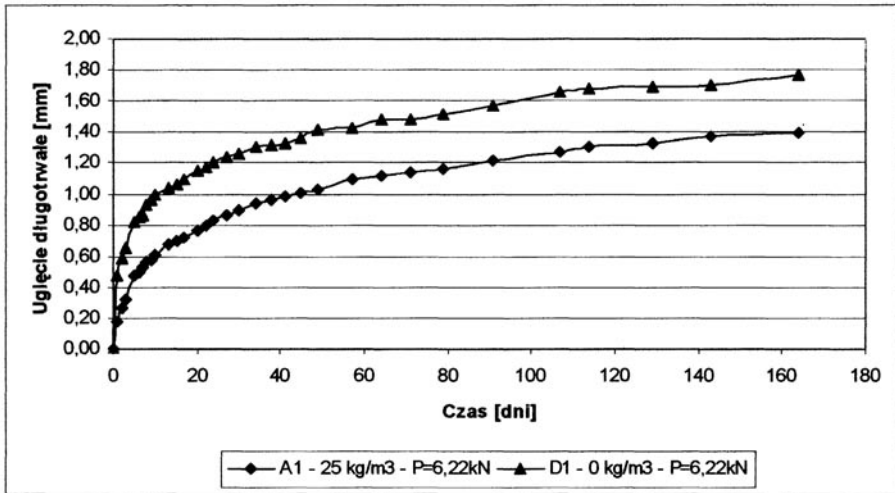
gdzie:

- $u_{if}$  – ugięcie doraźne, długotrwałe lub całkowite środka przęsła belki fibrobetonowej,
- $u_{iz}$  – ugięcie doraźne, długotrwałe lub całkowite środka przęsła belki żelbetonowej.

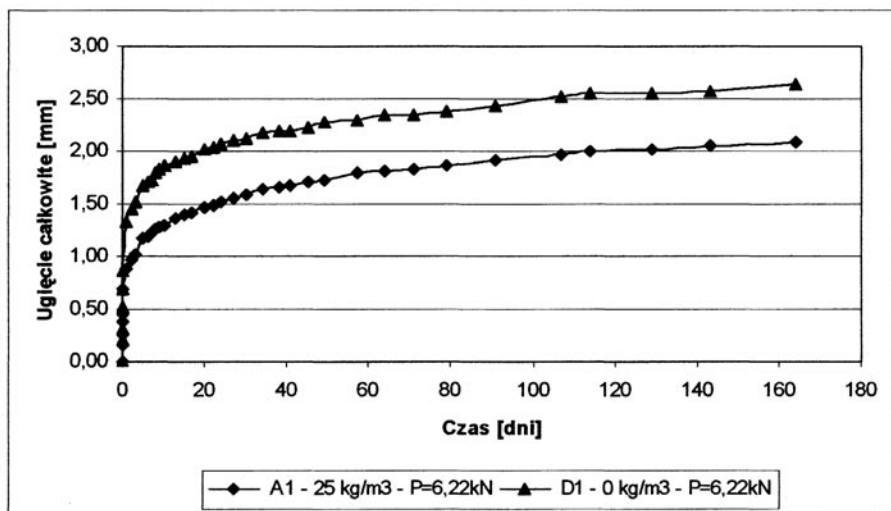




Rys. 7. Przyrost ugięć doraźnych środkowego przekroju przęśła w funkcji obciążenia



Rys. 8. Przyrost ugięć długotrwałych środkowego przekroju przęśła w funkcji czasu



Rys. 9. Ugięcia całkowite środkowego przekroju przęsła w funkcji czasu

## 4. Podsumowanie

Ugięcia doraźne dla założonego w eksperymencie poziomu obciążenia wyniosły dla belki żelbetowej 0,865 mm, a dla belki fibrobetonowej 0,695 mm. Ugięcia doraźne belki żelbetowej modyfikowanej włóknami stalowymi mierzone w środku rozpiętości przęsła były zatem mniejsze w porównaniu z ugięciami belki żelbetowej bez włókien. Różnica wartości ugięć wzrasta wraz ze wzrostem obciążenia i dla obciążenia  $P = 6,22$  kN (faza I) wynosi blisko 20% (19,65%), co wynika z porównania zależności przedstawionych na rys. 7.

Ugięcia długotrwałe belki fibrobetonowej po 164 dniach od momentu obciążenia były mniejsze o 21,19% w porównaniu z ugięciami belki żelbetowej. Przez 164 dni dla poziomu obciążenia  $P = 6,22$  kN ugięcia belki żelbetowej zwiększyły się o 1,770 mm, podczas gdy belki fibrobetonowej o 1,395 mm.

W efekcie ugięcia sumaryczne (całkowite) belki fibrobetonowej były również mniejsze w porównaniu z ugięciami belki żelbetowej, ponieważ są one sumą ugięć doraźnych i długotrwałych. Ugięcie całkowite po 164 dniach od obciążenia wyniosło: dla belki żelbetowej 2,635 mm, a dla belki fibrobetonowej 2,090 mm.

Na podstawie obserwacji ugięć belek fibrobetonowych i żelbetowych można zaryzykować stwierdzenie, że obecność włókien stalowych wpływa na redukcję wartości ugięć długotrwałych belek pracujących w fazie I. Jednak stwierdzenie to nie ma charakteru ogólnego i konieczne jest prowadzenie dalszych badań potwierdzających tak postawioną tezę.

## Literatura

- [1] M. Szechiński, Deformacje zginanych elementów żelbetowych obciążonych długotrwałe. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1996.
- [2] M. Kamiński, M. Szechiński, A. Ubysz, Teoretyczne i praktyczne podstawy obliczania ugięć elementów

- żelbetowych. Dolnośląskie Wydawnictwo Naukowe 1998.
- [3] M. Szechiński, Ugięcia długotrwanie obciążonych belek żelbetowych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2000.
  - [4] E.S.Lappa, C.R. Braam, J.C. Walraven, Static and fatigue bending tests of UHPC, International Symposium on Ultra High Performance Concrete September 13-15, 2004.
  - [5] J. Jungwirth, A. Muttoni, Structural behaviour of tension members in UHPC, International Symposium on Ultra High Performance Concrete September 13-15, 2004.
  - [6] I. Kovacs, G. L. Balazs, Structural behaviour of steel fibre reinforced concrete, Structural Concrete Journal of the fib, 06-2003.
  - [7] T. Leutbecher, E. Fehling, Structural Behavior of UHPC under Tensile Stress and Biaxial Loading, International Symposium on Ultra High Performance Concrete September 13-15, 2004.
  - [8] J. Bogucka, A. Uryzaj, Wpływ warunków wilgotnościowych środowiska na ugięcia zginanych elementów betonowych zbrojonych podłużnie, Inżynieria i Budownictwo nr 5/2004.