

Wojciech PAWLAK^{*}
Politechnika Wrocławska

DOŚWIADCZALNE BADANIA BELEK ŻELBETOWYCH PODDANYCH SKRĘCANIU

Streszczenie. W artykule opisano przebieg doświadczalnych badań żelbetowych belek poddanych skręcaniu. Badane elementy miały różny kształt przekroju poprzecznego: prostokątny (belka BP-T) i kątownikowy (belka BK-T). Badania prowadzono dla przypadku czystego skręcania. Doświadczenie miało na celu rozpoznanie zachowania się elementów poddanych skręcaniu o innym kształcie przekroju poprzecznego niż prostokątny.

W rezultacie przeprowadzonych badań uzyskano następujące wyniki: element kątownikowy (BK-T) zarysował się przy nieznacznie mniejszym obciążeniu niż belka o przekroju prostokątnym (BP-T). Element kątownikowy, w późniejszej fazie obciążenia, uzyskał zarówno większą nośność, jak i większą sztywność na skręcanie.

EXPERIMENTAL RESEARCH ON REINFORCED CONCRETE BEAMS UNDER TORSION

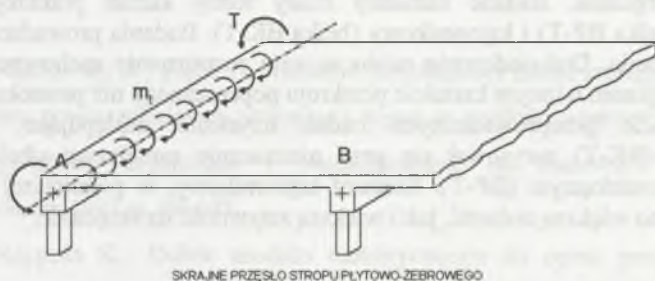
Summary. The paper presents results of experimental testing of rectangular (BP-T) and L-shaped (BK-T) beams subjected to pure torsion. The studies were conducted in the Laboratory of Institute of Building Engineering Wrocław University of Technology. The experiment had shown that L-shaped element cracked under slightly lower load than the rectangular beam. L-shaped element has bigger strength and rigidity while subjected to torsion in later stages of loading.

1. Wprowadzenie w tematykę

Moment skręcający pojawia się zawsze wtedy, gdy wypadkowa siły działa na mimośrodku względem osi podłużnej elementu. Wbrew pozorom sytuacja taka występuje dość często, choć w zdecydowanej większości przypadków wartość tego momentu

^{*} Opiekun naukowy: Prof. dr hab. inż. Mieczysław Kamiński.

skręcającego jest niewielka, niedecydująca o stanie granicznym nośności. Najczęściej skręcanie występuje łącznie z działaniem momentu zginającego i siły tnącej. Obciążenie elementu samym momentem skręcającym (tzw. czyste skręcanie) jest w budownictwie przypadkiem czysto teoretycznym, jednak w badaniach doświadczalnych i pracach teoretycznych autorzy często się nimi zajmują. Ma to swoje uzasadnienie – po pierwsze, pozwala na rozpoznanie samego zjawiska skręcania w elementach żelbetowych, po drugie, stanowi wyjście do bardziej złożonego przypadku obciążenia: momentem skręcającym, momentem zginającym i siłą tnącą. Częstymi przykładami elementów żelbetowych, które są obciążone momentem skręcającym są: skrajne belki stropów, wieńce mocujące płyty balkonowe, ramy przestrzenne, schody spiralne, żelbetowe łuki, obciążone prostopadle do swojej płaszczyzny (rys. 1).



Rys. 1. Przykład elementu skręcanego

Fig. 1. Example of element subjected to torsion

Zjawisko skręcania elementów żelbetowych jest słabiej rozpoznany schematem obciążenia tych elementów niż np. ściskanie, zginanie i ścinanie. Jednym z powodów, który wpływa na to, że prace doświadczalne, opisujące skręcanie są nieliczne jest złożoność takich badań. Elementy poddane obciążeniu skręcającemu pracują w przestrzennym stanie naprężeń i odkształceń. Badania eksperymentalne elementów żelbetowych poddanych skręcaniu prowadzone są zwykle na elementach w skali naturalnej lub zbliżonej do niej, a prawidłowe przeprowadzenie tych badań jest możliwe w stanowiskach badawczych, przygotowanych specjalnie do tego celu. Z tych względów oraz z powodu wysokich kosztów przeprowadzenie badań możliwe było tylko w wyspecjalizowanych ośrodkach na świecie, m.in. takich jak: University of Houston (USA), University of Toronto (Kanada), Chalmers University of Technology w Goteborgu (Szwecja), NIIŻB w Moskwie (były ZSRR) i ETH w Zürichu (Szwajcaria) [1].

Jedną z niewyjaśnionych spraw jest opis zachowania się żelbetowych elementów o przekrojach innych niż prostokątny i kołowy. Autor postanowił zająć się badaniem żelbetowych belek o kątownikowym kształcie przekroju poprzecznego (w kształcie litery L).

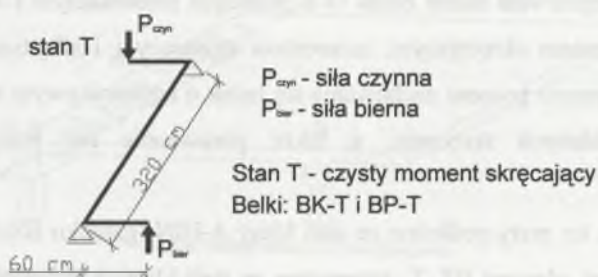
Teza wyjściowa do badań to: większa nośność i sztywność elementu kąтового (BK-T). Przykłady takich elementów to m.in.: skrajne belki stropów, belki podtrzymujące balkony.

2. Program badań

Program badań podzielono na dwa oddzielne etapy. W pierwszej części zbadano dwie belki obciążone samym momentem skręcającym. Jedna o przekroju prostokątnym (BP-T), wymiary przęsła 20x30 cm (bxh), druga o przekroju kątownikowym (BK-T), wymiary przęsła: środnik 18x25 cm, półka 15x10 cm. Druga część badań, realizowana obecnie, będzie obejmowała osiem belek (4 o przekroju prostokątnym i 4 kątownikowym), obciążonych momentem skręcającym, momentem zginającym i siłą tnącą. Badania mają pozwolić na rozpoznanie procesu zachowania się belek o kątownikowym kształcie przekroju poprzecznego poddanych skręcaniu, a także porównanie ich pracy z elementami prostokątnymi.

Zbrojenie belek to: pręty podłużne ze stali klasy A-IIIIN (gatunku BSt500S) #16 – 6 szt. element BP-T, 8 szt. element BK-T; strzemiona ze stali klasy A-II (gatunku 18G2-b) #8 – w rozstawie co 125 mm. Beton do wykonania elementów zamówiono w wytwórni betonu towarowego (beton B25 o konsystencji S2 wg PN-EN 206-1). Poza zabetonowaniem elementów wykonano również próbki do zbadania cech wytrzymałościowych betonu (10 próbek sześciennych o boku 150 mm – do badania wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie; 9 próbek walcowych o średnicy 113 mm i wysokości 350 mm – do badania modułu sprężystości podłużnej betonu i współczynnika Poissona). Otulina wkładek zbrojeniowych wynosiła 20 mm. Do realizacji elementów uprzednio wykonano formę rozbieralną wielokrotnego użycia z płyt szalunkowych wodoodpornych OSB Special gr. 21 mm, skręcaną na śruby. Mieszanka betonowa, układana w formie, zagęszczana była wibratorem wgłębnym buławowym. Próbki do badań cech betonu zagęszczano na stole wibracyjnym. Zarówno te elementy, jak i próbki pielęgnowane były przez 7 dni od zabetonowania. Belki badane były na specjalnie do tego celu przygotowanym stanowisku. Umożliwiło to obciążenie elementów tylko momentem skręcającym (1. część badań - opisana w artykule), natomiast obciążenie momentem skręcającym, zginającym i siłą poprzeczną (2. część badań). Schemat obciążenia przedstawiono na rys. 2.

Moment skręcający wywołany był przez przyłożenie siły skupionej do żelbetowych wsporników belek na mimośrodku 60 cm względem osi podłużnej przęsla elementu. Przeciwległy wspornik belki zamocowany był sztywno w tej samej odległości od osi podłużnej elementu. Schemat przykładania obciążenia wyglądał następująco: elementy obciążano w sposób statyczny, obciążenie przyrastało co 2,0 kN (w pierwszej serii obciążania i odciążania co 1,0 kN) do ok. 60% obciążenia niszczonego $P_u=0,6P_N$ (obliczono $P_N\approx 30$ kN, stąd $P_u\approx 18$ kN), następnie odciążane (z tym samym krokiem). Proces obciążanie-odciążanie powtarzano 6 razy. Następnie badany element obciążano aż do zniszczenia z przyrostem obciążenia równym 1,0 kN. Czas przyrostu obciążenia wynosił 1 minutę, a czas utrzymywania obciążenia na danym poziomie wynosił 3 min. Obciążenie realizowano siłownikami INSTRON.



Rys. 2. Schemat obciążenia elementów

Fig. 2. Loading elements scheme

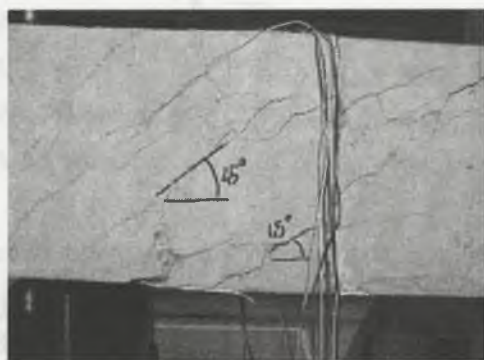
Na każdym poziomie obciążenia dokonywano następujących pomiarów:

- jednostkowy kąt skręcenia elementu (pary czujników indukcyjnych),
- odkształcenia jednostkowe zbrojenia podłużnego (tensometry elektrooporowe),
- odkształcenia jednostkowe zbrojenia poprzecznego (tensometry elektrooporowe),
- odkształcenia jednostkowe powierzchni betonu (tensometry elektrooporowe),
- szerokość rozwarcia rys, zakres ich występowania, kąt pochylenia względem osi podłużnej elementu oraz odległości pomiędzy nimi (lunetka optyczna o powiększeniu $\times 24$, taśma miernicza, kątomierz), wraz z ich propagacją na kolejnych poziomach obciążenia; należy także zaobserwować moment pojawienia się rys – siłę rysującą P_f .

Tensometry elektrooporowe na powierzchni betonu rozmieszczono na wszystkich ściankach w postaci rozet prostokątnych skrzyżowanych [2]. Umieszczono je zarówno w środku przęsla belki, jak i w strefie przypodporowej. Tensometry elektrooporowe do pomiaru odkształceń stali zbrojeniowej rozmieszczono na wszystkich prętach podłużnych, a także na wszystkich ramionach strzemion, w miejscach naklejenia rozet tensometrycznych na betonie. Czujniki indukcyjne do pomiaru jednostkowego kąta skręcenia rozstawiono

równomiernie w pięciu przekrojach po długości przęsła, parami po dwa czujniki w każdym przekroju. Każda para czujników rozstawiona była po obu stronach belki, na odcinku pomiarowym równym 250 mm. Zapisu wartości wielkości mierzonych za pomocą tensometrów elektrooporowych (na powierzchni betonu i na prętach zbrojeniowych) oraz czujników indukcyjnych dokonywano za pomocą komputera z wielokanałowym systemem pomiarowym UPM100 firmy Hottinger Baldwin Messtechnik.

Elementy zniszczyły się przez powstanie rys ukośnych (pod kątem ok. 45°) w pobliżu podpory elementu (rys. 3). Zniszczeniom towarzyszyły znaczne wartości kątów obrotu elementów.



Rys. 3. Obraz zniszczenia elementu BK-T
Fig. 3. Image of element failure (beam BK-T)

3. Wyniki badań

Cechy wytrzymałościowe betonu (tab. 1) oraz stali zbrojeniowej (tab. 2) zbadano w dniu realizacji badań doświadczalnych elementów.

Tabela 1

CECHY BETONU				
Wiek betonu	Wytrzymałość na ściskanie	Wytrzymałość na rozciąganie	Moduł sprężystości	Współczynnik Poissona
[dni]	f_c [MPa]	f_{ct} [MPa]	E_c [GPa]	ν_c [-]
54	27,1	2,77	26,4	0,19

Tabela 2

CECHY STALI ZBROJENIOWEJ					
#16 (BSI500S)			#8 (18G2-b)		
Granica plastyczności	Wytrzymałość na rozciąganie	Moduł sprężystości	Granica plastyczności	Wytrzymałość na rozciąganie	Moduł sprężystości
f_y	f_t	E_s	f_y	f_t	E_s
[MPa]	[MPa]	[GPa]	[MPa]	[MPa]	[GPa]
576	762	204	435	584	203

Poniżej (rys. 4) przedstawiono zależność: jednostkowy kąt skręcenia – moment skręcający (mierzone w środku rozpiętości przęśła elementu). Z wykresu wynika, że początkowo większą sztywność miał element prostokątny (BP-T), natomiast przy wyższym poziomie obciążenia (tuż przed zniszczeniem) większą sztywność miał element kątownikowy (BK-T).

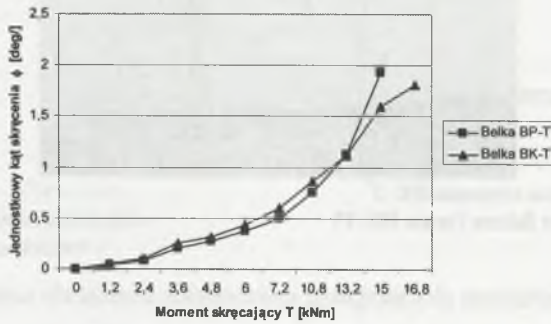
Siła rysująca P_{cr} wyniosła: belka BK-T – 8 kN (co odpowiada $T_{cr}=5$ kNm), belka BP-T – 9 kN ($T_{cr} = 5,4$ kNm). Pochylenie rys wynosiło $40-55^\circ$ (średnio 45°) na obu elementach, rozstaw rys: belka BK-T – 14-22 cm (średnio 18 cm), belka BP-T – 8-22 cm (średnio 15 cm).

Teoretyczny moment rysujący obliczono wg wzoru Hsu i Hwanga [3].

$$T_{cr} = 0,33 \cdot \sqrt{f_{cm}} \cdot \frac{A_c^2}{u_c}, \quad (1)$$

gdzie: f_{cm} – średnia wytrzymałość betonu na ściskanie,

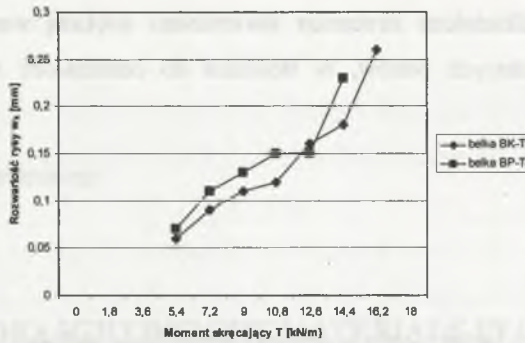
A_c i u_c – odpowiednio pole i obwód przekroju betonowego,



Rys. 4. Spadek sztywności elementów

Fig. 4. Decrease of the elements rigidity

Według tego wzoru teoretyczne wartości momentu rysującego wyniosły: element BK-T – 7 kNm, element BP-T – 8 kNm. Uzyskane wartości momentu rysującego były więc niższe od teoretycznych. Pierwsze rysy pojawiły się na dłuższych ściankach przekroju, mniej więcej w połowie ich wysokości. Propagacja rys następowała w obie strony (w górę i dół). Przy większym poziomie obciążenia rysy łączyły się ze sobą tworząc klasyczny obraz zarysowania, charakterystyczny dla elementów obciążonych momentem skręcającym [4, 5]. Rysunek 5 przedstawia przyrost rozwartości wybranych rys, zlokalizowanych w środku rozpiętości przęśła.

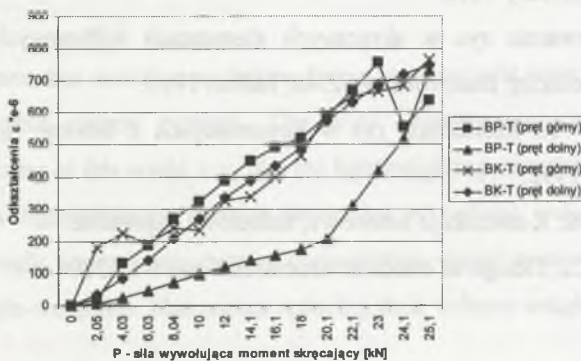


Rys. 5. Postęp rozwartości wybranych rys

Fig. 5. Propagation of some crack width

Doświadczalne nośności elementów T_u wyniosły: element BK-T – $T_u = 17$ kNm ($P_N=28$ kN), element BP-T - $T_u= 15$ kNm ($P_N= 25$ kN), są to wartości mniejsze od wartości normowych. Według PN [6] (wzory 92 i 93) obliczona nośność elementów T_{Rd} wynosi: 19 kNm (BK-T), 23 kNm (BP-T), a wg EC2 [7] (wzór 6.30) odpowiednio: 22 kNm i 26 kNm.

Na rys. 6 przedstawiono odkształcenia prętów podłużnych zbrojenia belek. Pomiary dokonano w środkowej części przęseł badanych elementów. Wszystkie rozpatrywane pręty uległy rozciąganiu. Odkształcenia przyrastały w miarę równomiernie, wraz ze wzrostem obciążenia. Jak widać również z tego wykresu, wszystkie badane pręty podobnie się odkształcają. Jedynie pręt dolny w belce BP-T początkowo odkształca się wolniej, a przy sile $P \approx 20$ kN dynamika przyrostu jego odkształceń zwiększyła się, by ostatecznie osiągnąć zbliżoną wartość, taką jak pozostałe pręty. Pewnym zakłóceniem w pomiarach odkształceń może być fakt, że belka w założeniu obciążona czystym momentem skręcającym, poddana jest też niewielkim wartościom momentu zginającego i siły tnącej, wynikającym z ciężaru własnego elementu ($M \approx 1,5$ kNm). W odkształceniach rozpatrywanych prętów nie zauważono wpływu momentu zginającego od ciężaru własnego elementów.



Rys. 6. Odkształcenia podłużne prętów zbrojenia

Fig. 6. Deformation of longitudinal reinforcement bar

Przy pomiarach odkształceń strzemion stwierdzono większą wartość odkształceń na ramionach wzdłuż dłuższych boków, w stosunku do odkształceń ramion strzemion na krótszych bokach.

4. Podsumowanie

Z przeprowadzonych badań można wyciągnąć następujące wnioski:

- element kątownikowy zarysował się przy nieznacznie mniejszej wartości siły niż element prostokątny,
- element kątownikowy uzyskał większą nośność od elementu prostokątnego,
- element kątownikowy charakteryzował się większą sztywnością skrętną przy wyższym poziomie obciążenia niż element prostokątny,
- rysy na obu elementach powstawały w miarę równomiernie na wszystkich bokach i układały się mniej więcej pod kątem 45° , zgodnie z kierunkiem skręcania,
- pierwsze rysy pojawiały się mniej więcej w połowie wysokości dłuższych boków.

LITERATURA

1. Ciężak T.: Polski dorobek naukowy w zakresie skręcania elementów żelbetowych, *Inżynieria i Budownictwo* 2/1986, s. 52-56.
2. Hohsdorf H.: *Statyka modelowa*, Warszawa, Arkady 1975.
3. Hsu T.T.C., Hwang C.S.: Torsional Limit Design of Spandrel Beam. *ACI Journal*, Vol.74, No. 2, February 1997.
4. Ciężak T.: Rozwarcie rys w skręcanych elementach żelbetowych. *Prace Naukowe Politechniki Lubelskiej, Budownictwo Z.40*, Lublin 1990.
5. Godycki-Ćwirko T.: Morfologia rys w konstrukcjach z betonu. *Rozprawy Naukowe*, nr 13, Białystok 1992.
6. PN-B-03264:2002, *Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone*.
7. EN 1992-1-1, EC2, *Design of concrete structures – part 1-1*, 2004.