

Tadeusz URBAN¹
Łukasz KRAWCZYK²
Michał GOŁDYN³

BADANIA EKSPERYMENTALNE WZMACNIANIA BARDZO KRÓTKICH WSPORNIKÓW ŻELBETOWYCH

W referacie przedstawiono badania doświadczalne dotyczące wzmocnienia istniejących krótkich wsporników za pomocą zbrojenia wklejanego. Proporcje wsporników modeli tej serii badawczej charakteryzował stosunek wysięgu do wysokości równy 1:3. Wyniki badań wykazały, że wzmocnienie zbrojeniem wklejanym może okazać się mniej efektywne niż w przypadku wsporników o większym wysięgu. W przypadku wsporników bardzo krótkich o nośności decyduje wytrzymałość betonu. Celem dodatkowego zbrojenia jest przekazanie sił rozciągających, działających poprzecznie do osi ukośnego krzyżulca ściskanego.

Słowa kluczowe: krótki wspornik, wytrzymałość betonu, zbrojenie wklejane, wzmocnianie, krzyżulec ściskany

1. Wprowadzenie

W referacie krynickim [1] autorzy przedstawili wyniki badań wsporników o proporcjach wysięgu do wysokości $a_e/h \approx 0,5$ i $0,6$ wzmocnianych zbrojeniem wklejanym. Uzyskane wyniki potwierdziły znaczną skuteczność tego sposobu wzmocnienia. Analiza wyników eksperymentalnych wykazała, że nośność po wzmocnieniu można określić za pomocą metody S-T, uzyskując bardzo dobrą zbieżność wyników doświadczalnych z teoretycznymi. Przy wspomnianych proporcjach wspornika i stosunkowo niskim stopniu zbrojenia głównego wynoszącym około 0,4%, o nośności decydowało zbrojenie. Zniszczenie poprzedzone było uplastycznieniem zbrojenia głównego, a w niektórych przypadkach nawet jego zerwaniem. Badania przedstawione w referacie dotyczą wsporników krępych o stosunku wysięgu do wysokości $a_e/h \approx 0,3$. W takim przypadku tangens

¹ Tadeusz Urban, Politechnika Łódzka

² Autor do korespondencji/corresponding author: Łukasz Krawczyk, Katedra Budownictwa Betonowego, al. Politechniki 6, 90-924 Łódź, lukasz.krawczyk@p.lodz.pl

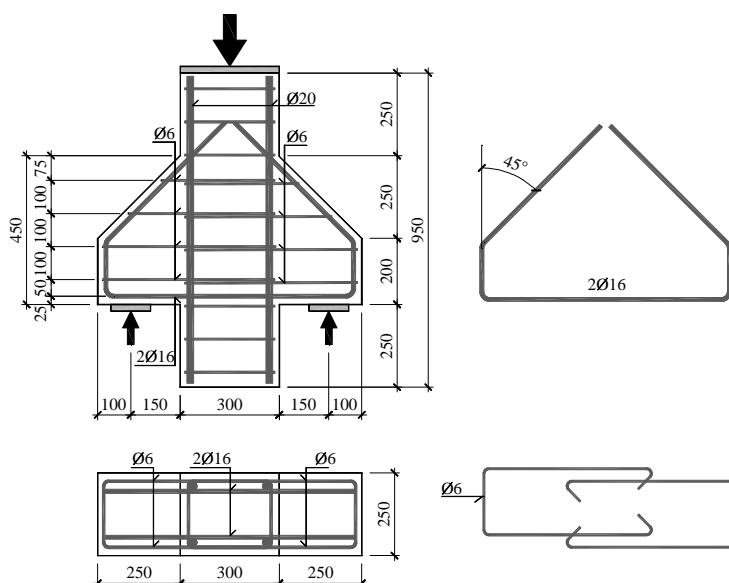
³ Michał Gołdyn, Politechnika Łódzka

kąta nachylenia krzyżulca ściskanego θ równy jest ok. 2,4, więc można stosować metodę Strut-and-Tie, która zgodnie z PN-EN 1992-1-1 [2] jest ograniczona warunkiem: $1,0 \leq \tan\theta \leq 2,5$. Badane wsporniki były blisko wartości granicznej, powyżej której można sprawdzać nośność wsporników według normy amerykańskiej ACI 318-14 [3] metodą *shear – friction* (ściananie – tarcie). Celem tej serii badań było sprawdzenie skuteczności wzmacniania wsporników krótkich za pomocą zbrojenia wklejanego.

2. Opis badanych elementów

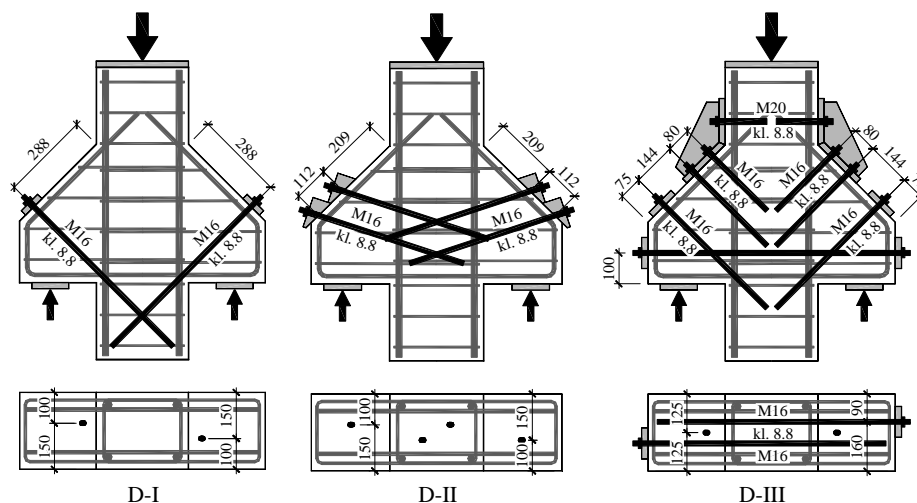
Na rysunkach 1 i 2 pokazano wymiary i zbrojenie badanych elementów. Jeden z nich o symbolu D-0 stanowił element odniesienia i nie podlegał wzmocnieniu. Pozostałe D-I, D-II i D-III zostały wzmocnione za pomocą wklejanych prętów gwintowanych M16 kl. 8.8 w uprzednio wywiercone otwory. W przypadku modelu D-III stosowano również akcesorium stalowe oraz śruby M20 – patrz rys. 2.

Wszystkie badane modele były wykonane z tej samej mieszanki betonowej o maksymalnym ziarnie kruszywa $d_g = 8$ mm. Pierwszy model D-0 badano po upływie 62 dni od zabetonowania, natomiast ostatni – D-III, po 83 dniach. W dniu badania każdego modelu wykonywano towarzyszące badania wytrzymałości betonu na próbkach walcowych. Ze względu na bardzo małe różnice w wytrzymałości do analizy przyjęto średnią wytrzymałość dla całej serii – $f_{cm} = 45,1$ MPa. Ustalono również średni moduł sprężystości wynoszący $E_{cm} = 27,2$ GPa.



Rys. 1. Kształt, wymiary i zbrojenie badanych elementów przed wzmocnieniem

Fig. 1. Geometry and reinforcement of tested specimens before strengthening



Rys. 2. Sposoby wzmocnienia elementów

Fig. 2. The methods of strengthening tested specimens

Parametry wytrzymałościowe zbrojenia określone na podstawie badań są następujące:

- zbrojenie główne z prętów $\varnothing 16$, $A_s = 200,5 \text{ mm}^2$, $f_{ym} = 533,6 \text{ MPa}$, $f_{im} = 638,5 \text{ MPa}$;
- strzemiona (pręty gładkie) $\varnothing 6$, $A_s = 28,1 \text{ mm}^2$, $f_{ym} = 385,6 \text{ MPa}$, $f_{im} = 487,6 \text{ MPa}$;
- zbrojenie słupa $\varnothing 20$, $A_s = 310,7 \text{ mm}^2$, $f_{ym} = 541,0 \text{ MPa}$, $f_{im} = 640,4 \text{ MPa}$.

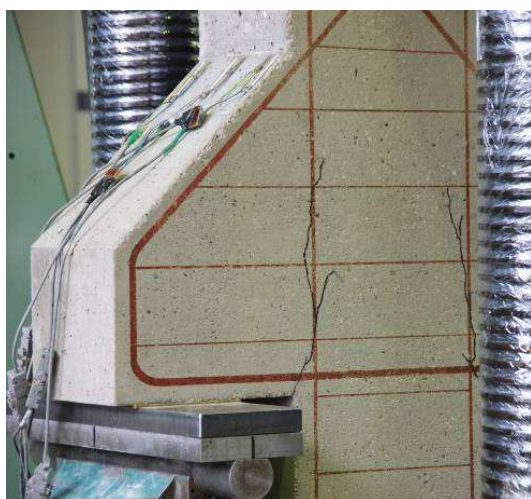
3. Realizacja badań

Badania zostały przeprowadzone w maszynie wytrzymałościowej ZD600, pokazanej na rys. 3. Model oparty był na dwóch liniowych podporach przegubowych. Obciążenie przekazywano na słup za pomocą tłoka prasy. Badanie modeli wzmocnianych realizowano w dwóch etapach. W pierwszym z nich prowadzono cykliczne, kilkukrotne obciążanie do 800 kN i stopniowe odciążanie do 100 kN. Siła 800 kN odpowiadała w przybliżeniu nośności obliczeniowej wsporników, co potwierdziło badanie modelu D-0. Stanowiła ona bowiem około 40% jego nośności eksperymentalnej, wynoszącej 1980 kN. Po zakończeniu trzech cykli obciążanie – odciążanie przystępowano do wzmocniania wsporników. Przy tym poziomie obciążenia wsporniki były już dość wyraźnie zarysowane (patrz rys. 4).



Rys. 3. Widok modelu D – II w stanowisku badawczym

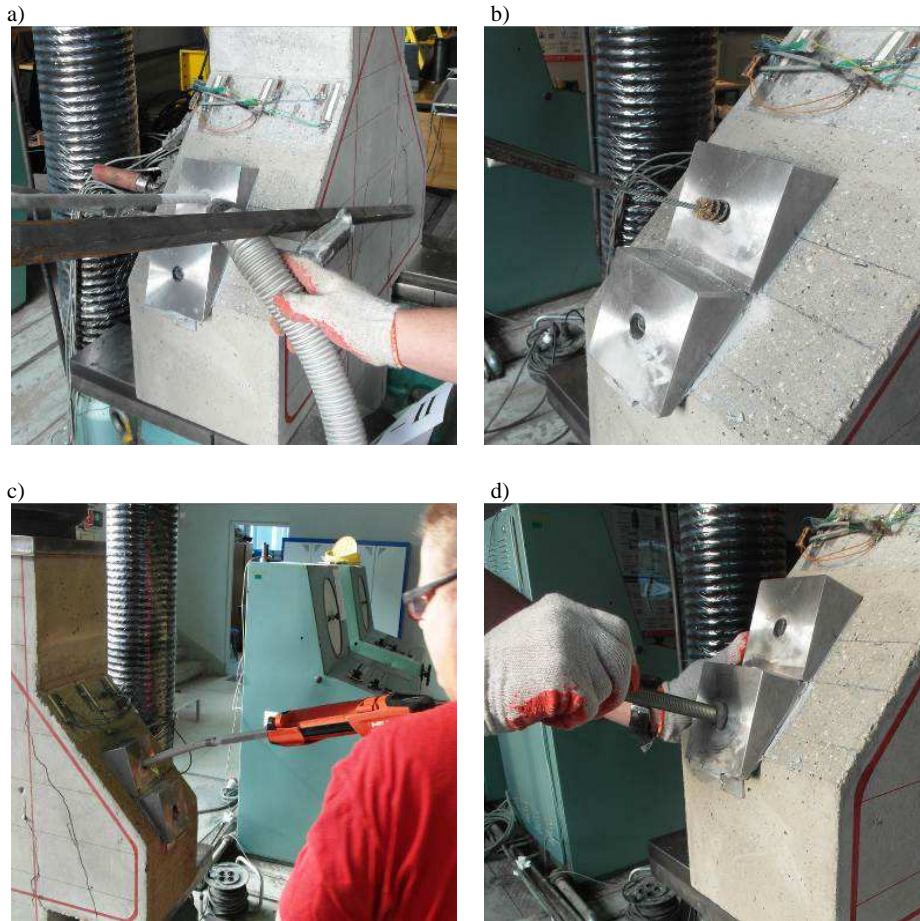
Fig. 3. The corbel D – II in test setup



Rys. 4. Widok modelu D – 0 pod obciążeniem 800 kN po trzech cyklach obciążenie-odciążenie

Fig. 4. The corbel D – 0, 800 kN load is applied

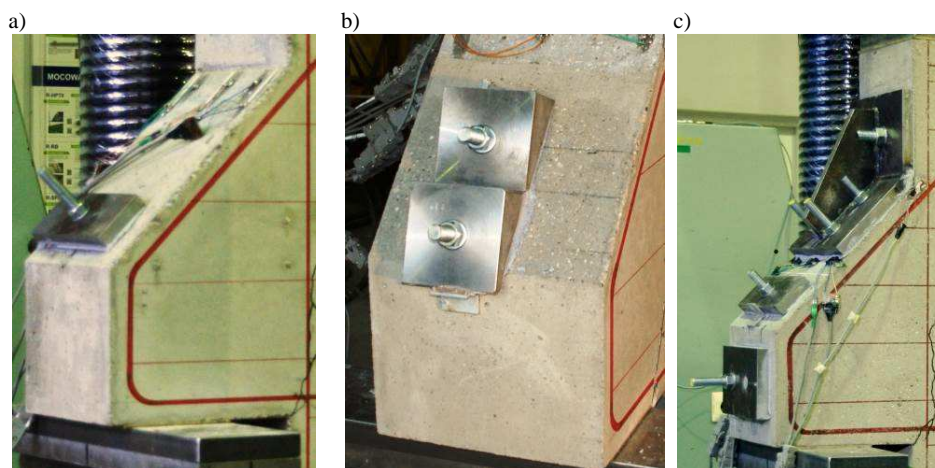
Wzmacnianie polegało na wywierceniu otworów, oczyszczeniu ich sprężonym powietrzem i szczotką w celu usunięcia pyłu, wypełnieniu ich klejem i osadzeniu prętów wzmocnienia. Na rysunku 5 pokazano wybrane etapy wzmocniania modelu D-II, a na rys. 6 widok wsporników po wzmocnieniu.



Rys. 5. Wzmocnianie modelu D-II: a) wiercenie otworu poprzez blok kotwiący, b) czyszczenie otworu, c) aplikacja kleju, d) osadzenie dodatkowego zbrojenia

Fig. 5. Strengthening of specimen D-II a) drilling the hole through anchoring plate, b) clearing the hole, c) application of injectable mortar, d) embedding the additional reinforcement

Po osiągnięciu przez klej pełnej wytrzymałości, co następowało po około 2 godzinach od momentu osadzenia śrub, przystępowano do drugiego etapu obciążania modeli. Obciążenie zwiększano skokowo, co 100 kN aż do zniszczenia. Widok zniszczonych modeli pokazano na rys. 7.

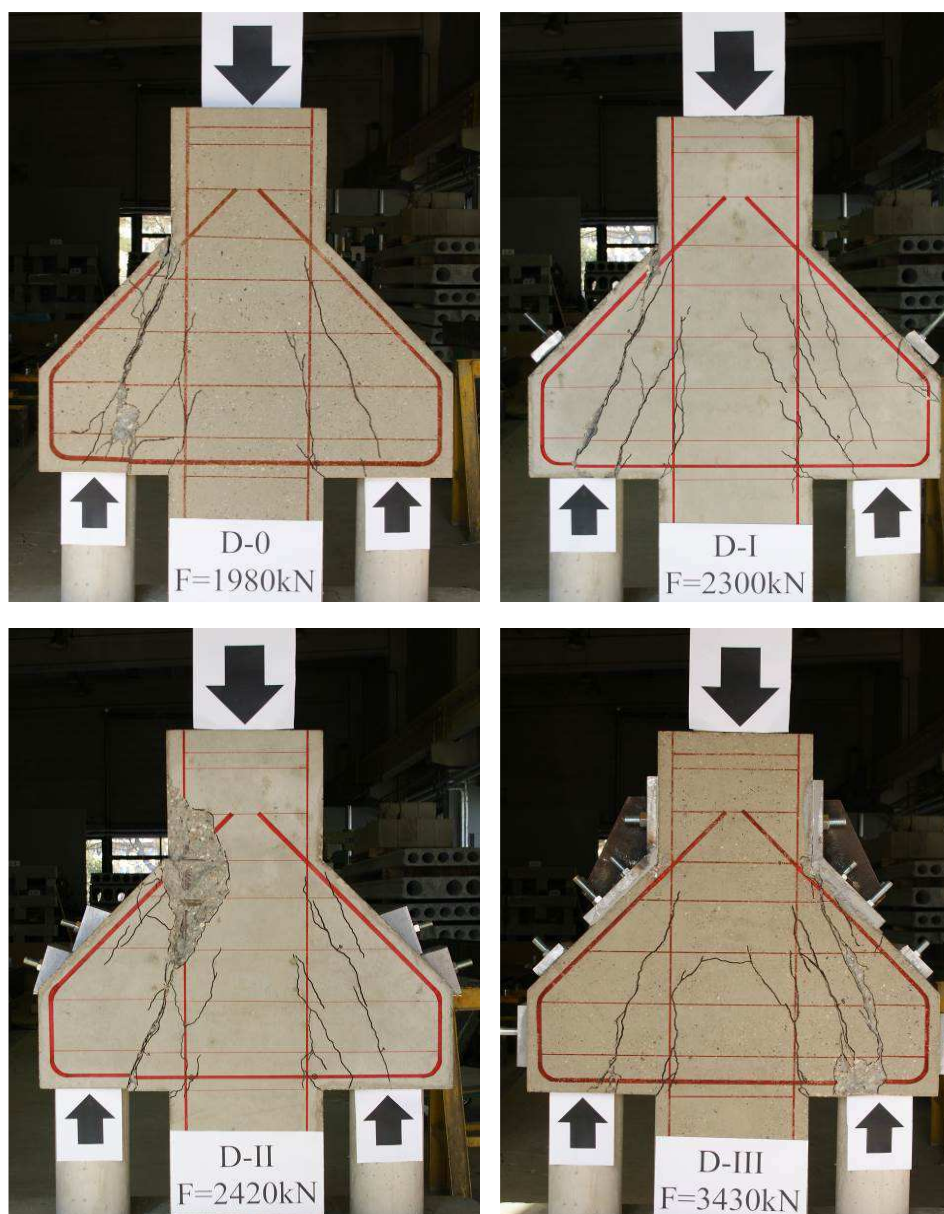


Rys. 6. Wsporniki po wzmocnieniu: a) D-I, b) D-II, c) D-III

Fig. 6. Corbels after strengthening a) D-I, b) D-II, c) D-III

4. Wyniki pomiarów odkształceń

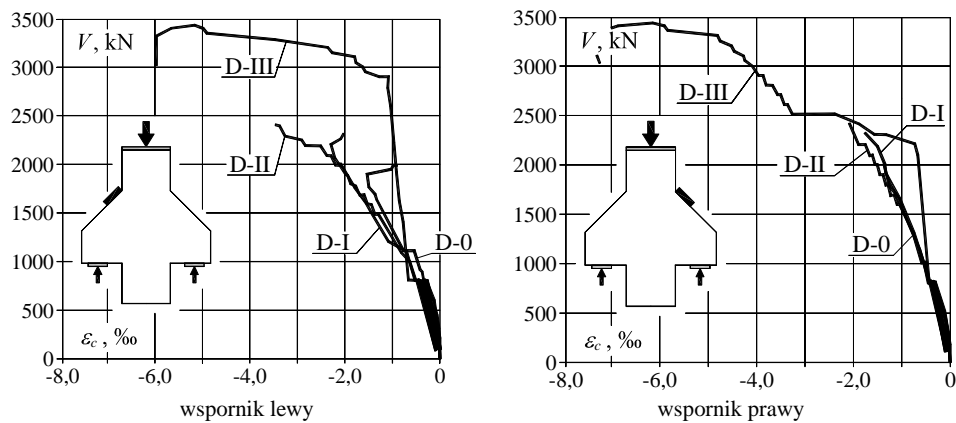
W trakcie badań dokonywano pomiaru odkształceń betonu i zbrojenia pierwotnego – głównego i strzemion. Niestety część tensometrów uległa uszkodzeniu w trakcie cyklicznego odciążania i obciążania, dlatego też niemożliwe było przedstawienie wszystkich rezultatów. Na rysunku 8 pokazano wyniki pomiarów odkształceń na betonie, prowadzonych za pomocą tensometrów o bazie pomiarowej 10 mm, usytuowanych na powierzchni ściskanej wspornika przy styku ze słupem. Zastosowanie prętów wklejanych jako wzmocnienia modeli D-I i D-II nie zmieniło w istotny sposób charakteru odkształceń względem modelu odniesienia. Inaczej było natomiast w przypadku elementu D-III, bowiem instalacja stalowego wzmocnienia znacznie ograniczyła tempo narastania odkształceń. Przy obciążeniu równym około 2000 kN były one średnio dwukrotnie niższe w stosunku do pozostałych modeli. Ponadto w momencie zniszczenia odkształcenia betonu na powierzchni wspornika pod stalowym elementem usztywniającym dochodziły do $6 \div 7\%$, znacznie przekraczając teoretyczne odkształcenia graniczne w stanie jednoosiowego ściskaniu $\varepsilon_{cu} = 3,5\%$.



Rys. 7. Widok modeli po zniszczeniu

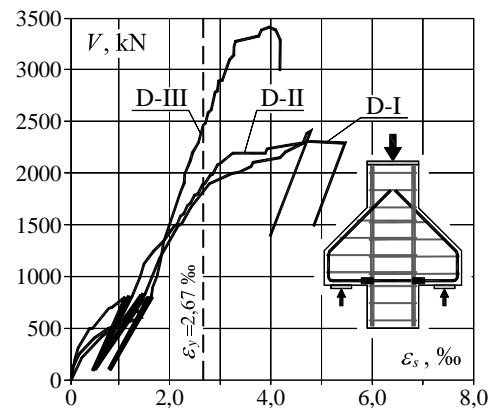
Fig. 7. Specimens after failure

Na kolejnym rys. 9 pokazano odkształcenia zbrojenia głównego mierzone na styku krawędzi rozciąganej wspornika ze słupem. Widoczny jest wyraźny wpływ stalowego elementu wzmocnienia, współdziałającego razem ze zbrojeniem wklejanym. Zwiększeniu uległa sztywność wspornika D-III, skutkiem czego znacznie później, w stosunku do pozostałych elementów, doszło do uplastycznienia zbrojenia głównego. W przypadku modeli D-I i D-II nastąpiło to przy obciążeniu całkowitym równym około $1800 \div 1900$ kN, wobec 2500 kN w przypadku elementu D-III.



Rys. 8. Odkształcenia betonu

Fig. 8. Concrete strains



Rys. 9. Odkształcenia zbrojenia głównego

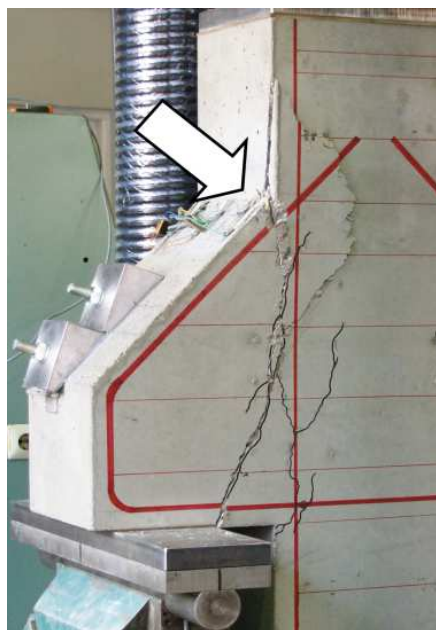
Fig. 9. Strains of main reinforcement

5. Zniszczenie modeli

Zniszczenie modeli poprzedzone było uplastycznieniem zbrojenia głównego. W przypadku modeli D-0, D-I i D-II miało to miejsce przy sile równej około 1900 kN. Model D-0 uległ zniszczeniu w trakcie zwiększania nacisku tłoka w kolejnym kroku obciążenia. W przypadku modeli D-I i D-II uzyskano kilkunastoprocentowe zwiększenie obciążeń granicznych, równe odpowiednio 16 i 20%. Obserwacja zarysowania modeli D-0 i D-I wskazywała, iż rysa o największej szerokości rozwijała się wzdłuż teoretycznego krzyżulca ściskanego, wynikającego z modelu kratownicowego. Można zatem przypuszczać, iż o ich nośności decydowała nośność krzyżulca ściskanego. Z tego względu wzmocnienie modelu D-I za pomocą pręta ukośnego przecinającego krzyżulec tylko w jednym miejscu pozwoliło jedynie nieznacznie zwiększyć nośność wspornika.

Uwzględniając obserwacje poczynione w trakcie badania modelu D-I, zmodyfikowano koncepcję wzmocnienia elementu D-II. Wprowadzono dwa pręty prostopadłe do przebiegu teoretycznego krzyżulca ściskanego. Wymagało to zastosowania odpowiednich bloków kotwiących, widocznych na rys. 2 i 6b. Zbrojenie to miało za zadanie „zszyć” rysę ukośną mniej więcej w połowie długości krzyżulca. Mimo dwukrotnego zwiększenia liczby prętów w stosunku do elementu D-I nie skutkowało to proporcjonalnym wzrostem nośności.

Niszczenie modelu zostało bowiem zapoczątkowane na styku nachylonej powierzchni wspornika i boku słupa – patrz rys. 10. Z tego względu to niewralgiczne miejsce zostało w modelu D-III wzmocnione stalowym okuciem, widocznym na rys. 6c. Zostało ono przyklejone do powierzchni elementu i dodatkowo zakotwione za pomocą wklejanych śrub. To rozwiązanie pozwoliło na znaczne podniesienie nośności o 73% w stosunku do modelu odniesienia.



Rys. 10. Zniszczenie modelu D-II

Fig. 10. Failure of specimen D-II

6. Wnioski

Przeprowadzone badania wykazały, że wzmacnianie wsporników krępych o proporcjach $a_c/h < 0,33$ za pomocą dodatkowego zbrojenia wklejanego może być mało efektywne. O ich nośności decyduje bowiem nośność krzyżulca ści-

skanego. Wnioski te potwierdzają wyniki opublikowane przez *Nagrodzką-Godycką* [4]. Zastosowanie prętów pełniących rolę zbrojenia poprzecznego „zszywającego” rysę pozwala jedynie nieznacznie zwiększyć nośność wspornika. W celu skutecznego ograniczenia zarysowania krzyżulca konieczne jest jednak zastosowanie znacznej ilości zbrojenia dodatkowego. Z tego względu bardziej efektywnym i łatwiejszym z technicznego punktu widzenia działaniem wydaje się wzmocnienie betonu w miejscach przewidywanej destrukcji za pomocą stalowych okuć.

Literatura

- [1] Urban T., Gołdyn M., Krawczyk Ł.: Wzmocnianie krótkich wsporników przez wklejanie dodatkowego zbrojenia. 61 Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB – Problemy naukowo-badawcze, Krynica 2015.
- [2] PN-EN 1992-1-1 Eurokod 2 – Projektowanie konstrukcji z betonu – Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2008.
- [3] ACI 318-14 Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary for Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318R-14), Farmington Hills, 2014.
- [4] Nagrodzka-Godycka K., Wsporniki żelbetowe: badania, teoria, projektowanie, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, 2001 s. 263.

EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF STRENGTHENING OF VERY SHORT REINFORCED CONCRETE CORBELS

Summary

The paper presents experimental investigations concerning strengthening of very short corbels by post – installed bars. The slenderness of corbels (a_c/h) was equal to 1/3. The results showed that strengthening by the post – installed bars may be less effective than in the case of corbels with greater a_c/h ratios. The carrying capacity of very short corbels is determined by concrete strength. The purpose of the additional reinforcement is transferring tensile forces acting laterally to concrete strut.

Keywords: short corbel, concrete strength, post – installed reinforcement, strengthening, strut

Przesłano do redakcji: 07.06.2016 r.

Przyjęto do druku: 30.06.2016 r.

DOI: 10.7862/rb.2016.35