**AGNIESZKA WIATER**<sup>1)</sup>

ORCID: 0000-0001-5559-3841

**TOMASZ SIWOWSKI**<sup>2)</sup>

ORCID: 0000-0002-2003-000X

## RESEARCH ON FATIGUE LIFE OF LIGHTWEIGHT CONCRETE BRIDGE DECKS REINFORCED WITH GFRP COMPOSITE REBARS

## BADANIA ZMĘCZENIOWE PŁYT POMOSTOWYCH Z BETONU LEKKIEGO ZBROJONYCH PRĘTAMI KOMPOZYTOWYMI GFRP

**STRESZCZENIE.** Betonowe płyty pomostowe wykonane z betonu lekkiego (LWC) i zbrojone prętami kompozytowymi (FRP) stanowią korzystną alternatywę dla konwencjonalnych płyt żelbetowych, w szczególności przy modernizacji istniejących mostów. Jednym z krytycznych stanów granicznych warunkujących możliwość zastosowania płyt LWC/FRP w pomostach mostów drogowych jest nośność zmęczeniowa. Niniejsza praca przedstawia wyniki badań w zakresie nośności zmęczeniowej takich płyt. Badaniom poddano łącznie dziewięć pełnowymiarowych płyt betonowych o wymiarach 3,0 m × 1,0 m × 0,18 m. Głównymi parametrami płyt porównywanymi w badaniach były: rodzaj betonu (lekki vs. zwykły), stopień zbrojenia płyt oraz poziom obciążenia zmęczeniowego. Wyniki badań zmęczeniowych przeanalizowano w oparciu o analizę stanu zarysowania i ugięcia płyt oraz ocenę liczby cykli zmęczeniowych i postaci zniszczenia. Zweryfikowano także procedury projektowe przyjęte w wybranych normach.

**SŁOWA KLUCZOWE:** beton lekki, nośność zmęczeniowa, płyty pomostowe, zbrojenie kompozytowe.

**ABSTRACT.** Concrete deck slabs made of lightweight concrete (LWC) and reinforced with composite bars (FRP) are an advantageous alternative to conventional reinforced concrete slabs, especially when retrofitting existing bridges. One of the critical limit states determining the possibility of using LWC/FRP slabs in road bridge decks is fatigue life. This paper presents the results of research in the field of fatigue life of such decks. A total of nine full-size concrete slabs measuring 3.0 m × 1.0 m × 0.18 m were tested. The main parameters of the slabs compared in the study were: type of concrete (light vs. ordinary), reinforcement ratio of the slabs and the level of fatigue load. The results of fatigue tests were analysed based on crack morphology analysis and slab deflection as well as fatigue life and failure form evaluation. Design procedures adopted in selected standards were also verified to assess the fatigue life of such decks.

**KEYWORDS:** composite reinforcement, deck slabs, fatigue life, lightweight concrete.

DOI: 10.7409/rabdim.024.008

<sup>1)</sup> Politechnika Rzeszowska, Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury, Katedra Dróg i Mostów, ul. Poznańska 2, 95-084 Rzeszów; wiater@prz.edu.pl (✉)

<sup>2)</sup> Politechnika Rzeszowska, Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury, Katedra Dróg i Mostów; siwowski@prz.edu.pl

## 1. WPROWADZENIE

Płyta pomostu to element konstrukcyjny drogowego obiektu mostowego, który przekazuje i rozkłada bezpośrednie obciążenie pojazdu samochodowego na belki pomostu i dźwigary główne. Najbardziej rozpowszechnionym rodzajem płyt pomostowych jest płyta żelbetowa o grubości 20-30 cm wykonywana monolitycznie i najczęściej zespolona z belkami pomostu i/lub z dźwigarami głównymi. Poprawnie zaprojektowana i utrzymywana żelbetowa płyta pomostu może bezpiecznie przenosić obciążenia od ruchu drogowego przez kilkadziesiąt lat eksploatacji obiektu. Jednakże ze względu na stale zwiększające się natężenie ruchu pojazdów ciężkich oraz wzrastającą agresywność środowiska potęgowaną przez konieczność zimowego utrzymania mostów, a także nieuniknione ograniczenia środków na utrzymanie mostów, trwałość płyt żelbetowych jest kilkukrotnie niższa od trwałości pozostałych głównych elementów obiektów mostowych [1, 2].

W ciągu ostatnich kilkunastu lat opracowano i wdrożono liczne rozwiązania technologiczne, materiałowe i konstrukcyjne, służące wydłużeniu życia technicznego płyt pomostowych obiektów mostowych. W pracach [1-3] zostały przedstawione nowe rodzaje płyt pomostów, które są stosowane głównie przy przebudowach i modernizacjach istniejących obiektów mostowych. Wśród nich są zarówno rozwiązania z materiałów konwencjonalnych (stal i beton wysokowartościowe, beton z inhibitorami korozji, wysokowartościowe betony lekkie) jak również materiałów niekonwencjonalnych, takich jak kompozyty włókniste, stopy aluminium, szkło lub drewno klejone. Z szerokiej gamy niekonwencjonalnych pomostów mostów drogowych jako przedmiot prac naukowo-badawczych autorzy wybrali betonowe płyty pomostowe, prefabrykowane lub monolityczne, wykonane z betonu lekkiego LWC (ang. *lightweight concrete*) i zbrojone prętami kompozytowymi FRP (ang. *fibre reinforced polymer*). W obecnych warunkach krajowych rozwiązanie to wydaje się być optymalne pod względem stosunku kosztów do efektu w postaci maksymalnej trwałości płyty. Płyty z betonu lekkiego zbrojone prętami kompozytowymi (dalej: płyty LWC/FRP) łączą wysoką wytrzymałość i trwałość kompozytu z możliwością redukcji ciężaru własnego pomostu przez użycie betonu lekkiego, co w przypadku przebudowy lub modernizacji mostu prowadzi zwykle do zwiększenia jego nośności użytkowej.

## 1. INTRODUCTION

Deck slab is a structural element of a road bridge which distributes direct loads from vehicles onto deck beams and main girders. The most popular deck type comprises 20-30-cm-thick monolithic reinforced concrete slab, which is typically connected with deck beams and/or main girders for composite performance. An adequately designed and maintained deck slab of reinforced concrete may safely carry road traffic loads throughout service life spanning decades. However, due to the growing heavy vehicle traffic volumes, increasing aggression of the environment related to winter maintenance and the unavoidable limitations on bridge maintenance budgets, service life of reinforced concrete slabs is several-fold shorter than service life of other primary structural members of bridges [1, 2].

In the last two decades, various technological, material and structural solutions have been developed and introduced to extend the service life of bridge deck slabs. Works [1-3] presented new types of deck slabs, used mainly in reconstruction and retrofitting of existing structures. They include both conventional materials (high-strength steel and concrete, concrete with corrosion inhibitors, high-strength lightweight concretes) and unconventional materials, such as fiber-reinforced composites, aluminum alloys, glass or glued laminated timber. Out of the wide range of unconventional road bridge decks, the authors of this study have chosen lightweight concrete (LWC) deck slabs (precast and monolithic) reinforced with fiber-reinforced polymer (FRP) rebars as the subject of their research. In current Polish conditions, this solution seems optimal in terms of cost-effectiveness of slab service life extension. Lightweight concrete slabs with fiber-reinforced polymer bars (hereinafter referred to as LWC/FRP slabs) combine high strength and durability of the composite with a reduction in deck self-weight provided by the use of lightweight concrete. This typically leads to an increase in service life during bridge reconstruction or retrofitting.

The first Polish study on LWC/FRP slabs was performed in the Department of Roads and Bridges at the Rzeszow University of Technology [4]. The results of that research enabled the first application of an LWC/FRP deck on a bridge structure in Poland [5]. Preliminary results of the authors' own research, as well as American studies [6, 7], indicate that the use of LWC/FRP deck slabs is feasible

Pierwsze polskie badania płyt LWC/FRP przeprowadzono w Katedrze Dróg i Mostów Politechniki Rzeszowskiej [4]. Wyniki tych badań umożliwiły pierwsze zastosowanie płyty pomostu LWC/FRP na obiekcie mostowym [5]. Wstępne wyniki badań własnych autorów, a także badań amerykańskich [6, 7] wskazują, że stosowanie w mostach drogowych płyt pomostowych typu LWC/FRP jest możliwe i celowe, a ich zachowanie pod obciążeniem eksploatacyjnym nie odbiega zasadniczo od konwencjonalnych żelbetowych płyt pomostowych. Pomimo pierwszego krajowego wdrożenia płyty LWC/FRP w budownictwie mostowym, to rozwiązanie materiałowo-konstrukcyjne wymaga dalszych badań, głównie w celu weryfikacji i ewentualnej modyfikacji istniejących procedur projektowania elementów z betonu lekkiego zbrojonych prętami kompozytowymi.

Zdecydowana większość normowych procedur projektowania elementów betonowych ze zbrojeniem kompozytowym dotyczy elementów z betonu zwykłego. Jednakże, jak wskazują wyniki kilku badań wstępnych [4, 6], w przypadku zastosowania betonu lekkiego procedury te nie są wystarczająco dokładne i nie zapewniają optymalizacji zużycia materiałów. Może to prowadzić do błędnego wymiarowania projektowanych elementów, skutkującego przekroczeniem stanów granicznych podczas eksploatacji obiektów mostowych i/lub zwiększonym zużyciem drogowych materiałów. Żadna z procedur stosowanych we współczesnych normach do projektowania elementów betonowych zbrojonych prętami kompozytowymi nie pozwala na sprawdzanie z satysfakcjonującą dokładnością wszystkich stanów granicznych wymaganych w projektowaniu obiektów mostowych. Na podstawie przeglądu i wstępnych analiz piśmiennictwa autorzy ustalili, że krytycznymi stanami granicznymi warunkującymi możliwość zastosowania płyt LWC/FRP w pomostach mostów drogowych są *nośność na ścinanie* i *nośność zmęczeniowa*. Nośność na ścinanie płyt LWC/GFRP była przedmiotem wcześniejszych badań autorów [8, 9], natomiast niniejsza praca przedstawia wyniki badań i analiz w zakresie oceny zmęczenia takich płyt.

## 2. PRZEGLĄD BADAŃ I PROCEDUR NORMOWYCH

W przeglądzie piśmiennictwa z ostatnich 30 lat nie znaleziono opisu badań zmęczeniowych płyt typu LWC/FRP, za wyjątkiem wstępnych badań przeprowadzonych przez

and justified; their performance under service loads does not considerably differ from that of conventional reinforced concrete deck slabs. Despite the fact that this material-structural solution has already been implemented on a bridge in Poland, it still requires further research, particularly in order to verify and potentially modify the existing design procedures for LWC/FRP elements.

The vast majority of standard design procedures for concrete elements with composite reinforcement pertains to usage of normal concrete. However, several preliminary studies [4, 6] indicated that the existing procedures are not optimum for LWC elements, as they do not provide adequate material quantities. This may lead to incorrect geometrical design of members, resulting in exceeding of limit states during service and/or increased usage of expensive materials. None of the procedures available in the current standards for the design of concrete elements reinforced with composite bars enables satisfyingly accurate verification of all the limit states required in bridge design. Based on literature review and preliminary analyses of the available studies, the authors have established that the critical limit states governing the possibility of application of LWC/FRP slabs in road bridge decks are the shearing strength and fatigue life. Shearing strength of LWG/GFRP slabs was researched in previous studies by the authors [8, 9]; this study is focused on testing and analyses of such slabs in terms of their fatigue life.

## 2. REVIEW OF THE AVAILABLE STUDIES AND STANDARD PROCEDURES

Literature review encompassing the last 30 years did not yield any descriptions of fatigue testing of LWC/FRP slabs, except for preliminary tests performed by the authors within one of their research projects [4]. However, there is a greater number of publications pertaining to fatigue testing of deck slabs of normal-weight concrete with composite reinforcement, primarily with glass fiber reinforced polymer (GFRP). The most important studies from the years 2007-2023 will be discussed below in chronological order.

The authors of [10] presented the results of fatigue tests on  $2.50\text{ m} \times 3.00\text{ m} \times 0.20\text{ m}$  slabs of normal concrete with compressive strength of 37 MPa and modulus of elasticity of 34 GPa. The slabs were reinforced with GFRP bars with diameters of 13 mm, 16 mm and 19 mm, tensile strength

autorów w ramach jednego z projektów badawczych [4]. Stosunkowo dużo jest natomiast publikacji z badań zmęczeniowych płyt pomostowych z betonu zwykłego ze zbrojeniem kompozytowym, głównie szklanym GFRP (ang. *glass fibre reinforced polymer*). Najważniejsze z nich z lat 2007-2023 omówiono poniżej w kolejności chronologicznej.

W pracy [10] autorzy przedstawili wyniki badań zmęczeniowych płyt o wymiarach  $2,50 \text{ m} \times 3,00 \text{ m} \times 0,20 \text{ m}$ , wykonanych z betonu zwykłego o wytrzymałości na ściskanie 37 MPa i module sprężystości 34 GPa. Płyty były zbrojone prętami GFRP o średnicach 13 mm, 16 mm i 19 mm, wytrzymałości na rozciąganie 637-756 MPa oraz module sprężystości 44 GPa. Wszystkie płyty zostały poddane skupionemu obciążeniu cyklicznemu ze stałą amplitudą przyłożonemu w środku rozpiętości. W wyniku badań stwierdzono sukcesywne niszczenie (zarysowanie) betonu pod wpływem skumulowanych obciążeń zmęczeniowych, skutkujące narastającym ugięciem aż do zniszczenia płyt przez przebicie. Wykazano, że płyty ze zbrojeniem GFRP miały 3-krotnie większą nośność zmęczeniową od analogicznych płyt ze zbrojeniem stalowym. Autorzy tłumaczą to zbliżonymi modułami sprężystości kompozytu GFRP i betonu oraz liniowo-sprężystą pracą prętów.

W pracy [11] obciążeniu zmęczeniowemu poddano płyty o wymiarach  $2,48 \text{ m} \times 5,00 \text{ m} \times 0,20 \text{ m}$ , wykonane z betonu zwykłego klasy C55/67 o wytrzymałości na ściskanie 54,3 MPa. Płyty były zbrojone prętami GFRP z posypką kwarcową i rowkowaniem o średnicy 12 mm i 16 mm, wytrzymałości na rozciąganie 885 MPa i module sprężystości 39 GPa. Obciążenie zmęczeniowe ze stałą amplitudą było przykładane w dwóch punktach w rozstawie 0,70 m. Autorzy wykazali, że płyty zbrojone prętami GFRP miały zdecydowanie większą nośność zmęczeniową niż oszacowana na podstawie Eurokodu dla mostów betonowych [12]. Płyty zostały zniszczone przez przebicie pod obciążeniem punktowym znacznie większym niż nacisk normowego koła pojazdu ciężkiego.

Obszerne badania zmęczeniowe płyt ze zbrojeniem GFRP przedstawiono w pracy [13]. Program badawczy obejmował obciążenie zmęczeniowe 23 płyt o wymiarach  $0,60 \text{ m} \times 2,40 \text{ m} \times 0,10 \text{ (0,12) m}$ , wykonanych z dwóch różnych betonów zwykłych o wytrzymałości na ściskanie 20,0 MPa i 30,0 MPa. Zbrojenie płyt stanowiły pręty kompozytowe GFRP o średnicy 10 mm z różnym wy-

of 637-756 MPa and modulus of elasticity of 44 GPa. All the slabs were subjected to concentrated cyclic loading with constant amplitude, applied in the middle of their span. The tests indicated successive cracking of concrete due to the accumulated fatigue damage, which led to increasing deflection of the slabs, up to the point of failure (which occurred through punching). It was shown that fatigue life of slabs with GFRP reinforcement was greater by a factor of 3 than fatigue life of corresponding slabs with steel reinforcement. Authors of the work associate this with the fact that moduli of elasticity of the GFRP composite and concrete were comparable, as well as the fact that reinforcement bars acted in linear elastic zone.

In [11] fatigue tests were conducted on  $2.48 \text{ m} \times 5.00 \text{ m} \times 0.20 \text{ m}$  slabs of normal class C55/67 concrete with 54.3 MPa compressive strength. The slabs were reinforced with quartz-coated grooved GFRP bars with diameters of 12 mm and 16 mm, tensile strength of 885 MPa and modulus of elasticity of 39 GPa. Constant-amplitude fatigue loading was applied at two points set 0.70 m apart. Authors of the work demonstrated that the fatigue life of GFRP-reinforced slabs considerably exceeded the evaluations based on the Eurocode for concrete bridges [12]. The slabs failed through punching under concentrated loads that were much greater than loading from the standard heavy vehicle wheel.

Comprehensive fatigue tests of GFRP-reinforced slabs were presented in [13]. The research project encompassed fatigue loading of 23 slabs, with the dimensions of  $0.60 \text{ m} \times 2.40 \text{ m} \times 0.10 \text{ (0.12) m}$ , produced from two different normal-weight concretes with compressive strength of 20.0 MPa and 30.0 MPa. The slabs were reinforced with GFRP bars with the diameter of 10 mm and various types of surface finish: plain, quartz-coated or grooved. The slabs were subjected to cyclic loading with constant amplitude, applied in the four-point bending scheme, with 0.73 m distance between the loading forces. The effect of reinforcement ratio, GFRP bar type and concrete strength on slab fatigue life was expressed qualitatively and quantitatively. For example, the increase in concrete strength provided an increase in fatigue life by a factor of 1.33; the greatest fatigue life was exhibited by slabs with quartz-coated GFRP reinforcement. The research also indicated that fatigue capacity of slabs reinforced with steel was greater than that of slabs with composite reinforcement. It was also confirmed that a safe level of fatigue



kończeniem powierzchni: pręty gładkie, pręty z posypką kwarcową oraz pręty z rowkowaniem. Płyty były poddane obciążeniu cyklicznemu ze stałą amplitudą w schemacie czteropunktowego zginania w rozstawie sił 0,73 m. Na podstawie badań ustalono jakościowy i ilościowy wpływ stopnia zbrojenia, rodzaju prętów GFRP oraz wytrzymałości betonu na nośność zmęczeniową płyt. Na przykład wzrost wytrzymałości betonu zwiększył nośność zmęczeniową płyt 1,33 razy, a największą nośność miały płyty z prętami GFRP z posypką kwarcową. Badania wykazały także większą nośność zmęczeniową płyt zbrojonych stalą w porównaniu z płytami ze zbrojeniem kompozytowym. Potwierdzono także, że bezpieczny poziom obciążenia zmęczeniowego powinien być niższy od ok. 60% maksymalnego obciążenia statycznego (nośności doraźnej).

Badania przedstawione w pracy [14] obejmowały sześć płyt o wymiarach 3,0 m × 4,0 m × 0,24 m, wykonanych z betonu zwykłego o wytrzymałości na ściskanie 36,0 MPa. Płyty były zbrojone prętami GFRP z opłotem o średnicy 16 mm, wytrzymałości na rozciąganie 1066 MPa i module sprężystości 47,8 GPa. Obciążenie zmęczeniowe ze stałą amplitudą było przykładane w środku płyty. Podobnie jak w innych badaniach, stwierdzono sukcesywne niszczenie (zarysowywanie) betonu pod wpływem skumulowanych obciążeń zmęczeniowych, skutkujące narastającym ugięciem aż do zniszczenia płyt przez przebicie. Płyty z prętami GFRP miały zbliżoną nośność zmęczeniową do płyt ze zbrojeniem stalowym, lecz znacznie większe ugięcie trwałe (rezydualne, resztkowe). Największy wpływ na nośność zmęczeniową płyt zbrojonych GFRP miał poziom obciążenia zmęczeniowego, który zdaniem badaczy nie powinien przekraczać ok. 60% maksymalnego obciążenia statycznego (nośności doraźnej) płyt, aby zagwarantować wymaganą nośność zmęczeniową na poziomie 2 mln cykli obciążenia.

Jedne z najnowszych badań zmęczeniowych płyt z zbrojeniem kompozytowym przedstawiono w pracy [15]. Badaniom poddano 6 płyt o wymiarach 0,45 m × 2,00 m × 0,12 m, wykonanych z betonu o wytrzymałości na ściskanie 36,7 MPa i module sprężystości 28,5 GPa. Płyty były zbrojone prętami bazaltowymi BFRP (ang. *basalt fibre reinforced polymer*) z opłotem o średnicy 10 mm i 12 mm, wytrzymałości na rozciąganie w zakresie 1050-1153 MPa oraz module sprężystości w zakresie 46,8-47,3 GPa. Obciążenie zmęczeniowe ze stałą amplitudą było przykładane w dwóch punktach

load should be lower than approx. 60% of the maximum static load (static load carrying capacity).

Research presented in [14] encompassed six 3.0 m × 4.0 m × 0.24 m slabs of normal-weight concrete with compressive strength of 36.0 MPa. The slabs were reinforced with wrapped GFRP bars with the diameter of 16 mm, tensile strength of 1066 MPa and modulus of elasticity of 47.8 GPa. Fatigue loading with constant amplitude was applied in the middle of the slab. Like in other studies, successive cracking of concrete due to the accumulated fatigue damage was noted, leading to increasing deflection of the slabs, up to the point of punching failure. Slabs with GFRP bars and steel bars displayed similar fatigue life; however, slabs with GFRP exhibited considerably greater permanent (residual) deflection. The factor that affected the fatigue life of slabs with GFRP bars to the greatest degree was the level of fatigue loading. According to the researchers, it should not exceed approx. 60% of the maximum static load (static load carrying capacity) if the required fatigue life of 2 million cycles is to be provided.

One of the most recent studies on composite-reinforced slabs was presented in [15]. Six 0.45 m × 2.00 m × 0.12 m slabs were tested. They were produced from concrete with compressive strength of 36.7 MPa and modulus of elasticity of 28.5 GPa. The slabs were reinforced with wrapped basalt fiber reinforced polymer bars (BFRP), with diameters of 10 mm and 12 mm, tensile strength in the range of 1050-1153 MPa and modulus of elasticity in the range of 46.8-47.3 GPa. Fatigue loading with constant amplitude was applied with 0.50 m distance between the loading points. Testing indicated that the main mode of failure consisted in rupture of the BFRP bars. Cracking of slabs subjected to fatigue loading was considerably more intensive than in static tests (due to damage accumulation), but crack widths were comparable. Like in earlier studies, fatigue curves were determined and adequate changes in design procedures were proposed.

In principle, it may be stated that performance of normal-weight concrete with composite reinforcement does not considerably differ from performance of conventional slabs reinforced with steel. Several studies indicated that composite-reinforced slabs had greater fatigue life than steel-reinforced slabs; however, there were also certain studies in which the opposite was true. The studies indicated successive cracking of concrete due to the accumulated fatigue damage, which led to increasing deflection

w rozstawie 0,50 m. Badania wykazały, że główną formą zniszczenia płyt było zerwanie prętów BFRP. Zarysowanie płyt obciążonych zmęczeniowo było znacząco większe niż w badaniach statycznych (kumulacja obciążenia), lecz rozwartości rys były zbliżone. W wyniku badań – podobnie jak w poprzednich pracach – wyznaczono krzywe zmęczeniowe i zaproponowano stosowne modyfikacje procedur projektowych.

Można stwierdzić, że zachowanie płyt z betonu zwykłego ze zbrojeniem kompozytowym pod obciążeniem zmęczeniowym zasadniczo nie odbiega od zachowania konwencjonalnych płyt zbrojonych stalą. Kilukrotnie wykazano, że płyty ze zbrojeniem kompozytowym miały większą nośność zmęczeniową, lecz pojawiły się także badania, gdzie nośność ta była zdecydowanie mniejsza. W wyniku badań stwierdzono sukcesywne niszczenie (zarysowywanie) betonu pod wpływem kumulacji obciążeń zmęczeniowych, skutkujące narastającym ugięciem aż do zniszczenia płyt przez przebicie lub zerwanie prętów. Rozwartości rys nie przekraczały wartości otrzymanych w badaniach statycznych, znacząco większe było jednak ugięcie trwałe po zakończeniu badań. Na podstawie niektórych badań ustalono także jakościowy i ilościowy wpływ wytrzymałości betonu, stopnia zbrojenia oraz rodzaju prętów GFRP na nośność zmęczeniową płyt.

Spośród kilkunastu norm służących do projektowania elementów betonowych zbrojonych prętami kompozytowymi procedurę służącą do oceny nośności zmęczeniowej zawierają tylko dwie normy amerykańskie: norma ogólnobudowlana ACI [16] i norma mostowa AASHTO [17]. Uwzględniając możliwość zmęczenia, norma ACI [16] ogranicza naprężenia w zbrojeniu kompozytowym, wyznaczone dla obciążeń długotrwałych (obciążenia stałe i 20% obciążeń zmiennych) powiększonych o maksymalny moment wywołany w zmęczeniowym cyklu obciążenia. Dla prętów szklanych GFRP wartością graniczną naprężeń jest  $0,20f_{fu}$ , dla prętów aramidowych AFRP jest to  $0,30f_{fu}$ , a dla prętów węglowych CFRP –  $0,55f_{fu}$ , gdzie  $f_{fu}$  to wytrzymałość prętów na rozciąganie, zredukowana z uwagi na środowisko pracy elementu. Z kolei norma AASHTO [17] ogranicza naprężenie w zbrojeniu GFRP do  $0,25f_{fu}$  od charakterystycznej i zmęczeniowej kombinacji obciążeń i oddziaływań, również z uwzględnieniem wpływu środowiska na wytrzymałość prętów na rozciąganie. Oba ograniczenia dotyczą elementów z betonu zwykłego, żadna z norm nie uwzględnia wpływu betonu lekkiego.

of the slabs, up to the point of failure, which occurred through punching or reinforcement rupture. Crack widths did not exceed the values obtained in static tests; however, permanent (residual) deflections after fatigue tests were greater. Some studies also included determination of qualitative and quantitative effects of concrete strength, reinforcement ratio and GFRP bar type on slab fatigue life.

Among all the standards pertaining to the design of concrete elements reinforced with composite bars, procedure for evaluation of fatigue life may be only found in two American standards: the general ACI standard [16] and the AASHTO bridge standard [17]. Due to potential fatigue, the ACI standard [16] limits the stress in composite reinforcement determined for long-term loads (permanent loads plus 20% of variable loads) increased by the maximum bending moment generated in a fatigue cycle. The limit stress value equals  $0.20f_{fu}$  for glass (GFRP) rebars,  $0.30f_{fu}$  for aramid (AFRP) rebars and  $0.55f_{fu}$  for carbon (CFRP) rebars, where  $f_{fu}$  represents the tensile strength of the rebars (reduced adequately to the environment that the element is exposed to). The AASHTO standard [17] limits the stress in GFRP reinforcement to  $0.25f_{fu}$ , using characteristic and fatigue combination of loads and actions, while also taking into account the environment and its effect on rebar tensile strength. Both limits pertain to elements produced from normal-weight concrete; neither standard incorporates the effect of lightweight concrete.

## 3. MATERIALS AND RESEARCH METHODS

### 3.1. MATERIALS

Model slabs for testing were produced from normal-weight C30/37 class concrete (2 slabs) and lightweight LC 35/38 class concrete (7 slabs). Compressive strength of concrete was determined in accordance with standard [18]. Three cubic specimens (with edge length of 150 mm) were prepared for each test, according to standard [19]. Tests were conducted on specimens cured in laboratory conditions as per standard [20], i.e. after 28 days. Before compressive strength tests were performed, density of each specimen was determined in accordance with standard [21]. Table 1 presents the results obtained for concrete used in individual slabs for fatigue tests. Moreover, Table 1 presents the concrete strength test results on day of fatigue tests (Specimens stored in the same conditions as model slabs).

### 3. MATERIAŁY I METODY BADAWCZE

#### 3.1. MATERIAŁY

Modele płyt do badań zostały wykonane z betonu zwykłego klasy C30/37 (2 płyty) oraz betonu lekkiego klasy LC 35/38 (7 płyt). Wytrzymałość betonu na ściskanie wyznaczono wg normy [18]. Do każdego badania wykonano po 3 próbki sześciennie zgodnie z normą [19] pielęgnowane w warunkach laboratoryjnych zgodnie z wymaganiami normy [20]. Dodatkowo przed badaniami wytrzymałości na ściskanie dla każdej próbki określono gęstość betonu wg normy [21]. W Tabl.1 przedstawiono zbiorczo wyniki badań betonu zastosowanego w płytach przeznaczonych do badań zmęczeniowych. Dodatkowo w tabelicy tej zamieszczono wyniki badań wytrzymałości betonu w dniu zniszczenia danej płyty (próbki sezonowane w takich samych warunkach jak dana płyta).

Slabs were reinforced with composite GFRP bars with spiral wrapping. Composite rebars were subjected to tensile tests in accordance with standard [22]. Tests were performed on 5 specimens per each bar diameter used (10 mm and 14 mm). The tests provided tensile strength, modulus of elasticity and ultimate strain of rebars. The determined parameters of composite bars are given in Table 2.

Table 1. Mechanical properties of concrete used in slabs for fatigue tests

Tablica 1. Parametry betonu zastosowanego w płytach przeznaczonych do badań zmęczeniowych

Age of concrete Wiek betonu	Slab designation (cf. section 3.2) Oznaczenie płyty (wg p. 3.2)	Compressive strength Wytrzymałość na ściskanie $f_{c,cube}$ [MPa]	Density Gęstość [kg/m <sup>3</sup> ]
Specimens cured in laboratory conditions (tested after 28 days, according to [20]) Próbki pielęgnowane w warunkach laboratoryjnych (badanie po 28 dniach zgodnie z [20])	NC series slabs (C30/37 concrete) Płyty serii NC (beton C30/37)	28.7 ± 0.5	2272 ± 16
	LC series slabs (LC35/38 concrete) Płyty serii LC (beton LC35/38)	46.8 ± 0.6	1926 ± 11
Specimens stored in the same conditions as model slabs (tested at the age of approx. 2 years, on the day of fatigue tests) Próbki sezonowane w warunkach dojrzewania modeli płyt (badanie po ok. 2 latach, w dniu zniszczenia płyt)	NC-D1-S	44.4 ± 0.8	2184 ± 5
	NC-D1-20%	42.8 ± 0.3	2148 ± 1
	LC-D1-S	56.1 ± 1.8	1860 ± 8
	LC-D1-10%	47.6 ± 0.7	1745 ± 18
	LC-D1-20%	48.0 ± 1.4	1772 ± 3
	LC-D1-30%	61.3 ± 0.5	1851 ± 5
	LC-D2-S	50.7 ± 2.1	1771 ± 7
	LC-D2-20%	56.5 ± 1.7	1790 ± 9
LC-D2-30%	52.0 ± 2.7	1782 ± 4	

Zbrojenie kompozytowe płyt wykonano z prętów kompozytowych GFRP ze spiralnym oplotem. Pręty kompozytowe zbadano na rozciąganie zgodnie z normą [22]. Badania przeprowadzono na 5 próbkach dla każdej użytej średnicy prętów (10 mm i 14 mm). Na podstawie wyników badań określono wytrzymałość prętów na rozciąganie, moduł sprężystości kompozytu i jego odkształcenie graniczne. Wyznaczone parametry mechaniczne prętów kompozytowych przedstawiono w Tabl. 2.

#### 3.2. MODEL SLABS

Dimensions of the test models reflected a typical structural layout of a road beam bridge; they were as follows: 1.00 m × 3.00 m × 0.18 m. A total of 9 models were prepared for the tests, out of which 3 slabs were intended for reference static loading tests and 6 were intended for principal fatigue tests. Static loading tests were performed in order to obtain the failure force (static load carrying capacity), which is necessary for determination of the level

### 3.2. MODELE BADAWCZE PŁYT

Wymiary modeli badawczych płyt zostały dostosowane do typowego układu konstrukcyjnego płyty pomostu drogowego mostu belkowego i były następujące: 1,00 m × 3,00 m × 0,18 m. Łącznie do badań przygotowano 9 modeli badawczych, z czego 3 płyty były przeznaczone do referencyjnych badań statycznych, a 6 płyt do zasadniczych badań zmęczeniowych. Badania statyczne wykonano także w celu określenia siły niszczącej (nośności doraźnej), niezbędnej do określenia poziomu obciążenia zmęczeniowego. Wszystkie modele płyt były zbrojone dwukierunkowo siatkami z prętów GFRP. W danej płycie zastosowane siatki górna i dolna były jednakowe. Pręty o średnicy 10 mm umiejscowione były w rozstawie 80 mm, zaś pręty o średnicy 14 mm – w rozstawie 100 mm. Otulina zbrojenia niezależnie od rodzaju betonu i układu zbrojenia wynosiła 30 mm.

Poszczególne modele płyt różniły się pomiędzy sobą rodzajem betonu (beton zwykły lub lekki) oraz stopniem zbrojenia głównego (liczba i średnica prętów w siatce dolnej). Do opisu poszczególnych płyt zastosowano następujące oznaczenia:

- NC – beton zwykły,
- LC – beton lekki,
- D1 – zbrojenie w postaci siatek z prętów GFRP  $\phi 10$  co 80 mm (stopień zbrojenia  $\rho_f = 0,60\%$ ),
- D2 – zbrojenie w postaci siatek z prętów GFRP  $\phi 14$  co 100 mm (stopień zbrojenia  $\rho_f = 0,97\%$ ),
- S – płyta obciążana statycznie,
- 10% – płyta obciążana zmęczeniowo, maksymalne obciążenie równe 10% statycznego obciążenia niszczącego dla odpowiedniej płyty,
- 20% – płyta obciążana zmęczeniowo, maksymalne obciążenie równe 20% statycznego obciążenia niszczącego dla odpowiedniej płyty,
- 30% – płyta obciążana zmęczeniowo, maksymalne obciążenie równe 30% statycznego obciążenia niszczącego dla odpowiedniej płyty.

Według tego kodu kolejne modele płyt oznaczono następująco:

- NC-D1-S oraz NC-D1-20% – płyty z betonu zwykłego, odpowiednio do badań statycznych i zmęczeniowych (2 szt.),

of fatigue load. All the slab models were produced with two-way GFRP reinforcement. The top and bottom reinforcement grids in a given slab were identical. Grid spacing equaled 80 mm for bars of 10 mm in diameter, and 100 mm for bars of 14 mm in diameter. Concrete cover thickness equaled 30 mm, regardless of the concrete type and reinforcement layout.

Table 2. Mechanical properties of composite reinforcing bars  
Tablica 2. Parametry mechaniczne zbrojenia kompozytowego

Parameter / Parametr	Nominal reinforcement diameter [mm] Nominalna średnica zbrojenia	
	$\phi 10$	$\phi 14$
Diameter of the rebar core (without wrapping), $d_b$ [mm] Średnica rdzenia pręta (bez oplotu)	9.6	13.8
Tensile strength, $f_{fu}$ [MPa] Wytrzymałość na rozciąganie	1000 ± 30	1001 ± 20
Modulus of elasticity, $E_f$ [GPa] Moduł sprężystości	55 ± 1	60 ± 2
Ultimate strain, $\epsilon_{fu}$ [%] Odształcenie graniczne	1.8 ± 0.1	1.6 ± 0.1

Individual slab models differed in concrete type (ordinary or lightweight) and ratio of primary reinforcement (number and diameter of bars in the bottom grid). The following elements were used in slab designations:

- NC – ordinary (normal-weight) concrete,
- LC – lightweight concrete,
- D1 – reinforcement in the form of GFRP grids,  $\phi 10$  bars with 80 mm spacing (reinforcement ratio  $\rho_f = 0.60\%$ ),
- D2 – reinforcement in the form of GFRP grids,  $\phi 14$  bars with 100 mm spacing (reinforcement ratio  $\rho_f = 0.97\%$ ),
- S – slab tested under static loading,
- 10% – slab tested under fatigue loading, maximum load equal to 10% of load at failure in the static test of corresponding slab type,
- 20% – slab tested under fatigue loading, maximum load equal to 20% of load at failure in the static test of corresponding slab type,
- 30% – slab tested under fatigue loading, maximum load equal to 30% of load at failure in the static test of corresponding slab type.



- LC-D1-S oraz LC-D2-S – płyty z betonu lekkiego do badań statycznych (2 szt.),
- LC-D1-10%, LC-D1-20%, LC-D1-30%, LC-D2-20% i LC-D2-30% – płyty z betonu lekkiego do badań zmęzeniowych (5 szt.).

Płyty badane statycznie, tj. NC-D1-S, LC-D1-S oraz LC-D2-S, stanowiły modele referencyjne dla badań zmęzeniowych. Wiek wszystkich płyt liczony od dnia betonowania do wykonania badań wynosił około 2 lata (od 716 do 865 dni).

### 3.3. STANOWISKO DO BADAŃ

Badania zmęczeniowe modeli płyt były wykonane w schemacie statycznym jednoprzęsłowej płyty swobodnie podpartej o rozpiętości teoretycznej 2,40 m. Podparcie modeli zapewniało możliwość obrotów płyt na obu podparciach oraz możliwość przesuwu w kierunku osi podłużnej płyty na łożysku ruchomym. Do podparcia płyt użyto walców stalowych o średnicy 60 mm oraz stalowych blach nadłożyskowych o grubości 12 mm i szerokości (w kierunku płyty) 300 mm. Aby zapewnić odpowiednie podparcie modelu, pomiędzy stalową płytą nadłożyskową a dolną powierzchnią płyty betonowej wykonano podlewkę z zaprawy wyrównującej.

Podczas badań zmęzeniowych były wykonywane pomiary przemieszczeń (ugięć) płyt oraz ocena morfologii rys, tj. określenie liczby, rozwartości i rozstawu rys. Do pomiaru przemieszczeń płyt stosowano czujniki indukcyjne LVDT o bazie pomiarowej 300 mm. Przemieszczenia mierzono w środku rozpiętości przęsła i nad podporami (po dwa czujniki na każdy przekrój poprzeczny) oraz w  $\frac{1}{4}$  rozpiętości płyty (po jednym czujniku). Łącznie wykorzystano 8 czujników indukcyjnych LVDT. Pomiaru przemieszczeń płyt oraz siły i przemieszczenia tłka siłownika obciążającego dokonywano na każdym etapie obciążania statycznego i zmęczeniowego. Odczyty rejestrowano z częstotliwością 5 Hz w przypadku obciążeń statycznych oraz z częstotliwością 100 Hz w przypadku obciążeń zmęczeniowych. Na każdym z etapów obciążenia statycznego i zmęczeniowego wykonywano również ocenę morfologii rys oraz dokumentację fotograficzną.

### 3.4. PROCEDURA BADAWCZA – OBCIĄŻENIE STATYCZNE I ZMĘCZENIOWE

Obciążenie płyt było realizowane za pomocą jednej siły skupionej w środku rozpiętości i szerokości płyty (sche-

According to the adopted code, slab models were labeled as follows:

- NC-D1-S and NC-D1-20% – ordinary concrete slabs, for static and fatigue tests, respectively (2 slabs),
- LC-D1-S and LC-D2-S – lightweight concrete slabs for static loading tests (2 slabs),
- LC-D1-10%, LC-D1-20%, LC-D1-30%, LC-D2-20% and LC-D2-30% – lightweight concrete slabs for fatigue tests (5 slabs).

Slabs that were subjected to static loading tests, i.e. NC-D1-S, LC-D1-S and LC-D2-S, served as reference for fatigue tests. The age of all the slabs, counting from pouring to testing, was approx. 2 years (ranging from 716 days to 865 days).

### 3.3. TEST STATION

Fatigue tests of model slabs were conducted in the scheme of single-span simply supported beam with theoretical span of 2.40 m. The models were supported in a manner that enabled unconstrained rotation at both supports and translation along the longitudinal axis at movable bearing. Supports were constructed from steel cylinders (60 mm in diameter) and steel plates with the thickness of 12 mm and width (along the slab) of 300 mm. In order to provide adequate support, the contact area between the slab and the steel plate was levelled using mortar.

Fatigue testing included measurement of displacements (deflections) of the slabs and assessment of crack morphology, i.e. evaluation of the number, width and spacing of the cracks. Displacements were measured using LVDT sensors with the base distance of 300 mm. Displacements were measured in mid-span and over supports (two sensors per section) and in  $\frac{1}{4}$  of the span (one sensor per section). A total of 8 LVDT sensors were used. Displacements of the slab as well as forces and displacements in the hydraulic loading piston were registered at every stage of static and fatigue loading. Readings were registered at the frequency of 5 Hz in the case of static loads and 100 Hz in the case of fatigue loads. Crack morphology assessments and photographic documentation were also collected at every stage.

### 3.4. TEST PROCEDURE – STATIC AND FATIGUE LOADS

Tests were conducted by applying a single concentrated force in the middle of the span (and width) of the slab (three-point bending scheme) using a hydraulic testing

mat trójpunktowego zginania) za pomocą układu obciążeniowo-rejestrującego o możliwości generowania siły w zakresie 0-1260 kN. Obciążenie było generowane za pomocą siłownika hydraulicznego, umieszczonego na ramie stalowej zamocowanej do podłogi siłowej hali. Siłę na płytę przekazywano pośrednio za pomocą blachy stalowej (ułożonej na betonie na podlewce z zaprawy) oraz ustawionego na blasze „stołeczka” stalowego, do którego przykładano obciążenie z siłownika przez przekładkę gumową. Powierzchnia kontaktu obciążenia z płytą miała kształt kwadratu o boku 0,40 m, co odpowiadało powierzchni styku pojedynczego koła modelu obciążenia mostowego LM1 wg normy [23].

Obciążenie statyczne płyt (oznaczonych przez  $S$ ) realizowano poprzez sterowanie przemieszczeniem tłoka siłownika, aż do uzyskania danego poziomu siły. Poszczególne etapy obciążania były jednakowe dla każdego modelu badawczego (10 kN, 20 kN, 30 kN, 50 kN, 80 kN, 100 kN, 135 kN, 150 kN lub 165 kN). Po wykonaniu każdego cyklu obciążenia utrzymywano wartość przemieszczenia tłoka siłownika przez ok. 5 min do ustabilizowania się odczytów, a następnie odciążano płytę. Po ustabilizowaniu się odczytów po odciążeniu (ok. 5 min) wykonywano kolejny cykl obciążenia.

Płyty przeznaczone do badań zmęczeniowych poddano wstępnemu obciążeniu statycznemu do poziomu górnej granicy cyklu zmęczeniowego, wykonując przy tym ocenę morfologii rys dla wszystkich poziomów pośrednich. Następnie każdą płytę poddawano obciążeniu zmęczeniowemu, którego górną granicę stanowiło odpowiednio 10%, 20% lub 30% obciążenia niszczącego płytę danej serii pod obciążeniem statycznym (nośność doraźna). Dolną granicę obciążenia w cyklu zmęczeniowym przyjęto na poziomie 10% górnej granicy, tak aby współczynnik asymetrii cyklu wynosił  $R = 0,1$  (wartość typowa dla obciążeń zmęczeniowych pomostów obiektów mostowych). Wyjątek stanowiło obciążenie zmęczeniowe płyty LC-D1-10%, gdzie minimalnym obciążeniem możliwym do uzyskania za pomocą układu obciążającego była wartość 4 kN (tj. 1,8% obciążenia maksymalnego). Częstotliwość obciążenia zmęczeniowego wynosiła 1 Hz, z wyjątkiem płyty LC-D1-30%, dla której badania zmęczeniowe rozpoczęto z częstotliwością 2 Hz, a po 250 tys. cyklach zmniejszono ją do 1,5 Hz, oraz płyty LC-D1-10%, dla której badania zmęczeniowe wykonano z częstotliwością 1,5 Hz.

system that enabled generation of forces in the range of 0-1260 kN. Loading was generated by a hydraulic cylinder mounted on a steel frame that had been fixed to the floor. Loading force was transferred onto the slab indirectly through a steel plate laid on a lift of mortar. A steel „stool”, which was placed on the steel plate, came into direct contact with rubber-coated end of the hydraulic cylinder. The contact area of the steel plate and the slab had the shape of a 0.40 m  $\times$  0.40 m square, reflecting the contact area of a single wheel in the LM1 bridge load model according to the standard [23].

Static loading tests of slabs (labeled with  $S$ ) were conducted by controlling the displacement of the hydraulic cylinder to obtain the adopted level of the applied force. Consecutive loading stages in the static test were the same for every model slab (10 kN, 20 kN, 30 kN, 50 kN, 80 kN, 100 kN, 135 kN, 150 kN and 165 kN). After reaching each loading level, the applied cylinder displacement was retained for approx. 5 minutes in order to stabilize the readings and the slab was subsequently unloaded. When the readings of the unloaded slab stabilized (approx. 5 min), the slab was loaded again to reach the next loading level.

Slabs intended for fatigue tests were subjected to preliminary static loading up to the planned maximum level of load per cycle in the fatigue test. Crack morphology was evaluated for all the intermediate levels. Each slab was then subjected to fatigue loading, whose upper limit was set at the level of 10%, 20% or 30% of load at failure in the static test performed on the given slab type (static load carrying capacity). The lower limit of load in a cycle was adopted at the level of 10% of the upper limit, so that cycle asymmetry ratio equaled  $R = 0.1$  (value typical for fatigue loading of road bridge decks). Fatigue loading of the LC-D1-10% slab was an exception, as the minimum load attainable in the test system equaled 4 kN (i.e. 1.8% of the maximum static load). Frequency of fatigue loading equaled 1 Hz, except for the LC-D1-30% slab (whose fatigue tests commenced at the frequency of 2 Hz and were continued at 1.5 Hz beyond 250 thousand cycles) and the LC-D1-10% (which was tested at the frequency of 1.5 Hz).

Fatigue tests were continued until 2 million cycles were reached (maximum value for fatigue assessment) or the slab failed. At intermediate stages of fatigue loading (e.g. 75 thousand, 150 thousand, 250 thousand) crack morphology was assessed and single static loading up to

Badania zmęczeniowe realizowano do osiągnięcia 2 mln cykli zmęczeniowych (wartość maksymalna dla oceny zmęczenia) lub zniszczenia płyty. Podczas obciążenia zmęczeniowego na etapach pośrednich (np. 75 tys., 150 tys., 250 tys.) wykonywano ocenę morfologii rys oraz jednokrotne obciążenie statyczne do górnej granicy obciążenia zmęczeniowego. W przypadku płyt, które nie uległy zniszczeniu po 2 mln cykli obciążenia, wykonywano dodatkowo jednokrotne obciążenie statyczne do zniszczenia (z poziomami pośrednimi).

## 4. WYNIKI BADAŃ ZMĘCZENIOWYCH

### 4.1. MORFOLOGIA RYS

Morfologię zarysowania płyt badanych pod obciążeniem statycznym i zmęczeniowym opisano za pomocą liczby rys  $n$ , oraz maksymalnej rozwartości rysy  $w_{max}$ . Rozwartość rys mierzone na powierzchniach bocznych płyt na poziomie zbrojenia. Dla każdej płyty ocenę morfologii rys wykonano podczas końcowego obciążania statycznego do maksymalnego poziomu obciążenia po uzyskaniu danej liczby cykli obciążenia zmęczeniowego. Dla płyt, które nie uległy zniszczeniu przed osiągnięciem 2 mln cykli obciążenia zmęczeniowego (LC-D1-10%, LC-D2-20% oraz LC-D2-30%), powtórzono ocenę jak dla obciążeń w pierwszym cyklu obciążenia, a następnie wykonano ją dla dodatkowych poziomów obciążenia (100 kN, 150 kN i 200 kN).

Podczas inspekcji płyt przed rozpoczęciem obciążeń zmęczeniowych nie zaobserwowano rys w betonie o rozwartości większej niż 0,1 mm. Największą liczbę rys o rozwartości poniżej 0,1 mm miały płyty LC-D1-S (12 rys), LC-D2-20% (10 rys) oraz LC-D1-30% (9 rys). W przypadku tych płyt nie obserwowano znaczącego przyrostu liczby rys podczas badań zmęczeniowych. W przypadku płyt o mniejszej liczbie rys o rozwartości poniżej 0,1 mm wraz ze wzrostem liczby cykli obciążenia zmęczeniowego wzrastała także liczba powstających nowych rys, nawet o 75%, jak w przypadku płyt NC-D1-20% oraz LC-D1-10%. Maksymalna pomierzona rozwartość rys dla wszystkich płyt poddanych badaniom zmęczeniowym wynosiła nie więcej niż 0,2 mm, niezależnie od liczby cykli obciążenia. Wyjątek stanowiła płyta LC-D1-30%, dla której po 150 tys. cykli obciążenia zinwentaryzowano maksymalną rozwartość rys o wartości 0,3 mm. Należy jednak zaznaczyć, że ta płyta uległa zniszczeniu po 198 tys. cykli, czyli miała znacznie niższą nośność zmęczeniową.

the upper limit of fatigue load cycle was performed. In the case of slabs that carried 2 million fatigue cycles without failure, final static loading was performed up to the point of failure (with intermediate levels).

## 4. FATIGUE TEST RESULTS

### 4.1. CRACK MORPHOLOGY

Morphology of cracks in slabs subjected to static and fatigue tests was described using the number of cracks  $n$ , and the maximum crack width  $w_{max}$ . Crack width was measured on the side surfaces of slabs, at the level of reinforcement. Crack morphology of each slab was assessed during the intermediate static loadings performed every time a set number of fatigue cycles was reached. Slabs that did not fail within 2 million fatigue cycles (LC-D1-10%, LC-D2-20% and LC-D2-30%) were assessed again in terms of crack morphology – cracks were assessed for loads like in the first cycle and then on additional load levels (100 kN, 150 kN and 200 kN).

No cracks exceeding the width of 0.1 mm were observed in concrete during slab inspection that preceded the fatigue tests. The greatest number of cracks (of width less than 0.1 mm) was observed in slabs LC-D1-S (12 cracks), LC-D2-20% (10 cracks) and LC-D1-30% (9 cracks). In the case of these slabs, a significant increase in the number of cracks was not observed during fatigue testing. Slabs with lower initial numbers of cracks (of width less than 0.1 mm) displayed greater increase in the number of new cracks during fatigue testing, even by 75%, like in the case of slabs NC-D1-20% and LC-D1-10%. The maximum crack width measured across all the slabs subjected to fatigue testing did not exceed 0.2 mm, regardless of the number of load cycles. The only exception was the LC-D1-30% slab, which displayed the maximum crack width of 0.3 mm after 150 thousand load cycles. However, this particular slab failed after 198 thousand cycles, which indicated significantly lower fatigue life.

The results of crack morphology assessment are shown in Figs 1 and 2 as the relationship of the number of cracks and the maximum crack width vs. the absolute number of loads and the relative number of loads  $n/N$ , i.e. the proportion between the current cycle number and the total number of cycles to failure of a given slab. For slabs that withstood fatigue testing without failure (LC-D1-10%, LC-D2-20% and LC-D2-30%)  $N = 2$  million was assumed as the maximum number of cycles. As visible in the plots,



Na Rys. 1 i 2 przedstawiono wyniki oceny morfologii zarysowania płyt w postaci zależności liczby rys i maksymalnej rozwartości rys od bezwzględnej liczby cykli oraz od przyrostu liczby cykli obciążenia  $n/N$ , tj. stosunku bieżącej liczby cykli do maksymalnej liczby cykli uzyskanej dla danej płyty. Dla płyt, które nie uległy zniszczeniu (LC-D1-10%, LC-D2-20% oraz LC-D2-30%) jako maksymalną liczbę cykli przyjęto wartość  $N = 2$  mln. Na wykresach można zauważyć, że liczba rys przyrastała w początkowych fazach badaniach, a następnie stabilizowała się na stałym poziomie. W przypadku płyty NC-D1-20% oraz LC-D1-30% w ostatnich fazach badania obserwowano znaczne zwiększenie rozwartości rys – o około 20-30%.

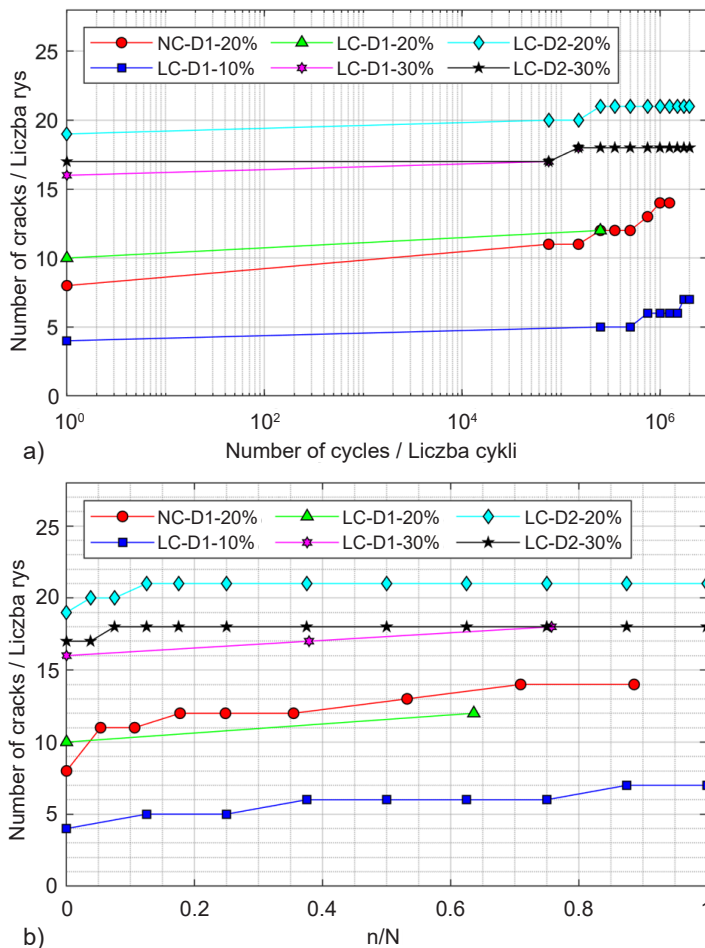


Fig. 1. The “number of cracks vs. number of cycles” (a) and “number of cracks vs.  $n/N$ ” (b) relationships for slabs tested under fatigue load

Rys. 1. Zależność „liczba rys – liczba cykli” (a) oraz „liczba rys –  $n/N$ ” (b) dla płyt pod obciążeniem zmęczeniowym

the number of cracks increased in the early stages of the test and then stabilized. In the case of slabs NC-D1-20% and LC-D1-30%, a considerable increase in crack width (by about 20-30%) was observed in the final stages of the test.

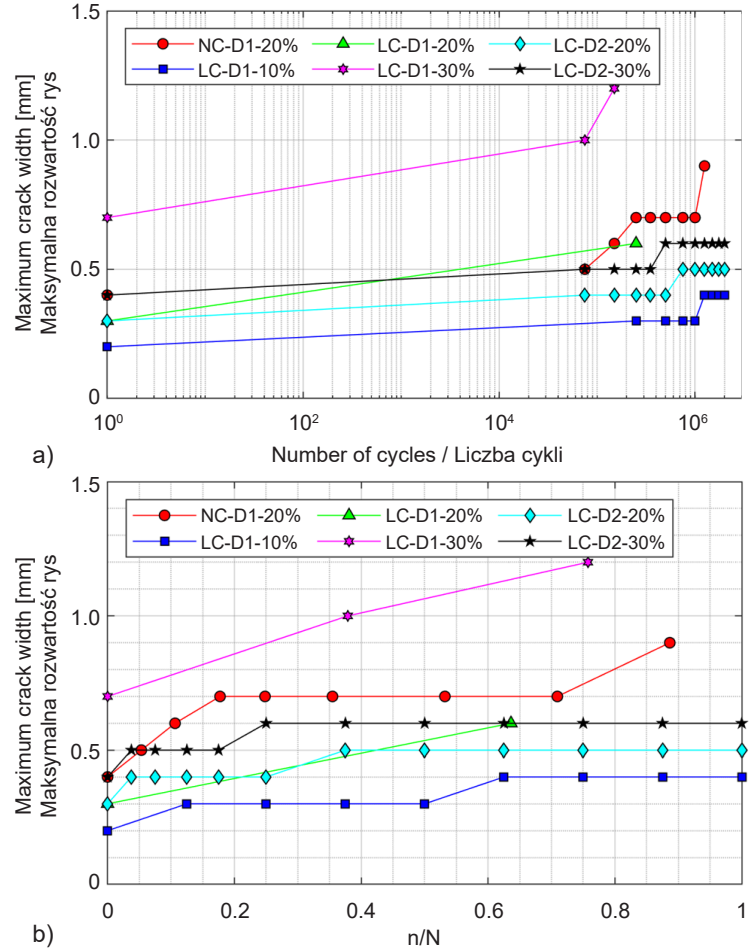


Fig. 2. The “maximum crack width vs. number of cycles” (a) and “maximum crack width vs.  $n/N$ ” (b) relationships for slabs tested under fatigue load

Rys. 2. Zależność „maksymalna rozwartość rys – liczba cykli” (a) oraz „maksymalna rozwartość rys –  $n/N$ ” (b) dla płyt pod obciążeniem zmęczeniowym

Fig. 3 presents the relationships of the number of cracks and their maximum width vs. load level for slabs that did not fail in the fatigue test (LC-D1-10%, LC-D2-20%, LC-D2-30%), and reference slabs (LC-D1-S and LC-D2-S). As visible in the plots, crack widths in the slabs LC-D2-20% and LC-D2-30% after 2 million load cycles were lower than in the corresponding reference slab (LC-D2-S). This is related to the number of cracks, which was 20-40% greater for those slabs than for the reference



Na Rys. 3 pokazano zależności liczby rys oraz ich maksymalnej rozwartości od poziomu obciążenia dla płyt, które nie uległy zniszczeniu w wyniku zmęczenia (płyty LC-D1-10%, LC-D2-20%, LC-D2-30%), oraz płyt referencyjnych (LC-D1-S oraz LC-D2-S). Na wykresach można zaobserwować, że dla płyt LC-D2-20% i LC-D2-30% po 2 mln cyklach obciążenia zarejestrowano mniejsze rozwartości rys niż w przypadku analogicznej płyty referencyjnej (LC-D2-S). Ma to związek z liczbą rys, która dla tych płyt była większa o 20-40% niż dla płyty referencyjnej, podanej wyłącznie obciążeniu statycznemu. Nie zaobserwowano spodziewanego wpływu poziomu obciążenia zmęczeniowego na liczbę rys i ich rozwartość po 2 mln cyklach – dla płyty z większym obciążeniem maksymalnym cyklu zmęczeniowego (LC-D2-30%) zainwentaryzowano mniejszą liczbę i rozwartość rys niż dla płyty o niższym poziomie obciążenia w cyklu zmęczeniowym (LC-D2-20%). Co więcej, beton płyty LC-D2-20% miał o 9% wyższą wytrzymałość na ściskanie niż płyty LC-D2-30% (Tabl. 1). W przypadku płyty o mniejszym stopniu zbrojenia głównego (LC-D1-10%) zarówno liczba rys, jak i ich rozwartość po 2 mln cyklach zmęczeniowych, były większe niż dla płyty referencyjnej (LC-D1-S). Zapewne ma to związek z wytrzymałością betonu na ściskanie, która w przypadku płyty przeznaczonej do badań statycznych była o 18% wyższa niż wytrzymałość betonu płyty poddanej obciążeniu zmęczeniowemu.

## 4.2. UGIĘCIE / SZTYWNOŚĆ

Zależność „obciążenie – przemieszczenie” dla płyt referencyjnych, tj. badanych statycznie (NC-D1-S, LC-D1-S oraz LC-D2-S), przedstawiono na Rys. 4. Wykres dla płyty LC-D1-S nie zawiera danych do zniszczenia, gdyż po osiągnięciu poziomu obciążenia 100 kN zdemontowano czujniki przemieszczeń. Można zauważyć, że największą sztywność miała płyta LC-D2-S, co ma związek z największym stopniem zbrojenia głównego, większym o 60% niż stopień zbrojenia płyt NC-D1-S i LC-D1-S. Zachowanie płyt NC-D1-S i LC-D1-S różniło się w początkowych etapach obciążania, co ma związek z wcześniejszym zarysowaniem płyt z betonu lekkiego. Natomiast w dalszych etapach obciążania zachowanie obu płyt było podobne, a po przekroczeniu siły 50 kN płyta z betonu lekkiego wykazywała od 3% do 8% mniejsze ugięcie niż płyta z betonu zwykłego. Ma to związek z wytrzymałością betonu na ściskanie, która w przypadku betonu lekkiego była wyższa o 26% (Tabl. 1).

slab, subjected to static loading test only. The expected increase in the number and width of cracks after 2 million cycles with increasing load level was not observed – the slab with greater maximum load level in cycle (LC-D2-30%) displayed less cracks and lower crack width than the slab with lower load level (LC-D2-20%). Moreover, concrete used in the LC-D2-20% slab displayed compressive strength greater by 9% than concrete used in the LC-D2-30% slab (Table 1). In the case of the slab with lower reinforcement ratio (LC-D1-10%), both the number and width of cracks after 2 million load cycles were greater than in the case of reference slab (LC-D1-S). This was probably related to compressive strength of concrete, which was greater by 18% in the slab for static loading tests than in the slab for fatigue tests.

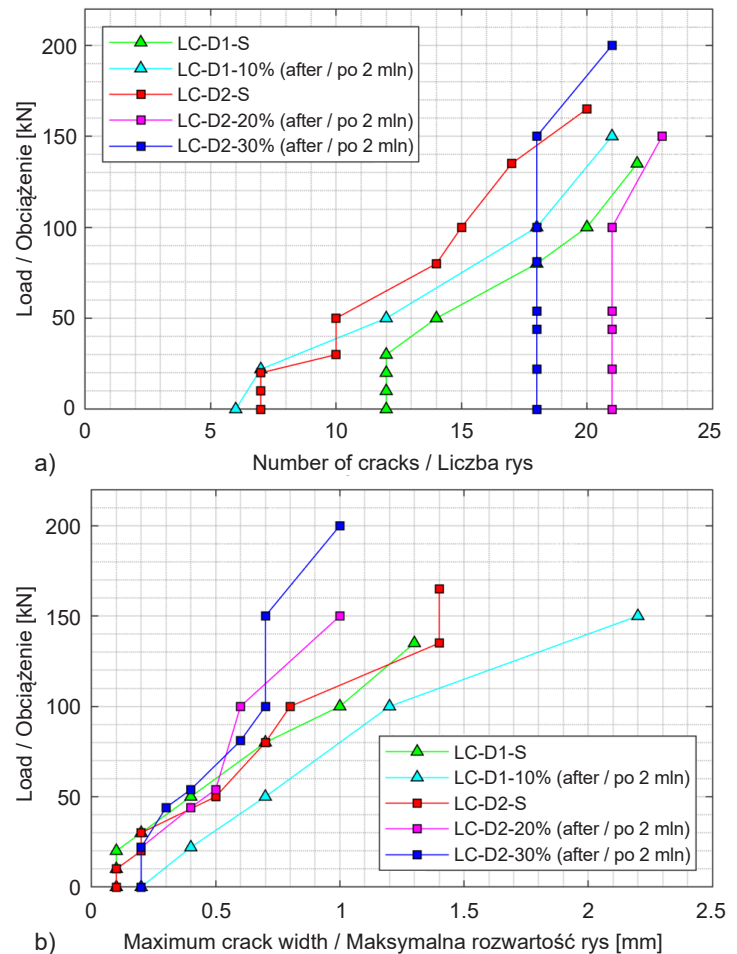


Fig. 3. Comparison of the number of cracks (a) and maximum crack width (b) for slabs under static and fatigue loads (reference and after 2 million cycles)

Rys. 3. Zestawienie liczby rys (a) i maksymalnych rozwartości rys (b) dla płyt pod obciążeniem statycznym i zmęczeniowym (referencyjnych i po 2 mln cyklach)

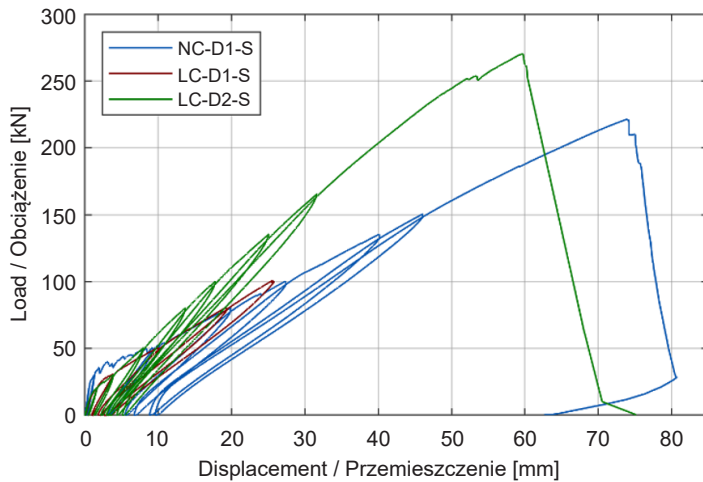


Fig. 4. "Load vs. displacement" relationship for slabs tested under static load

Rys. 4. Zależność „obciążenie – przemieszczenie” dla płyt obciążanych statycznie

Na Rys. 5 pokazano zależności „obciążenie – przemieszczenie” dla wszystkich płyt poddanych obciążeniu zmęczeniowemu w zależności od bezwzględnej liczby cykli, natomiast na Rys. 6 przedstawiono wartości ugięć (pod obciążeniem, trwałych i bezwzględnych) w zależności od przyrostu liczby cykli. W przypadku płyt, które uległy zniszczeniu podczas obciążenia zmęczeniowego można zaobserwować, że wraz ze wzrostem liczby cykli wzrastają ugięcia oraz zmniejsza się pochylenie krzywych „obciążenie – przemieszczenie” względem osi poziomej, tj. następuje redukcja sztywności płyt. Natomiast w przypadku płyt, które nie uległy zniszczeniu podczas obciążania zmęczeniowego (przetwały 2 mln cykli), nie zaobserwowano znaczących zmian pochylenia wykresów „obciążenie – przemieszczenie” ani dużych zmian w wartościach ugięć, czyli redukcja sztywności tych płyt była znacznie mniejsza. W przypadku płyt serii „LC-D2” zmiana sztywności praktycznie nie występuje, a stabilizację ugięć można zaobserwować już po 250 tys. cykli. W przypadku płyty LC-D1-10% zmiana sztywności ma także mniej gwałtowny charakter; nie zaobserwowano również tak wyraźnej stabilizacji ugięć. Jest to związane z poziomem maksymalnego obciążenia zmęczeniowego, które jest mniejsze od obciążenia rysującego płytę, a wzrost liczby i rozwartości rys nastąpił w późniejszym etapie badania zmęczeniowego (po 1 mln cykli).

## 4.2. DEFLECTION / STIFFNESS

The “load vs. displacement” relationship for reference slabs (i.e. subjected to static loading test: NC-D1-S, LC-D1-S and LC-D2-S) is presented in Fig. 4. Plot for the LC-D1-S slab does not include full data up to failure, as the displacement sensors were damaged after the 100 kN load level was reached. As visible, the greatest stiffness was displayed by the LC-D2-S slab, which is due to reinforcement level being 60% greater than in slabs NC-D1-S and LC-D1-S. Behavior of the NC-D1-S and LC-D1-S slabs in the early stages of loading differed, which was due to earlier cracking of slabs of lightweight concrete. Behavior in later stages was similar; beyond the load of 50 kN the lightweight concrete slab displayed deflection lower by 3% to 8% than that of the normal-weight concrete slab. This was also related to compressive strength, which was 26% greater in the case of lightweight concrete (Table 1). The “load vs. displacement” relationships, depending on the absolute number of cycles, are shown in Fig. 5 for all the slabs subjected to fatigue testing. Values of deflection (under load, permanent and absolute) depending on the  $n/N$  proportion are shown in Fig. 6. In the case of slabs that failed during the fatigue test, it is visible that as the number of cycles increases, the deflections increase and the slope of the “load vs. displacement” curve decreases, i.e. a reduction in slab stiffness occurs. In the case of slabs that did not fail during the test (that withstood 2 million load cycles), neither notable changes in the slope of the curve nor considerable changes in deflections were observed – which indicates that the reduction in slab stiffness was less pronounced. For slabs from the “LC-D2” series the change in stiffness was practically non-existent, and stabilization of deflections was observable as early as after 250 thousand cycles. In the case of the LC-D1-10% slab, the change in stiffness was also less rapid; however, stabilization of deflections was not as pronounced. This fact was related to the maximum load level in a fatigue cycle, which was less than load that would have resulted in cracking. The increase in the number and width of cracks occurred in later stages of the fatigue test (after 1 million cycles).

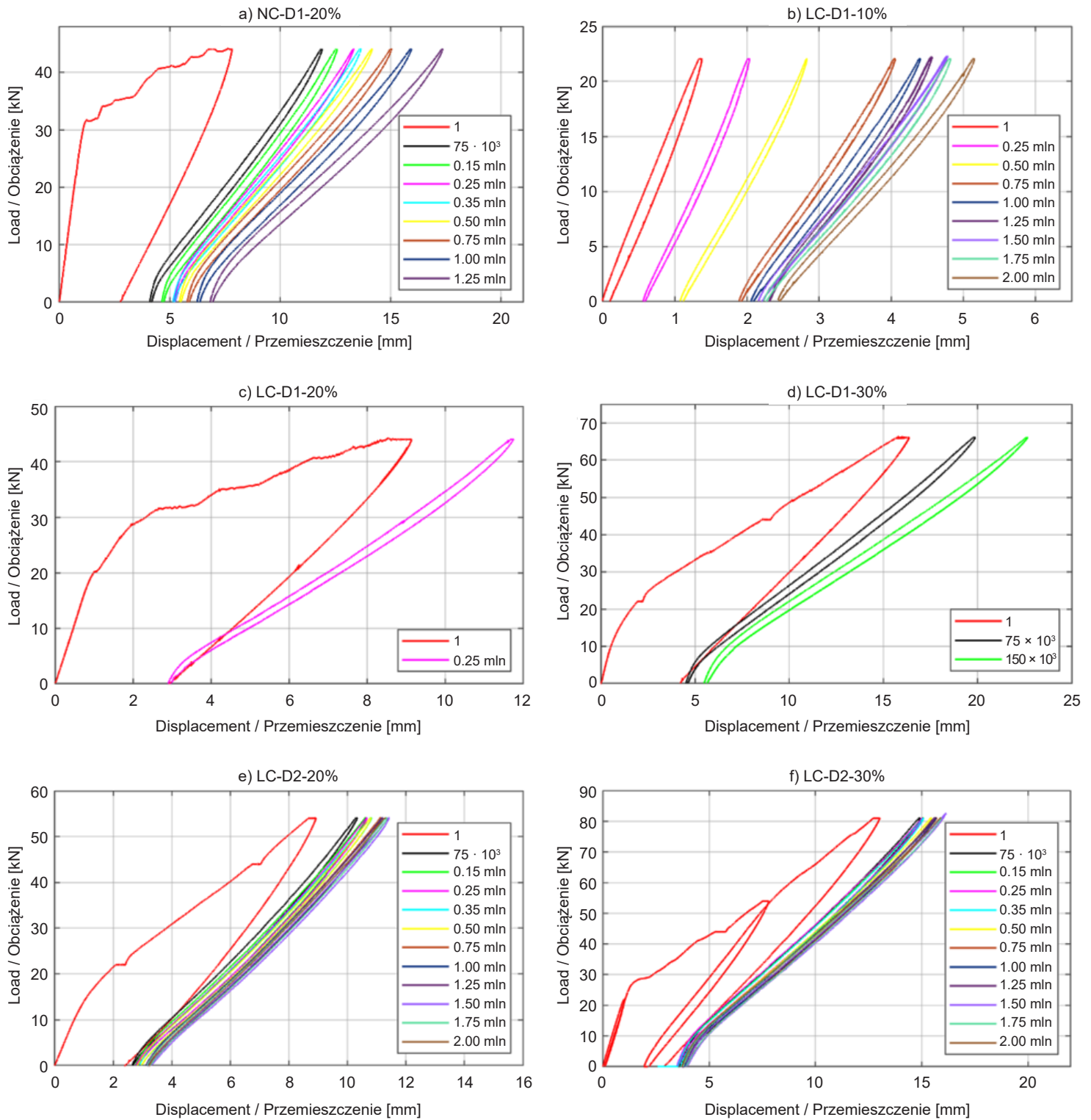
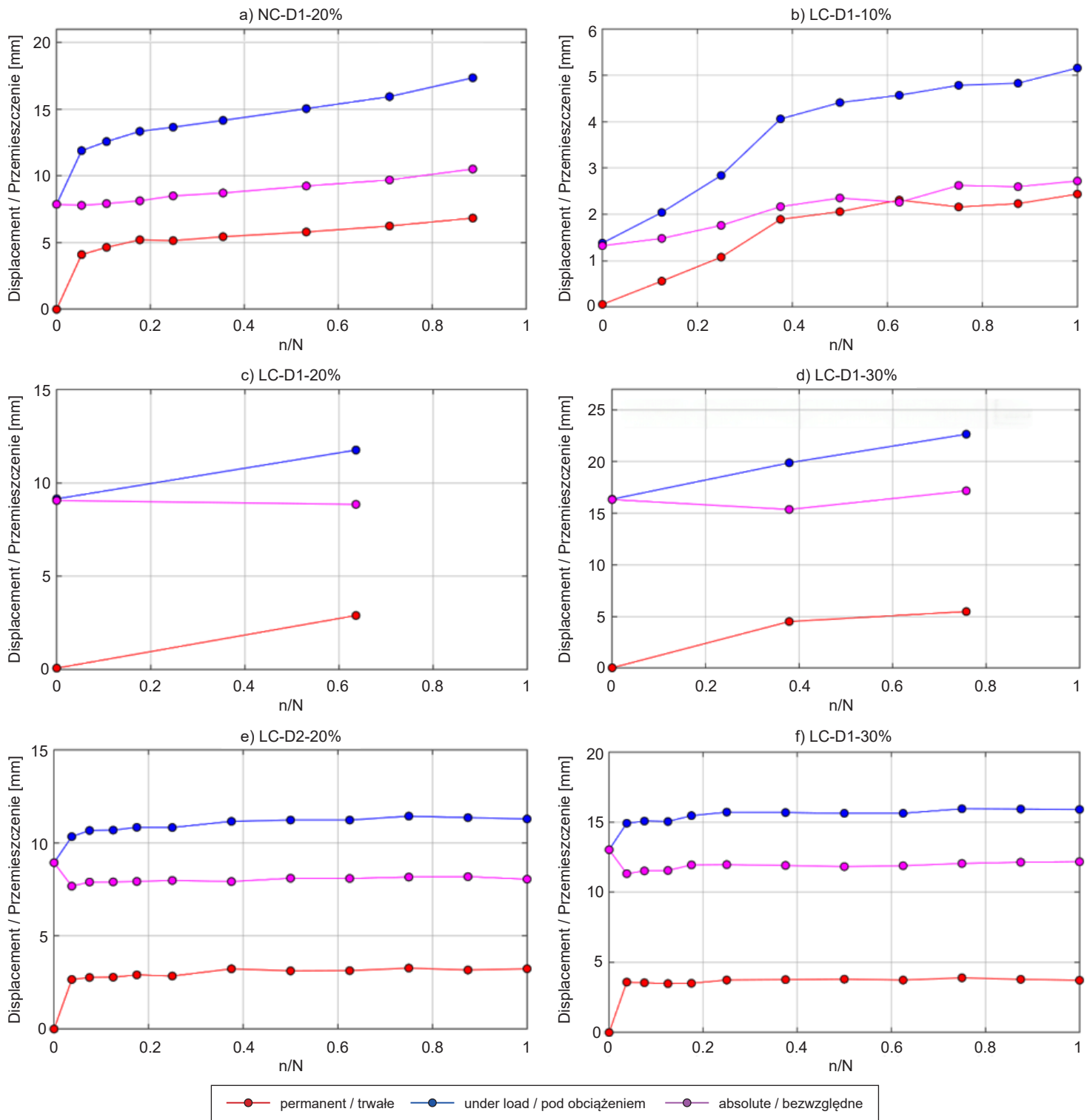


Fig. 5. "Load vs. displacement" relationship after a given number of cycles for slabs tested under fatigue load - cases a) ÷ f)  
 Rys. 5. Zależność „obciążenie – przemieszczenie” po danej liczbie cykli obciążenia dla płyt badanych pod obciążeniem zmęczeniowym - a) ÷ f)

Fig. 6. "Deflection vs.  $n/N$ " relationship for slabs tested under fatigue load - cases a) ÷ f)Rys. 6. Zależności „ugięcie –  $n/N$ ” dla płyt badanych pod obciążeniem zmęczeniowym - a) ÷ f)



Na Rys. 7 zestawiono krzywe „obciążenie – przemieszczenie” dla płyt, które nie uległy zniszczeniu pod obciążeniem zmęczeniowym (LC-D1-10%, LC-D2-20% oraz LC-D2-30%), tj. przetrwały 2 mln cykli obciążenia. Na wykresach dla poszczególnych płyt umieszczono także analogiczne zależności dla pierwszego cyklu obciążenia tych płyt oraz dla płyt badanych pod obciążeniem statycznym LC-D1-S oraz LC-D2-S (płyty referencyjne). W przypadku wszystkich porównywanych płyt zaobserwowano zgodność zachowania pod obciążeniem statycznym po pierwszym cyklu obciążenia zmęczeniowego oraz po 2 mln cykli obciążenia zmęczeniowego. Największa zgodność występuje dla płyt serii LC-D2, a największe rozbieżności uzyskano dla płyty LC-D1-10%, jednak i w tym przypadku pochylenie wszystkich krzywych jest podobne.

Fig. 7 presents the “load vs. displacement” relationships for slabs that did not fail in the fatigue test (LC-D1-10%, LC-D2-20% and LC-D2-30%), i.e. withstood 2 million load cycles. Plots for specific slabs also include corresponding relationships in the first load cycle determined for these slabs and reference slabs subjected to static loading tests (LC-D1-S and LC-D2-S). For all the compared slabs, agreement was observed between their behavior under static loading after the first fatigue cycle and after 2 million fatigue cycles. This agreement was strongest for the LC-D2 slab series, while greatest discrepancies were observed for the LC-D1-10% slab. However, also in this case the slopes of all the curves were similar.

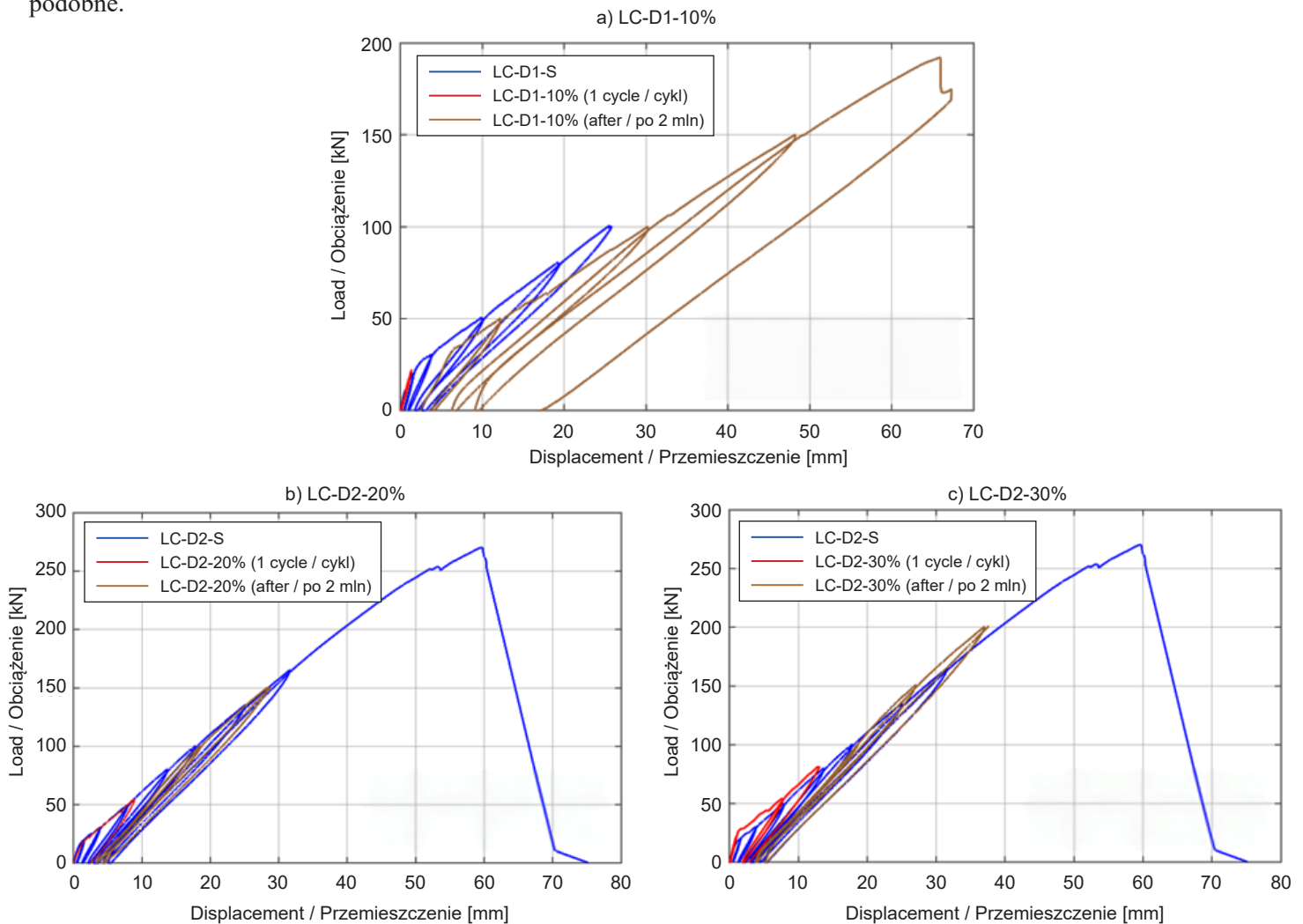


Fig. 7. “Load vs. displacement” relationships for slabs that did not fail under fatigue load - cases a) ÷ c)

Rys. 7. Zależności „siła – przemieszczenie” dla płyt, które nie uległy zniszczeniu pod obciążeniem zmęczeniowym - a) ÷ c)

Sztywność płyt, zdefiniowaną jako stosunek zmiany siły do zmiany ugięcia, w zależności od liczby cykli obciążenia zmęczeniowego  $n$  oraz od przyrostu cykli obciążenia  $n/N$  przedstawiono na Rys. 8. Dla płyt, które nie uległy zniszczeniu pod obciążeniem zmęczeniowym za maksymalną liczbę cykli przyjęto wartość  $N = 2$  mln. W przypadku płyt, które nie uległy zniszczeniu podczas badań zmęczeniowych (LC-D1-10%, LC-D2-20% oraz LC-D2-30%) można zaobserwować, że sztywność tych płyt szybko stabilizuje się na stałym poziomie. Wyjątek stanowi płyta LC-D1-10%, która charakteryzuje się również największą sztywnością. Uzasadnienie tego faktu przedstawiono powyżej; ma to związek z poziomem obciążenia zmęczeniowego niższym od obciążenia rysującego. W przypadku pozostałych płyt (NC-D1-20% i LC-D1-30%) w końcowych fazach badania zmęczeniowego można zaobserwować bardziej gwałtowną redukcję sztywności, co można interpretować jako oznaki wyczerpującej się trwałości płyt. Płytę LC-D1-20% pominięto w analizie z uwagi na zbyt małą liczbę danych.

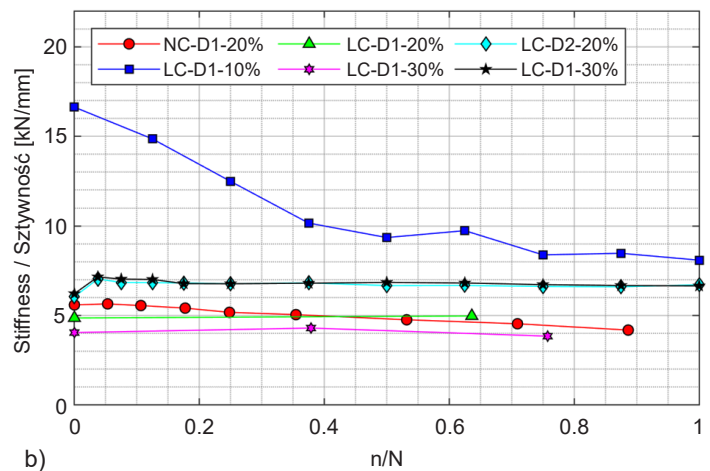
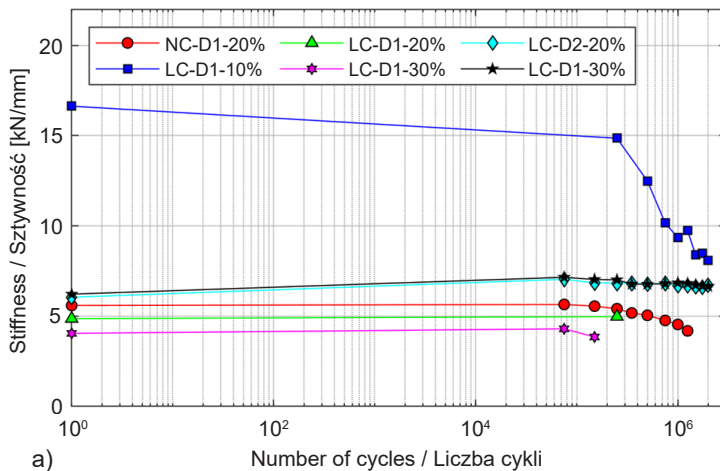


Fig. 8. "Stiffness vs. number of cycles" (a) and "stiffness vs.  $n/N$ " (b) relationships for slabs tested under fatigue load Rys. 8. Zależność „sztywność – liczba cykli” (a) oraz „sztywność –  $n/N$ ” (b) dla płyt pod obciążeniem zmęczeniowym

### 4.3. POSTAĆ ZNISZCZENIA I NOŚNOŚĆ ZMĘCZENIOWA

Postacie zniszczenia i nośności zmęczeniowe dla poszczególnych płyt zestawiono w Tabl. 3 i pokazano na Rys. 9. Dla płyt obciążanych statycznie (referencyjnych) zaobserwowano dwie postacie zniszczenia w zależności od zastosowanego betonu. Płyta NC-D1-S uległa zniszczeniu przy sile 221,4 kN w wyniku zgina-

Slab stiffness, defined as the ratio of change in the loading force to the change in deflection, is presented in Fig. 8 depending on the number of load cycles  $n$  and on the proportion  $n/N$ . Slabs for which failure was not observed in the fatigue tests were assigned the maximum number of loads  $N = 2$  million. In the case of slabs that did not fail in the fatigue test (LC-D1-10%, LC-D2-20% and LC-D2-30%), it may be observed that their stiffness quickly stabilized on a constant level, with the exception of the slab LC-D1-10%, which was also characterized by the highest stiffness. Explanation of this fact was given above; it is related to the level of fatigue load, which was lower than the load that would have cracked the slab. In the case of the remaining slabs (NC-D1-20% and LC-D1-30%), a more rapid reduction in stiffness was observable in the late stages of the fatigue test, which may be interpreted as a sign of fatigue life depletion. The LC-D1-20% slab was omitted in the analysis due to insufficient data.

### 4.3. FAILURE MODE AND FATIGUE LIFE

Failure modes and fatigue life values for specific slabs are given in Table 3 and Fig. 9. For slabs subjected to static loading tests (reference slabs), two failure modes were observed depending on the concrete used. While the NC-D1-S slab failed under the force of 221.4 kN due to bending, slabs of lightweight concrete failed due to shearing under the forces of 218.7 kN and 270.2 kN, for LC-D1-S

nia, natomiast płyty z betonu lekkiego uległy zniszczeniu na skutek ścinania przy sile 218,7 kN i 270,2 kN, odpowiednio dla płyt LC-D1-S oraz LC-D2-S. Z kolei wszystkie trzy odpowiadające im materiałowo płyty obciążone zmęczeniowo, tj. płyty NC-D1-10%, LC-D1-20% oraz LC-D1-30%, uległy zniszczeniu w wyniku zginania odpowiednio po 1,41 mln, 393 tys. oraz 198 tys. cykli obciążenia. Pozostałe płyty (LC-D1-10%, LC-D2-20% oraz LC-D2-30%) w ogóle nie uległy zniszczeniu podczas badań zmęczeniowych. Po 2 mln cykli obciążenia płyty te poddano obciążaniu statycznemu do zniszczenia. Płyty LC-D1-10%, LC-D2-20% oraz LC-D2-30% uległy zniszczeniu przy siłach odpowiednio 192,1 kN, 241,7 kN oraz 239,6 kN, a siła niszcząca stanowiła we wszystkich przypadkach 89% siły niszczącej płytę pod obciążeniem statycznym. Zaobserwowano dwie postacie zniszczenia: w przypadku płyty LC-D1-10% zniszczenie nastąpiło w wyniku zginania (odpowiadająca referencyjna płyta LC-D1-S uległa zniszczeniu w wyniku ścinania), natomiast obie płyty serii LC-D2 zostały zniszczone przez ścinanie. W przypadku płyt serii LC-D2 nie zaobserwowano wpływu poziomu obciążenia na nośność zmęczeniową płyt, a wartość siły niszczącej dla obu płyt jest praktycznie taka sama.

and LC-D2-S, respectively. All the corresponding slabs subjected to fatigue tests, i.e. NC-D1-10%, LC-D1-20% and LC-D1-30%, failed due to bending after 1.41 million cycles, 393 thousand cycles and 198 thousand cycles, respectively. The remaining slabs (LC-D1-10%, LC-D2-20% and LC-D2-30%) did not fail in fatigue tests. After 2 million cycles they were subjected to static loading tests up to the point of failure. Slabs LC-D1-10%, LC-D2-20% and LC-D2-30% failed under the forces of 192.1 kN, 241.7 kN and 239.6 kN, respectively. Force at failure in these cases equaled 89% of force at failure in the static loading test of corresponding slabs. Two failure modes were observed – in the case of the LC-D1-10% slab failure occurred due to bending (corresponding reference slab LC-D1-S failed due to shearing), whereas both slabs from the LC-D2 series failed due to shearing. In the case of the LC-D2 series, no influence of the level of fatigue load on fatigue life was observed and the value of force at failure for both slabs is practically identical.

Table 3. Summary of fatigue test

Tablica 3. Podsumowanie badań zmęczeniowych

Slab Płyta	Fatigue life [cycles] Nośność zmęczeniowa [cykle]	Force at failure (static) [kN] Siła niszcząca (statyczna)	Failure mode/cause Przyczyna/postać zniszczenia
NC-D1-S	n/a*) nd.*)	221.4	Bending / FRP rupture Zginanie / zerwanie prętów
NC-D1-20%	1 410 000	n/a*) nd.*)	Bending / FRP rupture Zginanie / zerwanie prętów
LC-D1-S	n/a*) nd.*)	218.7	Shearing / shear cracking Ścinanie / pęknięcie ukośne
LC-D1-10%	> 2 000 000	192.1	Bending / balanced failure Zginanie / zniszczenie zrównoważone
LC-D1-20%	393 000	n/a*) nd.*)	Bending / FRP rupture Zginanie / zerwanie prętów
LC-D1-30%	198 000	n/a*) nd.*)	Bending / FRP rupture Zginanie / zerwanie prętów
LC-D2-S	n/a*) nd.*)	270.2	Shearing / shear cracking Ścinanie / pęknięcie ukośne
LC-D2-20%	> 2 000 000	241.7	Shearing / shear cracking Ścinanie / pęknięcie ukośne
LC-D2-30%	> 2 000 000	239.6	Shearing / shear cracking Ścinanie / pęknięcie ukośne
*) n/a – not applicable nd. – nie dotyczy			





Fig. 9. Failure modes of the tested slabs  
Rys. 9. Postacie zniszczenia badanych płyt

## 5. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

### 5.1. WPŁYW WYBRANYCH PARAMETRÓW NA NOŚNOŚĆ ZMĘCZENIOWĄ PŁYT

Najważniejszymi zmiennymi czynnikami w badaniach zmęczeniowych były: rodzaj zastosowanego betonu (zwykły vs. lekki), stopień zbrojenia płyt ( $\rho_f = 0,60\%$  vs.  $\rho_f = 0,97\%$ ) oraz poziom maksymalnego obciążenia zmęczeniowego (20% vs. 30% nośności doraźnej płyt). Wpływ każdego czynnika zmiennego na zachowanie i nośność zmęczeniową płyt określano na podstawie wyników badań zmęczeniowych opisanych powyżej.

Porównując wyniki badań zmęczeniowych płyt z betonu zwykłego i lekkiego, można zaobserwować redukcję nośności zmęczeniowej o 72% w przypadku zastosowania betonu lekkiego dla takiego samego stopnia zbrojenia głównego płyt (płyty D1). Jednakże zwiększenie stopnia zbrojenia głównego płyt z betonu lekkiego o 60% (płyty D2) skutkowało podniesieniem nośności zmęczeniowej

## 5. ANALYSIS OF THE TEST RESULTS

### 5.1. THE EFFECT OF SELECTED FACTORS ON SLAB FATIGUE LIFE

The major variable factors in the fatigue tests included: concrete type (normal vs. lightweight), reinforcement ratio ( $\rho_f = 0.60\%$  vs.  $\rho_f = 0.97\%$ ) and the level of maximum load in a load cycle (20% vs. 30% of the force at failure in the static loading test). The effect of each factor on the behavior and fatigue life of slabs was evaluated based on the fatigue test results given above.

Comparing the fatigue test results of slabs of normal and light-weight concrete, a reduction in fatigue life by 72% may be noted when lightweight concrete is used instead of normal concrete at the same slab reinforcement ratio (slabs "D1"). However, an increase in the reinforcement ratio of lightweight concrete slabs by 60% (slabs "D2") provided an increase in their fatigue life to 2 million cycles, i.e. increase by a factor of 5-10. In the case of



płat do 2 mln, czyli od 5- do 10-krotnie zwiększyło nośność zmęczeniową płyt. Z kolei w przypadku płyt z betonu lekkiego zwiększenie poziomu maksymalnego obciążenia zmęczeniowego z 20% na 30% nośności doraźnej płyt skutkowało redukcją nośności zmęczeniowej o 50%.

## 5.2. WERYFIKACJA WYBRANYCH PROCEDUR PROJEKTOWYCH

Wymagania stawiane w zakresie stanu granicznego zmęczenia elementów zbrojonych prętami kompozytowymi zostały sprecyzowane jedynie w dwóch normach amerykańskich: ACI [16] oraz AASHTO [17]. Zakłada się tam, że odpowiednia kombinacja obciążeń powinna generować naprężenia w zbrojeniu o wartości poniżej 20% lub 25% (odpowiednio [16] i [17]) wytrzymałości kompozytu GFRP na rozciąganie. Chcąc sprawdzić te warunki w przypadku badanych płyt, dla każdej z nich wyznaczono naprężenia w zbrojeniu GFRP od maksymalnego poziomu obciążenia zmęczeniowego. Naprężenia obliczono ze wzoru (1) wg [16], z uwzględnieniem rzeczywistych parametrów wytrzymałościowych betonu i prętów kompozytowych (Tabl. 1 i 2).

$$f_{f,i} = M_i \frac{n_f d(1-k)}{I_{cr}}, \quad (1)$$

gdzie:

$M_i$  – moment zginający od analizowanego obciążenia,  
 $n_f$  – stosunek modułów sprężystości zbrojenia FRP i betonu,  $n_f = \frac{E_f}{E_c}$ ,

$d$  – wysokość użyteczna przekroju mierzona pomiędzy skrajnymi włóknami ściskanymi a środkiem ciężkości zbrojenia rozciąganego,

$k$  – stosunek położenia osi obojętnej przekroju do jego wysokości:  $k = \frac{\sqrt{2\rho_f n_f + (\rho_f n_f)^2} - \rho_f n_f}{1}$ ,

$I_{cr}$  – moment bezwładności przekroju zarysowanego.

Wyniki obliczeń przedstawiono w Tabl. 4, w której dodatkowo oszacowano stopień wytężenia zbrojenia GFRP, dzieląc uzyskane wartości naprężeń przez wytrzymałość prętów GFRP na rozciąganie. Na podstawie porównania wartości w Tabl. 4 można zauważyć, że kryterium ACI [16] jest spełnione dla płyt LC-D1-10% i LC-D2-20%.

lightweight concrete slabs, an increase in the maximum level of load in fatigue cycle from 20% to 30% of the maximum static load carrying capacity resulted in reduction of fatigue life by 50%.

## 5.2. VERIFICATION OF SELECTED DESIGN PROCEDURES

Precise requirements pertaining to fatigue limit states of elements reinforced with composite bars have been defined only in two American standards: the ACI standard [16] and the AASHTO standard [17]. It is assumed in the standards that stresses generated in the reinforcement by an appropriate load combination should be less than 20% or 25% of the GFRP tensile strength (in [16] and [17], respectively). In order to verify these conditions for the tested slabs, stresses in GFRP reinforcement were determined for each slab at the adopted maximum load level in fatigue cycle. Stress was calculated using equation (1) according to [16], using real strength parameters of concrete and composite rebars (Tables 1 and 2).

$$f_{f,i} = M_i \frac{n_f d(1-k)}{I_{cr}}, \quad (1)$$

where:

$M_i$  – bending moment from the analyzed load,

$n_f$  – ratio of the moduli of elasticity of FRP

reinforcement and concrete,  $n_f = \frac{E_f}{E_c}$ ,

$d$  – effective cross-section height, i.e. the distance between the outermost plane in concrete subjected to compression and the center of mass of reinforcement acting in tension,

$k$  – ratio expressing the location of the neutral axis of cross-section vs. its height:

$$k = \frac{\sqrt{2\rho_f n_f + (\rho_f n_f)^2} - \rho_f n_f}{1}$$

$I_{cr}$  – moment of inertia of cracked cross-section.

Results of such calculations are presented in Table 4, in combination with the evaluated proportion of the level of stress to the GFRP tensile strength.

Based on data shown in Table 4, one may note that the ACI [16] criterion is fulfilled for the slabs LC-D1-10% and LC-D2-20%. Both slabs displayed fatigue life greater than 2 million cycles. The remaining slabs, which did not meet the ACI criterion limiting the stress in reinforcement,

Obie te płyty wykazały nośność zmęczeniową powyżej 2 mln cykli. Pozostałe płyty, niespełniające kryterium ograniczenia naprężeń z uwagi na zmęczenie, nie osiągnęły zakładanej nośności zmęczeniowej (tj. 2 mln cykli). Wyjątkiem jest płyta LC-D2-30%, w przypadku której pomimo naprężeń w zbrojeniu równych 24% wytrzymałości prętów na rozciąganie płyta nie uległa zniszczeniu podczas badania zmęczeniowego. Należy również zauważyć, że nieznaczne przekroczenie limitu naprężeń w zbrojeniu w przypadku płyt NC-D1-20% oraz LC-D1-20% skutkowało nieosiągnięciem wymaganej nośności zmęczeniowej. Z kolei biorąc pod uwagę kryterium AASHTO [17] (25% wytrzymałości na rozciąganie), było ono spełnione dla wszystkich płyt oprócz płyty LD-D1-30%, a tymczasem połowa z badanych płyt nie osiągnęła zakładanej nośności zmęczeniowej. W tym kontekście zalecenia normy ACI [16] wydają się być bardziej adekwatne do wyników badań. Na podstawie tych wyników można jednak stwierdzić, że kryteria zmęczeniowe przyjęte w normach [16] i [17] zasadniczo mogą być stosowane do oceny zmęczenia płyty pomostowych LWC/GFRP.

## 6. WNIOSKI

Badaniom zmęczeniowym poddano łącznie dziewięć pełnowymiarowych płyt betonowych o wymiarach 3,0 m × 1,0 m × 0,18 m. Dwie płyty wykonano z betonu zwykłego, a siedem z betonu lekkiego. Trzy płyty zostały poddane obciążeniu statycznemu (płyty referencyjne), zaś pozostałe sześć płyt poddano obciążeniu zmęczeniowemu. Głównymi czynnikami zmiennymi w badaniach były: rodzaj betonu, stopień zbrojenia głównego oraz poziom maksymalnego obciążenia zmęczeniowego. Wyniki badań zmęczeniowych przeanalizowano w oparciu o analizę stanu zarysowania i ugięcia płyt oraz ocenę nośności zmęczeniowej i postaci zniszczenia. Na podstawie analizy wyników badań zmęczeniowych można wyciągnąć następujące wnioski:

1. Nośność zmęczeniowa płyt pomostowych z betonu lekkiego jest zredukowana o 72% w porównaniu z analogicznie zbrojonymi płytami z betonu zwykłego.
2. Zwiększenie stopnia zbrojenia głównego płyt z betonu lekkiego o 60% spowodowało wzrost nośności zmęczeniowej płyt 5-10-krotnie, do osiągnięcia wymaganych 2 mln cykli.

did not reach the assumed fatigue life (i.e. 2 million cycles). The only exception was the LC-D2-30% slab, which did not fail in the fatigue test despite the fact that the maximum level of stress in reinforcement equaled 24% of its tensile strength. It is also noteworthy that in the case of the NC-D1-20% and LC-D1-20% slabs, maximum reinforcement stress values slightly exceeding the 20% limit led to insufficient fatigue life. Taking into consideration the AASHTO criterion [17] (25% of reinforcement tensile strength), it was fulfilled for all the slabs except LD-D1-30%; however, half of the tested slabs did not reach the assumed fatigue life. In this context, provisions of the ACI standard [16] seem more adequate to the actual test results. However, the obtained results justify a general observation that the fatigue criteria given in [16] and [17] are, in principle, useful for fatigue evaluation of LWC/GFRP bridge deck slabs.

Table 4. Stress values in GFRP reinforcement due to fatigue load  
Tablica 4. Wartości naprężeń w zbrojeniu GFRP od obciążenia zmęczeniowego

Slab designation Oznaczenie płyty	Maximum load level [kN] Maksymalny poziom obciążenia	Stress in reinforcement Naprężenie w zbrojeniu [MPa]	Level of stress vs. GFRP tensile strength [%] Stopień wyczerpania prętów GFRP
NC-D1-20%	44	219	22
LC-D1-10%	22	109	11
LC-D1-20%	44	219	22
LC-D1-30%	66	328	33
LC-D2-20%	54	160	16
LC-D2-30%	81	241	24

## 6. CONCLUSIONS

The tests were conducted on a total of nine full-scale concrete slabs with the dimensions of 3.0 m × 1.0 m × 0.18 m. Two slabs were made of normal-weight concrete and seven were made of lightweight concrete. Three slabs were subjected to static loading tests (reference slabs), while the remaining six slabs were subjected to fatigue tests. The major variable factors in the fatigue tests included: concrete type, reinforcement ratio and the level of maximum load in a load cycle. Fatigue test results were analyzed based on cracking and deflection, fatigue life assessment and failure mode. Based on the analysis, the following conclusions may be formulated:

3. Zwiększenie poziomu maksymalnego obciążenia zmęczeniowego płyt z betonu lekkiego z 20% do 30% ich nośności doraźnej (statycznej) skutkowało redukcją nośności zmęczeniowej płyt o 50%.
4. Płyty z betonu lekkiego po 2 mln cykli obciążenia zmęczeniowego wykazywały podobne zachowanie w zakresie morfologii zarysowania oraz sztywności jak płyty bez historii obciążenia zmęczeniowego (obciążone statycznie).
5. Nie zaobserwowano znacznej zmiany sztywności badanych płyt wraz ze wzrostem liczby cykli obciążenia, co ma istotne znaczenie dla pracy płyt pomostowych w trakcie wieloletniej eksploatacji obiektów mostowych.
6. Należy zaznaczyć, że zasięg zarysowania płyt w rzeczywistym schemacie pracy płyty, która jest elementem składowym dźwigara głównego (stąd w kierunku podłużnym w płycie dominuje ściskanie), będzie mniejszy niż uzyskany w badaniach (brak możliwości odwzorowania rzeczywistego schematu pracy płyty pomostu w warunkach laboratoryjnych) przy oddziaływaniu obciążenia pojedynczym kołem.
7. Kryterium zmęczeniowe przyjęte w normie ACI [16] w postaci ograniczenia naprężeń w zbrojeniu do 20% wytrzymałości kompozytu na rozciąganie może być stosowane także do oceny zmęczenia płyty pomostowych LWC/GFRP.

Pierwszym mostem drogowym w Polsce płytą pomostu LWC/FRP jest w eksploatacji od 2015 r. Systematyczne przeglądy tej konstrukcji nie wykazały do tej pory żadnych negatywnych skutków zastosowania dwóch niekonwencjonalnych materiałów. Wydaje się jednak, że do szerszego stosowania płyt pomostowych typu LWC/FRP jest konieczne opracowanie dokładnych procedur ich projektowania, także w zakresie oceny zmęczenia. Procedury te, oprócz zapewnienia wymaganego bezpieczeństwa, użyteczności i trwałości konstrukcji, przyczynią się również do optymalizacji zużycia podstawowych materiałów, co przy ich wyższej cenie w stosunku do ceny materiałów konwencjonalnych wydaje się być niezbędnym warunkiem szerszego stosowania płyt pomostowych LWC/FRP.

## BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

[1] *Siwowski T.*: Pomosty drogowe. Część I. Autostrady, 10, 2006, 30-38

1. Fatigue life of lightweight concrete deck slabs is reduced by 72% in comparison to corresponding normal-weight concrete slabs with the same reinforcement.
2. An increase in the reinforcement ratio of lightweight concrete slabs by 60% provided an increase in their fatigue life by a factor of 5-10, i.e. beyond the required 2 million cycles.
3. For lightweight concrete slabs, an increase in the maximum level of load in fatigue cycle from 20% to 30% of the maximum static load carrying capacity resulted in reduction of their fatigue life by 50%.
4. Lightweight concrete slabs that had been subjected to 2 million fatigue cycles and slabs without fatigue history (subjected only to static loading tests) displayed similar stiffness and crack morphology.
5. No considerable changes in stiffness of the tested slabs were observed as the number of load cycles increased; this fact is important in the context of long-term performance of bridge deck slabs.
6. One should bear in mind that the depth of cracks in an actual working scheme of the slab (as an element of the primary girder, slab will act predominantly in compression) will be lower than in the tests under a single wheel load (the actual scheme cannot be imitated in laboratory conditions).
7. The ACI standard [16] fatigue criterion limiting the allowable tensile stress in reinforcement to 20% of composite reinforcement tensile strength may be applied in fatigue evaluation of LWC/GFRP bridge deck slabs as well.

The first Polish bridge with LWC/FRP deck slab has been in service since 2015. Regular inspections of the structure have not indicated any negative effects of usage of the two unconventional materials. However, before such solutions are accepted in general use, it seems advisable to develop detailed design procedures, including fatigue evaluation. Such procedures, apart from providing the required safety, serviceability and durability of the structure, will contribute to optimized consumption of the basic materials, which is a requirement for their widespread use, taking into account the fact that LWC and FRP are more expensive than conventional materials.

[2] *Siwowski T.*: Pomosty drogowe. Część II. Autostrady, 11, 2006, 67-72

- [3] *Stewart M.G., Estes A.C., Frangopol D.M.*: Bridge deck replacement for minimum expected cost under multiple reliability constraints. *Journal of Structural Engineering*, **130**, 9, 2004, 1414-1419, DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2004)130:9(1414)
- [4] *Wiater A., Rajchel M., Siwowski T.*: Badania płyt pomostu z betonu lekkiego zbrojonych prętami kompozytowymi GRFP. *Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury*, **XXXII**, 62 (4/15), 2015, 469-492, DOI: 10.7862/rb.2015.211
- [5] *Wiater A., Siwowski T.*: Lightweight concrete bridge deck slabs reinforced with GFRP composite bars. *Roads and Bridges – Drogi i Mosty*, **16**, 4, 2017, 279-293, DOI: 10.7409/rabd.017.018
- [6] *Liu R., Pantelides C.P.*: Shear strength of GFRP reinforced precast lightweight concrete panels. *Construction and Building Materials*, **48**, 2013, 51-58, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.06.057
- [7] *Pantelides C.P., Besser B.T., Liu R.*: One-way shear behavior of lightweight concrete panels reinforced with GFRP bars. *Journal of Composite Construction*, **16**, 1, 2012, 2-9, DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000240
- [8] *Wiater A., Siwowski T.*: Nośność na ścinanie zginanych elementów betonowych zbrojonych prętami kompozytowymi FRP w świetle wybranych procedur obliczeniowych. *Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury*, **XXXIV**, 64 (2/II/17), 2017, 267-297, DOI: 10.7862/rb.2017.98
- [9] *Wiater A., Siwowski T.*: Serviceability and ultimate behaviour of GFRP reinforced lightweight concrete slabs: Experimental test versus code prediction. *Composite Structures*, **239**, 2020, 112020, DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.112020
- [10] *El-Ragaby A., EL-Salakawy E., Benmokrane B.*: Fatigue analysis of concrete bridge deck slab reinforced with E-glass/vinyl ester FRP reinforcing bars. *Composites Part B: Engineering*, **38**, 5-6, 2007, 703-711, DOI: 10.1016/j.compositesb.2006.07.012
- [11] *Carvelli V., Pisani M.A., Poggi C.*: Fatigue behaviour of concrete bridge deck slabs reinforced with GFRP bars. *Composites Part B: Engineering*, **41**, 2010, 560-567, DOI: 10.1016/j.compositesb.2010.06.006
- [12] PN-EN 1992-2:2010 Eurokod 2. Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 2: Mosty z betonu – Obliczanie i reguły konstrukcyjne
- [13] *Sivagamasundari R., Kumaran G.*: Experimental study on the behaviour of concrete one way slabs reinforced with GFRP reinforcements under constant and variable amplitude repeated loadings. *International Journal of Civil and Structural Engineering*, **2**, 2, 2011, 556-578
- [14] *You Y.J., Kim J.H.J., Park Y.H., Choi J.H.*: Fatigue Performance of Bridge Deck Reinforced with Cost-to-Performance Optimized GFRP rebar with 900 MPa Guaranteed Tensile Strength. *Journal of Advanced Concrete Technology*, **13**, 5, 2015, 252-262, DOI: 10.3151/jact.13.252
- [15] *Mai G., Li L., Chen X., Xiong Z., Liang J., Zou X., Qiu Y., Qiao S., Liang D., Liu F.*: Fatigue performance of basalt fibre-reinforced polymer bar-reinforced sea sand concrete slabs. *Journal of Materials Research and Technology*, **22**, 2023, 706-727, DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.11.135
- [16] American Concrete Institute (ACI): ACI 440.1R-15. Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars, Farmington Hills, 2015
- [17] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO): AASHTO LRFD Bridge Design Guide Specifications for GFRP-Reinforced Concrete. 2nd edition, Washington, 2018
- [18] PN-EN 12390-3:2011 Badania betonu. Wytrzymałość na ściskanie próbek do badania
- [19] PN-EN 12390-1:2013-03 Badania betonu. Kształt, wymiary i inne wymagania dotyczące próbek do badań i form
- [20] PN-EN 12390-2:2011 Badania betonu. Wykonanie i pielęgnacja próbek do badań wytrzymałościowych
- [21] PN-EN 12390-7:2011 Badania betonu. Gęstość betonu
- [22] ISO 10406-1:2015 Fibre-reinforced polymer (FRP) reinforcement of concrete. Test methods. FRP bars and grids
- [23] PN-EN 1991-2:2007 Eurokod 1. Oddziaływania na konstrukcję – Część 2: Obciążenia ruchome mostów