

Advantages of using ultra-high-performance concrete (UHPC) link slabs as an alternative to dowel bar joints in rigid road surfaces

Zalety wykorzystania płyt łącznikowych z betonu o bardzo wysokiej wytrzymałości (UHPC) jako alternatywy połączeń dyblowych w sztywnych nawierzchniach drogowych

Abstract: The presented experimental study evaluates the possibility of replacing rigid pavement joints by a link slab made of ultra-high-performance concrete (UHPC) and shows advantages of it. Connection between the link slab and the pavement is provided by using shear studs. The tests focusing on evaluation of the load-deflection performance of UHPC link slabs was done using full-scale models. Twelve model structures containing UHPC link slabs were fabricated, tested and compared with specimens containing steel dowel bars. Parameters investigated in this study included link slab length and thickness, the number of shear studs, and joint width. The experimental results showed less deflection at the joint face, especially when the link slabs were 450 mm long and 70 mm thick, displaying a reduction in deflection by 47.46%-61.54% compared with steel dowel joint, at the load of 60 kN. Moreover the UHPC link slab ultimate load and relative deflection were more sensitive to changes in link slab thickness and length. Compared with model including shear stud connector, the ultimate load increased by 38.24%-88.52% and the relative deflection *RD* decreased by 56.12%-81.81% when the UHPC link slab was 450-mm-long and 70-mm-thick. Load transfer efficiency *LTE* of specimens with UHPC link slabs was slightly greater than that of specimens with dowel bars, which was in the range of 70%-90%. The values of *LTE* were more advantageous when two shear studs were used instead of one shear stud on each side. Mode of failure of specimens with UHPC link slabs consisted in shearing or flexural cracking near the joint region. The study indicated that UHPC link slabs could be a superior substitute for the traditional steel dowels in rigid pavements.

Keywords: epoxy-coated steel dowel bars, JPCP, link slab, *LTE*, relative deflection, sustainability, UHPC.

Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki eksperymentu badawczego polegającego na zastąpieniu stalowych dybli jako łączników betonowych płyt zwykłych w sztywnych nawierzchniach drogowych, płytami łącznikowymi z betonu o bardzo wysokiej wytrzymałości UHPC (ang. *ultra high performance concrete*). Do połączenia płyt łącznikowych UHPC z sąsiednimi płytami z betonu zwykłego zastosowano ścinane dyble. Badania realizowano na modelach naturalnej wielkości. Celem eksperymentu było określenie charakterystyki obciążenie-przemieszczenie dla płyt łącznikowych z betonu UHPC. Wykonano dwanaście stanowisk z próbkami zawierającymi betonowe płyty nawierzchni sztywnej połączone płytą z betonu wysokowartościowego UHPC, zróżnicowaną w układzie pod względem długości, grubości płyty, liczby dybli ścinanych oraz szerokości szczeliny złączeniowej. Wyniki przeprowadzonych eksperymentów obciążeniowych płyty z betonu UHPC porównano odpowiednio z wynikami testów na próbkach zawierających jako łączniki stalowe dyble. Na podstawie przeprowadzonych badań wyznaczono dla każdego stanowiska badawczego krzywe obciążenie-przemieszczenie uwzględniając przy tym różne konfiguracje wymiarów płyty łącznikowej UHPC. W przypadku połączenia płyt betonowych z wykorzystaniem jako łączników płyty UHPC wykazano ich mniejsze ugięcie pod wpływem obciążenia monotonicznego (szczególnie w pobliżu krawędzi łączenia) niż przy zastosowaniu do tego celu stalowych dybli. Dla płyt łącznikowych UHPC o długości 450 mm i grubości 70 mm, przy obciążeniu 60 kN, odnotowano mniejsze ugięcie o 47,46-61,54% w porównaniu do połączenia płyt stalowymi dyblami. Nośność graniczna i ugięcie względne płyty łącznikowej wykonanej z betonu UHPC wykazywały większą podatność na zmiany zarówno jej grubości jak i długości. W porównaniu do próbek zawierających połączenia płyt za pomocą dybli, w przypadku płyty łączącej z betonu UHPC o długości 450 mm i grubości 70 mm jej nośność graniczna wzrosła o 38,24%-88,52%, a ugięcie względne *RD* zmniejszyło się o 56,12-81,81%. Wskaźnik efektywności przenoszenia obciążenia *LTE* dla stanowisk zawierających płyty łącznikowe z betonu UHPC był nieco wyższy niż w przypadku próbek zawierających połączenia dyblowe i mieścił się w zakresie 70-90%. Wartości tego wskaźnika były korzystniejsze w przypadku zastosowania dwóch łączników ścinanych zamiast jednego po każdej stronie płyty. Mechanizm zniszczenia próbek zawierających płyty łącznikowe z betonu UHPC uwzględniał ścinanie lub zginanie płyt w pobliżu krawędzi łączenia. Badanie wykazało, że płyty łącznikowe z betonu UHPC mogą być alternatywnym rozwiązaniem do zastosowania w sztywnych nawierzchniach betonowych w stosunku do tradycyjnych połączeń stalowymi dyblami.

Słowa kluczowe: *LTE*, nawierzchnia betonowa ze szczelinami poprzecznymi, płyta łącznikowa, stalowe dyble pokryte żywicą epoksydową, trwałość, UHPC, ugięcie względne.

¹⁾ University of Al-Qadisiyah, Department of Roads and Transport Engineering, 100 Aljamaa St., 58001 Al-Diwaniyah, Iraq; haider.aljelawy@qu.edu.iq (✉)

²⁾ Department of Roads and Bridges, 730 Court St., 58001 Al-Diwaniyah, Iraq; alaaalhijamee@gmail.com

³⁾ University of Al-Qadisiyah, Department of Roads and Transport Engineering, 100 Aljamaa St., 58001 Al-Diwaniyah, Iraq; mohammed.mousa@qu.edu.iq

⁴⁾ University of Al-Qadisiyah, Department of Civil Engineering, 100 Aljamaa St., 58001 Al-Diwaniyah, Iraq; muthana.muhaishin@qu.edu.iq

1. INTRODUCTION

Jointed plain concrete pavement (JPCP) is a common rigid pavement type used in highway and airport engineering. Transverse joints are usually introduced to control stresses and strains generated by temperature and moisture variations, reducing the need for future repairs. These joints are usually dowelled using epoxy-coated steel bars. The dowel bars distribute loads between adjacent slabs and maintain their horizontal and vertical levels along the pavement. There are two major issues with steel dowel bars. The first is dowel looseness, which is caused by repeated traffic loads and dowel corrosion, which in turn leads to a decrease in dowel surface area, resulting in joint distress. The other issue is dowel vertical and/or horizontal misalignment due to incorrect placement during installation, generating stresses and restrictions in pavement movement. These dowel issues cause various problems in JPCP, such as joint faulting and spalling, transverse cracking and corner breaks, which lead to early pavement deterioration [1]. Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) bars were used as an alternative to conventional dowel bars due to their smooth surface and the fact that they do not require lubrication to conform to the dowel pull-out testing requirements [1, 2]. This material is also corrosion-resistant and its bond with concrete is weaker, which results in less restriction in pavement movement, leading to lower values of locked-up stress. Although GFRP bars have lower long-term maintenance cost, their initial cost is greater by approximately 50% than that of standard steel bars [3]. However, GFRP bars are not frequently considered an ideal solution due to their weakness in the transverse direction. Additionally, an increase in GFRP dowel size is needed to provide flexural rigidity comparable to that of steel dowel bars, leading to increased cost. Research on GFRP-dowelled pavement joints as an alternative to steel-dowelled joints has already been presented in the literature [4, 5].

The current study suggests using ultra-high-performance concrete (UHPC) link slabs as a sustainable material to connect adjacent slabs with no visible expansion joints in JPCP, and investigates the effect of different geometric configurations on joint behavior. This technique has been utilized in bridges, since the existence of transverse

1. WPROWADZENIE

Nawierzchnia betonowa ze szczelinami poprzecznymi JPCP (ang. *Jointed Plain Concrete Pavement*) jest popularnym typem nawierzchni drogowej sztywnej stosowanym w inżynierii autostrad i lotnisk. Szczeliny te są zwykle stosowane w celu kontrolowania stanu naprężeń i odkształceń generowanych przez zmiany temperatury i wilgotności w nawierzchni, zmniejszając w konsekwencji liczbę potrzebnych jej napraw. Do łączenia płyt nawierzchniowych używane są zwykle stalowe dyble pokryte żywicą epoksydową. Dyble te rozkładają obciążenia między sąsiednimi płytami i utrzymują je w poziomie oraz w pionie wzdłuż nawierzchni. Podczas obciążania płyt pojawiają się jednak dwa główne zdarzenia krytyczne związane ze stosowaniem stalowych dybli jako łączników. Pierwszym z nich jest poluzowanie się dybli w trakcie eksploatacji, spowodowane cyklicznymi wielokrotnymi obciążeniami oraz ich korozją. W rezultacie na skutek zmniejszenia powierzchni oddziaływania dybli jako łączników następuje uszkodzenie nawierzchni. Inną istotną kwestią jest niewspółosiowość położenia dybli w pionie i/lub poziomie na skutek ich nieprawidłowego umieszczenia podczas montażu, co generuje powstawanie dodatkowych naprężeń w płytach nawierzchniowych. Opisane problemy techniczne przy eksploatacji dybli jako łączników płyt powodują różne usterki nawierzchni sztywnej wyposażonej w szczeliny poprzeczne skurczowe, takie jak uskoki i odpryski, pęknięcia poprzeczne oraz pęknięcia narożne, które prowadzą do pogorszenia jej stanu jakościowego we wczesnym etapie użytkowania [1]. Z powodu tych przyczyn jako alternatywa dla konwencjonalnych dybli w łączeniu nawierzchniowej płyty betonowej z płytą łącznikową z betonu UHPC do badań zostały użyte pręty z polimeru wzmocnionego włóknem szklanym GFRP (ang. *Glass Fibre Reinforced Polymer*). Ze względu na ich gładką powierzchnię i brak konieczności smarowania spełniają one wymagania pod kątem testu wyrywania dybli [1, 2]. Materiał kompozytowy, z którego wykonano pręty jest również odporny na korozję, a jego wiązanie z betonem jest słabsze, co skutkuje mniejszym ograniczeniem sprężystości nawierzchni i prowadzi do uzyskania niższych wartości naprężenia szczątkowego. Chociaż pręty GFRP wykazują w okresie długoterminowym niższe koszty utrzymania, początkowy koszt ich zastosowania jest niestety o około 50% wyższy niż w przypadku standardowych dybli stalowych [3]. Pręty

expansion joints is a vital cause of bridge damage. Therefore, it is preferable to eliminate such joints using a link slab while allowing the bridge to function properly. UHPC was selected as a link slab due to its superior properties, such as high compressive and tensile strength, low shrinkage, high durability and ductility, and high resistance to corrosion [6-8]. The first such link slab was implemented in 2005 [9] in the state of North Carolina; it was constructed following the design procedures by Caner and Zia [10] and Gastal and Zia [11]. Since 2015, there has been a significant demand for research on UHPC [12]. Several studies investigated the use of UHPC link slabs in bridge expansion joints [13, 14]. However, studies on the use of such slabs in JPCP are scarce. In a recent study, Kinaine and Al-Jelawy [15] demonstrated the superiority of UHPC link slab in JPCP over conventional dowelled joints. However, their study was limited in terms of the parameters that affect joint performance. In the study presented herein, an experimental program is focused on investigation of the use of UHPC link slabs as an alternative to the traditional steel dowels in pavement joints. The effect of different geometric configurations on joint behavior is investigated. The study investigates the relative deflection of UHPC link slab joints, load transfer mechanism, and load-deflection behavior at the joint face, compared with steel-dowelled joints. The studied geometric variables are: joint width, link slab length and thickness, and the number of shear studs used to connect the link slab to the main pavement.

2. EXPERIMENTAL PROGRAM AND SET-UP

Twelve specimens were constructed using continuous UHPC link slab placed across a hidden expansion joint. Specimen dimensions were similar to those adopted in the study by Kinaine and Al-Jelawy [15] to set a basis for comparison; the selected dimensions satisfy the American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) recommendations (1993) for dowel bar spacing and slab depth requirements [16]. Table 1 depicts the testing matrix. A specimen consisted of two concrete blocks (loaded and unloaded) each with the width of 300 mm, length of 300 mm, and thickness of 200 mm.

GFRP nie są jednak często uważane za idealne rozwiązanie ze względu na osłabienie ich skuteczności oddziaływania w kierunku poprzecznym. Dodatkowo, aby zapewnić sztywność zginania porównywalną ze stalowymi dyblami, konieczne jest zwiększenie rozmiarów prętów GFRP, co prowadzi do dodatkowego wzrostu ich kosztów eksploatacji. Podobne badania nad połączeniami płyt nawierzchni sztywnych zawierającymi jako łączniki pręty wykonane z GFRP – stanowiące alternatywę dla połączeń zawierających dyble stalowe – zostały przedstawione w [4, 5]. Przeprowadzone testy zalecają wykorzystanie płyt łączących z betonu o bardzo wysokiej wytrzymałości (UHPC). Są one uznawane za odpowiedni materiał do łączenia sąsiednich płyt, który nie pozostawia widocznych szczelin dylatacyjnych, jak to ma miejsce w przypadku nawierzchni betonowej ze szczelinami poprzecznymi. W ramach testów przeanalizowano również wpływ różnych konfiguracji geometrycznych płyt łącznikowych z UHPC na zachowanie łączy. Technika ta jest w praktyce wykorzystywana przy budowie mostów z uwagi na występowanie na ich nawierzchniach szczelin dylatacyjnych poprzecznych, gdzie pęknięcia na łączeniach płyt są często istotną przyczyną ich uszkodzeń. Lepszym rozwiązaniem umożliwiającym prawidłowe funkcjonowanie mostu jest więc eliminacja połączeń dyblowych w szczelinach dylatacyjnych między płytami i zastąpienie ich płytą łączącą z betonu UHPC. Beton wysokowartościowy jest coraz częściej stosowany w nawierzchniach sztywnych jako materiał płyty łączącej ze względu na jego doskonałe właściwości, takie jak: wysoka wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie, niski skurcz, wysoka trwałość i plastyczność oraz wysoka odporność na korozję [6-8]. Pierwsza tego rodzaju płyta łącząca została wdrożona w 2005 roku [9] w stanie Karolina Północna. Została ona zbudowana zgodnie z procedurami projektowymi opracowanymi przez Caner i Zia [10] oraz Gastal i Zia [11]. Począwszy od 2015 roku znacznie wzrosło zapotrzebowanie na wyniki badań wytrzymałościowych betonu UHPC [12]. Kilka analiz opisanych w zgromadzonej przez autorów literaturze skupiało się na zastosowaniu płyt łączących z betonu UHPC w szczelinach dylatacyjnych mostów [13, 14]. Natomiast wyniki badań dotyczących stosowania takich płyt w nawierzchniach betonowych ze szczelinami poprzecznymi są rzadziej dostępne. W niedawno opublikowanym opracowaniu Kinaine i Al-Jelawy [15] wykazali większą skuteczność zastosowania płyty łączącej z betonu UHPC w nawierzchniach

Specimens with dowel bars (C-10-DB & C-20-DB), which had been tested by Kinaine and Al-Jelawy [15], were used as reference in the presented study. The designation used herein are as follows: "RP" refers to reactive powder concrete (RPC) or, alternatively, UHPC; "DB" refers to reference specimens with dowel bars (from previous study [15]); "S1" and "S2" refer to the number of shear studs used on each side of the tested specimens; "10" and "20" refer to the width of the joint; "C" refers to ordinary concrete; "450" and "340" refer to the length of the UHPC link slab; "70" and "100" refer to link slab thickness.

For the majority of specimens, the link slab length was equal to the length of dowel bar used by Kinaine and Al-Jelawy [15], which was 450 mm; in some specimens this length was reduced to 340 mm. Link slab thickness was determined to be equal to half of the slab thickness (100 mm) based on prior investigations on link slabs in expansion joints in bridges. Also, for most specimens, link slab thickness of 70 mm was adopted. The reduction in link slab dimensions for some specimens was intended to enable a potential reduction in the UHPC material cost and provide an opportunity to investigate the effect of size reduction on the performance of the joint. In those specimens, the length and thickness of the link slab were reduced by 25% and 30%, respectively. Fig. 1 depicts the experimental test setup, which simulates the actual pavement behavior. The unloaded block is placed over a solid foundation to allow the loaded block to deform in the empty space below. Both concrete blocks are supported and attached to the steel base of the testing machine. A monotonic load is applied to the loaded concrete block using an L-shaped frame positioned over the center of the joint. Thick plates are placed over the loaded and unloaded blocks and secured by steel rods, which are welded to the base of testing machine to prevent lateral, vertical, and/or horizontal movement above the testing machine base. A load cell is set directly below the loaded block at the outer edge to act as an initial support, prevent specimen from tilting and measure the load received by the block. The adopted configuration follows the setup used in testing of joints with dowel bars, which is outlined in the literature [17-19].

betonowych ze szczelinami poprzecznymi nad konwencjonalnymi połączeniami dyblowymi. W ich analizie wykorzystano jednak ograniczoną liczbę parametrów mających wpływ na jakość łączenia płyt. Eksperyment doświadczalny opisany w niniejszym artykule koncentrował się na sprawdzeniu możliwości zastąpienia stalowych łączników używanych tradycyjnie do spajania sztywnych płyt nawierzchniowych, elementami łącznikowymi w postaci płyt z betonu o bardzo wysokiej wytrzymałości UHPC. Badano wpływ różnych konfiguracji geometrycznych płyty łączącej na jej zachowanie pod obciążeniem. Ponadto zmierzono względne ugięcie na połączeniu wykonanym za pomocą płyty UHPC, określono mechanizm przenoszenia obciążenia oraz zbadano zależność obciążenie-przemieszczenie w porównaniu z połączeniami dotychczas stosowanymi w postaci dybli stalowych. Podczas eksperymentu wyznaczono parametry związane z funkcjonowaniem płyty łączącej z wysokowartościowego betonu UHPC: szerokość łączenia, długość i grubość płyty oraz liczbę dybli ścinanych użytych do połączenia z nawierzchnią sztywną.

2. PROGRAM EKSPERYMENTALNY I OPRZYRZĄDOWANIE

Wykonano dwanaście modeli w skali rzeczywistej z zastosowaniem płyty łączącej z betonu UHPC ułożonej w kierunku poprzecznym do skurczowej szczeliny dylatacyjnej. W celu porównania wyników eksperymentu wymiary płyt przyjęto podobne do użytych w badaniu Kinaine i Al-Jelawy [15]. Są one zgodne z zalecenia Amerykańskiego Stowarzyszenia Urzędników ds. Autostrad i Transportu (AASHTO) (1993) dotyczącymi rozstawu dybli oraz grubości płyty [16]. Tablica 1 przedstawia wymiary geometryczne badanych próbek. Stanowisko badawcze składało się z dwóch betonowych bloków (obciążonego i nieobciążonego), każdy o szerokości 300 mm, długości 300 mm i grubości 200 mm. Jako modele referencyjne posłużyły stanowiska zawierające płyty łączone dyblami (C-10-DB oraz C-20-DB), które zostały wcześniej przetestowane przez Kinaine i Al-Jelawy [15]. W Tabl. 1 w celu identyfikacji poszczególnych próbek zastosowano następujące oznaczenia: „RP” odnosi się do betonu z proszku reaktywnego (RPC) lub alternatywnie do betonu o bardzo wysokiej wytrzymałości (UHPC); „DB” odnosi się do próbek referencyjnych zawierających dyble (z poprzedniego badania [15]); „S1” i „S2” odnoszą się do liczby łączników ścinanych stosowanych po każdej stronie próbek; „10”

Vertical deflection of the UHPC link slab was measured using dial gauges at distances of 0 mm, 25 mm, 50 mm and 75 mm from joint face. All specimens were cast in two stages. The initial stage consisted in casting both conventional (loaded and unloaded) concrete blocks followed by shear stud installation (diameter of 19 mm, length of 70 mm) in the middle of the region adjacent to the debonded zone (red-colored line in Fig. 1a) to function as a connection between the conventional pavement blocks and UHPC link slab. The debonded zone, in which the UHPC link slab and conventional concrete blocks are separated with duct tape as depicted in Fig. 2, accounts for 50% of the length of UHPC link slab on each side. The second stage involved casting the UHPC link slab using appropriate mixture proportions. It is noteworthy that shear studs in the proposed setup would restrict the joint horizontal movement during contraction and expansion. However, this restriction is dealt with by introduction of the debonded zone, which relieves the stresses and allows insignificant upward movement of the link slab during joint contraction. This was considered acceptable when similar expansion joint was used in bridges [13, 14].

i „20” odnoszą się do szerokości połączenia; „C” odnosi się do zwykłego betonu; „450” i „340” odnoszą się do długości płyty łączącej wykonanej z betonu UHPC; „70” i „100” odnoszą się do grubości płyty łączącej.

W przypadku większości stanowisk badawczych długość płyty łącznikowej była równa długości dybla zastosowanego przez Kinaine i Al-Jelawy [15] i wynosiła 450 mm; w niektórych próbkach długość ta została zmniejszona do 340 mm. W oparciu o wcześniejsze badania dotyczące płyt łącznikowych stosowanych w szczelinach dyktacyjnych nawierzchni mostów grubość testowanej płyty UHPC została ustalona jako równa połowie grubości płyty (100 mm). Finalnie dla większości stanowisk badawczych przyjęto grubość płyty łącznikowej 70 mm. Zmniejszenie wymiarów płyty łączącej w niektórych próbkach miało na celu umożliwienie potencjalnej redukcji kosztów materiałowych zastosowania betonu UHPC i zapewnienie możliwości zbadania wpływu skrócenia na wytrzymałość łączenia. W próbkach tych długość i grubość płyty łączącej zostały zmniejszone odpowiednio o 25% i 30%.

Table 1. Test specimen matrix

Tablica 1. Zestawienie badanych próbek

Specimen ID Identyfikator próbki	Specimen loaded and unloaded blocks Próbka w postaci bloków obciążonych i nieobciążonych			Link slab Płyta łącznikowa			No. of shear studs Liczba łączników ścińcanych [–]	Joint width Szerokość szczeliny na połączeniu [mm]
	Width Szerokość [mm]	Length Długość [mm]	Thickness Grubość [mm]	Width Szerokość [mm]	Length Długość [mm]	Thickness Grubość [mm]		
RPC100-450-10-S1	300	300	200	300	450	100	1	10
RPC100-450-10-S2	300	300	200	300	450	100	2	10
RPC100-450-20-S1	300	300	200	300	450	100	1	20
RPC100-450-20-S2	300	300	200	300	450	100	2	20
RPC70-450-10-S1	300	300	200	300	450	70	1	10
RPC70-450-10-S2	300	300	200	300	450	70	2	10
RPC70-450-20-S1	300	300	200	300	450	70	1	20
RPC70-450-20-S2	300	300	200	300	450	70	2	20
RPC70-340-10-S1	300	300	200	300	340	70	1	10
RPC70-340-10-S2	300	300	200	300	340	70	2	10
RPC70-340-20-S1	300	300	200	300	340	70	1	20
RPC70-340-20-S2	300	300	200	300	340	70	2	20

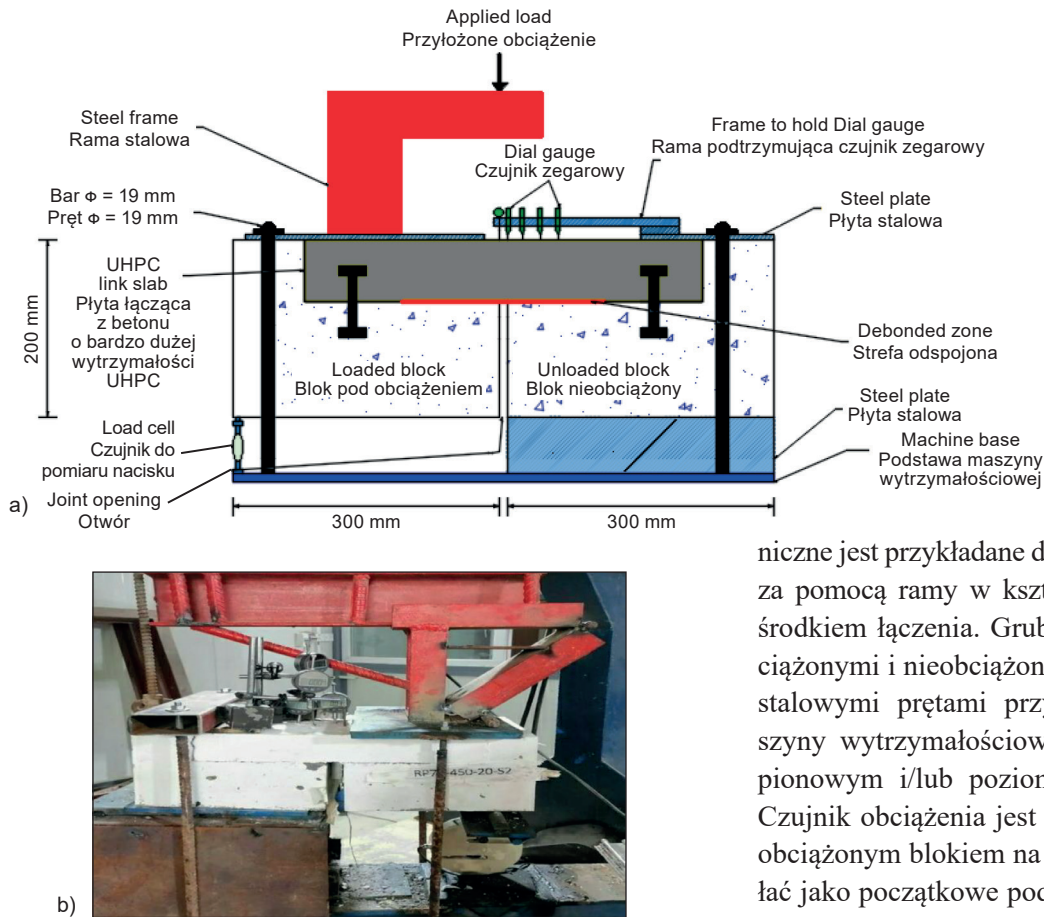


Fig. 1. Test setup used for specimens with UHPC link slabs:
a) schematic view; b) laboratory station with specimen mounted
Rys. 1. Stanowisko badawcze do testowania płyt łącznikowych
z betonu UHPC: a) widok schematyczny; b) stanowisko
z zamontowaną próbką

Rys. 1 przedstawia konfigurację testową, w ramach której przeprowadzana jest symulacja rzeczywistego zachowania nawierzchni sztywnej. Nieobciążony blok jest umieszczony nad stałym fundamentem, aby umożliwić obciążonemu blokowi odkształcenie się w pustej przestrzeni poniżej. Oba bloki betonowe są podparte i przymocowane do stalowej podstawy maszyny wytrzymałościowej. Obciążenie monotoniczne jest przykładane do obciążonego bloku betonowego za pomocą ramy w kształcie litery L umieszczonej nad środkiem łączenia. Grube płyty są umieszczane nad obciążonymi i nieobciążonymi blokami oraz zabezpieczane stalowymi prętami przyspawanymi do podstawy maszyny wytrzymałościowej, tak aby zapobiec bocznym, pionowym i/lub poziomym ruchom nad tą podstawą. Czujnik obciążenia jest zamontowany bezpośrednio pod obciążonym blokiem na zewnętrznej krawędzi, aby działać jako początkowe podparcie, zapobiegać przechylaniu się próbki i mierzyć obciążenie wywierane na blok. Przyjęta konfiguracja stanowiska badawczego jest zgodna ze stosowaną w testach łączeń dyblowych i opisaną w literaturze [17-19].



Fig. 2. Casting an UHPC link slab
Rys. 2. Odlewanie płyty łącznikowej z betonu o bardzo wysokiej wytrzymałości UHPC

3. MATERIAL PROPERTIES

3.1. ORDINARY CONCRETE

The testing specimens were fabricated and cast at the Laboratory of Structures located in the University of Al-Qadisiyah in Iraq. The compressive strength of conventional concrete was determined using three cylindrical samples according to ASTM C39 [20]. The average concrete compressive strength was determined to be 24 MPa at 28 days and 31 MPa on the specimen testing day.

3.2. UHPC LINK SLAB

UHPC has been used in a wide range of civil engineering applications due to its durability and superior mechanical characteristics, and research on its performance has expanded in recent years [12, 21-26]. Compressive strength of UHPC with steel fiber is typically greater than 140 MPa, depending on curing conditions and mixture proportions [27]. The UHPC used in the present study had an average compressive strength of 99 MPa at 28 days, while its average compressive strength on the test day equaled 118 MPa. Mixture proportions of the UHPC used in the study are listed in Table 2.

Table 2. Mixture proportions of UHPC
Tablica 2. Proporcje składu mieszanki betonu UHPC

UHPC components Skład betonu UHPC	Quantity Ilość
Portland Cement (type 1) Cement portlandzki (typ 1)	1000 kg/m ³
Silica fume Pył krzemionkowy	25% by weight of cement 25% wagi cementu
Water/cement ratio Stosunek wody do cementu	0.2
Sand (particle size less than 0.6 mm) Piasek (wielkość cząstek poniżej 0,6 mm)	1000 kg/m ³
Steel fiber Włókno stalowe	2% of mixture volume 2% objętości mieszanki
Superplasticizer Superplastyfikator	2 liters (for 100 kg of binder*) 2 litry (na 100 kg spoiwa*)
*) binder = cement + silica fume spoiwo = cement + pył krzemionkowy	

Pionowe ugięcie płyty łączącej z betonu UHPC mierzono za pomocą mierników zegarowych w odległościach odpowiednio 0 mm, 25 mm, 50 mm i 75 mm od powierzchni łączenia. Wszystkie stanowiska badawcze były obsługiwane w dwóch etapach. Początkowy etap polegał na odlaniu zarówno konwencjonalnych (obciążonych i nieobciążonych) bloków betonowych, a następnie zainstalowaniu łączników ścinanych o średnicy 19 mm i długości 70 mm na środku obszaru przylegającego do strefy odspojonej (czerwona linia na Rys. 1a), tak aby mogły funkcjonować jako połączenie między konwencjonalnymi blokami nawierzchni sztywnej a płytą łączącą z UHPC. Strefa odspojona, w której płyta łącząca z UHPC i konwencjonalne bloki betonowe są oddzielone taśmą izolacyjną (Rys. 2), ma wymiar z każdej strony równy 50% długości płyty łączącej z betonu UHPC. Drugi etap polegał na odlaniu płyty łączącej z UHPC przy użyciu odpowiednich proporcji mieszanki z dodatkami chemicznymi. Warto zauważyć, że łączniki ścinane w proponowanej konfiguracji ograniczyłyby ruch poziomy łączenia podczas skurczu i rozszerzania. Utrudnienie to jest jednak rozwiązywane poprzez wprowadzenie strefy odspojonej, która łagodzi naprężenia i pozwala na nieznaczny ruch płyty łączącej w górę w momencie wystąpienia na łączeniu skurczu. Zjawisko to zostało także uznane za występujące i akceptowalne podczas stosowania podobnych szczelin dylatacyjnych w nawierzchniach mostowych [13, 14].

3. WŁAŚCIWOŚCI MATERIAŁU

3.1. ZWYKŁY BETON

Próbki do badań zostały wykonane i odlane w Laboratorium Konstrukcji znajdującym się na Uniwersytecie Al-Kadisijja w Iraku. Wytrzymałość na ściskanie betonu konwencjonalnego określono przy użyciu trzech próbek cylindrycznych zgodnie z ASTM C39 [20]. Średnia wytrzymałość betonu na ściskanie po 28 dniach twardnienia wyniosła 24 MPa oraz w dniu odlania próbki (bez okresu dojrzewania) 31 MPa.

3.2. PŁYTA ŁĄCZĄCA Z UHPC

Jak wiadomo beton o bardzo wysokiej wytrzymałości UHPC ze względu na swoją trwałość i doskonałe właściwości mechaniczne nadaje się do szerokiego zakresu zastosowań w inżynierii lądowej i wodnej. Ponadto w ostatnich latach rozwinięto na szeroką skalę badania nad jego wydajnością [12, 21-26]. Wytrzymałość

4. DISCUSSION OF EXPERIMENTAL RESULTS

4.1. OVERVIEW OF THE RESULTS

Monotonic loading was applied to all specimens until failure. Deflection readings of unloaded and loaded blocks were recorded using dial gauges during the test. Results obtained in the previous study for specimens with steel dowel bars [15] were first compared to those obtained for specimens with 450-mm-long link slabs and then to the results obtained for specimens with 340-mm-long link slabs. The ultimate loads and deflections of all specimens are summarized in Table 3. The findings indicated that the load-deflection behavior of specimens with UHPC link slab was influenced by the number of shear studs on each side, joint width, link slab thickness and link slab length.

Table 3. The ultimate load and deflection for specimens
Tablica 3. Graniczne obciążenie i ugięcie próbek z płytą UHPC

Test ID Identyfikator testu	Ultimate load [kN] Obciążenie maksymalne	Deflection at the ultimate load [mm] Ugięcie przy obciążeniu granicznym
RPC100-450-10-S1	82	0.51
RPC100-450-10-S2	90	0.55
RPC100-450-20-S1	86	0.66
RPC100-450-20-S2	92	0.64
RPC70-450-10-S1	101	0.46
RPC70-450-10-S2	115	0.51
RPC70-450-20-S1	95	0.51
RPC70-450-20-S2	94	0.46
RPC70-340-10-S1	74	0.45
RPC70-340-10-S2	75	0.43
RPC70-340-20-S1	74	0.47
RPC70-340-20-S2	72	0.50

4.2. LOAD-DEFLECTION COMPARISON BETWEEN SPECIMENS WITH UHPC LINK SLABS AND STEEL DOWELS

The load-deflection response of specimens with UHPC link slabs is compared with that of epoxy-coated dowel bar specimens from previous study [15] using two perspectives. The first compares deflection profile at several stations for a certain load level, and the second compares the response of load-deflection for specimens at the face of the joint. Figs 3 and 4 show the deflection profile of specimens with UHPC link slabs and dowel bars at the

betonów UHPC na ściskanie, zawierających np. włókna stalowe, jest zwykle większa niż 140 MPa, w zależności od warunków utwardzania i proporcji w zakresie składu mieszanki [27]. Beton UHPC użyty w niniejszym badaniu wykazywał średnią wytrzymałość na ściskanie 99 MPa po 28 dniach dojrzewania, podczas gdy jego średnia wytrzymałość na ściskanie w dniu testu wyniosła 118 MPa. Skład i proporcje mieszanki użytej do wytworzenia betonu UHPC podano w Tabl. 2.

4. OMÓWIENIE WYNIKÓW EKSPERYMENTU

4.1. PRZEGLĄD WYNIKÓW

Do wszystkich próbek przykładano obciążenie monotoniczne aż do ich zniszczenia. Podczas przeprowadzania badań odczyty ugięcia nieobciążonych i obciążonych bloków były rejestrowane za pomocą mierników zegarowych. Wyniki pomiarów uzyskane w poprzednim badaniu dla próbek ze stalowymi dyblami [15] zostały najpierw porównane z wynikami otrzymanymi dla próbek z płytami łącznikowymi UHPC o długości 450 mm, a następnie z wynikami zarejestrowanymi w przypadku próbek z płytami łącznikowymi UHPC o długości 340 mm. Obciążenia i ugięcia graniczne wszystkich próbek zestawiono w Tabl. 3. Wyniki testów obciążeniowych wykazały, że na ugięcie próbek z płytą łącznikową z betonu UHPC miały wpływ: liczba łączników ścinanych po każdej stronie, szerokość połączenia, grubość płyty oraz jej długość.

4.2. PORÓWNANIE UGIĘCIA POD WPŁYWEM OBCIĄŻENIA PRÓBEK ZAWIERAJĄCYCH PŁYTY ŁĄCZNIKOWE Z UHPC ORAZ DYBLE STALOWE

Uwzględniając dwa przyjęte kryteria, generalnie ugięcie płyt łącznikowych z UHPC pod wpływem obciążenia jest porównywane z ugięciem nawierzchni sztywnej łączonej za pomocą dybli pokrytych żywicą epoksydową, które zostało opisane w badaniu [15]. W pierwszym kryterium porównuje dla określonego poziomu obciążenia profil ugięcia uzyskany podczas testu obciążeniowego w kilku punktach pomiarowych płyty, a w drugim porównuje się ugięcie pod wpływem obciążenia próbek w pobliżu powierzchni łączenia. Rys. 3 i 4 przedstawiają profil ugięcia płyt łączonych betonem z UHPC i płyt łączonych dyblami przy poziomie obciążenia 60 kN (najniższą nośność

load level of 60 kN (lowest load-carrying capacity among specimens, which was observed for specimen C-10-DB). Negative values in Figs 3 and 4 mean that the displacement was downward.

zaobserwowano dla próbki C-10-DB). Wartości ujemne na Rys. 3 i 4 oznaczają, że wektor przemieszczenia jest skierowany w dół.

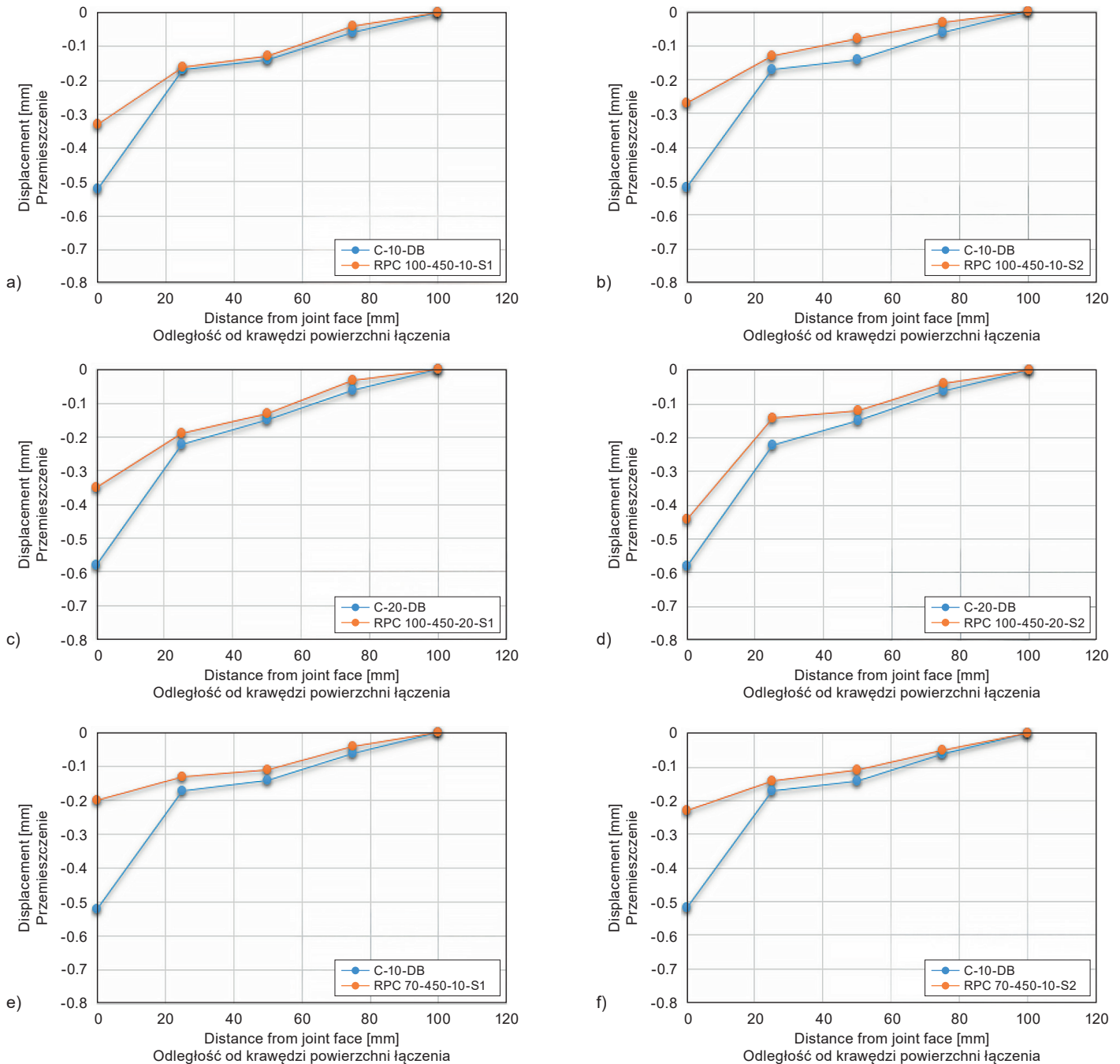
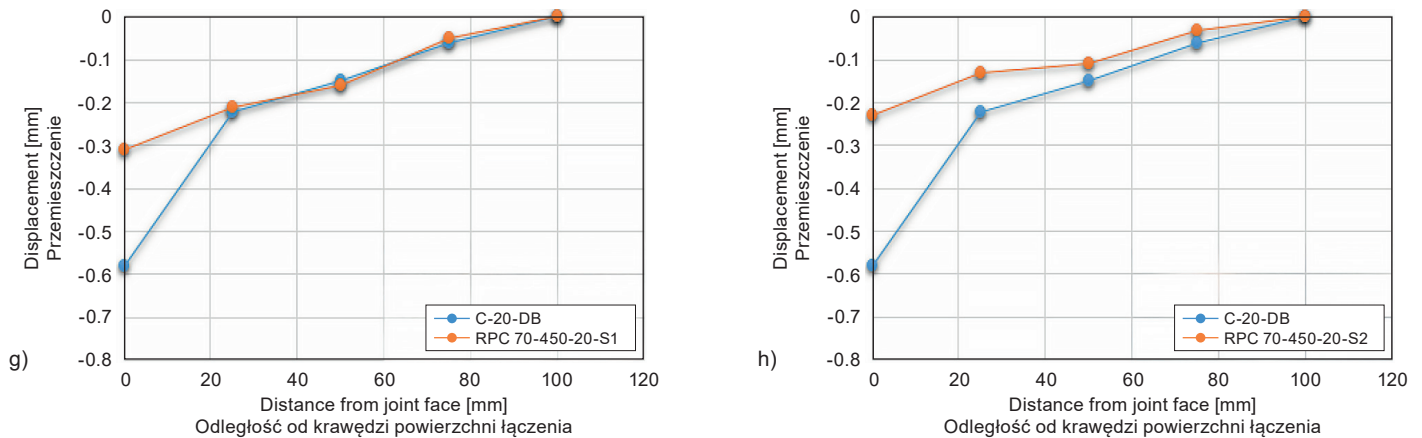


Fig. 3. Deflection results for specimens with dowel bars and UHPC link slabs at the load of 60 kN: a-d) link slab length of 450 mm and thickness of 100 mm; e-f) link slab length of 450 mm and thickness of 70 mm

Rys. 3. Wyniki ugięcia przy obciążeniu 60 kN dla próbek referencyjnych zawierających dyble oraz próbek zawierających płyty łącznikowe z UHPC w przypadku: a-d) płyty o długości 450 mm i grubości 100 mm; e-f) płyty o długości 450 mm i grubości 70 mm →



← Fig. 3. (Continuous) Deflection results for specimens with dowel bars and UHPC link slabs at the load of 60 kN: g-h) link slab length of 450 mm and thickness of 70 mm

Rys. 3. (Kontynuacja) Wyniki ugięcia przy obciążeniu 60 kN dla próbek referencyjnych zawierających dyble oraz próbek zawierających płyty łącznikowe z UHPC w przypadku: g-h) płyty o długości 450 mm i grubości 70 mm

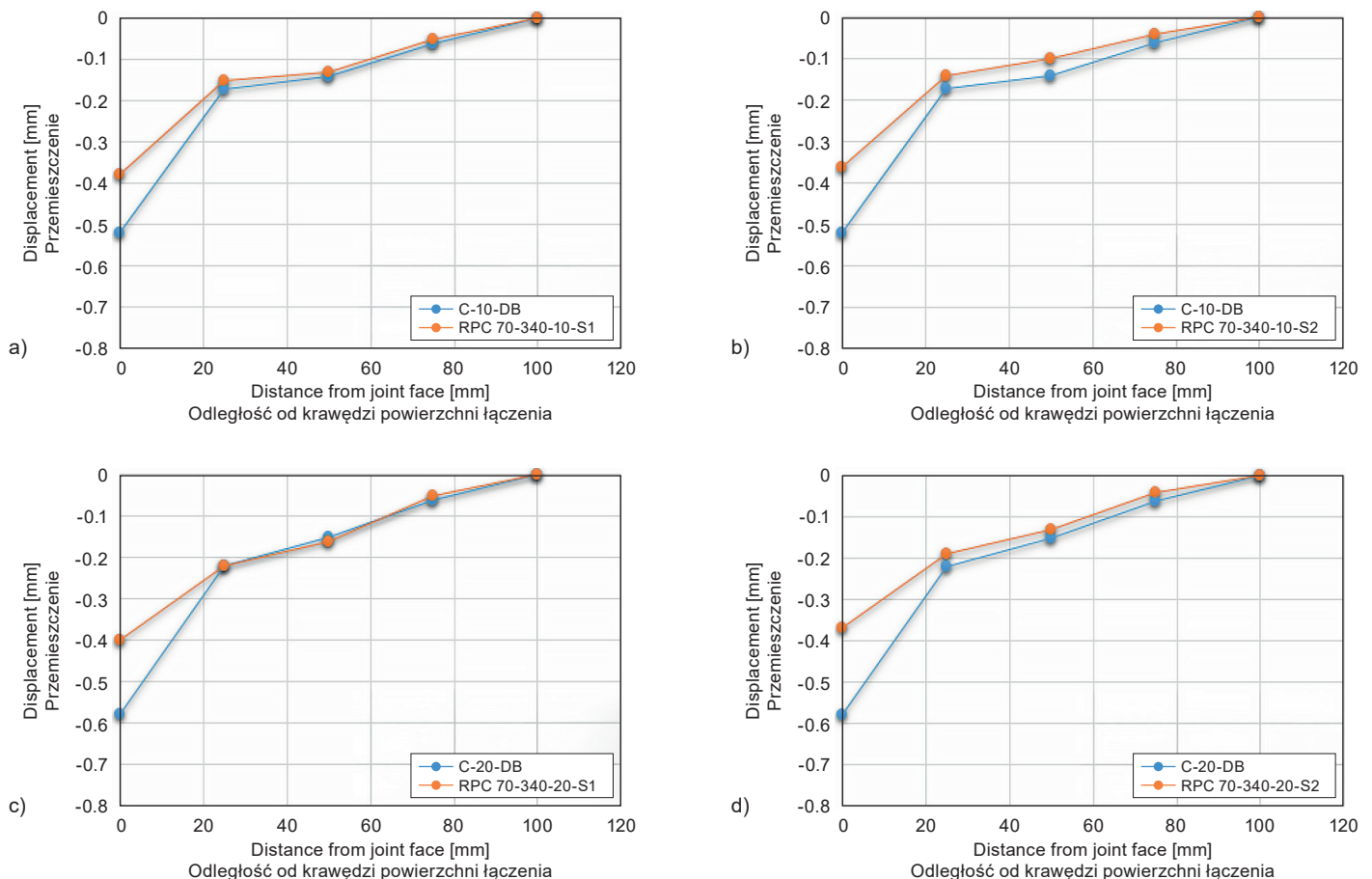


Fig. 4. Deflection results for specimens with dowel bars and UHPC link slabs at the load of 60 kN – link slab length of 340 mm and thickness of 70 mm

Rys. 4. Wyniki ugięcia przy obciążeniu 60 kN dla próbek referencyjnych zawierających dyble oraz próbek zawierających płyty łącznikowe z UHPC w przypadku płyty o długości 340 mm i grubości 70 mm

The magnitude of deflection of specimens with UHPC link slabs was slightly lower than that of specimens with steel dowel bars at all stations, but was significantly lower at the joint face. This is due to the large area of the link slab (greater than that of the dowels), as well as the lower stiffness of UHPC. Less bearing load is generated, resulting in lower deflection. This is reflected in the link slab deflection profile, which is closer to linear and less steep than that of the dowel bar specimen (Figs 3 and 4).

As the load increases until failure, the deflection increases for both steel dowel bars and UHPC link slabs. However, the magnitude of deflection is less in specimens with UHPC link slabs in all stations and for different specimens. For example, this applies to specimens where the length of link slab is 450 mm and thickness is 100 mm (Fig. 3a-3d); specimens where the length of link slab is 450 mm and the thickness is 70 mm (Fig. 3e-3h); and those where the length of link slab is 340 mm and the thickness is 70 mm (Fig. 4a-4d). Based on the results reported for dowelled joints [15], stress was concentrated at the interface between the dowel bar and concrete, particularly at the joint face, resulting in higher deflection values and, ultimately, concrete bearing failure. When compared to dowel bar specimens, the UHPC link slab specimens produce uniform and lower bearing stresses, even at the joint face, as the applied loads are better distributed due to the larger link slab area. This reduction in stress enables the pavement to last longer.

The number of shear studs had no significant effect on the load-deflection results, making a single stud connection sufficient to qualify the proposed joint, especially in the light of the fact that it provided more loading capacity than the reference dowelled joints. However, as demonstrated in Fig. 3, applying two shear studs on each side leads to less deflection compared to application of one shear stud on each side, except for Fig. 3d, where two shear studs produced higher deflection due to the presence of fractures at the face of the joint in the concrete directly beneath the UHPC link slab. In comparison to the doweled specimens, the deflection at the joint face of the specimens with UHPC link slabs at the load of 60 kN decreased by 25.42%-46.15% when the length of the link slab was 450 mm and the thickness was 100 mm (Fig. 4a-d); and by 47.46%-61.54% when the length of the link slab was 450 mm and the thickness was 70 mm (Fig. 3e-h); and by 25%-37.29% when the length of the link slab was 340 mm and the thickness was 70 mm (Fig. 4a-d).

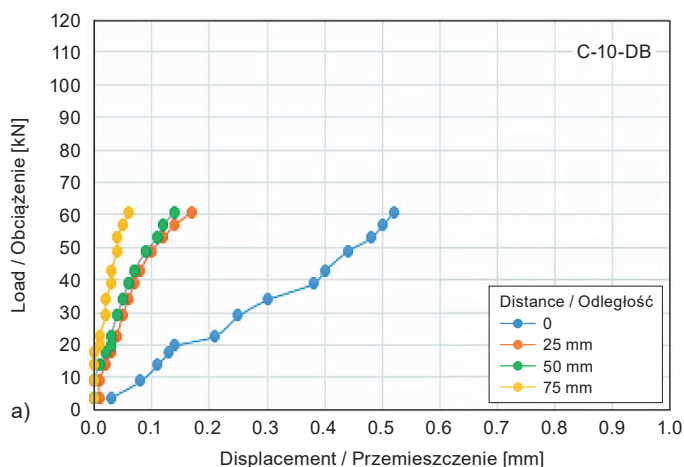
Wartość ugięcia próbek z płytami łączącymi UHPC była we wszystkich punktach pomiarowych nieznacznie niższa niż w przypadku próbek z dyblami stalowymi oraz znacznie niższa na obszarze łączenia. Wynika to z dużej powierzchni nośnej płyty łącznikowej (większej niż powierzchnia dybli), a także z mniejszej sztywności betonu UHPC. Niższe jednostkowe obciążenie nośne powoduje redukcję ugięcia. W konsekwencji profil ugięcia płyty łączącej UHPC jest bardziej zbliżony do liniowego i mniej stromy niż w przypadku próbki zawierającej stalowy dybel jako łącznik (Rys. 3 i 4).

Wraz ze wzrostem obciążenia aż do zniszczenia próbki, ugięcie wzrasta zarówno w przypadku stalowych dybli łącznikowych, jak i płyt łącznikowych z UHPC. Jednak dla różnych badanych próbek wartość ugięcia we wszystkich punktach pomiarowych była zawsze mniejsza dla próbek z płytami łącznikowymi z betonu UHPC niż odpowiednio dla próbek łączonych stalowymi dyblami. Dotyczy to stanowisk badawczych, w których długość płyty łącznikowej wynosiła 450 mm, a grubość 100 mm (Rys. 3a-3d), stanowisk, w których długość płyty łącznikowej wynosiła 450 mm, a grubość 70 mm (Rys. 3e-3h) oraz tych, w których długość płyty łącznikowej wynosiła 340 mm, a grubość 70 mm (Rys. 4a-4d). Z analizy zawartej w [15] wynikało, że w przypadku połączeń dyblowych naprężenia koncentrowały się głównie na styku dybla i betonu, szczególnie na powierzchni łączenia, co skutkowało wyższymi wartościami ugięcia i ostatecznie uszkodzeniem betonowej warstwy nośnej. W porównaniu do próbek zawierających dyble, płyty łącznikowe z betonu UHPC wytwarzają bardziej równomiernie rozłożone na powierzchni i niższe naprężenia nośne, szczególnie na powierzchni łączenia, ponieważ siły ściskające wywołane na skutek obciążenia rozkładają się bardziej równomiernie na większej powierzchni płyty łączącej. W rezultacie redukcja powstałych naprężeń przyczynia się do ograniczenia uszkodzeń i wydłużenia żywotności nawierzchni sztywnej. Liczba łączników (dybli) ścinanych nie miała natomiast znaczącego wpływu na wyniki ugięcia płyty UHPC wywołanego obciążeniem, a łączenie za pomocą jednego elementu okazało się wystarczające, zwłaszcza uwzględniając fakt, że zapewniało ono większą nośność niż referencyjne połączenia za pomocą stalowych dybli. Jak pokazano na Rys. 3, zastosowanie dwóch dybli ścinanych po każdej stronie płyty łącznikowej prowadzi do zmniejszenia jej ugięcia w porównaniu z zastosowaniem odpowiednio po jednym takim łączniku. Wyjątkiem jest sytuacja

The effect of joint width on load-deflection response was more evident in the case of steel-doweled specimens than in the case of UHPC link slab specimens, as deflection increased with increasing joint width. Fig. 3e-h demonstrates that the deflection for the 70-mm-thick UHPC link slab specimens is lower than that for the 100-mm-thick specimens.

Fig. 4a-d shows that the deflection increases significantly as the length of the link slab decreases from 450 mm to 340 mm, in which case the area of the link slab is reduced. This is expected, since the reduction in area produces greater stresses that cause increased deflections, especially at the joint face.

Fig. 5 depicts the load-deflection response at the distance of 0 mm, 25 mm, 50 mm and 75 mm from the face of the joint, measured along the centerline of the unloaded block for each specimen. It can be observed that the deflection is more noticeable at the joint face and gradually diminishes moving away from the joint face. With regard to the ultimate load, it was found that using link slab instead of dowel bars as a mechanism for load transfer across the joint resulted in an increase in the load by 26.47%-47.54% when the length of the link slab was 450 mm and the thickness 100 mm, as shown in Fig. 5c-f, by 38.24%-88.52% when the length of the link slab was 450 mm and the thickness 70 mm, as shown in Fig. 5g-j, and by 5.88%-22.95% when the link slab length was 340 mm and thickness 70 mm, as shown in Fig. 5 (k-n).



przedstawiona na Rys. 3d, gdzie dwa łączniki ścinane spowodowały większe ugięcie płyty z powodu obecności pęknięć na powierzchni łączenia w betonie bezpośrednio pod płytą łącznikową z UHPC. W porównaniu do próbek zawierających betonowe płyty sztywne łączone stalowymi dyblami, przy obciążeniu 60 kN ugięcie płyt łącznikowych z betonu UHPC w pobliżu krawędzi łączenia było niższe o 25,42-46,15% w przypadku płyty o długości 450 mm i grubości 100 mm (Rys. 4a-d), zaś o 47,46-61,54%, dla płyty o długości 450 mm i grubości 70 mm (Rys. 3e-h) oraz o 25-37,29% w przypadku płyty łącznikowej o długości 340 mm i grubości 70 mm (Rys. 4a-d).

Wpływ szerokości złącza na ugięcie pod wpływem obciążenia był bardziej widoczny w przypadku stanowisk badawczych z dyblami stalowymi niż w przypadku stanowisk z płytami łącznikowymi z UHPC, ponieważ ugięcie wzrastało wraz ze wzrostem szerokości tego łączenia.

Rys. 3e-h dowodzi, że ugięcie pod obciążeniem dla płyt z betonu UHPC o grubości 70 mm jest niższe niż w przypadku zastosowania takich płyt o większej grubości 100 mm.

Rys. 4a-d pokazuje natomiast, że ugięcie znacznie wzrasta, gdy zredukujemy długość płyty łącznikowej UHPC z 450 mm do 340 mm. W takim przypadku powierzchnia nośna płyty łącznikowej zostaje bowiem zmniejszona. Jest to reakcja spodziewana, ponieważ zmniejszenie powierzchni nośnej powoduje większe naprężenia, które z kolei wywołują zwiększone ugięcie, zwłaszcza w pobliżu krawędzi łączenia.

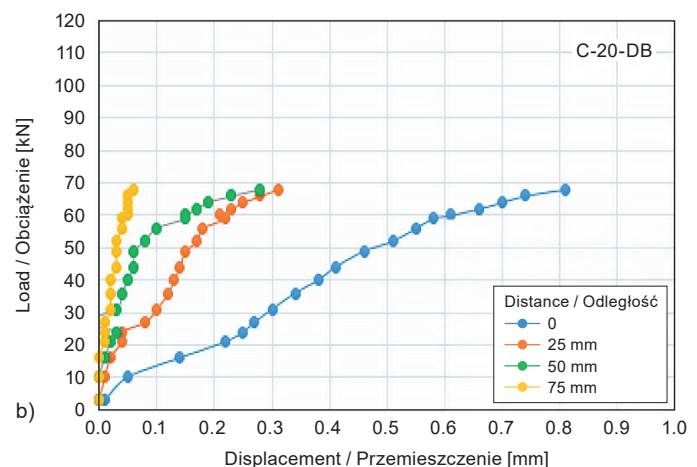
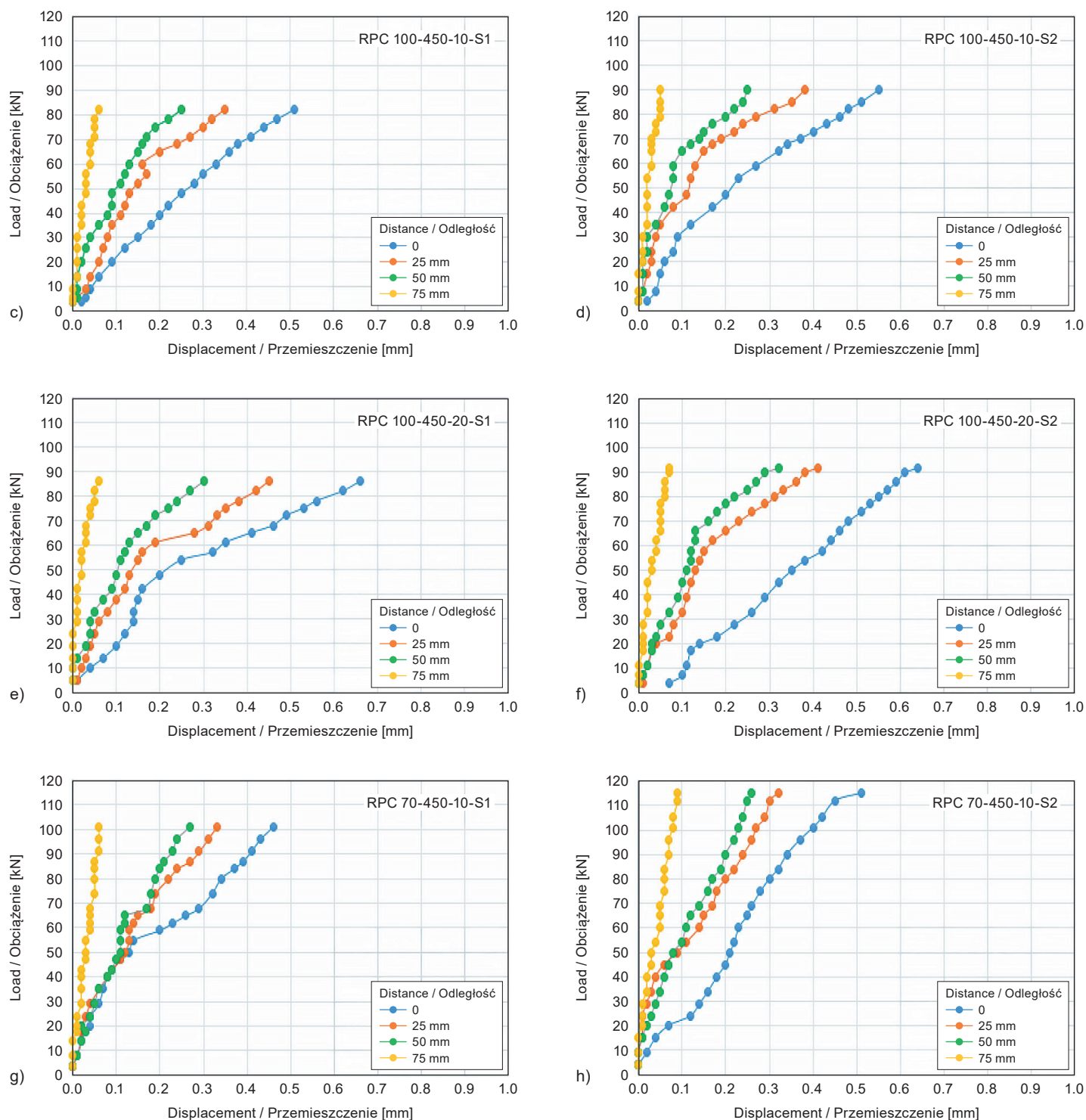
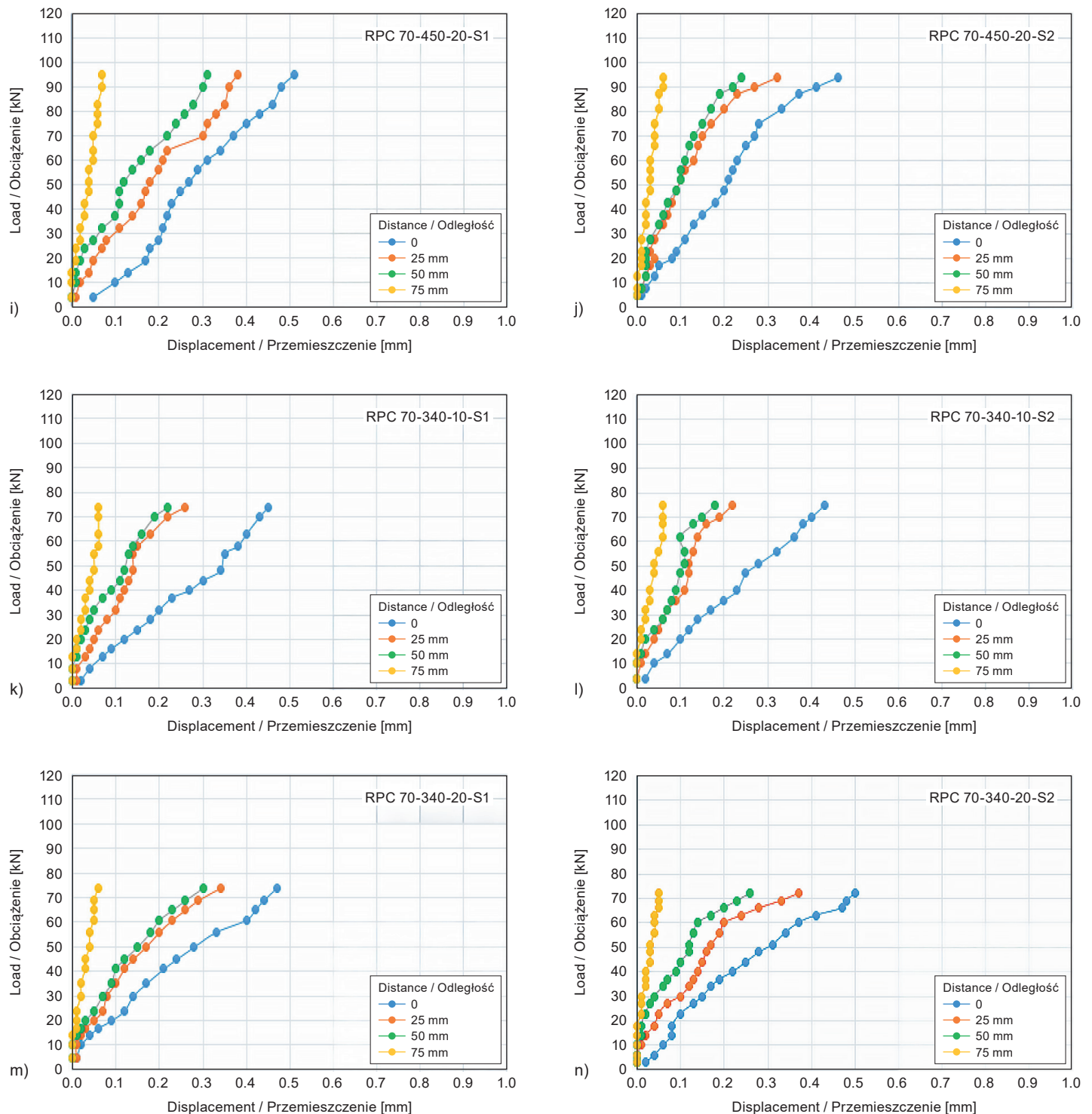


Fig. 5. Load-displacement relationships for specimens with steel dowels (a-b) and UHPC link slabs (c-n) at the distance of 0 mm, 25 mm, 50 mm and 75 mm from the joint face of the unloaded block

Rys. 5. Zależności przemieszczenie-obciążenie dla próbek referencyjnych zawierających stalowe dyble (a-b) oraz próbek zawierających płyty łącznikowe z UHPC (c-n) w odległości 0 mm, 25 mm, 50 mm i 75 mm od krawędzi powierzchni łączenia w przypadku nieobciążonego bloku →



← Fig. 5. (Continuous) Load-displacement relationships for specimens with steel dowels (a-b) and UHPC link slabs (c-n) at the distance of 0 mm, 25 mm, 50 mm and 75 mm from the joint face of the unloaded block
 Rys. 5. (Kontynuacja) Zależności przemieszczenie-obciążenie dla próbek referencyjnych zawierających stalowe dyble (a-b) oraz próbek zawierających płyty łącznikowe z UHPC (c-n) w odległości 0 mm, 25 mm, 50 mm i 75 mm od krawędzi powierzchni łączenia w przypadku nieobciążonego bloku →



← Fig. 5. (Continuous) Load-displacement relationships for specimens with steel dowels (a-b) and UHPC link slabs (c-n) at the distance of 0 mm, 25 mm, 50 mm and 75 mm from the joint face of the unloaded block
 Rys. 5. (Kontynuacja) Zależności przemieszczenie-obciążenie dla próbek referencyjnych zawierających stalowe dyble (a-b) oraz próbek zawierających płyty łącznikowe z UHPC (c-n) w odległości 0 mm, 25 mm, 50 mm i 75 mm od krawędzi powierzchni łączenia w przypadku nieobciążonego bloku

4.3. RELATIVE DEFLECTION

Figs 6 and 7 show the relative deflection RD results of the unloaded and loaded concrete blocks for the specimens in the study. All of the results show that RD of specimens with UHPC link slabs at the ultimate load is significantly lower than that of specimens with dowel bars except at the initial stages of load application, at which steel dowel bar specimens exhibited lower RD response. The reason for low RD of UHPC link slab specimens at the ultimate load is the fact that the large UHPC link slab surface area withstands the applied load better, resulting in lower generated stresses (and a consequent decrease in RD), while in the case of steel dowels the small contact area increases the stress and deflection. The lower RD of steel dowel specimens observed at the initial stages of load application is related to elasticity – the elasticity of steel is greater than that of UHPC, which initially impacts RD behavior positively. However, that impact diminishes at the advanced stages of loading, at which the concrete beneath the steel is being crushed.

For the dowel bar specimens, it was observed that the slope of the load- RD curve was lower beyond 0.1 mm of RD , for UHPC link slab specimens there are no significant changes in the slope until failure. Compared with specimens with steel dowels for joint width of 10 mm and 20 mm, the RD of specimens with UHPC link slabs decreased by 52.04%-67.27% for specimens that have link slab of 450 mm in length and 100 mm in thickness (Fig. 6a-b); by 56.12%-81.81% for specimens that have link slab of 450 mm in length and 70 mm in thickness (Fig. 6c-f); and by 61.24%-80.9% when the length of link slab is 340 mm and the thickness is 70 mm (Fig. 7a-b).

Rys. 5 przedstawia wartości ugięcia płyty UHPC pod wpływem obciążenia w odległości 0 mm, 25 mm, 50 mm i 75 mm od krawędzi powierzchni łączenia, mierzoną na każdym stanowisku badawczym wzdłuż linii środkowej nieobciążonego bloku. Można zaobserwować, że wektor ugięcia ma wyższą wartość przy powierzchni łączenia i stopniowo maleje w miarę oddalania się od złącza. Jeśli chodzi o obciążenie graniczne na podstawie badań stwierdzono, że zastosowanie płyty łączącej UHPC zamiast dybli jako mechanizmu przenoszenia obciążenia spowodowało wzrost dopuszczalnego obciążenia o 26,47-47,54% dla płyty UHPC o długości 450 mm i grubości 100 mm (Rys. 5c-f), o 38,24-88,52% dla płyty o długości 450 mm i grubości 100 mm (Rys. 5g-j), o 38,24-88,52% dla płyty o długości 450 mm i grubości 70 mm (Rys. 5g-j) oraz o 5,88-22,95% dla płyty o długości 340 mm i grubości 70 mm (Rys. 5k-n).

4.3. UGIĘCIE WZGLĘDNE

Rys. 6 i 7 ilustrują wyniki zmierzonego ugięcia względnego RD w przypadku poddanych badaniu wytrzymałościowemu nieobciążonych i obciążonych betonowych bloków. Uzyskane wyniki pomiarów potwierdzają, że ugięcie względne RD stanowisk z płytami łączącymi z UHPC przy obciążeniu granicznym jest znacznie niższe niż w przypadku stanowisk z dyblami, z wyjątkiem początkowych etapów przykładania obciążenia, w których stanowiska badawcze zawierające stalowe dyble wykazywały niższe ugięcie względne. Przyczyną niskiego RD w przypadku zastosowania obciążenia granicznego dla płyt łączących z UHPC jest fakt, że na dużej powierzchni płyty łącznikowej z UHPC równomierniej rozkłada się przyłożone obciążenie, co skutkuje niższymi naprężeniami (i w konsekwencji spadkiem RD), podczas gdy w przypadku dybli stalowych mała powierzchnia oddziaływania zwiększa naprężenia i powoduje wzrost ugięcia. Niższa wartość RD w odniesieniu do stalowych dybli obserwowana na początkowych etapach przykładania obciążenia związana jest ze sprężystością dybli, gdyż stal charakteryzuje się wyższą sprężystością niż beton UHPC, co początkowo pozytywnie wpływa na RD . Jednak wpływ ten zmniejsza się na dalszych etapach przykładania obciążenia, gdy beton pod warstwą stali, z której wykonano dyble zaczyna się kruszyć.

W przypadku monotonicznego obciążenia próbek referencyjnych zawierających jako łączniki stalowe dyble

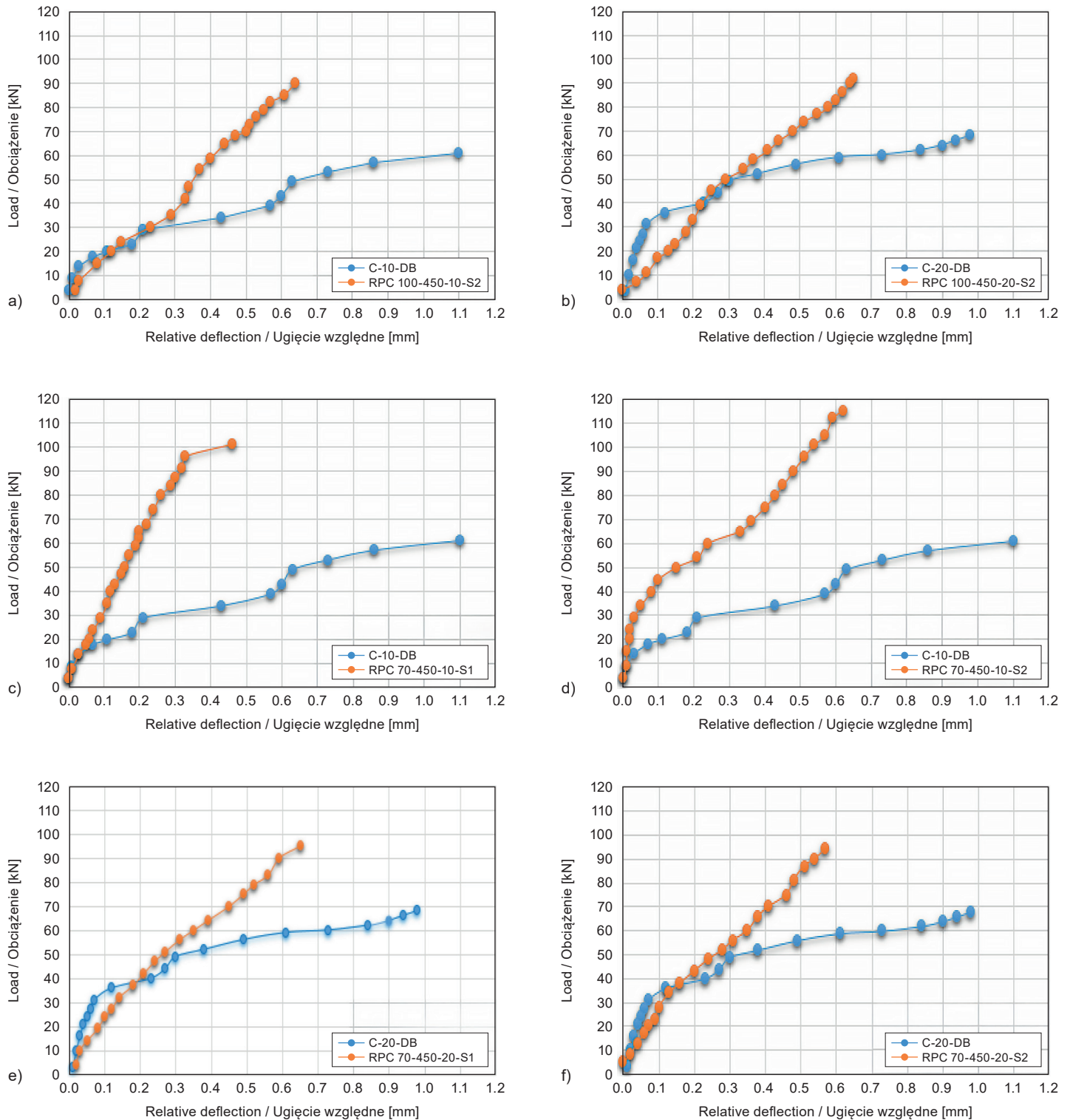


Fig. 6. Relative deflection for specimens with steel dowels and UHPC link slabs: a-b) link slab length of 450 mm and thickness of 100 mm; c-f) link slab length of 450 mm and thickness of 70 mm

Rys. 6. Ugięcie względne dla próbek referencyjnych zawierających jako łączniki stalowe dyble oraz dla próbek zawierających płyty łącznikowe z UHPC w przypadku: a-b) płyt o długości 450 mm i grubości 100 mm; c-f) płyt o długości 450 mm i grubości 70 mm

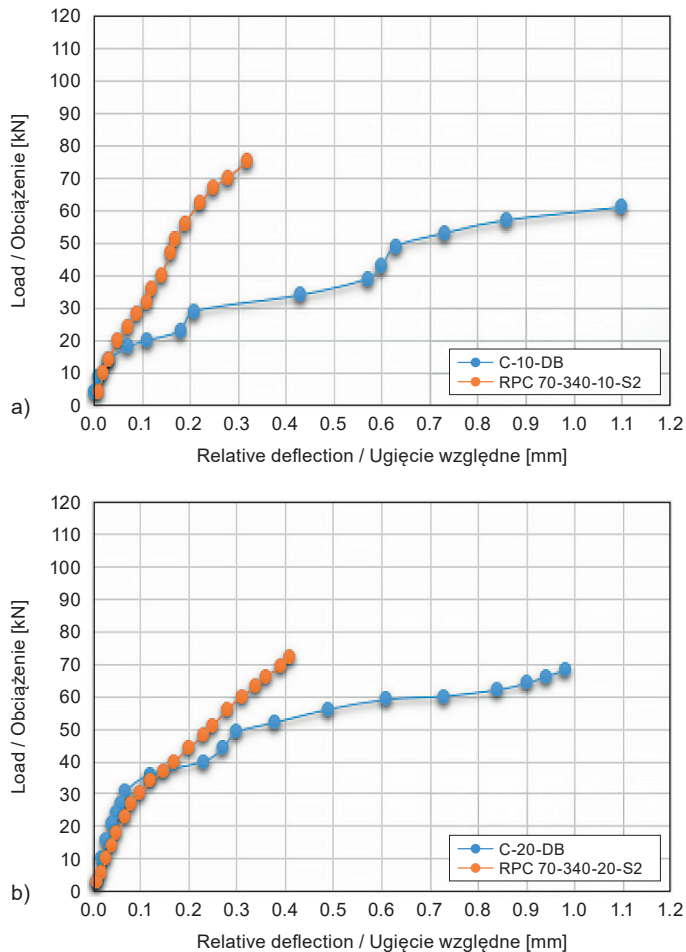


Fig. 7. Relative deflection results for specimens with steel dowels and UHPC link slabs: link slab length of 340 mm and thickness of 70 mm

Rys. 7. Ugięcie względne dla próbek referencyjnych zawierających stalowe dyble oraz dla płyty łącznikowej z UHPC w przypadku zastosowania płyt o długości 340 mm i grubości 70 mm

4.4. LOAD TRANSFER EFFICIENCY

Under ideal conditions, the applied load should be transferred across a joint with 100% efficiency, but this is difficult to achieve in reality. Equation (1) can be used to calculate load transfer efficiency *LTE*. Figs 8 and 9 show the *LTE* values for chosen specimens. The y-axis in the figures represents the *LTE* of the specimens with dowel bars and UHPC link slabs, while the x-axis shows the total applied load. In the x-axis, the first number in each pair corresponds to specimens with steel dowels, while the second corresponds to UHPC link slab specimens. For example, in a pair such as “9-6”, the first number “9” represents the total applied load at a certain load level in

zaobserwowano, że nachylenie krzywej obciążenie-ugięcie względne było mniejsze powyżej wartości ugięcia względnego wynoszącej 0,1 mm, natomiast w przypadku próbek zawierających płytę łączącą z UHPC nie ma znaczących zmian nachylenia charakterystyki aż do krytycznego momentu jej zniszczenia. W porównaniu ze stalowymi dyblami o szerokości łączenia 10 mm i 20 mm, ugięcie względne *RD* płyt łączących z UHPC zmniejszyło się o 52,04-67,27% w przypadku płyty łączącej o długości 450 mm i grubości 100 mm (Rys. 6a-b), o 56,12-81,81% dla płyty łącznikowej o dł. 450 mm i gr. 100 mm (Rys. 6c-f), o 56,12-81,81% dla płyty o długości 450 mm i grubości 70 mm (Rys. 6c-f) oraz o 61,24-80,9% w przypadku płyty łącznikowej o długości 340 mm i grubości 70 mm (Rys. 7a-b).

4.4. SKUTECZNOŚĆ PRZENOSZENIA OBCIĄŻENIA

W idealnych warunkach przyłożone obciążenie powinno być przenoszone przez płytę łącznikową ze 100% skutecznością, jednakże w rzeczywistości jest to trudne do osiągnięcia. Równanie (1) można wykorzystać do obliczenia skuteczności przenoszenia obciążenia wyrażonym wskaźnikiem *LTE*. Rys. 8 i 9 pokazują uzyskane wartości wskaźnika *LTE* dla wszystkich badanych próbek. Na tych rysunkach oś y oznacza wartość wskaźnika *LTE* w przypadku próbek zawierających dyble oraz próbek zawierających płyty łączące z UHPC, podczas gdy oś x obrazuje przyłożone obciążenie całkowite. Na osi x pierwsza liczba w każdej parze odpowiada próbkom referencyjnym zawierającym stalowe dyble, podczas gdy druga odpowiada próbkom zawierającym płyty łącznikowe z UHPC. Na przykład, w parze takiej jak „9-6”, pierwsza liczba „9” reprezentuje przyłożone obciążenie całkowite w próbce zawierającej łączenie dyblowe, podczas gdy druga liczba „6” odnosi się do próbki zawierającej płytę łącznikową z UHPC. Z Rys. 8 i 9 wynika, że wskaźnik przenoszenia obciążenia *LTE* osiąga wartość około 70%-90%. Na prawie wszystkich etapach przykładania obciążenia wskaźnik *LTE* dla stanowisk badawczych zawierających płyty łącznikowe UHPC jest nieco wyższy niż w przypadku stanowisk ze stalowymi dyblami stanowiącymi łączniki płyt sztywnych. Większa powierzchnia płyty łącznikowej w porównaniu z powierzchnią stalowych dybli oraz zastosowanie łączników ścinanych przyczyniły się do zwiększenia efektywności przenoszenia obciążenia na łączeniach płyt. Zauważalny jest także względny wzrost *LTE* według (1) dla próbek z dwoma łącznikami

the dowelled joint specimen, while the second number “6” refers to the UHPC link slab specimen. Figs 8 and 9 show that LTE is approximately 70%-90%. The value of LTE for specimens with UHPC link slabs is slightly higher than that of specimens with steel dowels at almost all loading stages. Larger area of the link slab compared with the dowel area, in combination with the existence of shear studs, contributed to an increase in the load transferred across the joints. There is a noticeable relative increase in LTE according (1) for specimens with two shear studs on each side compared to those with one shear stud, indicating the importance of shear studs in transferring load between the adjacent slabs.

$$LTE = \frac{P_t}{P} \cdot 100\% , \quad (1)$$

where P and P_t are the total applied load and the total transferred load, respectively.

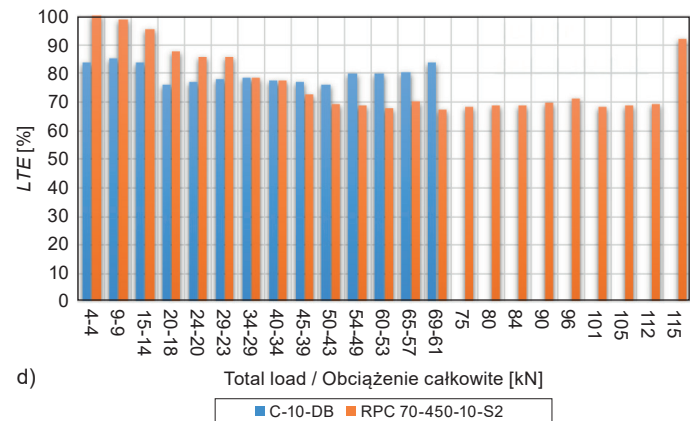
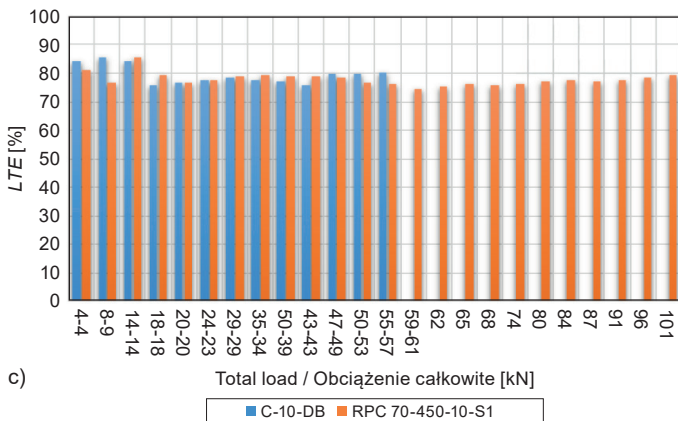
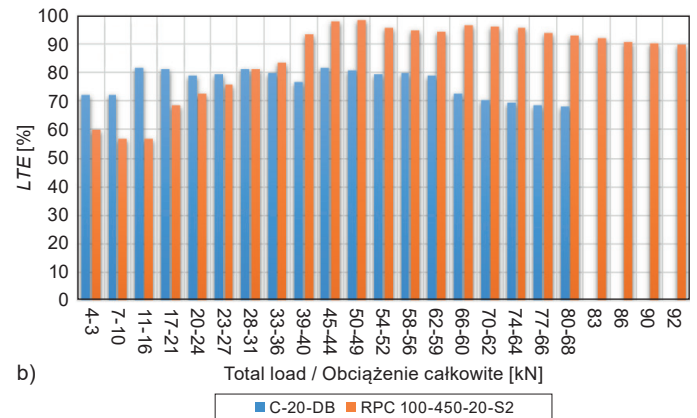
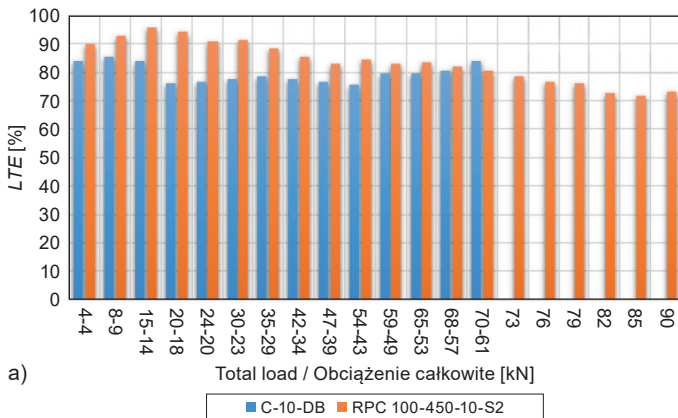


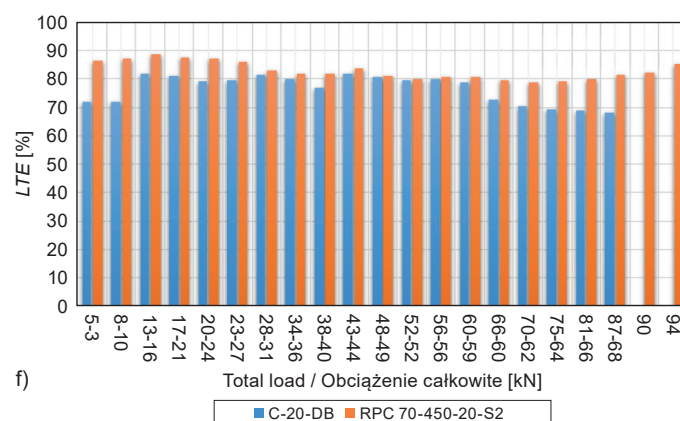
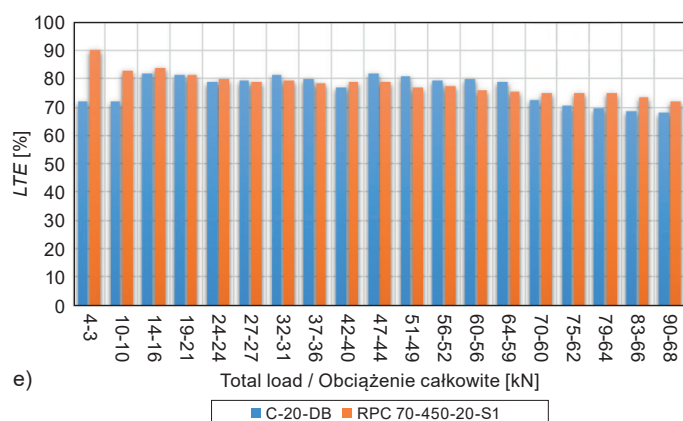
Fig. 8. Load transfer efficiency LTE or specimens with steel dowels and UHPC link slabs: link slab length of 450 mm; thickness of 100 mm (a-b) or 70 mm (c-f)

Rys. 8. Porównanie skuteczności przenoszenia obciążeń LTE dla próbek ze stalowymi dyblami oraz próbek z płytami łącznikowymi UHPC w przypadku: a-b) płyty o długości 450 mm i grubości 100 mm, c-f) płyty o długości 450 mm i grubości 70 mm →

ścianymi po każdej stronie w porównaniu do próbek z jednym łącznikiem ścinanym, co wskazuje na znaczenie liczby łączników ścinanych w przenoszeniu obciążenia między sąsiednimi płytami sztywnymi.

$$LTE = \frac{P_t}{P} \cdot 100\% , \quad (1)$$

gdzie P i P_t to odpowiednio przyłożone obciążenie całkowite i przeniesione obciążenie całkowite.



← Fig. 8. (Continuous) Load transfer efficiency LTE or specimens with steel dowels and UHPC link slabs: link slab length of 450 mm; thickness of 100 mm (a-b) or 70 mm (c-f)

Rys. 8. (Kontynuacja) Porównanie skuteczności przenoszenia obciążeń LTE dla próbek ze stalowymi dyblami oraz próbek z płytami łącznikowymi UHPC w przypadku: a-b) płyty o długości 450 mm i grubości 100 mm, c-f) płyty o długości 450 mm i grubości 70 mm

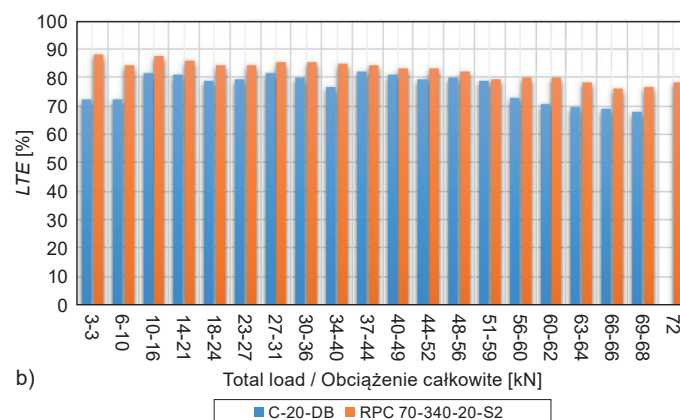
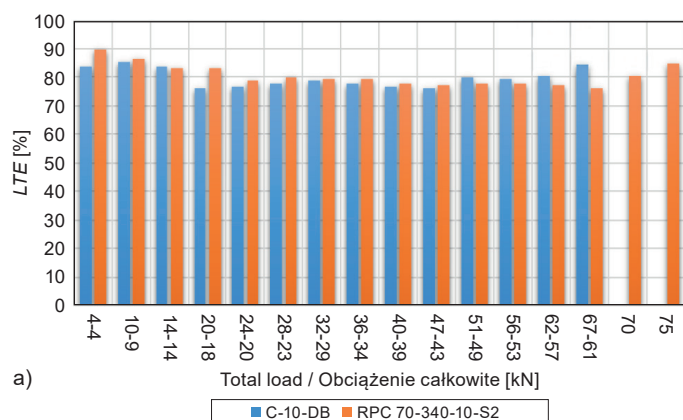


Fig. 9. Load transfer efficiency LTE for specimens with steel dowels and UHPC link slabs: link slab length of 340 mm and thickness of 70 mm

Rys. 9. Porównanie skuteczności przenoszenia obciążeń LTE dla próbek ze stalowymi dyblami jako łączniki oraz dla próbek z płytą łącznikową UHPC w przypadku zastosowania płyty o długości 340 mm i grubości 70 mm

4.5. EFFECT OF THE ANALYZED PARAMETERS ON THE LOAD-DEFLECTION RESPONSE SPECIMENS WITH UHPC LINK SLABS

4.5.1. Effect of the number of shear studs

Shear studs were used in this investigation to connect the UHPC link slab with the concrete pavement. There are two configurations that were utilized for distributing shear studs on both sides of adjacent blocks across expansion joints. The first configuration requires placing one shear stud on each side of the adjacent blocks, whereas the second involves placing two shear studs on each side. Fig. 10 shows the load deflection response of specimens with UHPC link slabs (at joint face) with one and two

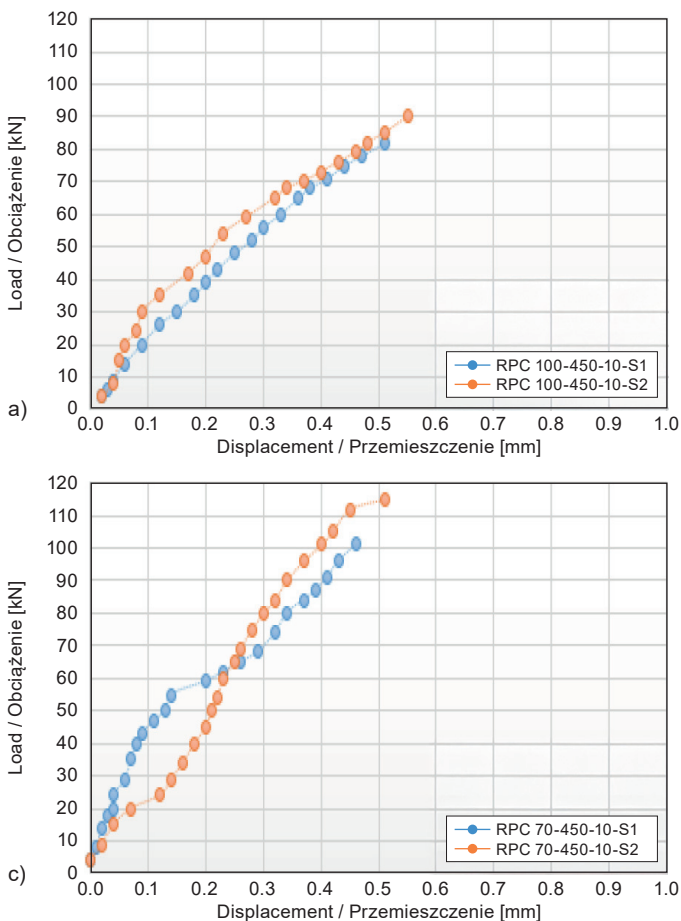
4.5. WPŁYW ANALIZOWANYCH PARAMETRÓW NA UGIĘCIE PŁYT ŁĄCZNIKOWYCH Z UHPC POD WPŁYWEM OBCIĄŻENIA

4.5.1. Wpływ liczby łączników ścinanych

W badaniu do połączenia płyty UHPC z betonową nawierzchnią zastosowano łączniki ścinane. W celu rozmieszczenia łączników ścinanych w szczelinach dylatacyjnych po obu stronach sąsiednich bloków zostały przeanalizowane dwa warianty. W pierwszy z nich umieszczono po jednym łączniku ścinanym z każdej strony sąsiadujących ze sobą betonowych bloków, podczas gdy w drugim rozmieszczono z każdej strony po dwa łączniki ścinane. Rys. 10 ilustruje ugięcie pod obciążeniem płyt łącznikowych z UHPC (na krawędzi łączenia)

shear studs on each side of the joint. It can be observed that there was no obvious effect of shear stud number on the deflection, especially at considerable load levels.

As shown in Fig. 11a-f, the value of RD was not greatly influenced by the number of shear studs on each side. The exception is Fig. 11c, where the deflection of specimen (RPC 70-450-10-S2) notably exceeded that of specimen (RPC 70-450-10-S1) after reaching around 40% of the total load. Observation of a slight increase in load-bearing capacity was expected for specimens with two shear studs, since the studs are the main contributors to load transfer, apart from the load transfer from UHPC to the concrete below.



w konfiguracji z jednym lub dwoma łącznikami ścinanymi z każdej strony płyty. Można zauważyć, że liczba zastosowanych łączników ścinanych nie miała wyraźnego wpływu na ugięcie (przeszczenie w dół), szczególnie przy znacznych wartościach obciążenia.

Jak pokazano na Rys. 11a-f, liczba łączników ścinanych zamocowanych z każdej strony płyty łącznikowej nie miała większego wpływu na wartość ugięcia względnego RD . Wyjątkiem jest przypadek pokazany na Rys. 11c, gdzie ugięcie względne RD płyty UHPC z dwoma łącznikami ścinanymi po każdej stronie (próbka RPC 70-450-10-S2) przekroczyło ugięcie RD płyty z jednym łącznikiem po każdej stronie (próbka RPC 70-450-10-S1), co nastąpiło po osiągnięciu poziomu około 40% wartości przyłożonego obciążenia całkowitego. Ten zaobserwowany niewielki wzrost nośności płyty UHPC z dwoma łącznikami ścinanymi był spodziewany, ponieważ łączniki te są w głównej mierze odpowiedzialne za przenoszenie obciążenia na beton nawierzchniowy poza obszarem płyty UHPC.

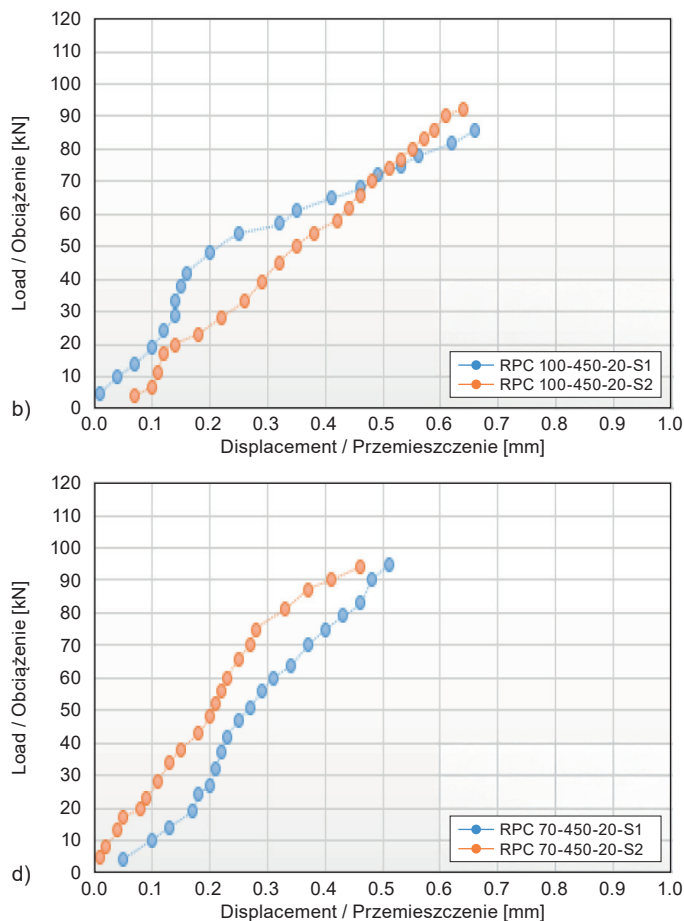
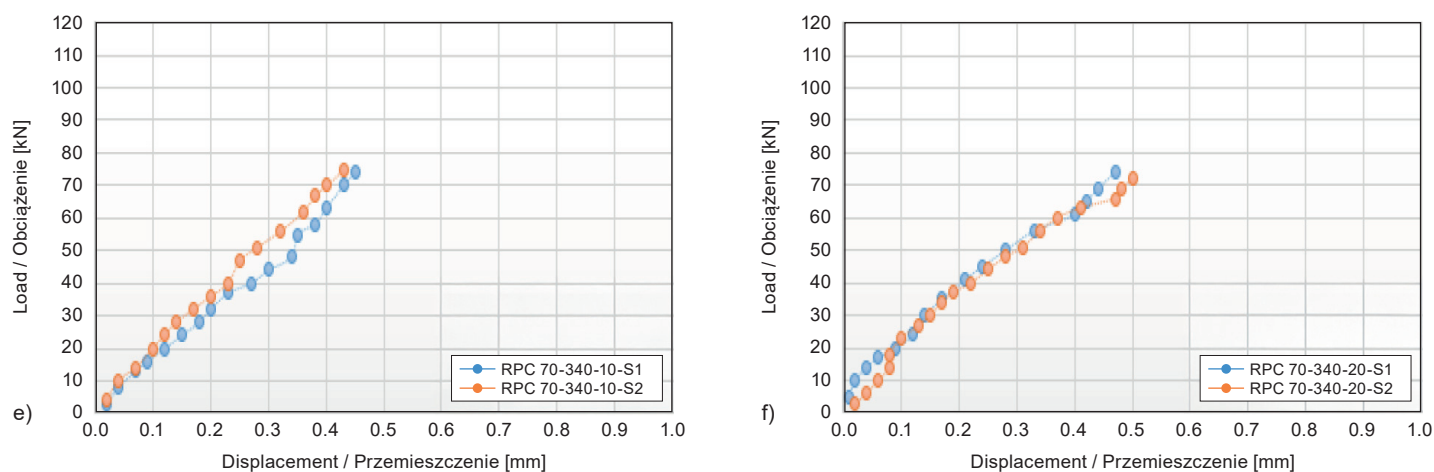


Fig. 10. Load-deflection response of specimens with UHPC link slabs with different number of shear studs at the joint
Rys. 10. Porównanie ugięcia pod wpływem obciążenia w przypadku próbek zawierających płyty łącznikowe UHPC z różnieniem liczby łączników ścinanych zamocowanych po jej stronach →



← Fig. 10. Load-deflection response of specimens with UHPC link slabs with different number of shear studs at the joint
Rys. 10. Porównanie ugięcia pod wpływem obciążenia w przypadku próbek zawierających płyty łącznikowe UHPC z różnieniem liczby łączników ścinanych zamocowanych po jej stronach

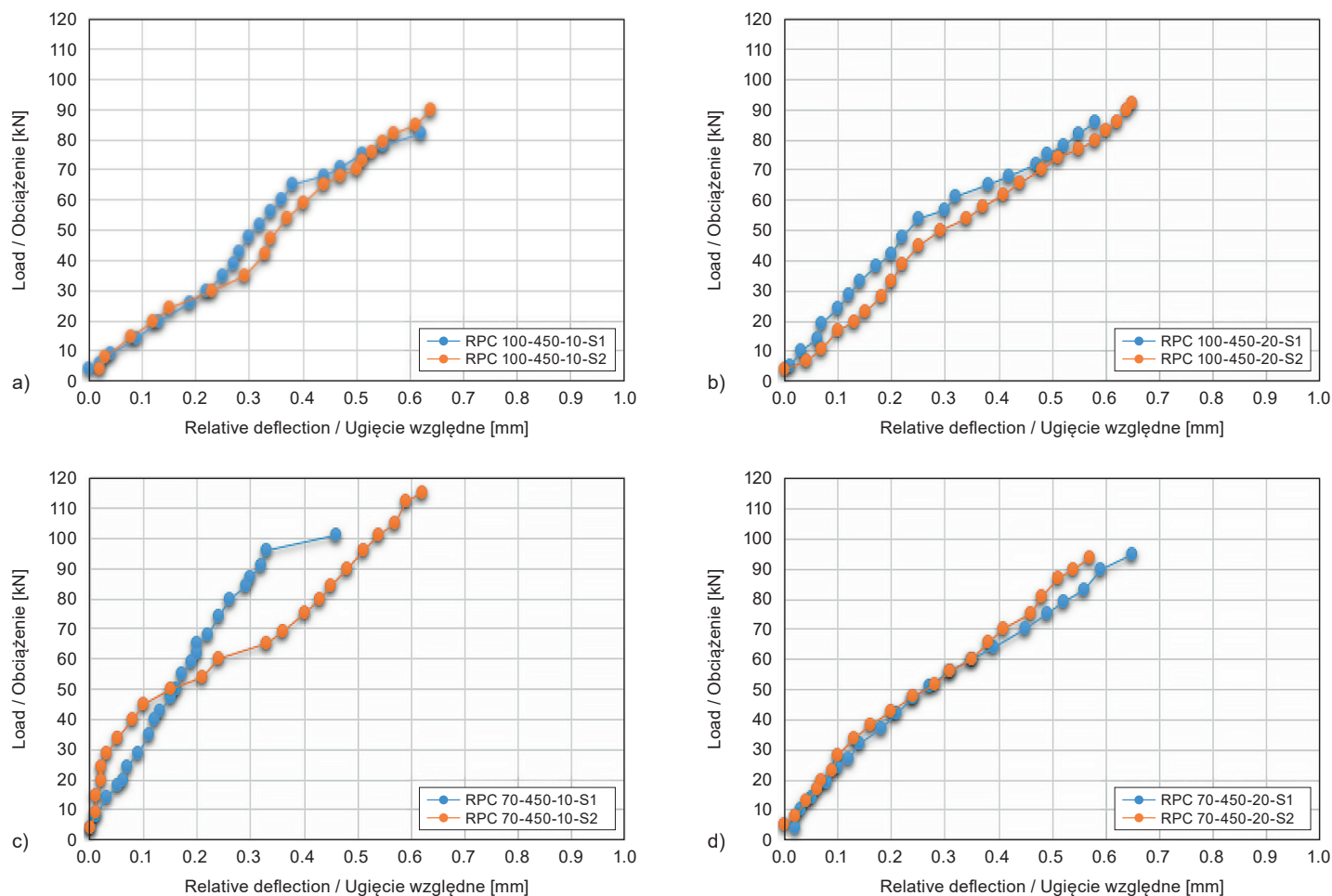
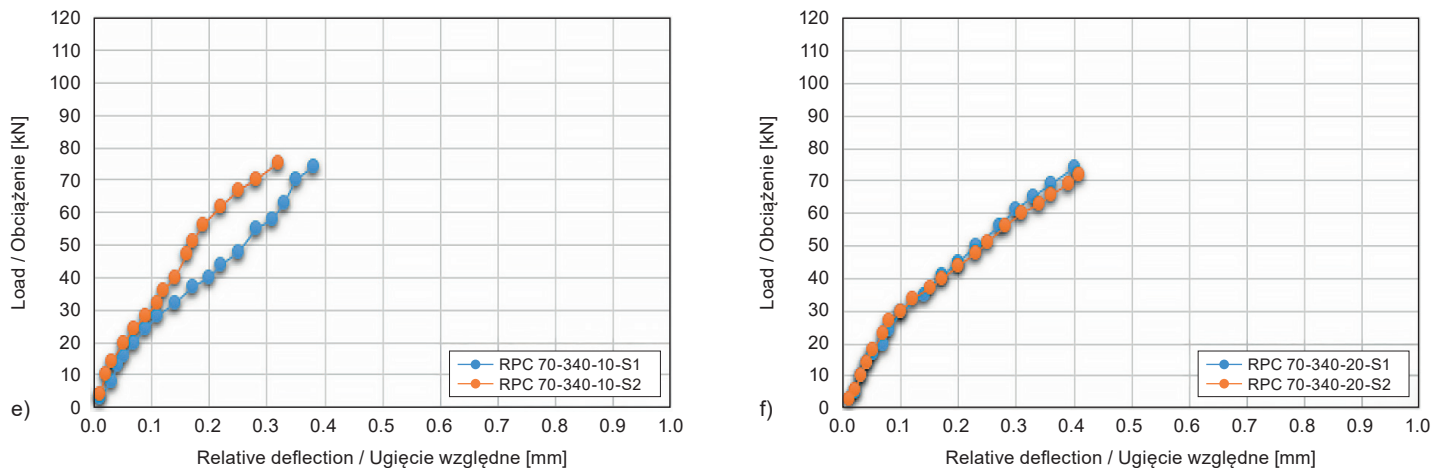


Fig. 11. Relative deflection RD results of specimens with UHPC link slabs with different number of shear studs
Rys. 11. Porównanie ugięcia względnego RD w przypadku płyt łącznikowych UHPC z różną liczbą łączników ścinanych zamocowanych po obydwu jej stronach →



← Fig. 11. (Continuous) Relative deflection RD results of specimens with UHPC link slabs with different number of shear studs
 Rys. 11. (Kontynuacja) Porównanie ugięcia względnego RD w przypadku płyt łącznikowych UHPC z różną liczbą łączników ścinanych zamocowanych po obydwu jej stronach

4.5.2. Joint width effect

This study included using two joint widths: 20 mm (wide joint) and 10 mm (narrow joint), which are typical joint sizes for pavement expansion joints. The effect of joint width is obvious in load deflection behavior, where deflection decreases with a reduction in joint width and increases with an increase in joint width, as observed in Fig. 12. The deflection of specimens with UHPC link slabs decreased by 4.26%-23.91% for 10-mm-joints compared with 20-mm-joints with corresponding joint parameters (length, thickness and shear stud number).

On the other hand, the impact of joint width on RD was not as pronounced for 450-mm-long and 100-mm-thick link slabs as it was for 450-mm-long and 70-mm-thick link slabs, as shown in Fig. 13a-f. Joint width had a clear effect on RD when the length of link slab was 450 mm and the thickness was 70 mm, while its effect was lower when the link slab length was 340 mm, due to the reduction in the surface area.

4.5.2. Wpływ szerokości łączenia

Badanie dotyczyło ustalenia wpływu zastosowania dwóch różnych szerokości łączeń: 20 mm (szerokie) i 10 mm (wąskie), które są typowymi rozmiarami szczelin dylatacyjnych w nawierzchniach sztywnych, na ugięcie płyty. Wpływ szerokości spoiny na ugięcie pod obciążeniem jest oczywisty. Ugięcie płyty zmniejszyło się wraz ze spadkiem szerokości łączenia i zwiększyło się wraz z jej wzrostem (Rys. 12). Ugięcie próbek zawierających płyty łącznikowe z UHPC było mniejsze o 4,26-23,91% w przypadku spoiny o szerokości 10 mm w porównaniu ze spoiną o szerokości 20 mm przy takich samych niezmiennych pozostałych parametrach płyty (długość, grubość i liczba łączników ścinanych).

Z drugiej strony, wpływ szerokości spoiny (łączenia) na ugięcie względne RD płyty UHPC nie był aż tak wyraźny dla płyt o długości 450 mm i grubości 100 mm, jak w przypadku użycia płyt o długości 450 mm i grubości 70 mm (Rys. 13a-f). Szerokość zastosowanej spoiny miała wyraźny wpływ na parametr RD , w przypadku gdy długość płyty łącznikowej wynosiła 450 mm, a grubość 70 mm, podczas gdy z powodu zmniejszenia powierzchni nośnej płyty jej wpływ był mniejszy, gdy długość płyty wynosiła 340 mm a grubość była taka sama.

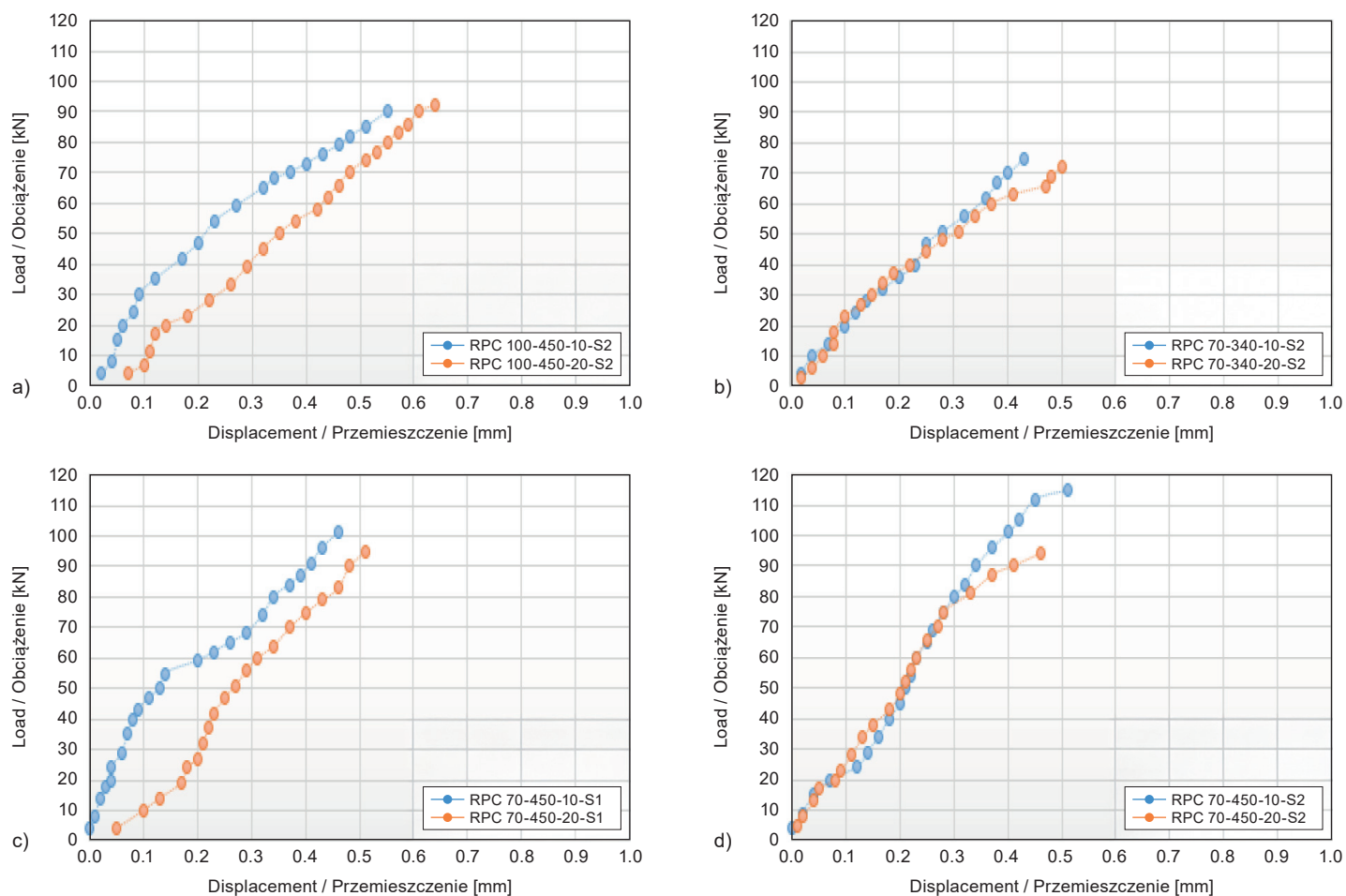


Fig. 12. Load-deflection response at the joint face of specimens with UHPC link slabs for two different joint widths
 Rys. 12. Ugięcie pod obciążeniem na krawędzi łączenia w próbkach zawierających płyty łącznikowe z betonu UHPC
 w przypadku zastosowania dwóch różnych szerokości spoiny

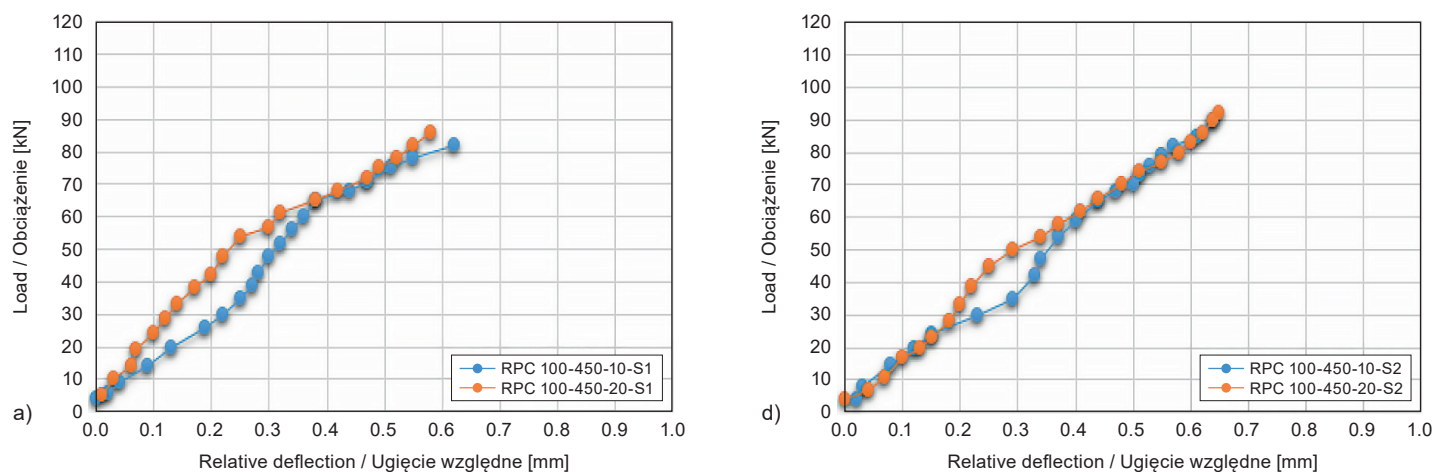
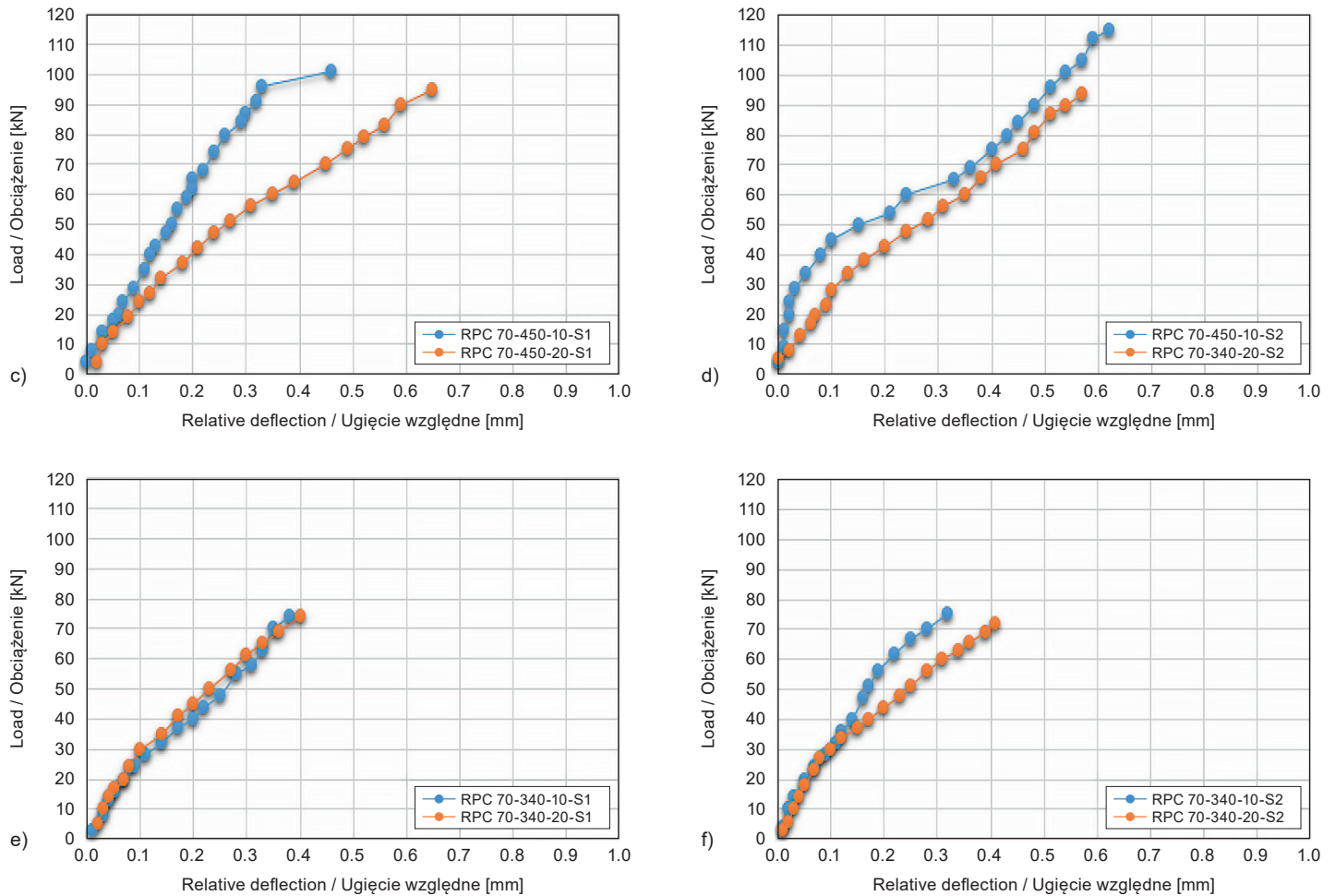


Fig. 13. Results of relative deflection RD of specimens with UHPC link slabs for two different joint widths
 Rys. 13. Wyniki pomiarów ugięcia względnego RD dla próbek zawierających płyty łącznikowe z UHPC
 w przypadku zastosowania dwóch różnych szerokości spoiny →



← Fig. 13. (Continuous) Results of relative deflection RD of specimens with UHPC link slabs for two different joint widths
 Rys. 13. (Kontynuacja) Wyniki pomiarów ugięcia względnego RD dla próbek zawierających płyty łącznikowe z UHPC w przypadku zastosowania dwóch różnych szerokości spoiny

4.5.3. The effect of link slab thickness

The experimental results of the load-deflection response of specimens with UHPC link slabs for two different thicknesses (100 mm, 70 mm) are shown in Fig. 14. In general, deflections for specimens with the thickness of 70 mm were more advantageous than those for specimens with the thickness of 100 mm. As seen in Fig. 14a-d, the deflection for 70-mm-thick link slab specimens decreased by 30.3%-38.18% compared with 100-mm-thick link slab specimens, due to the link slab's aspect ratio, which was greater for those specimens. When the thickness of the link slab was 100 mm (which affected the load-deflection behavior), shear failure occurred; whereas when the thickness was 70 mm, flexural failure occurred, which is less disadvantageous than shear failure. There was also an

4.5.3. Wpływ grubości płyty łącznikowej

Wyniki eksperymentu doświadczalnego w zakresie wpływu parametru grubości płyty łącznikowej UHPC na jej ugięcie wskutek obciążenia pokazano na przykładzie dwóch różnych płyt: o wymiarze 100 mm oraz 70 mm (Rys. 14). Ogólnie rzecz biorąc, wartości ugięcia dla próbek z płytą o grubości 70 mm były niższe niż w przypadku próbek z płytą o grubości 100 mm. Jak widać na Rys. 14a-d, ugięcie w przypadku płyt łącznikowych UHPC o grubości 70 mm było mniejsze o 30,3-38,18% w porównaniu z płytami o grubości 100 mm, na co miał decydujący wpływ bardziej korzystny współczynnik kształtu cieńszej płyty. Gdy grubość płyty łącznikowej wynosiła 100 mm wystąpiło jej uszkodzenie pod zwiększonym obciążeniem wskutek zaistnienia siły ścinającej, natomiast

increase in the ultimate load (by 2.17% to 27.7%), especially when the joint width was 10 mm.

On the other hand, the *RD* results revealed a reduction in deflection as the thickness of the UHPC link slab was reduced to 70 mm, as depicted in Fig. 15. This effect was especially notable for the 10-mm-joints (narrow joints).

w przypadku gdy grubość płyty miała wymiar 70 mm, doszło do jej uszkodzenia przy zginaniu, które jest w skutkach mniej niszczące. W tym drugim przypadku nastąpił również wzrost dopuszczalnego obciążenia granicznego (o 2,17% do 27,7%), zwłaszcza gdy szerokość spoiny łączącej wynosiła 10 mm.

Z drugiej strony, wyniki pomiarów ugięcia względnego *RD* wykazały jego mniejszą wartość dla płyty łącznikowej z betonu UHPC o grubości 70 mm niż w przypadku płyty o grubości 100 mm (Rys. 15). Efekt ten był szczególnie zauważalny w przypadku zastosowania wąskich spoin łączących o szerokości 10 mm.

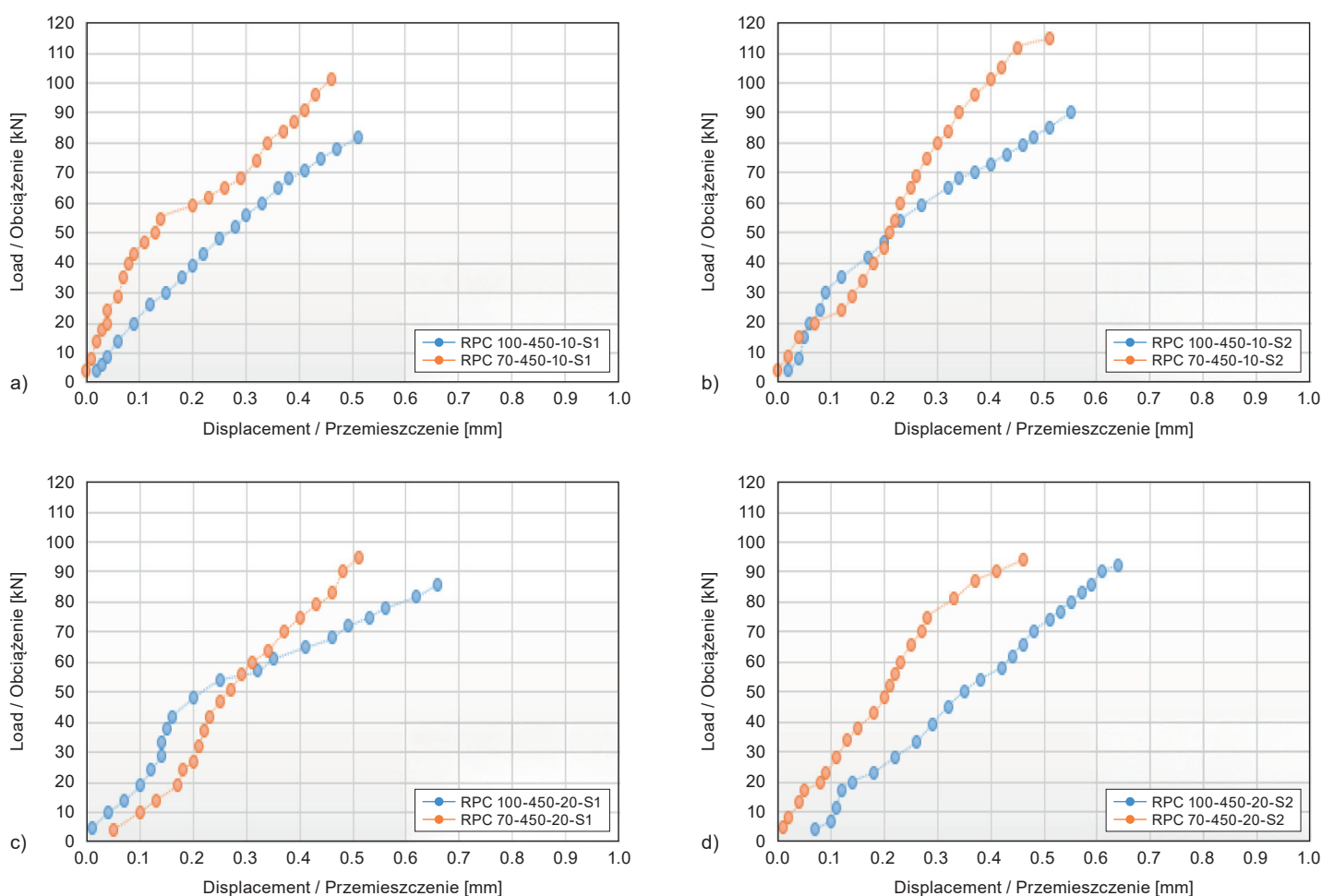


Fig. 14. Load-deflection response of specimens with UHPC link slabs for different link slab thicknesses

Rys. 14. Porównanie ugięcia wskutek obciążenia próbek zawierających płyty łącznikowe UHPC w przypadku zastosowania różnych grubości płyt

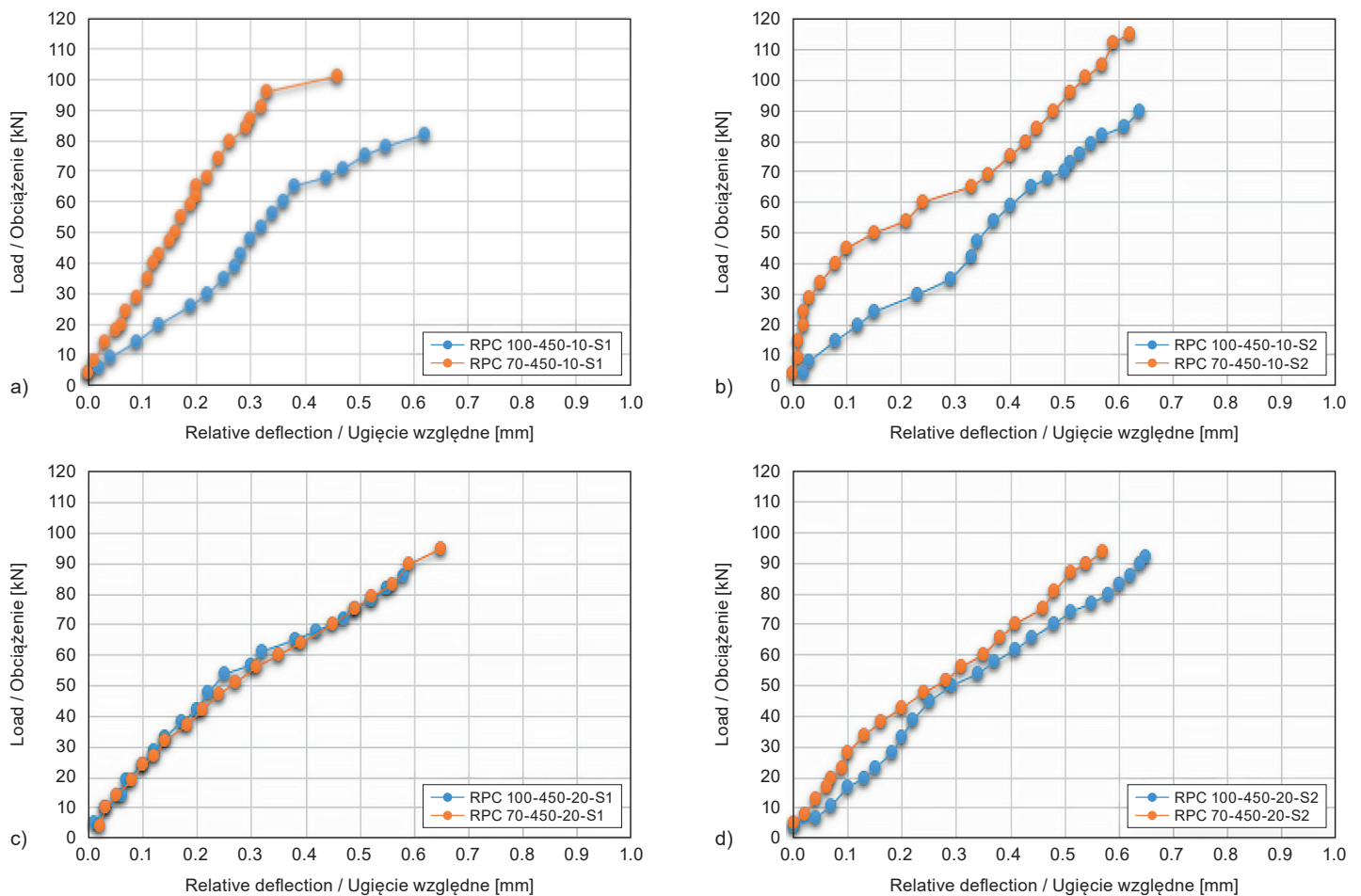


Fig. 15. Results of relative deflection RD for specimens with UHPC link slabs for different link slab thicknesses

Rys. 15. Wyniki ugięcia względnego RD dla próbek zawierających płyty łącznikowe UHPC w przypadku zastosowania różnych grubości płyt

4.5.4. Effect of link slab length

In the current investigation, the suggested link slab lengths were 450 mm and 340 mm. Fig. 16 (a-d) exhibits the results of load-deflection response for specimens with UHPC link slabs for the two aforementioned lengths. When specimens are compared based on the link slab length, it is observable that the deflection was lower and the ultimate load was greater for specimens with the longer link slab. Although the deflection at ultimate load was higher when the length of link slab was 450 mm (compared to 340 mm), deflections registered for the 450-mm-long slabs were generally lower at the same load level. The ultimate load increased by 28.38%-53.3%, as shown in Fig. 16a-d. The increase in length means that the applied load is distributed over a larger overall surface area; subsequently the increase in area results in lesser deflection and greater load-bearing capacity than in the

4.5.4. Wpływ długości płyty łącznikowej

Jak już wcześniej wspomniano w badaniu wykorzystano płyt łącznikowe UHPC o długości 450 mm oraz 340 mm. Rys. 16a-d przedstawia wyniki pomiarów parametru ugięcia na skutek obciążenia próbek zawierających płyty łącznikowe o dwóch różnych wymienionych długościach. Z porównywania próbek o różnej długości płyty łącznikowej poddanych badaniom na nośność wynika, że ugięcie było mniejsze, a obciążenie niszczące większe w przypadku płyt dłuższych. Choć ugięcie płyty przy obciążeniu granicznym było wyższe w przypadku, gdy jej długość wynosiła 450 mm (w porównaniu do płyty o wymiarze 340 mm), wartości ugięcia zarejestrowane dla płyt o długości 450 mm były ogólnie niższe przy tym samym poziomie obciążenia. Obciążenie graniczne wzrosło o 28,38-53,3% (Rys. 16a-d). Zwiększenie długości płyty UHPC powoduje, że przyłożone obciążenie rozkłada się

case of the shorter link slab. The deflection at the joint face decreased by 14.89%-46%.

The link slab length reduction had no appreciable impact on the *RD* values at the same load level for either scenario, as shown in Fig. 17a-d. Even after a reduction, the area of the link slab remains significantly greater than that of the steel dowel; small dowel area creates additional stresses that increase the probability of failure.

na większej powierzchni całkowitej, co w konsekwencji skutkuje mniejszym ugięciem oraz większą nośnością niż w przypadku zastosowania krótszej płyty łączącej. Ugięcie płyty przy krawędzi zmniejszyło się w tym przypadku o 14,89-46% w stosunku do ugięcia płyty o krótszej długości 340 mm.

Z drugiej strony, zastosowanie płyty łącznikowej o krótszej długości 340 mm nie miało (przy tym samym obciążeniu co dla płyty o wymiarze 450 mm) znaczącego wpływu na osiągane wartości ugięcia względnego *RD* (Rys. 17a-d). Nawet przy krótszej płycie łącznikowej UHPC jej powierzchnia pozostaje jednak znacznie większa niż w przypadku w próbce referencyjnej ze stalowym dyblem, gdzie jego mała powierzchnia nośna powoduje dodatkowe naprężenia zwiększające prawdopodobieństwo uszkodzenia.

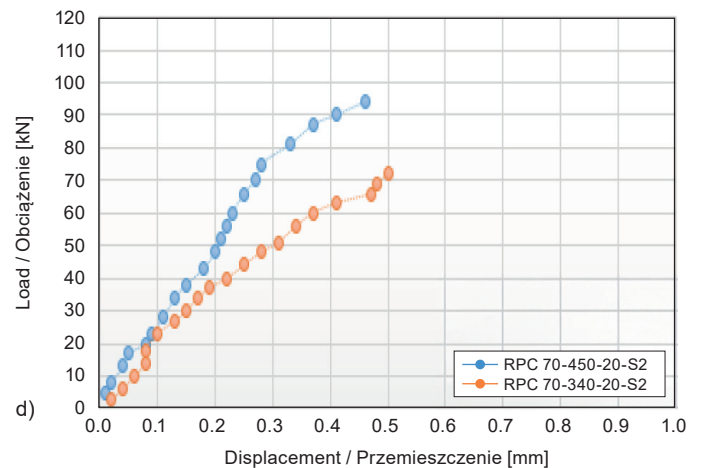
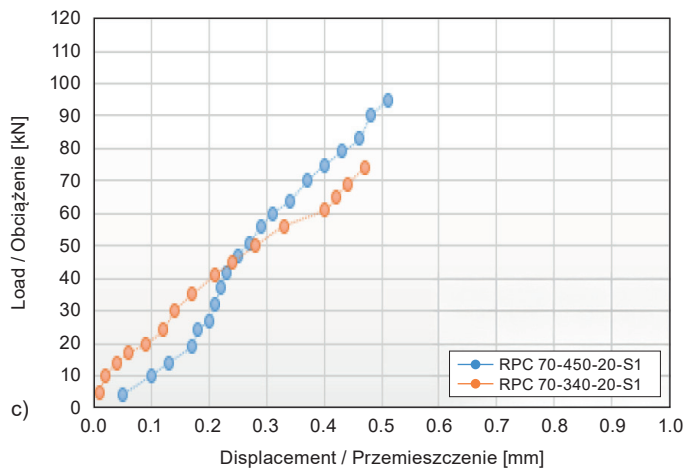
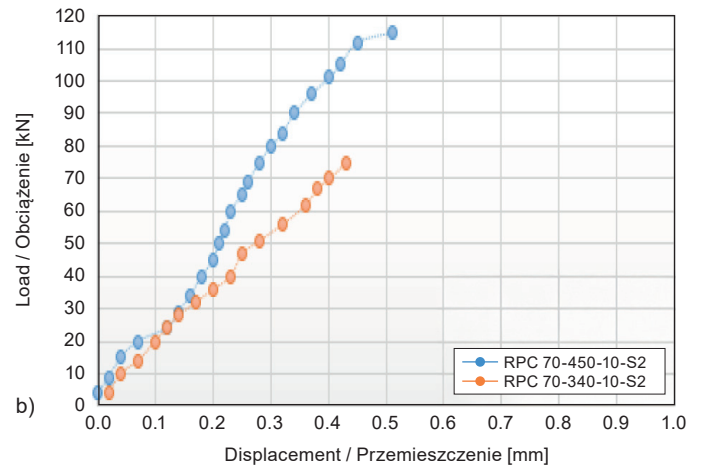
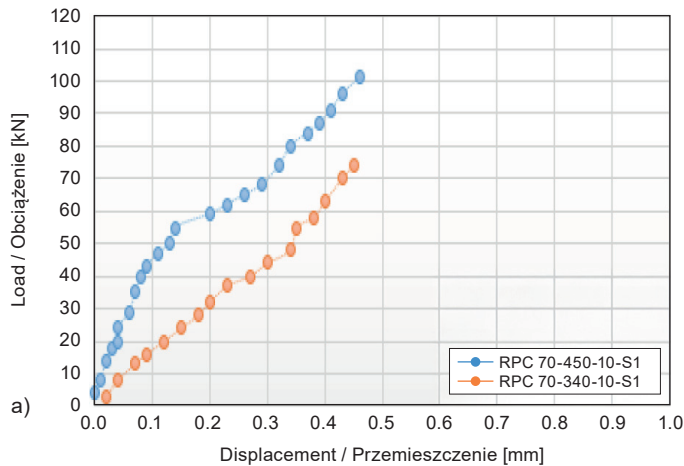


Fig. 16. Load-deflection response for specimens with UHPC link slabs for different link slab lengths

Rys. 16. Wyniki ugięcia pod obciążeniem płyt łącznikowych z betonu UHPC uzyskane dla płyt o różnych długościach

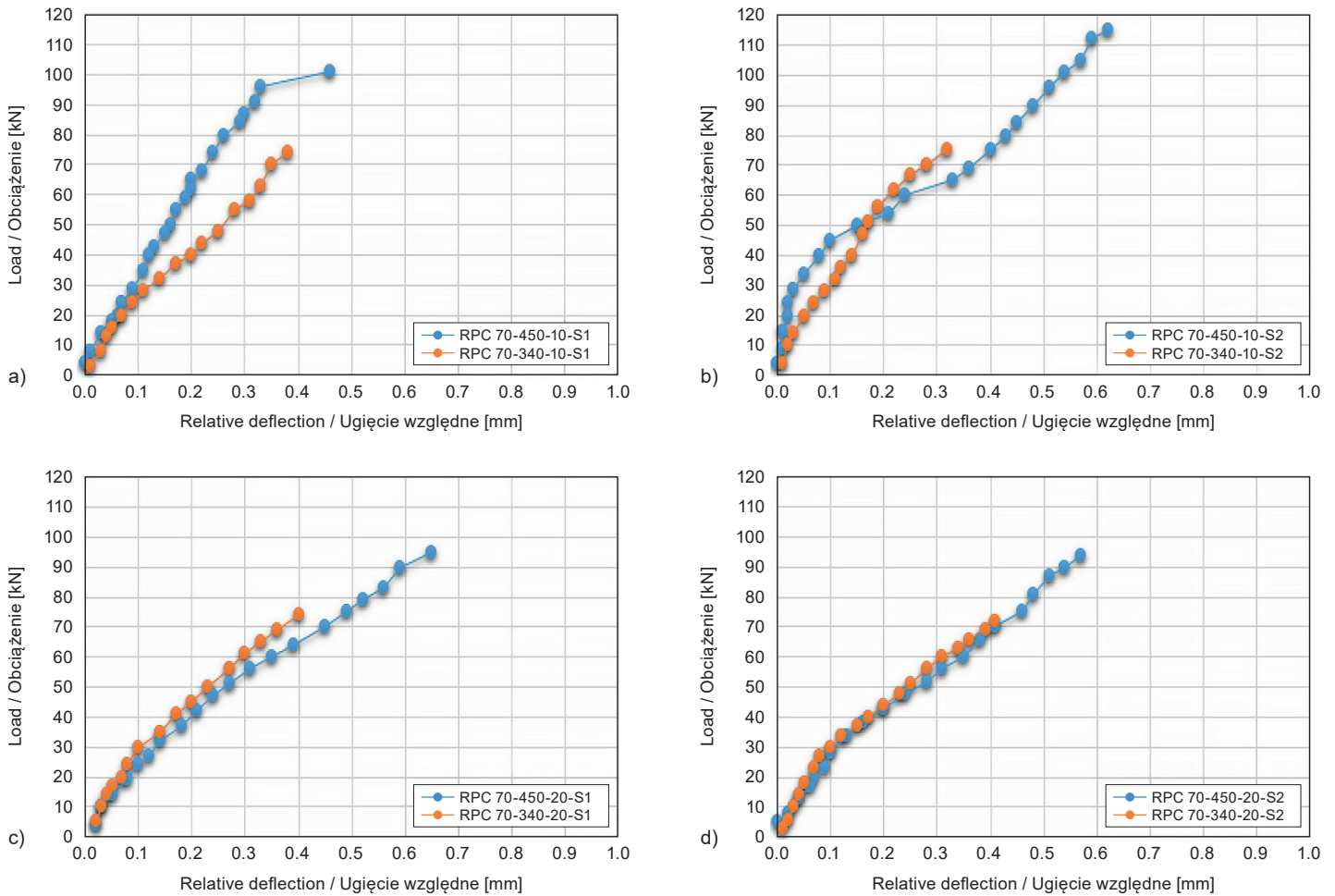


Fig. 17. Results of relative deflection RD for specimens with UHPC link slabs for different link slab lengths
 Rys. 17. Wyniki ugięcia względnego RD płyt łącznikowych z betonu UHPC uzyskane dla płyt o różnych długościach

4.6. FAILURE MODES OF THE SPECIMENS

Fig. 18 shows the modes of failure for the specimens utilized in this study, with the majority of failures occurring at or around the joint region, as expected. The failure in UHPC link slab specimens consisted in flexural cracking when the link slab thickness was 70 mm or shear cracking when the link slab thickness was 100 mm (due to the shorter aspect ratio), as seen in Fig. 18. The crack width increased with the applied load until the specimen failed.

4.6. RODZAJE ZNISZCZENIA PRÓBEK

Rys. 18 przedstawia mechanizm zniszczenia próbek poddanych badaniom obciążeniowym, podczas których większość uszkodzeń płyty UHPC nastąpiła zgodnie z przewidywaniami w obszarze łączenia z nawierzchnią sztywną lub w pobliżu. Jak już wcześniej podano uszkodzenia w próbkach zawierających płyty łączące UHPC polegało na pękaniu podczas zginania płyty o grubości 70 mm lub pękaniu podczas ścinania płyty o grubości 100 mm na co miał wpływ niższy współczynnik kształtu uwzględniający korzystniejsze proporcjach wymiarów. Szerokość pęknięcia zwiększała się stopniowo wraz z przyłożonym obciążeniem, aż do zniszczenia próbki.

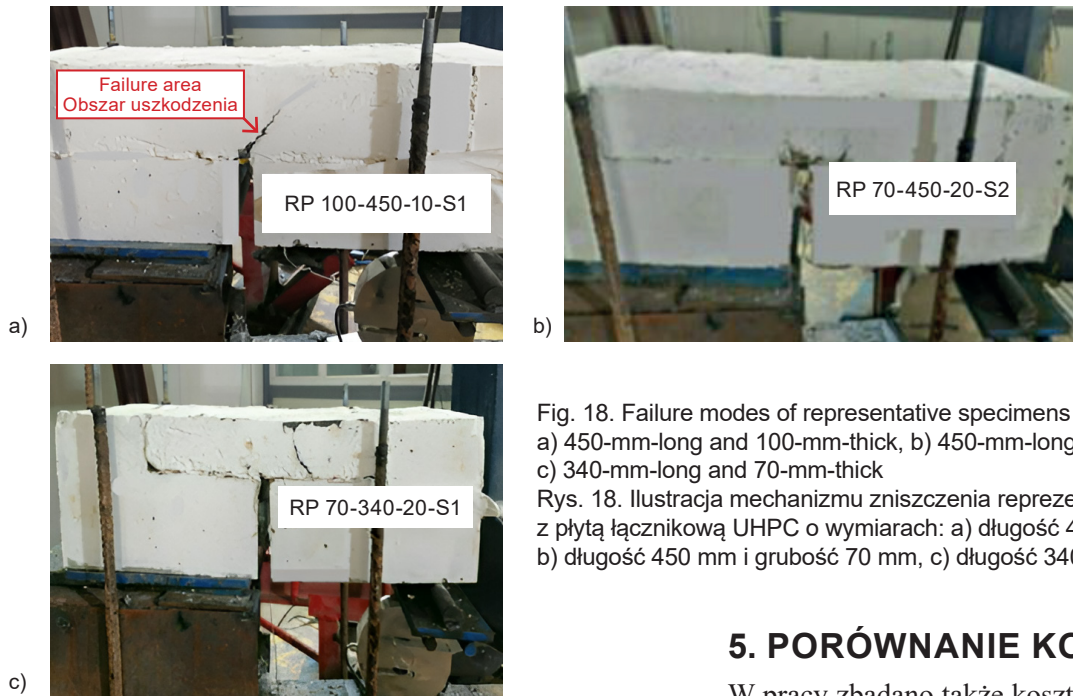


Fig. 18. Failure modes of representative specimens failure of UHPC link slab: a) 450-mm-long and 100-mm-thick, b) 450-mm-long and 70-mm-thick, c) 340-mm-long and 70-mm-thick

Rys. 18. Ilustracja mechanizmu zniszczenia reprezentatywnych próbek z płytą łącznikową UHPC o wymiarach: a) długość 450 mm i grubość 100 mm, b) długość 450 mm i grubość 70 mm, c) długość 340 mm i grubość 70 mm

5. COST COMPARISON

In addition to the experimental work conducted in this study, cost comparison is another important factor that should be taken into consideration given the high cost of UHPC. The cost analysis is based on comparing the cost of UHPC on a single joint with the cost of a conventional steel dowel joint along with its routine maintenance cost, assuming UHPC joint is highly durable and does not require maintenance over the given road life span, which is assumed to be 25 years. Dowelled joints require repetitive repairs [28]. The maintenance repair routine for dowelled joints reported in the literature [29] is taken as a reference for comparison with UHPC link slab joints. From the referenced routine, only the repair stages that apply to dowelled joints are included, as shown in Table 4. It is clear that the initial cost of the UHPC link slab is higher than that of the steel dowel bars. On the other hand, the cost of routine maintenance of the dowelled joints is higher than that of the UHPC link slab, owing to the durability characteristics displayed by UHPC.

5. PORÓWNANIE KOSZTÓW

W pracy zbadano także koszty wykorzystania płyty łącznikowej z UHPC zamiast stalowych łączników dyblowych. Takie porównanie kosztów jest kolejnym ważnym elementem kompleksowej oceny, który należy uwzględnić pamiętając o wysokich kosztach wytwarzania betonu UHPC. Analiza ta opierała się na porównaniu kosztów zastosowania pojedynczej płyty łącznikowej z betonem UHPC z kosztami konwencjonalnego stalowego połączenia dyblowego wraz rutynowymi nakładami na jego utrzymanie, przy założeniu, że połączenie wykonane z betonu UHPC jest bardzo trwałe i nie wymaga konserwacji w przewidzianym na 25 lat okresie użytkowania nawierzchni sztywnej. Jak wiemy z doświadczenia, połączenia dyblowe wymagają powtarzalnych napraw [28]. Koszt rutynowych napraw połączeń dyblowych opisanych w [29] przyjęto w analizie jako punkt odniesienia do porównania kosztów utrzymania połączeń wykonanych płytami z betonu UHPC. W przywołanej procedurze oszacowania poszczególnych kosztów uwzględniono jedynie naprawy połączeń dyblowych, zakładając że połączenia nawierzchni sztywnych płytą UHPC są bardzo trwałe i nie wymagają napraw (Tabl. 4). Oczywistym jest fakt, że początkowy koszt wytworzenia płyty łączącej z betonu UHPC jest wyższy niż koszt produkcji stalowych dybli. Z drugiej jednak strony, koszt rutynowej naprawy połączeń dyblowych jest znacznie wyższy niż w przypadku konserwacji płyty łącznikowej z betonu o wysokiej wytrzymałości UHPC.

Table 4. Repair cost comparison of a single dowelled joint and a single UHPC link slab joint

Tablica 4. Porównanie kosztów naprawy łączenia płyt nawierzchni pojedynczym stalowym dyblem oraz pojedynczego łączenia płyty łącznikowej UHPC

Repair Stage Etap naprawy	Type of repair Typ naprawy	Joint type / Typ łączenia			
		Dowelled joint Połączenia dyblowe			UHPC link slab joint Połączenia płytą z betonu UHPC
		Unit repair cost Jednostkowy koszt naprawy [USD]	Frequency in 25 years Częstotliwość napraw w ciągu 25 lat	Cost in 25 years Koszt napraw w ciągu 25 lat [USD]	Unit cost Koszt jednostkowy [USD]
Preservation measures Chemiczne środki zabezpieczające	Reseal joints and cracks Uszczelnianie łączy i pęknięć	3.125	4	12.5	—*)
Functional concrete pavement repair Naprawa funkcjonalnej nawierzchni betonowej	Partial depth repair Naprawa w zakresie do określonej głębokości płyty	14.6	3	43.7	—*)
Structural concrete pavement repair Naprawa nawierzchni z betonu strukturalnego	Restore load transfer Przywrócenie funkcjonalności przenoszenia obciążenia	30	2	60	—*)
Remove and replace Usunięcie i wymiana	Full depth repair Naprawa w zakresie do całkowitej głębokości płyty	15.25	2.5	38	—*)
Initial cost [USD] / Koszt wstępny		13			24.7
Total cost [USD] / Koszt całkowity		167.2			24.7
*) – not applicable / nie dotyczy					

6. CONCLUSIONS

An experimental study was carried out to investigate and compare the load transfer and load-deflection behavior of plain concrete pavement jointed using UHPC link slabs. The variables investigated in the study included joint width, number of shear studs, thickness and link slab length. Based on the experimental results obtained on twelve specimens, the following conclusions can be drawn:

- Generally, the deflection of specimens with UHPC link slabs is smaller than that of the steel dowel specimens, especially at the face of the joint.
- Changes in joint width, number of shear studs on each side of the concrete block, and thickness and length of the link slab all influenced the deflection of specimens with UHPC link slabs.

6. WNIOSKI

Przeprowadzone eksperymenty doświadczalne miały na celu zbadanie i porównanie mechanizmu przenoszenia obciążeń oraz określenie ugięcia płyty łącznikowej z betonu o wysokiej wytrzymałości UHPC zastosowanej do połączenia sąsiednich płyt z betonu zwykłego w nawierzchniach sztywnych. Podczas przeprowadzonych testów obciążeniowych na próbkach modelowych o naturalnych wymiarach badano wpływ geometrii obciążonej płyty łącznikowej UHPC (grubość i długość płyty, szerokość łączenia, liczba łączników ścinanych) na jej parametry wytrzymałościowe (ugięcie, ugięcie względne, nośność). Na podstawie wyników badań dwunastu próbek z płytą łącznikową UHPC sformułowano następujące wnioski:

- Except for the number of shear studs (a slight increase in load transfer efficiency when two shear studs were used on each side of the concrete block), none of the other parameters of the UHPC link slab affected load transfer between the adjacent slabs across the joint. In general, load transfer efficiency was slightly higher in the UHPC link slab joints than in the steel dowel specimens.
- Among the four test parameters – joint width, shear stud number, thickness and length of the UHPC link slab – relative deflection *RD* was more sensitive to changes in UHPC link slab length and thickness. *RD* decreased by 56.12%-81.81% for specimens that had link slab of 450 mm and 70 mm in length and thickness, respectively, compared with specimens with steel dowels. Changes in joint width, on the other hand, had greater effect on relative deflection of joints with steel dowels than that of joints with UHPC link slab.
- The load-deflection response was better in specimens with UHPC link slabs than in those with dowel bars (less deflection). Deflection decreased by 47.46%-61.54% for specimens that had link slab of 450 mm and 70 mm in length and thickness, respectively, at the load of 60 kN.
- The ultimate load was more sensitive to changes in UHPC link slab length and thickness than other parameters. It increased by 38.24%-88.52% for specimens that had link slabs of 450 mm and 70 mm in length and thickness, respectively, compared with doweled specimens.
- The experimental results showed that the an UHPC link slab performs best as a substitute for a doweled joint when it is 450-mm-long (i.e. same length as the dowel bar) and 70-mm-thick; it provided less deflection and higher load-bearing capacity compared to other specimens that were 100-mm-thick for the same length.
- Failure in UHPC link slab specimens consisted in flexural cracking when the link slab thickness was 70 mm and shear cracking when the link slab thickness was 100 mm.
- The study involved monotonic static load applied to the joint. Future research based on fatigue tests is recommended in order to investigate the durability of the proposed joint.
- Generalnie, ugięcie pod wpływem zastosowanego obciążenia statycznego płyt łącznikowych wykonanych z betonu UHPC było mniejsze (szczególnie na powierzchni przy krawędzi spoiny) niż w przypadku – używanych konwencjonalnie do połączeń sąsiednich płyt sztywnych – stalowych dybli.
- Parametry płyty łącznikowej z betonu UHPC takie jak szerokość łączenia (szczelina dylatacyjna), liczba łączników ścinanych po każdej stronie betonowego bloku oraz grubość i długość miały wpływ na jej ugięcie płyt pod wpływem statycznego obciążenia monotonicznego.
- Z wyjątkiem liczby łączników ścinanych (niewielki wzrost wydajności przenoszenia obciążenia w przypadku zastosowania dwóch łączników ścinanych po każdej stronie betonowego bloku), żaden z pozostałych parametrów płyty łącznikowej z betonu UHPC nie wpłynął na przenoszenie obciążenia w kierunku poprzecznym między sąsiednimi płytami. Efektywność przenoszenia obciążeń była nieco wyższa przy stosowaniu płyt łącznikowych z betonu UHPC niż w przypadku połączeń sąsiednich płyt betonowych tradycyjnymi stalowymi dyblami.
- Spośród czterech badanych podczas testów parametrów płyty łącznikowej z UHPC (szerokość łączenia, liczba łączników ścinanych, długość oraz jej grubość) tylko zmiany długości i grubości płyty miały wyraźny wpływ na ugięcie względne *RD*. Wartość parametru *RD* zmniejszyła się o 56,12-81,81% w przypadku zastosowania płyty łącznikowej o długości 450 mm i grubości 70 mm w porównaniu do próbek, w których połączenie sąsiednich bloków betonowych zapewniały stalowe dyble. Zmiana szerokości szczeliny dylatacyjnej miała większy wpływ na względne ugięcie *RD* w przypadku połączeń sąsiednich bloków betonowych stalowymi dyblami niż dla połączeń z wykorzystaniem płyty UHPC.
- W przypadku zastosowania płyt łącznikowych z UHPC ich ugięcie było mniejsze niż dla płyt sztywnych połączonych stalowymi dyblami. Przy obciążeniu 60 kN ugięcie płyty łącznikowej UHPC o długości 450 mm i grubości 70 mm zmniejszyło się o 47,46-61,5% w porównaniu do płyt połączonych stalowymi dyblami.

REFERENCES / BIBLIOGRAFIA

- [1] *Löfsjögård M.*: A laboratory investigation on bonding properties of dowels in concrete roads. *Materials and Structures*, **38**, 7, 2005, 721-728, DOI: 10.1007/BF02484317
- [2] *Porter M.L., Guinn R.J., Lundy A.L., Davis D.D., Rohner J.G.*: Investigation of glass fiber composite dowel bars for highway pavement slabs. Iowa State University, Engineering Research Institute, Ames, 2001
- [3] *Bian Y.*: Investigation of fiber reinforced polymer (FRP) dowel bars in rigid pavements. PhD thesis, University of California, Davis, 2009
- [4] *Porter M., Pierson N.*: Laboratory evaluation of alternative dowel bars for use in Portland cement concrete pavement construction. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, **2040**, 1, 2007, 80-87, DOI: 10.3141/2040-09
- [5] *Vijay P.V., Ganga Rao H.V.S., Li H.*: Design and evaluation of jointed plain concrete pavement with fibre reinforced polymer dowels. Report No. FHWA-HRT-06-106, Federal Highway Administration, McLean, 2009.
- [6] *Richard P., Cheyrezy M.H.*: Reactive powder concretes with high ductility and 200-800 MPa compressive strength. *ACI Symposium Publication*, **144**, 507-518, DOI: 10.14359/4536
- [7] *Richard P., Cheyrezy M.*: Composition of reactive powder concretes. *Cement and Concrete Research*, **25**, 7, 1995, 1501-1511, DOI: 10.1016/0008-8846(95)00144-2
- [8] *Naji A.J., Al-Jelawy H.M., Hassoon A., Al-Rumaithi A.*: Axial Behavior of Concrete Filled-steel Tube Columns Reinforced with Steel Fibers. *International Journal of Engineering*, **35**, 9, 2022, 1682-1689, DOI: 10.5829/ije.2022.35.09c.02
- [9] *Wing K.M., Kowalsky M.J.*: Behavior, analysis, and design of an instrumented link slab bridge. *Journal of Bridge Engineering*, **10**, 3, 2005, 331-344, DOI: 10.1061/(ASCE)1084-0702(2005)10:3(331)
- [10] *Caner A., Zia P.*: Behavior and design of link slabs for jointless bridge decks. *PCI Journal*, **43**, 3, 1998, 68-80, DOI: 10.15554/pcij.05011998.68.80
- [11] *Gastal F., Zia P.*: Behavior and design of link slabs for jointless bridge decks. In: *Durability of Structures*. IABSE Symposium, 6-8 September 1989, Lisbon (IABSE Report Volume 57/2)
- [12] *Xue J., Briseghella B., Huang F., Nuti C., Tabatabai H., Chen B.*: Review of ultra-high performance concrete and its application in bridge engineering. *Construction and Building Materials*, **260**, 2020, Article ID: 119844, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119844
- [13] *Reed C.*: Evaluation of Functionality and Service Life of Ultra-High Performance Concrete Link Slab Connections for Bridges. Master's Thesis, University of Oklahoma, 2022
- Wartość dopuszczalnego obciążenia maksymalnego była bardziej zależna od zmian długości i grubości płyty łączącej z UHPC niż od inny pozostałych parametrów geometrycznych związanych z płytą. Wartość obciążenia granicznego była wyższa o 38,24%-88,52% przy zastosowaniu jako łącznika sąsiednich bloków betonowych płyty z UHPC o długości 450 mm i grubości 70 mm w porównaniu z próbką, gdzie położone obok siebie bloki zostały połączone stalowymi dyblami.
- Płyta łącznikowa z betonu UHPC najlepiej sprawdziła się jako alternatywa połączenia dyblowego, gdy jej długość wynosiła 450 mm (tj. taką samą jak miał stalowy dybel) i grubość 70 mm. Te parametry geometryczne płyty wywołały mniejsze ugięcie i wyższą nośność niż w przypadku badań porównawczych próbek z płytą o tej samej długości i większej grubości 100 mm.
- Mechanizm zniszczenia próbek zawierających płyty łącznikowe z betonu UHPC polegał na pękaniu podczas zginania w przypadku zastosowania jako łącznika płyty o grubości 70 mm oraz pękaniu podczas ścinania w przypadku płyty łączącej o grubości 100 mm.
- Badanie polegało na przykładaniu monotonicznego obciążenia statycznego na łączniku płyt nawierzchni sztywnej. Zaleca się przeprowadzenie w przyszłości testów zmęczeniowych w celu zbadania trwałości proponowanego łączenia.
- [14] *Haber Z.B., Foden A., McDonagh M., Ocel J.M., Zmetra K., Graybeal B.A.*: Design and Construction of UHPC-Based Bridge Preservation and Repair Solutions (No. FHWA-HRT-22-065). Federal Highway Administration, Office of Infrastructure Research and Development, McLean, 2022
- [15] *Kinaine A.F., Al-Jelawy H.M.*: Using Short Ultra-High Performance Concrete Link Slab as an Alternative to Steel Dowel Bars in Rigid Pavements. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **1232**, 1, 2023, Article ID: 012053, DOI: 10.1088/1755-1315/1232/1/012053
- [16] *AASHTO* guide for design of pavement structures. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, 1993
- [17] *Mannava S.S., Bush Jr. T.D., Kukreti A.R.*: Load-deflection behavior of smooth dowels. *ACI Structural Journal*, **96**, 6, 1999, 891-898, DOI: 10.14359/784
- [18] *Al-Humeidawi B.H., Mandal P.*: Evaluation of performance and design of GFRP dowels in jointed plain concrete pavement – part 2: numerical simulation and design consideration. *International Journal of Pavement Engineering*, **15**, 8, 2014, 752-765, DOI: 10.1080/10298436.2014.893314

- [19] *Al-Humeidawi B.H., Mandal P.*: Numerical evaluation of the combined effect of dowel misalignment and wheel load on dowel bars performance in JPCP. *Engineering Structures*, **252**, 2022, Article ID: 113655, DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.113655
- [20] ASTM C39/C39M-21a: Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. ASTM International, West Conshohocken, 2021
- [21] *Haber Z.B., Mackie K.R., Al-Jelawy H.M.*: Testing and analysis of precast columns with grouted sleeve connections and shifted plastic hinging. *Journal of Bridge Engineering*, **22**, 10, 2017, Article ID: 04017078, DOI: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001105
- [22] *Al-Jelawy H.M., Mackie K.R., Haber Z.B.*: Shifted plastic hinging for grouted sleeve column connections. *ACI Structural Journal*, **115**, 4, 2018, 1101-1114, DOI: 10.14359/51702233
- [23] *Naji A.J., Al-Jelawy H.M., Hassoon A., Al-Rumaithi A.*: Axial Behavior of Concrete Filled-steel Tube Columns Reinforced with Steel Fibers. *International Journal of Engineering*, **35**, 9, 2022, 1682-1689, DOI: 10.5829/ije.2022.35.09c.02
- [24] *Naji A.J., Al-Jelawy H.M., Saadoon S.A., Ejel A.T.*: Rehabilitation and strengthening techniques for reinforced concrete columns. *Journal of Physics: Conference Series*, **1895**, 1, Article ID: 012049, DOI: 10.1088/1742-6596/1895/1/012049
- [25] *Al-Jelawy H., Haber Z., Mackie K.*: Grouted splice precast column connections with shifted plastic hinging. *Proceeding of 16th World Conference on Earthquake – 16WCEE*, Santiago, 2017, Article ID: 2711
- [26] *Al-Jelawy H.M., Mackie K.R., Haber Z.B.*: Experimental and numerical studies on precast bridge columns with shifted plastic hinging. *Eleventh U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, Los Angeles, 2018
- [27] *Wille K., Naaman A.E., Parra-Montesinos G.J.*: Ultra-High Performance Concrete with Compressive Strength Exceeding 150 MPa (22 ksi): A Simpler Way, *ACI Materials Journal*, **108**, 1, 2011, 46-54, DOI: 10.14359/51664215
- [28] *Graczyk M., Gajewski M., Szczerba R.*: Structural analysis of airfield concrete pavement with doweled joints taking into account curling of slabs. *Roads and Bridges – Drogi i Mosty*, **15**, 2, 2016, 137-155, DOI: 10.7409/rabdim.016.009
- [29] *Freeman T.J., Zollinger D.G.*: Guidelines for routine maintenance of concrete pavement (No. FHWA/TX-08/0-5821-1). Texas Transportation Institute, College Station, 2008