

prof. dr hab. inż. Mieczysław Kamiński*
dr inż. Wojciech Pawlak*

Doświadczalne badania żelbetonowych elementów pod obciążeniem momentem skręcającym

Experimental research of reinforced concrete elements under torsion

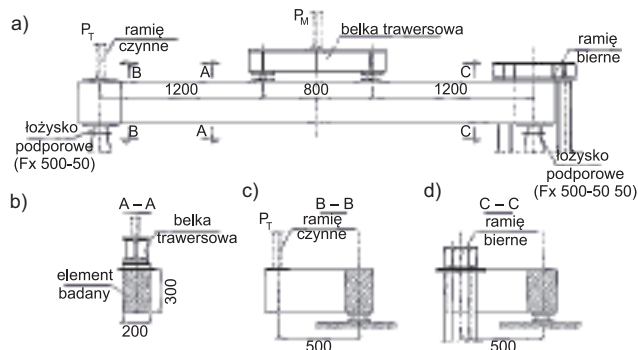
Z względu na sposób obciążania elementy żelbetonowe można podzielić na różne grupy, w tym elementy obciążone momentem skręcającym. Moment skręcający powstaje wtedy, gdy wypadkowa sił działa na mimośrodku względem osi podłużnej elementu. Przykładami takich elementów w konstrukcjach żelbetonowych są skrajne belki stropów, wieńce mocujące wspornikowe płyty balkonowe, ramy przestrzenne, schody spiralne, belki podsuwnicowe, trzony usztywniające budynki wysokie, żelbetonowe łuki obciążone prostopadłe do swojej płaszczyzny i inne konstrukcje pracujące przestrzennie.

Skręcanie jest słabiej rozpoznany zjawiskiem obciążenia niż inne występujące w elementach żelbetonowych, jak np. zginanie, ściskanie, ścinanie. Badania elementów skręcanych rozwinęły się w latach 60. i 70. XX w., kiedy zaczęto stosować coraz wytrzymalsze betony i stal zbrojeniową, przez co projektowane elementy zaczęły być coraz smuklejsze, a w efekcie bardziej podatne na działanie momentu skręcającego. Wcześniej elementy były na tyle masywne i krępe, że wpływ skręcania zazwyczaj był pomijany i obciążenie momentem skręcającym nie wpływało (zasadniczo) na ich zachowanie się. Dotychczasowe badania i analizy nie pozwalają na pełny, całkowity opis zjawiska skręcania w żelbecie. Powodem, dla którego prac doświadczalnych opisujących skręcanie nie jest tak wiele, jest m.in. złożoność badań i skomplikowanie zjawiska. Elementy poddane obciążeniu skręcającemu pracują w przestrzennym stanie naprężeń i odkształceń. Badania elementów żelbetonowych poddanych skręcaniu prowadzone są zwykle na próbkach w skali naturalnej lub zbliżonej, a ich prawidłowe przeprowadzenie jest możliwe w specjalnie do tego celu przygotowanych urządzeniach i na stanowiskach badawczych. Z tych względów oraz z powodu wysokich kosztów, przeprowadzenie obszernych badań było możliwe głównie w wyspecjalizowanych ośrodkach na świecie, m.in. w University of Houston (USA), University of Toronto (Kanada), Chalmers University of Technology w Goteborgu (Szwecja), NIIŻB w Moskwie (były ZSRR) i ETH w Zurychu (Szwajcaria).

Stanowisko do badań, elementy badawcze, pomiary mierzonych wielkości

W celu zbadania elementów żelbetonowych pod obciążeniem momentem skręcającym niezbędne jest skonstruowanie odpowiedniego stanowiska do badań, które będzie

umożliwiało prawidłową realizację zadania badawczego, odpowiadającego pracy takich elementów w rzeczywistości. Szczególną uwagę należy zwrócić na konstruowanie podpór i strefę przekazania obciążenia wywołującego moment skręcający w elemencie. Schemat stanowiska zależy od kształtu i sposobu obciążenia elementu badawczego. Najczęściej mamy do czynienia z badaniem elementów belkowych obciążanych przez ramię (wysięg, wspornik), uzyskując moment skręcający. Wówczas podpory na takim stanowisku badawczym powinny być w formie łożysk lub innych elementów umożliwiających swobodny obrót i skręt w obu płaszczyznach (przesła belki i ramienia obciążającego), co pokazano na rysunku 1.



Rys. 1. Przykład stanowiska do badania elementów belkowych (a, b) i szczegółów podparcia (c, d) [1]

Najprostsze do realizacji jest wykonanie prostych belek i obciążenie ich za pomocą innych prostopadłych elementów (najczęściej stalowych wsporników), które obciążane na końcach wywołują w przęśle elementu moment skręcający. Taki sposób obciążenia może prowadzić do błędów, polegających na nie najlepszym odwzorowaniu rzeczywistej pracy konstrukcji. Bardziej prawidłowe jest wykonanie belek żelbetonowych, w których moment skręcający powstaje przez obciążenie żelbetonowych wsporników belek (belki przestrzenne). W rzucie górnym badane belki mają kształt litery „Z” lub belek z wspornikami żelbetonowymi o innych kształtach. Taki kształt elementów badawczych, choć trudniejszy w wykonawstwie, ze względu na sposób przekazywania obciążenia jest bardziej właściwy. Podczas badań elementów skręcanych, a także ścinanych, istnieje problem lokalnych zakłóceń odkształceń wywołanych siłami skupionymi (bądź reakcjami podporowymi). W okolicach przyłoże-

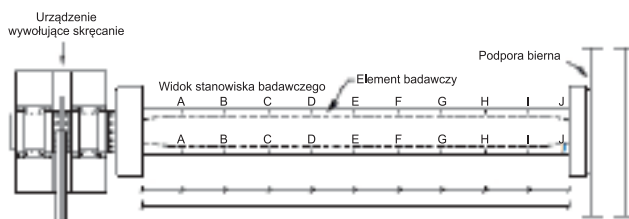
* Politechnika Wroclawska

nia sił skupionych występują obszary nieregularności odkształceń, nazywane w literaturze obszarami typu „D” – discontinuity regions [np. 2, 3]. W tych obszarach nie znajduje zastosowania zasada płaskich przekrojów oraz nie są spełnione warunki nierozdzielności odkształceń. Prościej jest realizować takie badania, wykonując elementy bez wsporników, a siłę wywołującą skręcanie przekazywać przez belkę stalową, prostopadle usytuowaną do osi podłużnej przęsła elementu. Wiele badań przeprowadzono z wykorzystaniem stalowych belek, przez które realizowano skręcanie elementów. W związku z tym, że w miejscu zamocowania stalowych wsporników do żelbetowych belek powstają obszary „D”, do wyników badań trzeba podchodzić z ostrożnością. Zdaniem Hsu [4] (czołowego badacza skręcania w żelbecie), obciążenie należy wprowadzać do elementu badawczego za pomocą żelbetowych wsporników. Wówczas obciążenie skupione z belki poprzecznej przekazywane jest na belkę główną przez naprężenia styczne równomiernie rozłożone na całej wysokości przekroju poprzecznego elementu. W miejscu przekazywania obciążenia występują jedynie niewielkie zakłócenia odkształceń na bardzo małym, ograniczonym obszarze.

Podobnie jak w elementach ścinanych i zginanych, stosunek rozpiętości elementu do jego wysokości (l_{eff}/d) powinien mieć wartość min. 10, aby prawidłowo odwzorować pracę rzeczywistych elementów żelbetowych. W celu wyeliminowania wpływu efektu skali na wyniki pomiarów badania powinno się wykonywać wyłącznie na elementach w skali naturalnej. W badanych elementach mierzy się odkształcenia betonu i odkształcenia stali zbrojeniowej za pomocą tensometrów elektrooporowych i ekstensometrów, przemieszczenia-ugięcia za pomocą czujników zegarowych i czujników indukcyjnych. Rozwartość rys i ich zasięg pozwalają określić lupki, ekstensometry, przyrządy do pomiarów liniowych i kątowych, a skręcenie elementów kątomierze lub pary czujników indukcyjnych bądź zegarowych. W przypadku elementów skręcanych mierzy się skręt elementów w celu określenia spadku sztywności elementów na skręcanie. Przy pomiarach odkształceń betonu należy pamiętać o przestrzennej pracy tych elementów – odpowiednio wykonując rozety tensometryczne.

Przykłady badań elementów skręcanych

Moment skręcający wywołwany jest najczęściej przez przyłożenie siły na wspornikach (stalowych lub żelbetowych) na odpowiednim mimośrodku. Lepszym sposobem obciążenia jest skonstruowanie urządzeń wywołujących skręcanie bez dodatkowych elementów (rysunek 2), gdyż



Rys. 2. Przykład stanowiska bez wsporników do wywołania skręcania [5]

siły w elemencie lepiej się rozkładają, bądź wykonanie konstrukcji przestrzennych i ich obciążanie, wywołując w niektórych elementach konstrukcji moment skręcający. Badania żelbetowych elementów skręcanych prowadzone są od ponad 100 lat (pierwsze badania – Morsch w 1904 r.).

Wybrane wnioski z dotychczas przeprowadzonych badań doświadczalnych:

- moment rysujący w przypadku elementów ze zbrojeniem i bez jest zasadniczo taki sam (o momencie rysującym decyduje wytrzymałość betonu, a zbrojenie ma prawie niezauważalny wpływ);
- elementy poddane czystemu skręcaniu powinny mieć podobną „moc” zbrojenia podłużnego i poprzecznego (najlepsze ze względów wytrzymałościowo-ekonomicznych byłoby zbrojenie spiralne o kierunku spirali zgodnej z kierunkiem skrętu elementu, przy obciążeniu momentem wywołującym skręcanie jednego znaku);
- po zarysowaniu o sztywności i nośności decyduje głównie ilość i rodzaj zbrojenia, a nie wytrzymałość betonu;
- zbrojenie uzwojeniem jest lepiej wykorzystywane, ale ma liczne wady wykonawcze czy możliwość pomyłki ułożenia uzwojenia niezgodnie z kierunkiem skrętu;
- sztywność elementów bardzo maleje przy łącznym działaniu momentu skręcającego, momentu zginającego i siły tnącej (stan T + M + V);
- wzrost klasy betonu decyduje głównie o zwiększeniu tylko momentu rysującego;
- niezależnie, czy mamy do czynienia z przekrojem pełnym czy drażonym, w przejściu skręcania uczestniczy tylko zewnętrzna skorupa betonowa;
- w elementach obciążonych momentem skręcającym musi być zastosowane zbrojenie podłużne i poprzeczne (chyba że stosujemy zbrojenie w postaci uzwojenia);
- w przypadku gdy w elemencie występuje stan T + V (skręcanie ze ścinaniem), wtedy pierwsza rysa pojawia się na ścianie, gdzie naprężenia styczne od ścinania sumują się z tymi od skręcania ($\tau_T + \tau_V$); największe naprężenia w zbrojeniu poprzecznym (w strzemionach) występują w połowie wysokości dłuższego boku przy tej ścianie, gdzie naprężenia od skręcania sumują się z tymi od ścinania.

Badania własne

Przeprowadziliśmy badania belek żelbetowych poddanych skręcaniu, o przekroju prostokątnym (belki BP) i kątowym (belki BK) tzn. w kształcie litery „L”. Badania podzielono na dwa etapy: w pierwszym elementy obciążano tylko momentem skręcającym (belki BP-T i BK-T), a w drugim momentem skręcającym, momentem zginającym i siłą tnącą (belki BP-TVM i BK-TVM). Belki zaprojektowano z żelbetowymi wspornikami, przez które siłowniki obciążające ich końce wywoływały moment skręcający w przęsłach elementów (rysunek 1). Celem badań było m.in. porównanie sztywności na skręcanie obu rodzajów belek. Belki miały jednakowe pole przekroju, natomiast elementy kątownikowe mniejszą o ok. 10% wartość momentu bezwładności na skręcanie I_T . Na rysunku 3 przedstawiono geometrię badanych belek.

Sztywność na skręcanie elementów K_T określano w zależności od zmieniającego się obciążenia ze wzoru:

$$K_T = \frac{T}{\Theta}$$

Do wyznaczenia K_T wykorzystano określone w badaniach wartości momentów skręcających T oraz towarzyszących im jednostkowych kątów skręcenia Θ , określonych na podstawie pomiarów kąta skręcenia φ w przekrojach pomiarowych elementów:

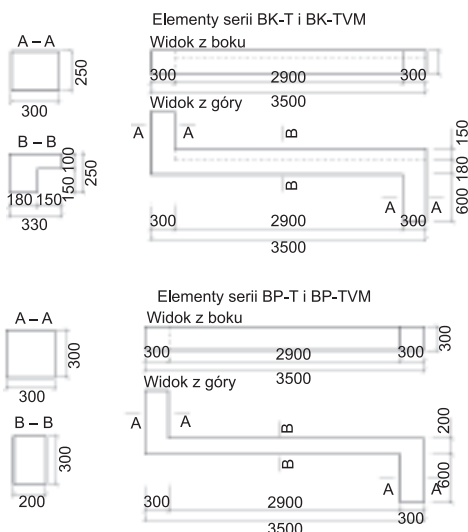
$$\Theta = \frac{\varphi_{i+1} + \varphi_i}{\Delta L_i}$$

gdzie:

ΔL_i – odległość pomiędzy przekrojami pomiarowymi elementu.

Skręcenie przekroju w badaniach mierzono w pięciu przekrojach (5 par czujników indukcyjnych) równomiernie rozłożonych na długości przęsła elementów. Na rysunku 4 przedstawiono wyniki ze środka rozpiętości elementów.

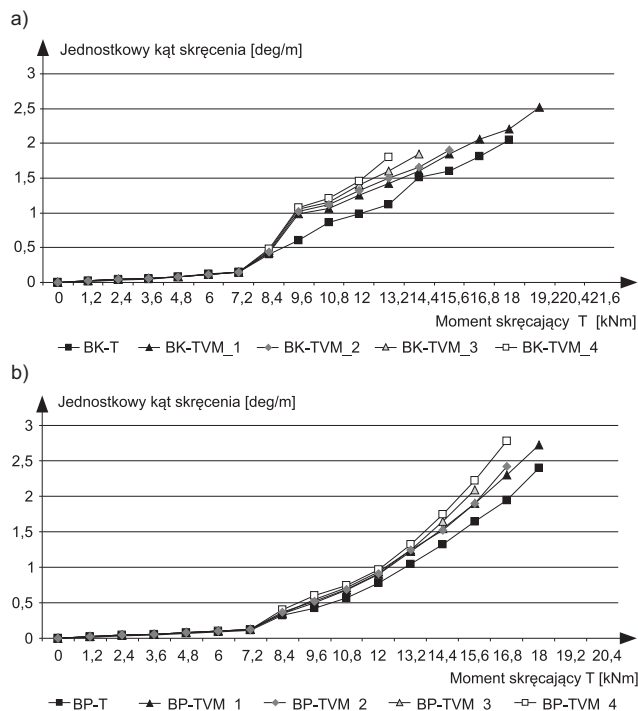
Na podstawie badań stwierdzono korzystny wpływ półki na sztywność skrętną belek o przekroju kątowym (BK). Belki serii BK (L-beam) charakteryzowały się mniejszym kątem skręcenia niż elementy o przekroju prostokątnym (belki serii BP), choć te drugie wykazywały większy moment bezwładności skrętnej I_T . Spadek sztywności w elementach BK był mniejszy o ok. 5 ÷ 10% w porównaniu z elementami serii BP. Świadczy to o pozytywnym wpływie półki przekroju na sztywność skrętną badanych elementów [6].



Rys. 3. Geometria badanych belek [1]

Podsumowanie

W artykule przedstawiono metodykę i wyniki badań żelbetonowych elementów pod obciążeniem momentem skręcającym. Ze względu na charakter pracy tego typu elementów przy konstruowaniu stanowiska badawczego i elementów badawczych należy uwzględnić specyfikę pracy obciążonych elementów, aby prawidłowo odwzorowywały rzeczywistą pracę konstrukcji. Projektowanie i realizacja tego typu elementów stanowi dość duże wyzwanie badawcze i możli-



Rys. 4. Zależność moment skręcający T – jednostkowy kąt skręcenia Θ dla elementów o przekroju poprzecznym prostokątnym: a – belki BK; b – belki BP [1]

w jest tylko w dobrze wyposażonych laboratoriach. Problem skręcania nie jest jeszcze w pełni rozpoznany, stąd konieczność prowadzenia badań. Jednym z dotychczas nierozpoznanych dostatecznie zjawisk jest spadek sztywności w elementach skręcanych, który decyduje o stanach użyteczności konstrukcji.

Abstract

Specific topics which should be considered in designing of experimental set-up and elements as well in case of reinforced concrete elements subjected to torsional moment were presented. The examples of experimental set-up and elements in this type of investigations were shown.

Literatura

- [1] Kamiński M., Pawlak W.: Nośność żelbetonowych belek poddanych skręcaniu o kątowym kształcie przekroju poprzecznego. Załącznik nr 2 do raportu końcowego z badań. Raport SPR nr 09/2008, Instytut Budownictwa Politechniki Wrocławskiej.
- [2] Dąbrowski K., Lewicki B., Zieliński J.L.: Postęp w projektowaniu konstrukcji z betonu w świetle prac CEB. Inżynieria i Budownictwo, 9/88, str. 329 – 333.
- [3] Ramirez J.A., Breen J.E.: Evaluation of a Modified Truss-Model Approach for Beams in Shear. ACI Structural Journal, V. 88, No. 5, 9-10/91.
- [4] Hsu T.T.C.: Torsion of Reinforced Concrete Beams. Van Nostrand Reinhold, New York 1984.
- [5] Bernardo L.F.A., Lopes S.M.R.: High-strength Concrete Hollow Beams Strengthened with External Transversal Steel Reinforcement Under Torsion. Journal of Civil Engineering and Management Volume 17, Issue 3, September 2011, pages 330 – 339.
- [6] Kamiński M., Pawlak W.: Load capacity and stiffness of angular cross section reinforced concrete beams under torsion. Archives of Civil and Mechanical Engineering, Vol. 11, No. 4, pp. 885 – 903.