

Badanie zespolenia betonu zwykłego z lekkim betonem kruszywowym

Experimental investigations on the connection between ordinary and lightweight aggregate concrete

dr inż. Michał Gołdyn (ORCID: 0000-0002-7791-1940), prof. dr hab. inż. Tadeusz Urban (ORCID: 0000-0001-7494-3747), Katedra Budownictwa Betonowego, Politechnika Łódzka

DOI 10.5604/01.3001.0053.6985

Streszczenie: W artykule przedstawiono badania eksperymentalne dotyczące zespolenia pomiędzy betonem zwykłym a betonem lekkim z kruszywem ze spiekanych popiołów lotnych. Parametry zmienne stanowiły: wytrzymałość betonu nadkładu, sposób przygotowania powierzchni oraz stopień zbrojenia styku. Badania potwierdziły wpływ wytrzymałości betonu nadkładu na siły adhezji. Wykazały jednocześnie, że przygotowanie powierzchni zespolenia poprzez bruzdowanie udarowe może prowadzić do uszkodzenia struktury betonu i ograniczyć nośność połączenia. Zachowanie minimalnego stopnia zbrojenia zespalającego według *fib* Model Code 2010 pozwoliło na uzyskanie ciągłego zachowania styku, który po zarysowaniu charakteryzował się pewną nośnością rezydualną.

Słowa kluczowe: nadbeton, konstrukcje zespolone, styk pomiędzy betonami, lekki beton kruszywowy, szorstkość powierzchni.

Abstract: The paper presents the experimental investigations on the connection between ordinary concrete and lightweight concrete with sintered fly ash aggregate. The variable parameters were the strength of the concrete overlay, the surface preparation method and the interface reinforcement ratio. The study confirmed the effect of the strength of the concrete overlay on the adhesive forces. At the same time, they demonstrated that surface preparation by impact grooving can lead to damage to the concrete structure and limit the load carrying capacity of the connection. Maintaining a minimum shear reinforcement ratio according to the *fib* Model Code 2010 allowed for a ductile behaviour of the elements, which were still characterised by a residual capacity after cracking.

Keywords: concrete overlay, composite structures, connection between concretes, lightweight aggregate concrete, surface roughness.

1. Wprowadzenie

Przebudowa istniejących obiektów wymusza niekiedy konieczność zwiększenia nośności elementów konstrukcyjnych. Potrzeba ta może również wynikać z błędów wykonawczych, kiedy to ilość czy też położenie zbrojenia głównego odbiega od założeń przyjętych w projekcie wykonawczym. Taka sytuacja występuje dość często w przypadku zbrojenia górnego stropów, które, w wyniku niewłaściwej lub niedostatecznej stabilizacji, ulega przemieszczeniu w dół. Prowadzi to do obniżenia wysokości użytecznej przekroju (ramienia sił wewnętrznych) i w przypadku istotnej odchyłki może skutkować deficytem nośności na zginanie i przebicie [1]. Jednym ze sposobów skutecznej naprawy może być w takim przypadku wzmocnienie płyty za pomocą nadbetonu, w którym umieszczone zostanie dodatkowe zbrojenie pozwalające skompensować występujące w strefie podporowej deficyty nośności. Główną wadą wzmocniania za pomocą nadkładu betonowego jest zwiększenie ciężaru własnego konstrukcji – ułożenie warstwy o grubości 5 cm skutkuje wzrostem obciążeń stałych o 1,25 kN/m². Z tego względu godną rozważenia alternatywą betonu zwykłego może być konstrukcyjny lekki beton kruszywowy klasy gęstości

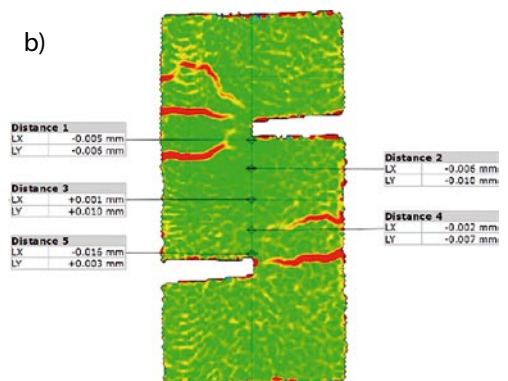
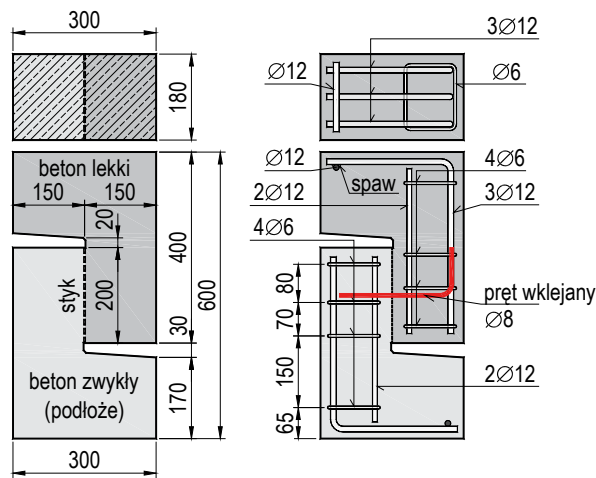
1,8 lub 2,0 według PN-EN 206 [2]. Zastosowanie współczesnych kruszyw lekkich powstających w procesie spiekania popiołów lotnych (m.in. Certyd, Lytag) umożliwia uzyskanie betonów lekkich dorównujących wytrzymałością na ściskanie betonom zwykłym. Jednocześnie charakteryzują się one niższym o około 15–20% ciężarem objętościowym. Należy jednak zauważyć, że zwiększeniu wytrzymałości na ściskanie lekkich betonów kruszywowych towarzyszy mniejszy wzrost wytrzymałości na rozciąganie względem betonów zwykłych. Właściwość ta może być istotna w przypadku konstrukcji zespolonych, kiedy to kluczową rolę odgrywają siły adhezji, warunkujące zarysowanie styku i powiązane właśnie z wytrzymałością betonu na rozciąganie.

W artykule przedstawiono badania eksperymentalne, których celem było określenie nośności i zachowania styków pomiędzy betonem zwykłym a lekkim betonem kruszywowym, stanowiącym nadkład wykonywany w późniejszym terminie.

2. Program badań eksperymentalnych

W celu określenia zachowania i nośności połączeń pomiędzy betonem zwykłym a nadbetonem lekkim układanym

Rys. 1. Kształt i zbrojenie badanych elementów oraz widok stanowiska badawczego



Rys. 2. Stanowisko do pomiaru metodą cyfrowej korelacji obrazu i mapa odkształceń głównych na powierzchni jednego z badanych elementów (kolor czerwony oznacza rysy)

w późniejszym czasie w Katedrze Budownictwa Betonowego Politechniki Łódzkiej zainicjowano badania eksperymentalne, które obejmowały łącznie 12 elementów zgrupowanych w dwóch seriach badawczych [3]. Wszystkie modele typu push-off składały się z dwóch jednakowych części w kształcie litery „L”, połączonych ze sobą w części środkowej. Jeden z bloków reprezentował podłoże z betonu zwykłego natomiast drugi, dobetonowany został w późniejszym czasie z lekkiego betonu kruszywowego. Zbrojenie każdego z bloków składało się z 3 prętów $\varnothing 12$, kotwionych mechanicznie za pomocą pręta przyspojonego oraz zamkniętych strzemion $\varnothing 6$, zagęszczonych w obszarze styku – rysunek 1. W wybranych elementach stosowano dodatkowo wklejany pręt $\varnothing 8$ jako zbrojenie zespalające.

Badania prowadzono w prasie o maksymalnym nacisku 1000 kN, umożliwiającej sterowanie siłą. Elementy sytuowano w taki sposób, aby oś działania siły przechodziła przez płaszczyznę zespolenia, wywołując czyste ścinanie.

W trakcie badań prowadzono pomiary deformacji powierzchni elementów przy użyciu systemu cyfrowej korelacji obrazu (*Digital Image Correlation*) GOM Aramis. Składał się on z dwóch kamer o wysokiej rozdzielczości 2752x2200 pikseli, umożliwiających rejestrację 25 klatek na sekundę, połączonych ze sterownikiem i komputerem wyposażonym w oprogramowanie umożliwiające

śledzenie odkształceń powierzchniowych 3D przy wykorzystaniu metody triangulacji (rys. 2a). Monitorowany obszar, przygotowany wcześniej poprzez naniesienie desena składającego się z czarnych punktów o zróżnicowanej średnicy, obejmował całą powierzchnię czołową elementu o wymiarach 300x600 mm. W trakcie badania możliwe było śledzenie w czasie rzeczywistym rozwoju zarysowania, a także przemieszczeń dowolnych punktów na powierzchni elementów poprzez wskazanie wirtualnych reperów i baz pomiarowych (rys. 2b).

Na zbrojeniu wklejonym umieszczono dodatkowo tensometry elektrooporowe, które umożliwiły śledzenie odkształceń w sąsiedztwie powierzchni zespolenia (rys. 6).

Program badań podsumowano w tabeli 1. Rozważane parametry zmienne stanowiły: klasa wytrzymałości na ściskanie nadkładu (LC25/28 oraz LC30/33), profil powierzchni (gładka – przygotowana poprzez przeszlifowanie, szorstka – powstała przez bruzdowanie) i stopień zbrojenia zespalającego ($\rho_i = 0$ lub 0,14%). Dobierając zbrojenie zespalające, kierowano się zaleceniami w pracy [4]. W celu uzyskania zachowania ciągłego należało zachować minimalny stopień zbrojenia $\rho_{min} = \max(0,12 f_{ctm}/f_{ym}; 0,05\%)$. W rozważanym przypadku przełożyło się to na wymagany przekrój zbrojenia styku $A_{i,min} = 29,2 \text{ mm}^2$, dlatego ostatecznie zastosowano pojedynczy pręt $\varnothing 8$ ($\rho_i = 0,14\%$).

Tabela 1. Program badań eksperymentalnych

| Oznaczenie elementu | L30/50-S-0 | L30/50-S-0.14 | L30/50-R-0 | L30/50-R-0.14 | L30/30-S-0 | L30/30-S-0.14 | L30/30-R-0 | L30/30-R-0.14 |
|--------------------------------|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|---------------|
| Podłoże | C25/30 | | | | | | | |
| Nadbeton | LC30/33 | | | | LC25/28 | | | |
| Szorstkość R_f [mm] | < 0,1 | | ~ 0,7 | | < 0,1 | | ~ 0,7 | |
| Przygotowanie powierzchni | szlifowanie | | bruzdowanie | | szlifowanie | | bruzdowanie | |
| Stopień zbrojenia ρ_f [%] | 0 | 0,14 | 0 | 0,14 | 0 | 0,14 | 0 | 0,14 |

Tabela 2. Właściwości mechaniczne betonu

| Seria | Podłoże (beton zwykły) | | | Nadkład (beton lekki kruszywowy) | | | |
|--------|------------------------|-----------------|----------------|----------------------------------|------------------|-----------------|-----------------------------|
| | f_{cm} [MPa] | f_{ctm} [MPa] | E_{cm} [GPa] | f_{lcm} [MPa] | f_{lctm} [MPa] | E_{lcm} [GPa] | ρ [kg/m ³] |
| L30/30 | 39,9 | 3,49 | 30,0 | 32,2 | 2,13 | 18,2 | 1659 |
| L30/50 | | | | 51,6 | 4,04 | 19,8 | 1787 |

Fragmenty elementów reprezentujące podłoże wykonano z betonu zwykłego, towarowego o projektowanej klasie wytrzymałości na ściskanie C25/30. Kruszywo drobne stanowił piasek naturalny natomiast grube – kruszywo granitowe łamane frakcji 2/8. Nadkład wykonano z betonu lekkiego z kruszywem „Certyd”, stanowiącym produkt spiekania popiołów lotnych. Stosowano kruszywo lekkie frakcji 4/9, jako kruszywo drobne zastosowano natomiast piasek naturalny. Skład mieszanek dobrano tak, aby uzyskać betony klas LC25/28 oraz LC30/33 i klasy gęstości 1,8 według PN-EN 206 [2]. We wszystkich mieszankach betonowych stosowano cement portlandzki CEM I. Cechy wytrzymałościowe betonu określano każdorazowo w dniu badania elementów głównych. Nie stwierdzono znacznych różnic pomiędzy wynikami poszczególnych oznaczeń, dlatego też w tabeli 2 zestawiono parametry średnie,

uzyskane dla betonu pochodzącego z jednego zarobu. W celu odzwierciedlenia rzeczywistych warunków spotkanych w konstrukcjach wzmacnianych elementy wykonywano w kilku etapach (rys. 3). Po przygotowaniu, elementy podłoża były przechowywane w laboratorium przez minimum 6 miesięcy. Po upływie tego czasu dokonywano obróbki powierzchni zespolenia poprzez szlifowanie lub bruzdowanie (serie L30/30 i L30/50). Kolejny etap stanowiło wklejenie zbrojenia zespalającego, składającego się z prętów $\varnothing 8$ ze stali B500SP (granica plastyczności $f_{ym} = 598,3$ MPa, wytrzymałość na rozciąganie $f_{um} = 642,8$ MPa), w uprzednio nawiercone otwory (w wybranych elementach). W tym celu stosowano gotową dwuskładnikową żywicę hybrydową o krótkim czasie utwardzania. Głębokość osadzenia prętów była we wszystkich przypadkach jednakowa i wynosiła $h_{ef} = 110$ mm. Po uzupełnieniu zbrojenia elementu

Rys. 3. Przygotowywanie elementów: a) bloki podłoża i zbrojenie umieszczone w formach, b) widok elementów po wyjęciu z formy


reprezentującego nadkład, w formach układano lekkie beton kruszywowy.

W celu zwiększenia szorstkości podłoża powierzchnia zespolenia wybranych elementów została przygotowana za pomocą dłuta umożliwiającą uzyskanie podłużnych bruzd. W przypadku pozostałych elementów powierzchnia styku została przeszlifowana. Zabieg ten miał na celu jedynie usunięcie warstwy mleczka cementowego i nie prowadził do istotnego zwiększenia szorstkości powierzchni. Klasyfikacji powierzchni pod względem ich szorstkości dokonano metodą piaskową. W przypadku powierzchni szlifowanych średnia głębokość profilu R_t nie przekraczała 0,1 mm. Przy powierzchniach bruzdowanych głębokość ta wahała się w zakresie $R_t = 0,65-0,75$ mm. Biorąc pod uwagę głębokość profilu, wszystkie uzyskane powierzchnie należałoby uznać za gładkie w świetle postanowień prEN 1992-1-1 [5] i fib Model Code 2010 [6] ($R_t < 1,5$ mm).

3. Wyniki badań

3.1. Rozwój zarysowania i poślizg w styku

Analiza pól odkształceń prowadzona w czasie rzeczywistym umożliwiła śledzenie rozwoju zarysowania. W przypadku elementów ze stykiem niezbrojonym zarysowanie było równoznaczne z wyczerpaniem nośności, bowiem w przeciągu ułamków sekundy ($< 0,03$ s) dochodziło do zniszczenia przejawiającego się gwałtownym odspojeniem bloku wykonanego z betonu lekkiego (rys. 4a). Zastosowanie zbrojenia przecinającego płaszczyznę zespolenia spowodowało zmianę charakteru zniszczenia. Zarysowanie styku nie było równoznaczne ze zniszczeniem elementu, bowiem połączenie charakteryzowało się pewną nośnością rezydualną. Początkowo wynikała ona z tarcia, a następnie z dyblowania zbrojenia. Rozerwanie styku zostało odsunięte

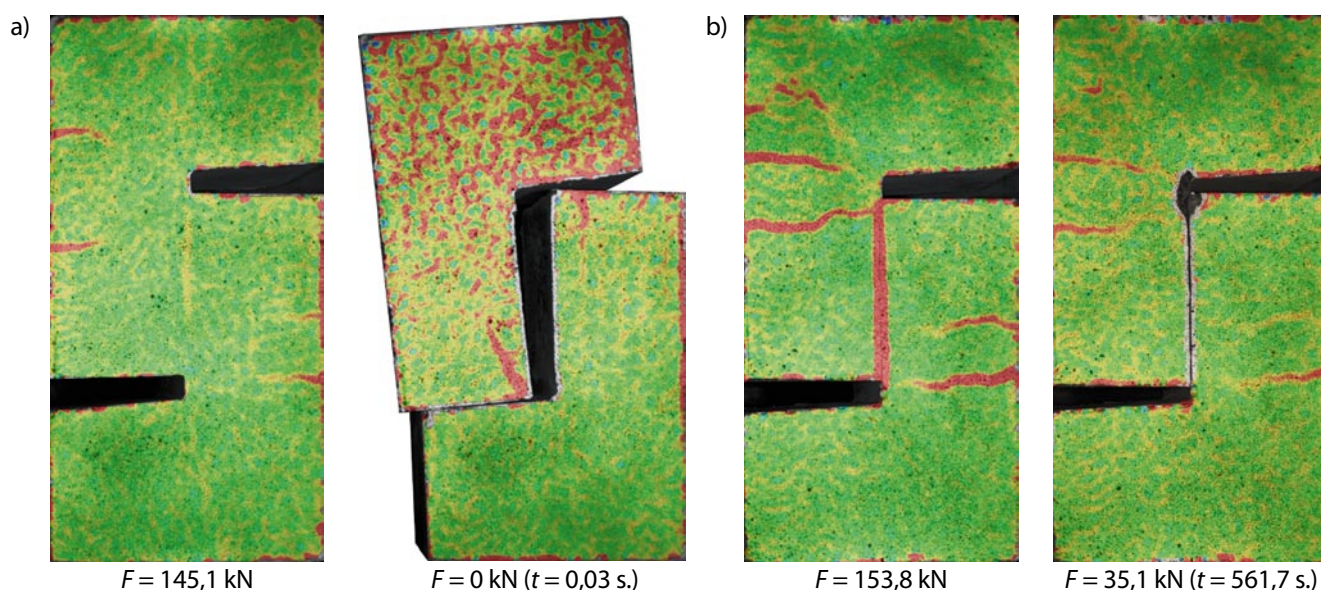
w czasie, czemu towarzyszył znaczny poślizg, dochodzący w przypadku prezentowanego elementu do ponad 7 mm (rys. 4b).

Na rysunku 5 pokazano krzywe opisujące poślizg s w funkcji obciążenia V_{int} , charakteryzujące wybrane elementy ze stykiem niezbrojonym (rys. 5a) i zbrojonym (rys. 5b). Zwiększanie obciążenia prowadziło do wzrostu wzajemnych przemieszczeń pomiędzy podłożem i nadkładem, przy czym zmiana ta miała w przybliżeniu charakter liniowy do momentu zarysowania styku, które następowało przy niewielkim poślizgu, nieprzekraczającym 0,01–0,02 mm. W elementach serii L30/30 przemieszczenia w momencie zarysowania wynosiły $s_{cr} = 0,004-0,012$ mm. W przypadku modeli serii L30/50 wartości te były około trzykrotnie większe ($s_{cr} = 0,012-0,021$ mm), jednak elementy te cechowały również większe siły niszczące – średnio o 210–220% (elementy ze stykiem gładkim) oraz 74% (elementy ze stykiem szorstkim).

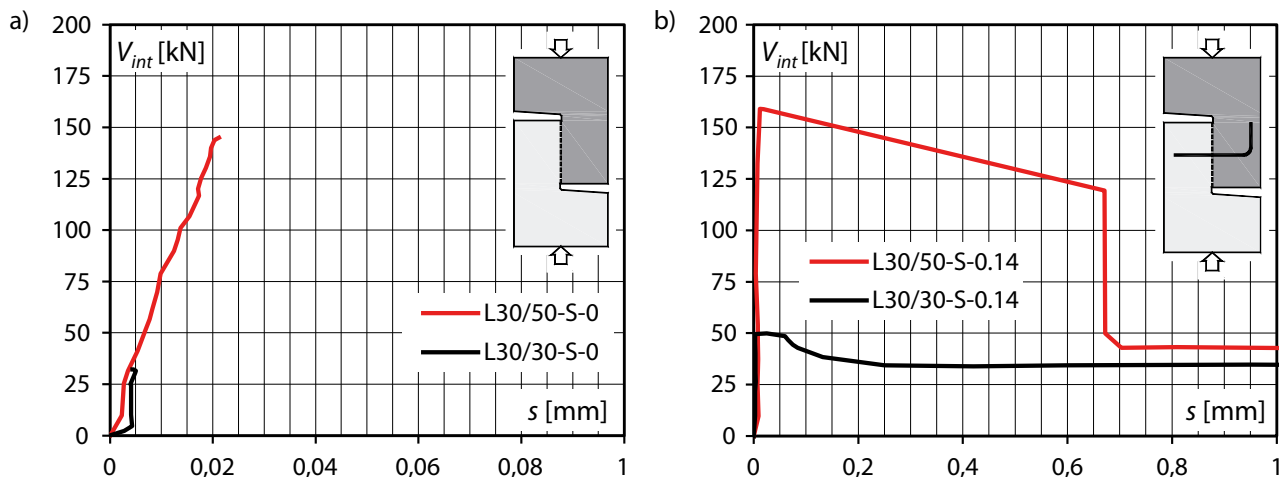
Zastosowane zbrojenie zespalające było zbyt słabe, aby zapewnić skuteczne skrępowanie styku, skutkiem czego po zarysowaniu następował spadek rejestrowanej siły, czemu towarzyszył znaczny poślizg. Zniszczenie miało jednak charakter ciągliwy a połączenie charakteryzowało się pewną nośnością rezydualną F_{res} , która wynosiła około 27–35 kN. Całkowite zniszczenie połączenia pomiędzy podłożem i nadkładem wynikało z zerwania zbrojenia, do którego dochodziło przy znacznym poślizgu wynoszącym nawet do 12 mm.

3.2. Odkształcenia zbrojenia poprzecznego

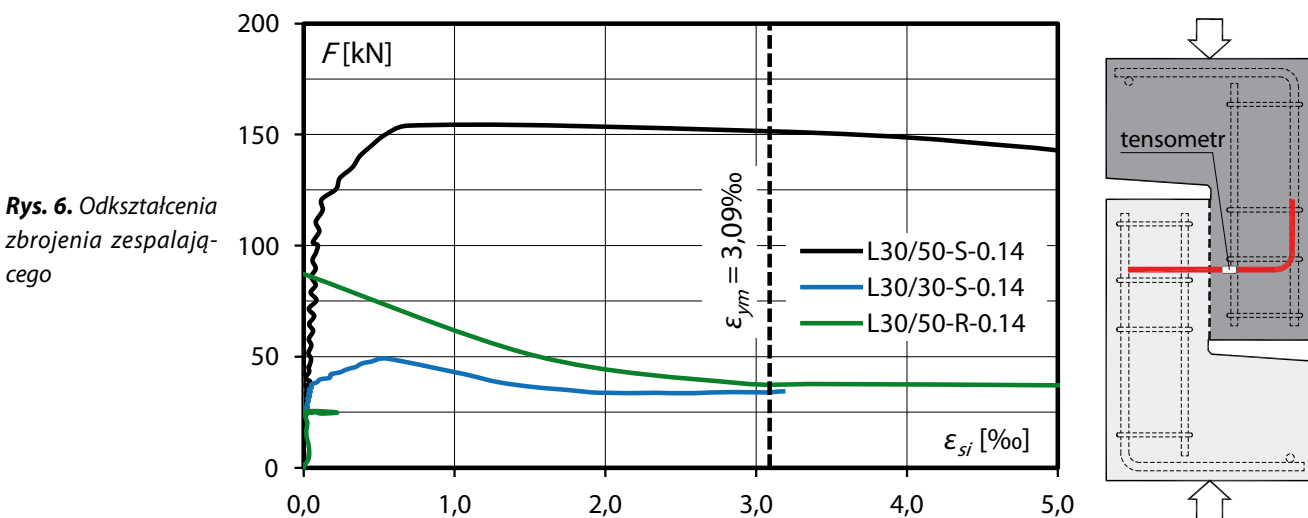
Wyniki pomiarów odkształceń zbrojenia zespalającego, rejestrowanych w sąsiedztwie płaszczyzny zespolenia pokazano na rysunku 6. Przez większą część badania odkształcenia te były bliskie zera. W przypadku elementu z powierzchnią bruzdowaną (L30/50-R-0.14) zauważalny wzrost rejestrowanych odkształceń nastąpił dopiero po osiągnięciu obciążenia



Rys. 4. Rozwój zarysowania styku wybranych modeli: a) L30/50-S-0, b) L30/50-S-0.14 (wartości w nawiasach oznaczają czas mierzony od momentu zarysowania styku)



Rys. 5. Zależności obciążenie-poślizg charakteryzujące wybrane elementy: a) ze stykiem niezbrojonym, b) ze stykiem zbrojonym



Rys. 6. Odształcenia zbrojenia zespalającego

maksymalnego, gdy styk uległ zarysowaniu. W ciągu jednej sekundy nastąpił wzrost odkształceń o ponad 1,5‰, czemu towarzyszył spadek siły z 87,0 do 57,5 kN. W przypadku elementów ze stykami szlifowanymi (L30/50-S-0.14 i L30/30-S-0.14) obserwowano natomiast stopniowe włączanie się zbrojenia do współpracy jeszcze przed osiągnięciem obciążenia maksymalnego. Odształcenia, jakie zarejestrowano bezpośrednio przed zarysowaniem, wynosiły około 0,6–0,7‰, co odpowiadało naprężeniom nieprzekraczającym 20% granicy plastyczności. Pomiary te potwierdziły spostrzeżenia wskazane wcześniej m.in. w pracach [7, 8], w których zwrócono uwagę na niejednoczesność działania sił adhezji i mechanizmów związanych ze współpracą zbrojenia poprzecznego.

Po zarysowaniu styku następował gwałtowny wzrost odkształceń zbrojenia, które musiało przejąć siły wynikające początkowo z rozwierania styku (wskutek nachodzenia na siebie ziaren kruszywa naturalnego) a następnie dominującego efektu dyblowania zbrojenia. Wskutek przeginięcia zbrojenia ulegało ono znacznym odkształceniom i w konsekwencji dochodziło do jego zerwania. Do uplastycznienia zbrojenia ($\epsilon_{ym} = 3,09‰$) dochodziło przy poślizgu wynoszącym około 0,5 mm (powierzchnia szlifowana) oraz 0,7 mm (powierzchnia

bruzdowana), co potwierdza bardzo ograniczony efekt zażebienia kruszywa w rozważanych badaniach.

3.3. Nośności eksperymentalne

Siły niszczące F_{exp} , a także pozostałe wielkości charakterystyczne, takie jak nośności rezydualne F_{res} czy poślizg przy zarysowaniu s_{cr} i zerwaniu zbrojenia s_{ult} zestawiono w tabeli 3. Można zauważyć, że zmianie wytrzymałości nadkładu betonowego z 51,6 do 32,2 MPa towarzyszył spadek naprężeń granicznych, który sięgał 75% (elementy z powierzchnią bruzdowaną) do nawet 230% (elementy z powierzchnią szlifowaną). Było to skutkiem dużego zróżnicowania wytrzymałości na rozciąganie obu nadkładów – wytrzymałość betonu serii L30/30 była niemal o 50% mniejsza niż w elementach serii L30/50, co przełożyło się na wielkość sił adhezji działających przed zarysowaniem styku. W przypadku elementów zbrojonych pojedynczym prętem $\varnothing 8$ zmiana była jednakowa przy obu rodzajach powierzchni i wynosiła 75%.

Analizując uzyskane wyniki, można stwierdzić, że obróbka powierzchni poprzez bruzdowanie nie zawsze prowadziła do zwiększenia nośności styku. Pomimo tego,

Tabela 3. Porównanie nośności eksperymentalnych i odpowiadających im przemieszczeń styku

| Oznaczenie elementu | Seria L30/50 | | | | | | Seria L30/30 | | | | | |
|---------------------|-----------------|----------------|---------------|-----------------|----------------|---------------|-----------------|----------------|---------------|-----------------|----------------|---------------|
| | Styk szlifowany | | | Styk bruzdowany | | | Styk szlifowany | | | Styk bruzdowany | | |
| | L30/50-S-0 | L30/50-S-0 bis | L30/50-S-0.14 | L30/50-R-0 | L30/50-R-0 bis | L30/50-R-0.14 | L30/30-S-0 | L30/30-S-0 bis | L30/30-S-0.14 | L30/30-R-0 | L30/30-R-0 bis | L30/30-R-0.14 |
| F_{exp} [kN] | 143,0 | 86,0 | 154,0 | 135,0 | 74,0 | 87,0 | 32,5 | 38,3 | 50,0 | 51,5 | 68,5 | 50,0 |
| s_{cr} [mm] | 0,021 | 0,012 | 0,012 | 0,016 | 0,018 | 0,020 | 0,004 | 0,004 | 0,004 | 0,006 | 0,012 | 0,007 |
| F_{res} [kN] | | | 35,1 | | | 27,2 | | | 32,4 | | | 33,4 |
| s_{ult} [mm] | | | 7,268 | | | 11,510 | | | 11,848 | | | 6,973 |

F_{exp} – nośność eksperymentalna, F_{res} – nośność rezydualna, s_{cr} – przemieszczenie w styku przy zarysowaniu, s_{ult} – poślizg przy zerwaniu prętów

że powierzchnia charakteryzowała się większą szorstkością, w przypadku serii L30/50 stwierdzono obniżenie sił niszczących o około 10–43%. Przyczyn takiego stanu rzeczy należy upatrywać w możliwym uszkodzeniu struktury betonu. W wyniku inwazyjnego bruzdowania w podłożu mogło dojść do rozwoju mikrorys na styku ziaren kruszywa i matrycy jak również spękania ziaren. Przypuszczenie to wynika z obserwowanego sposobu zniszczenia modeli z powierzchnią bruzdowaną – płaszczyzna zniszczenia przecinała bowiem warstwę podłoża, co jest widoczne na rysunkach 7b i 7d.

W przypadku elementów serii L30/30, w których nadkład charakteryzował się niższą wytrzymałością niż beton podłoża, mechaniczne uszorstnienie powierzchni okazało się korzystne. Nośność elementów z powierzchnią bruzdowaną była średnio o niemal 70% wyższa od nośności modeli ze stykiem szlifowanym. Efekt był zatem odwrotny do obserwowanego w przypadku serii L30/50, na co wpływ mogła mieć znacznie mniejsza wytrzymałość na rozciąganie betonu nadkładu w serii L30/30 ($f_{lctm}/f_{ctm} = 0,61$). O nośności styków szlifowanych decydowały siły adhezji, zależne od wytrzymałości lekkiego betonu kruszywowego. Zwiększenie powierzchni zespolenia poprzez bruzdowanie wpłynęło przede wszystkim na wzrost adhezji mechanicznej, wskutek wnikięcia zaprawy w pory i nierówności podłoża [9].

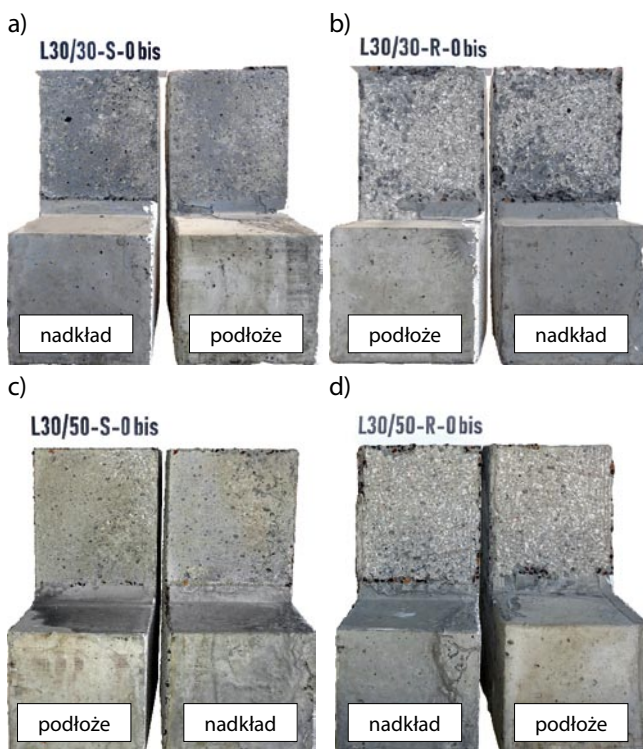
Zastosowane zbrojenie poprzeczne było zbyt małe, aby zapobiec spadkowi nośności styku po zarysowaniu. W zależności od sposobu przygotowania powierzchni i wytrzymałości betonu nadkładu, spadek nośności po zarysowaniu wynosił 76% (L30/50-S-0.14), 63% (L30/50-R-0.14), 30% (L30/30-S-0.14) i 22% (L30/30-R-0.14).

Wprowadzenie prętów wklejanych $\varnothing 8$ pozwoliło jednak zwiększyć nośność elementów ze stykiem gładkim o około 30 oraz 40%, odpowiednio w przypadku serii L30/50 i L30/30. Zbrojenie to okazało się jednak zbyt słabe, aby

wpłynąć na wartość sił niszczących elementy z powierzchniami bruzdowanymi.

3.4. Charakterystyka sposobu zniszczenia

Wytrzymałość zastosowanego nadbetonu warunkowała sposób zniszczenia elementów. W przypadku modeli ze stykiem szlifowanym, w których wytrzymałość nadkładu była mniejsza od wytrzymałości betonu podłoża (seria L30/30), płaszczyzna zniszczenia przecinała przypowierzchniową warstwę stwardniałego zaczynu cementowego – rysunek 7a. Zniszczenie przypominało „odklejenie” bloku wykonanego z lekkiego betonu kruszywowego, bowiem


Rys. 7. Widok wybranych modeli po zniszczeniu

miejscami uległa odsłonięciu szlifowana powierzchnia podłoża. Biorąc pod uwagę niską adhezję mechaniczną wynikającą ze sposobu przygotowania powierzchni, naturalne było zniszczenie w obrębie warstwy betonu lekkiego, który charakteryzował się o ponad 60% mniejszą wytrzymałością na rozciąganie.

W przypadku elementów serii L30/50 z powierzchnią szlifowaną płaszczyzna zniszczenia przecinała blok podłoża i miała chropowatą fakturę (rys. 7c). Zmiana sposobu zniszczenia wynikała z większej wytrzymałości na rozciąganie betonu nadkładu, która przewyższała o 16% wytrzymałość betonu podłoża, co wpłynęło również na zwiększoną adhezję specyficzną.

W przypadku elementów, w których powierzchnia styku była bruzdowana, płaszczyzna zniszczenia zawsze przecinała beton podłoża – niezależnie od wytrzymałości nadkładu betonowego – rysunki 7b i 7d. Było to następstwem uszkodzenia struktury betonu wskutek inwazyjnego przygotowania powierzchni.

W wyniku usuwania wierzchniej warstwy betonu przy użyciu dłuta udarowego dochodziło do formowania się rys na styku matrycy cementowej i kruszywa jak również pękania ziaren, co przełożyło się na osłabienie podłoża.

4. Podsumowanie

Prezentowane badania eksperymentalne dowiodły, że lekki beton z kruszywem popiołoporytowym może być stosowany jako nadkład w elementach z betonu zwykłego. Wykazały, że wpływ na nośność połączeń pomiędzy betonem zwykłym a lekkim betonem ma nie tylko wytrzymałość nadkładu, lecz także sposób przygotowania powierzchni. W przypadku elementów serii L30/30 zwiększenie średniej szorstkości powierzchni R_f z około 0,10 do 0,70 mm skutkowało wzrostem nośności styku o około 70%. Inwazyjny sposób przygotowania powierzchni poprzez bruzdowanie udarowe spowodował jednak obniżenie skuteczności zespolenia w przypadku elementów serii L30/50. Płaszczyzna zniszczenia przecinała przypowierzchniową warstwę betonu podłoża, która była osłabiona wskutek mikrospeknięcia struktury i uszkodzenia kruszywa. W rezultacie, pomimo zwiększenia szorstkości powierzchni, nośność połączenia uległa obniżeniu o około 10% względem elementów z powierzchnią szlifowaną. Wskazuje to na konieczność zwrócenia szczególnej uwagi na metodę przygotowania powierzchni, która nie powinna prowadzić do nadmiernej degradacji struktury betonu podłoża.

Badania potwierdziły również relację pomiędzy siłami wiązań adhezyjnych a wytrzymałością na rozciąganie lekkiego betonu kruszywowego. Dwukrotne zwiększenie tej wytrzymałości skutkowało wzrostem sił niszczących o około 40 i 70%, odpowiednio w przypadku elementów z powierzchnią bruzdowaną i szlifowaną.

Zastosowanie zbrojenia „zszywającego” o przekroju nieznacznie większym od minimalnego według [4] pozwoliło na zmianę zachowania styku ze sztywnego na ciągliwe. Dzięki temu zabiegowi połączenie charakteryzowało się nośnością rezydualną, co w przypadku rzeczywistych płyt umożliwiłoby redystrybucję sił na pozostałe obszary, w których nie doszło do zarysowania styku. Wprowadzenie zbrojenia pozwoliło również na zwiększenie nośności elementów ze stykiem szlifowanym (o około 30–40%), jednak okazało się niewystarczające do zwiększenia sił niszczących w przypadku elementów z powierzchnią bruzdowaną.

Zdaniem autorów stosowanie zbrojenia zespalającego jest konieczne, w celu zachowania wymaganego bezpieczeństwa konstrukcji i zapobieżeniu tzw. kruchemu zniszczeniu o charakterze gwałtownym. Dzięki współdziałaniu zbrojenia, po zarysowaniu styku i zerwaniu sił adhezji, połączenie pomiędzy elementem i nadkładem będzie charakteryzowało się nośnością rezydualną, która pozwoli na przeniesienie obciążeń w wyjątkowej sytuacji obliczeniowej. W badaniach nie stwierdzono równomiernego narastania odkształceń zbrojenia wraz ze wzrostem obciążenia elementów. W przypadku elementów ze stykami szlifowanymi rozciąganie w zbrojeniu zaczęło rejestrować dopiero przy obciążeniu stanowiącym około 60–70% nośności połączenia. Maksymalne naprężenia uzyskane bezpośrednio przed zarysowaniem nie przekraczały jednak 20% granicy plastyczności. W elemencie ze stykiem bruzdowanym siły rozciągające w zbrojeniu pojawiły się dopiero po zarysowaniu i wynikały z efektu dyblującego. Obserwacje te potwierdziły wcześniejsze spostrzeżenia [7], które wskazują na rozdzielność mechanizmów związanych z adhezją, tarciem, zazębianiem kruszywa czy dyblowaniem zbrojenia, co znalazło odzwierciedlenie w procedurach projektowych [5 i 6].

BIBLIOGRAFIA

- [1] Urban T., Gołdyn M., Krawczyk Ł., Strengthening of RC slabs against punching shear in theory and practice, *Archives of Civil Engineering* 67, 2021, str. 317–335
- [2] PN-EN 206+A2:2021-08: Beton – Wymagania, Właściwości Użytkowe, Produkcja i zgodność,
- [3] Gołdyn M., Urban T., Experimental Investigations on Interface between Ordinary and Lightweight Aggregate Concretes Cast at Different Times, *Materials* 14, 2021, str. 1664
- [4] Randl N., Zur Frage der Mindestbewehrung bei Aufbeton-Verbundfugen, *Beton- und Stahlbetonbau* 105, 2010, str. 608–611
- [5] prEN 1992-1-1 Eurocode 2: Design of Concrete Structures – Part 1-1: General Rules – Rules for Buildings, Bridges and Civil Engineering Structures, 2022
- [6] fib Model Code 2010 – Final draft – tom 2, 2012, str. 377
- [7] Randl N., Wicke M., Schubübertragung zwischen Alt- und Neubeton. Experimentelle Untersuchungen, theoretischer Hintergrund und Bemessungsansatz, *Beton- und Stahlbetonbau* 95, 2000, str. 461–473
- [8] Fang Z., Jiang H., Liu A., Feng J., Li Y., Shear-friction behaviour on smooth interface between high-strength and lightweight concrete, *Magazine of Concrete Research* 72, 2020, str. 68–87
- [9] Halicka A., Studium stanu naprężeń i odkształceń w płaszczyźnie styku i strefie przypodporowej elementów zespolonych z udziałem betonów skurczowych i ekspansywnych, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin, 2007