

MUHAMMAD ADEEL ARSHAD¹⁾MUHAMMAD FAHAD²⁾AKHTAR NAEEM KHAN³⁾MOHAMMAD ADIL⁴⁾ARSALAN KHAN⁵⁾

FATIGUE LOAD EFFECTS ON HIGHWAY BRIDGES OF PAKISTAN USING WEIGH-IN-MOTION DATA

EFEKTY ODDZIAŁYWAŃ ZMĘCZENIOWYCH NA DROGOWE OBIEKTY INŻYNIERSKIE W PAKISTANIE NA PODSTAWIE DANYCH ZE STACJI WAŻENIA POJAZDÓW W RUCHU

STRESZCZENIE. Drogowe obiekty inżynierskie to elementy infrastruktury o zasadniczym znaczeniu dla bezpieczeństwa transportu, bez których nie sposób wyobrazić sobie funkcjonowania sieci komunikacyjnej. Pierwszorzędne znaczenie ma zapewnienie bezpieczeństwa eksploatacji przy ograniczonych do minimum wyłączeniach z ruchu w celu wykonania prac utrzymaniowych i naprawczych. Nieustannie rosnące natężenie ruchu i obciążenie osi pojazdów ciężarowych przekładają się bezpośrednio na większą sumaryczną liczbę cykli obciążenia zmęczeniowego. W badaniach wykorzystano dane dotyczące ruchu pojazdów ciężarowych, pochodzące ze stacji ważenia pojazdów w ruchu (ang. *Weigh-In-Motion*), zlokalizowanej na najdłuższej i najbardziej ruchliwej drodze szybkiego ruchu w Pakistanie. W celu obliczenia liczby cykli obciążeniowych w najbardziej wyęźzonych miejscach opracowano algorytm symulujący przejazdy pojazdów przez obiekty o różnych długościach przęsła, reprezentowane prostymi modelami analitycznymi. Przeanalizowano przypadek obiektu z pomostem z belek żelbetonowych typu T, zlokalizowanego w strefie oddziaływania wybranej stacji ważenia pojazdów, w celu uzyskania widma naprężeń w najbardziej wyęźzonych elementach konstrukcji. Opisana metoda postępowania stanowi narzędzie do identyfikacji obiektów mostowych najbardziej narażonych na uszkodzenia zmęczeniowe w administrowanym obszarze i może być wykorzystana jako element kompleksowego systemu zarządzania obiektami infrastruktury drogowej.

SŁOWA KLUCZOWE: dopuszczalna masa całkowita, obiekty inżynierskie, trwałość zmęczeniowa, ważenie w ruchu, zakres naprężeń.

ABSTRACT. Bridges are considered to be the essential structures and represent a vital part of a transportation network. Their safe operation with minimal maintenance closures is paramount for their efficient operation. The continuous increase in volume and weight of truck traffic directly translates into a higher number of accumulated fatigue load cycles. This study utilizes truck traffic data from a Weigh-in-Motion (WIM) station located on Pakistan's busiest and longest National Highway. An algorithm was developed to simulate vehicle passages over simple analytical bridge models of various span lengths to compute fatigue cycles at critical locations. This was followed by a case study on a reinforced concrete T-beam bridge located under the influence of the selected WIM station to obtain a fatigue stress spectrum for its critical details. This information provides an identification tool for bridges within a stock that are more susceptible to fatigue problems and could form part of a full-bridge management framework.

KEYWORDS: fatigue behaviour, gross vehicular weights, highway bridges, stress range, weigh in motion.

DOI: 10.7409/rabdim.022.002

¹⁾ University of Engineering and Technology, Peshawar, Department of Civil Engineering, Jamrud Road Peshawar 25000, Pakistan; ceadeel@uetpeshawar.edu.pk (✉)

²⁾ University of Engineering and Technology, Peshawar, Department of Civil Engineering, Jamrud Road Peshawar 25000, Pakistan; fahadkhan@uetpeshawar.edu.pk

³⁾ University of Engineering and Technology, Peshawar, Department of Civil Engineering, Jamrud Road Peshawar 25000, Pakistan; drakhtarnaem@uetpeshawar.edu.pk

⁴⁾ University of Engineering and Technology, Peshawar, Department of Civil Engineering, Jamrud Road Peshawar 25000, Pakistan; adil@uetpeshawar.edu.pk

⁵⁾ University of Engineering and Technology, Peshawar, Department of Civil Engineering, Jamrud Road Peshawar 25000, Pakistan; arsalaan@uetpeshawar.edu.pk

1. WPROWADZENIE

Pod pojęciem zmęczenia rozumie się stopniowo narastające uszkodzenie materiału pod wpływem cyklicznego obciążenia o wartości znacznie poniżej niszczącego obciążenia statycznego. Uszkodzenia zmęczeniowe materiału przebiegają zasadniczo w trzech etapach: 1) inicjacja pęknięcia, 2) propagacja pęknięcia, 3) ostateczne pęknięcie. Na Rys. 1 porównano morfologię pęknięcia pręta zbrojeniowego pod wpływem niszczącego obciążenia statycznego i obciążeń cyklicznych. W okresie eksploatacji obiekty mostowe poddawane są z reguły milionom cykli obciążeniowych wywołanych ruchem pojazdów. Spektrum naprężeń wywołanych zmiennymi obciążeniami może doprowadzić do powstania w konstrukcji uszkodzeń zmęczeniowych, zależnych nie tylko od charakterystyki przejeżdżających pojazdów, ale także od właściwości konstrukcyjnych mostu.

Parametry ruchu obejmujące geometrię pojazdów, obciążenia osi, odstęp między pojazdami, strukturę rodzajową i oddziaływania dynamiczne w istotny sposób określają spektrum obciążeń zmęczeniowych obiektu. W przypadku zmęczenia, bardziej niż obciążenia ekstremalne wywołane ruchem pojazdów, które uwzględniane są w procesie projektowania wytrzymałościowego, interesują nas regularne obciążenia eksploatacyjne. Wynika to z faktu, że obciążenia ekstremalne występują rzadko w okresie użytkowania konstrukcji i stąd ich wpływ na trwałość zmęczeniową uważa się za znikomy.

Szereg norm stosowanych w projektowaniu obiektów mostowych, w tym AASHTO, Eurokod 1 oraz BS5400, podaje modele obciążeń zmęczeniowych, które mogą być odpowiednie w przypadku projektowania zmęczeniowego nowych konstrukcji, lecz w przypadku istniejących obiektów dają wyniki obarczone błędem [1]. Ponadto zakłada się, że zdefiniowane w normie modele obciążeń zmęczeniowych są jednakowo ważne dla lokalizacji obiektu w obrębie danego regionu, jak również przyjmuje się niezmiennosc nacisków i układów osi przez cały okres użytkowania konstrukcji. Z przeprowadzonych badań wynika jednak, że parametry obciążeń zmiennych wywołane pojazdami w danym miejscu mogą odbiegać od parametrów w innych miejscach w tym samym regionie [2]. Ze względu na niepewność co do rozkładu przemieszczających się pojazdów i trendów zmian obciążenia, zaleca się przeprowadzanie oceny zmęczenia przy uwzględnieniu rzeczywistych parametrów ruchu określonych dla danej lokalizacji, w której znajduje się obiekt mostowy.

Idealnym rozwiązaniem w przypadku wykonywanych w terenie badań zmęczeniowych obiektów mostowych jest monitorowanie w czasie rzeczywistym zmian naprężeń występujących w kluczowych elementach konstrukcji pod

1. INTRODUCTION

Fatigue is the progressive failure of material under repetitive loading, where the maximum load can be significantly lower than that required to cause static failure. Fatigue damage evolution in material generally takes place in three stages: 1) crack initiation, 2) crack propagation and 3) final rupture. Fig.1 shows the difference between the fracture morphology of a rebar failure under static and repetitive cyclic loading. Bridges are structures that are usually subjected to millions of load cycles in their service life due to the moving traffic loads. The stress spectrum resulting from these varying loads may produce fatigue damage, which not only depends upon the characteristics of traversing vehicles, but also depends upon the structural characteristics of the bridge.

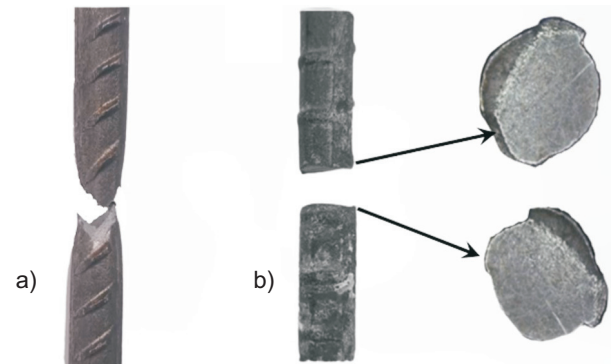


Fig. 1. Fracture morphology of a rebar failure: a) yield failure, b) fatigue failure

Rys.1. Widok zerwanego pręta zbrojeniowego: a) pęknięcie plastyczne, b) pęknięcie zmęczeniowe

Traffic characteristics such as the vehicle's geometry, axle loads, vehicle spacing, the composition of traffic, and its dynamic effects have a significant role to play in defining the fatigue load spectrum over a bridge. From the perspective of fatigue, routinely operational vehicular loads are of more interest than the extreme vehicular loads used in the strength design process. This is because extreme load events rarely occur in the lifetime of a structure; therefore, they are considered to have an insignificant effect on the fatigue life of a structure.

Several bridge design codes like AASHTO, Eurocode 1, and BS5400 include fatigue load models that may be adequate for the purpose of fatigue design of new structures, but yield biased results of fatigue life for existing bridges [1]. Moreover, the code-defined fatigue load models are assumed equally valid for all sites in a region and are based on the presumption that axle loads and configurations will remain constant throughout the service life of

wpływem rzeczywistego obciążenia ruchem drogowym [3]. Nie zawsze jednak istnieje możliwość zastosowania tej metodologii z powodu braku dostępu do niektórych obiektów, a także trudnego i kosztownego utrzymania systemu monitorowania obiektu, zwłaszcza w przypadku monitorowania długo-terminowego. Ponadto niektóre obiekty na drogach szybkiego ruchu nie kwalifikują się nawet do tego rodzaju monitoringu w terenie ze względów ekonomicznych. Alternatywnie rzeczywiste dane ruchowe w danej lokalizacji można uzyskać z pomiarów WIM (ang. *Weigh-In-Motion*). Skutki oddziaływania obciążeń zmęczeniowych można następnie wyznaczyć obliczeniowo, korzystając z modeli analitycznych konstrukcji obiektu, co jest przedmiotem opisanych tutaj badań.

2. UZASADNIENIE CELOWOŚCI BADAŃ

Na drogach krajowych w Pakistanie wybudowano ponad 5500 obiektów mostowych. W ciągu ostatnich kilkudziesięciu lat w kraju miał miejsce ogromny rozwój sieci dróg szybkiego ruchu. W konsekwencji wzrosło zarówno natężenie ruchu, jak i obciążenie załadunkiem oraz prędkości pojazdów. Pakistański Zarząd Dróg Krajowych (NHA) jest największą organizacją rządową Pakistanu, która oprócz budowy, utrzymywania i zarządzania infrastrukturą drogową narzuca ograniczenia nacisku na oś pojazdów korzystających z tej infrastruktury [4, 5]. Dopuszczalne konfiguracje pojazdów ciężarowych oraz wartości dopuszczalnej masy całkowitej (DMC) określa Rozporządzenie na temat bezpieczeństwa dróg krajowych [6]. Parametry te są uchwalane i egzekwowane przez NHA poprzez wyznaczenie maksymalnych obciążeń osi przedniej (54 kN), tylnej (118 kN), podwójnej (216 kN) i potrójnej (315 kN) [7]. Biorąc pod uwagę dane z pomiarów nacisków osi przeprowadzonych w 1995 roku przez Krajowy Ośrodek Badań Transportu, ustalono powyższe wartości w drodze konsultacji, w których uczestniczyły wszystkie zainteresowane strony, tj. przewoźnicy, przedstawiciele administracji państwowej oraz przedstawiciele biur projektowych. Limity dopuszczalnej masy całkowitej i obciążenia osi zostały ustalone w celu ograniczenia nacisku osi tylnej do poziomu, przy którym obciążenie dowolnej pojedynczej osi nie przekracza 118 kN, co jest wartością graniczną obciążenia osi obliczeniowej zalecaną przez UNESCAP (Komisję Gospodarczo-Społeczną Organizacji Narodów Zjednoczonych do spraw Azji i Pacyfiku), organ ONZ promujący międzynarodową współpracę na rzecz zrównoważonego rozwoju i wyrównania społecznego.

Egzekwowanie ww. limitów nacisków na oś stanowi niemałe wyzwanie dla rządu w sytuacji notorycznego naruszania ustawowych ograniczeń przez przewoźników z powodu ciągłego

the structure. Studies have revealed that the vehicle loading characteristics at a particular site may not be the same at any other site in a region [2]. Given the uncertainty in traffic composition and loading trends, fatigue evaluation based on actual traffic loads at the bridge site is recommended by many researchers.

Real-time field monitoring of stress variation under actual traffic loads at the critical details of the bridge provides an ideal solution to investigate fatigue in bridges [3]. However, this methodology is not always feasible, because some bridges are not accessible for field monitoring; the maintenance of the monitoring system is difficult and costly, especially for long-term monitoring; some highway bridges will not even be considered for field monitoring due to economic concerns. Alternatively, realistic traffic data at a site can be obtained from WIM studies. Subsequently, fatigue load effects can be computed utilizing analytical bridge models, which is the scope of the present research.

2. BACKGROUND MOTIVATION

There are well over 5,500 bridges on the National Highways of Pakistan. Over the past few decades, the country has witnessed tremendous growth in its highway transportation network. This has resulted in increased traffic volume, vehicular weights and speeds. In Pakistan, National Highway Authority (NHA) is the largest government organization that not only builds, maintains and manages highway infrastructure, but also enforces limits on axle weights [4, 5]. The allowable truck configurations are defined in the National Highways Safety Ordinance as permissible Gross Vehicular Weights (GVWs) [6]. These are also enacted and enforced by NHA such that the weight of front, rear, tandem and tridem axle must not exceed 54 kN, 118 kN, 216 kN and 315 kN, respectively [7]. These limits have been set with mutual consultation between the stakeholders including transporters, concerned government authorities and consultants against the backdrop of the axle load survey data collected in 1995 by the National Transport Research Centre. The gross and axle load limits have been developed to maintain the rear axle load of trucks such that the weight of any individual axle must not exceed 118 kN, which is the threshold value of standard axle load recommended by the United Nations Economic and Social Commission of Asia and the Pacific (UNESCAP), which acts to promote cooperation among countries to achieve inclusive and sustainable development.

wzrostu cen paliw i rosnącej konkurencji w branży. Dążąc do maksymalizacji zysków, przewoźnicy decydują się na przeciążanie pojazdów. W rezultacie na drogach krajowych nierzadko można spotkać przeciążone pojazdy ciężarowe (Rys. 2), a przekraczanie dopuszczalnej masy całkowitej stało się w Pakistanie zwyczajem lub wręcz tradycją [8, 9]. Uzasadnione wydaje się stwierdzenie, że Pakistan jest obecnie jedynym w swoim regionie krajem, w którym ograniczenia nacisku na oś nie są wciąż egzekwowane w skuteczny sposób. W sąsiednich krajach – Iranie, Afganistanie i Indiach – obowiązują surowe przepisy zapewniające skuteczną realizację wymogów ustawowych, i to przy znacznie bardziej rygorystycznych ograniczeniach niż obowiązujące obecnie w Pakistanie [10]. W konsekwencji obiekty mostowe zlokalizowane na terenie Pakistanu są z reguły narażone na oddziaływanie dużej liczby obciążeń o znacznych amplitudach. W tych warunkach zmęczenie staje się ważnym czynnikiem nie tylko przy ocenie stanu istniejących konstrukcji, ale również przy projektowaniu nowych obiektów [11].

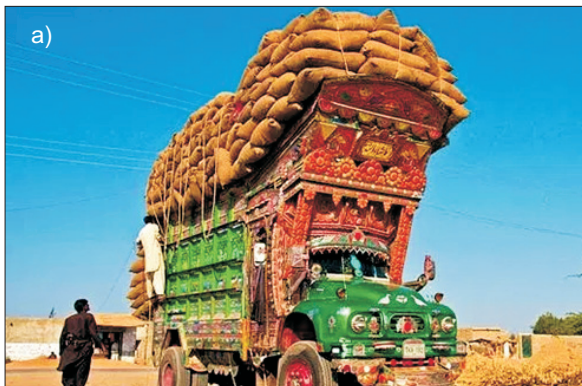


Fig. 2. Overloaded trucks (2-axle Bedford) hauling over National Highway N-5: a) loaded with wheat grain sacks having $GVW = 325$ kN (approx.), b) loaded with wheat straw having $GVW = 245$ kN (approx.); GVW – Gross Vehicle Weight
Rys. 2. Przeladowane pojazdy ciężarowe (2-osiowy Bedford) na drodze krajowej N-5 przewożące: a) worki ze zbożem o obciążeniu całkowitym ok. 325 kN, b) worki ze słomą pszenną o obciążeniu całkowitym ok. 245 kN

Jak dotąd w Pakistanie nie stworzono ram prawnych regulujących zasady projektowania obiektów mostowych [5]. Większość istniejących starych obiektów mostowych eksploatowanych na terenie Pakistanu została zaprojektowana zgodnie z opracowaną w 1967 roku normą WPCPHB (Zachodniopakiistańska Norma Projektowa dla Drogowych Obiektów Mostowych) [12]. Norma ta nie była aktualizowana od momentu publikacji i stąd nie uwzględnia ona aktualnej wiedzy dotyczącej wytrzymałości zmęczeniowej obiektów mostowych. Nowe obiekty natomiast projektowane są zgodnie ze specyfikacją projektowania obiektów mostowych AASHTO LRFD [13]. Norma traktuje zmęczenie jako odrębny stan graniczny, ale biorąc pod uwagę obciążenia na oś powszechnie występujące w Pakistanie, które są znacznie wyższe od przyjętych

Enforcing these axle load limits is an uphill task for the government and the truck industry continues to violate the regulations due to continuous increases in fuel prices and growing competition among the freighters. Truckers resolve to overload in order to maximize their profits. It is not uncommon to find overloaded trucks on national highways (Fig. 2), which reflects that overloading has become more like a custom and tradition in Pakistan [8, 9]. Perhaps, Pakistan is the only country left in the region where axle load limits have not yet been enforced effectively. Neighbouring countries like Iran, Afghanistan and India have strict regulations in place to ensure the implementation of such laws even though their limits are far more stringent than what is permissible in Pakistan [10]. This implies that the bridges in Pakistan are typically exposed to many load cycles with significant amplitudes. Under these circumstances, fatigue becomes an important consideration not only for the evaluation of existing structures, but also for the design of new structures [11].

There exists no legal framework for the design of bridges in Pakistan to date [5]. The majority of the existing old bridges in Pakistan have been designed according to the West Pakistan Code of Practice for Highway Bridges (WPCPHB) developed in 1967 [12]. The design code has never been updated and the problem of fatigue in bridges is left unaddressed. However, new bridges are being designed as per specifications provided by the AASHTO LRFD [13]. The code treats fatigue as a separate limit state, but the adequacy of the defined fatigue load model in the context of Pakistan is still unknown, since the operational axle loads in Pakistan are much higher than were actually considered in the AASHTO LRFD fatigue load model [4].

w zakładanym modelu obciążenia zmęczeniowego, nieznanne jest dopasowanie tego modelu dla warunków występujących w Pakistanie [4].

Obecnie wykorzystywany System Zarządzania Obiektami Mostowymi zapewnia jedynie inwentaryzację obiektów drogowych administrowanych przez Zarząd Dróg Krajowych. Spis aktualizowany jest co 3-4 lata bez jakiegokolwiek oceny stanu technicznego. Inspekcje terenowe są planowane losowo i ograniczają się jedynie do oceny wizualnej przy stosunkowo wąskim zakresie informacji dotyczących wytrzymałości zmęczeniowej konstrukcji. Uświadomienie sobie, że eksploatowane w Pakistanie mosty drogowe są konstrukcjami podatnymi na zmęczenie, a nie istnieje na etapie ich projektowania lub oceny istniejącej konstrukcji żaden racjonalny system przewidywania skutków powyższego oddziaływania, budzi poważne obawy co do bezpieczeństwa takich obiektów. Mosty stanowią najdroższy element infrastruktury drogowej, bowiem bardzo wysokie są koszty ich utrzymania. Środki finansowe przeznaczone na ten cel zależą w dużej mierze od jakości informacji i danych o aktualnym stanie technicznym obiektów mostowych [14]. Lepsze zrozumienie oddziaływań obciążeń i ich wpływu na tego typu konstrukcje może prowadzić do bardziej ekonomicznego i wydajnego rozwiązania występujących problemów.

3. METODYKA BADANIA

W pracy przedstawiono nieskomplikowaną procedurę kwantyfikacji problemu zmęczenia konstrukcji mostowych na skutek codziennego oddziaływania przejeżdżających po nich pojazdów ciężarowych. Z punktu widzenia procesów zmęczeniowych zachodzących w konstrukcjach mostowych pod wpływem ruchu pojazdów, za najważniejsze parametry uznaje się częstość ich przejazdów, obciążenie osi oraz odstępy czasowe między osiami przejeżdżających pojazdów [15]. Analizę cykli zmęczeniowych przeprowadzono przy wykorzystaniu wartości obciążeń i odstępów osi uzyskanych z jednej stacji ważenia pojazdów w ruchu zlokalizowanej na ruchliwym korytarzu drogowym w Pakistanie. Analiza zmęczeniowa elementów i rozwiązań projektowych obiektów mostowych wymaga szczegółowej znajomości geometrii konstrukcji, właściwości materiałów oraz czynników zewnętrznych zwiększających skutki zmęczenia [16]. Studium przypadku obiektu o konstrukcji wykonanej z belek żelbetonowych typu T o schemacie belki wolnopodpartej przeprowadzono na podstawie histogramu naprężeń zmęczeniowych wywołanych zginaniem stali w betonie. Powyższe informacje można wykorzystać do sprawdzenia efektów zmęczenia oraz oceny stanu technicznego obiektów mostowych. Wyniki badania dotyczą konkretnej lokalizacji w której znajduje się przedmiotowa stacja ważenia

The Bridge Management System run by NHA currently only holds an inventory of highway bridges under its jurisdiction. The inventory is updated every 3 to 4 years without any condition assessment. The field inspections are randomly planned and are only limited to visual screening with rather narrow knowledge about the fatigue behaviour of bridges. Understanding that our highway bridges are fatigue prone, with no rational anticipation of fatigue effects in their assessment or design, has raised a serious concern about their health. Bridges are the most expensive component of highway infrastructure; thus, require enormous maintenance costs. The financial needs to maintain them largely depend upon the quality of relevant information and data on the current condition of these structures [14]. Better knowledge about the acting loads and their effects on these structures could lead to a more economical and efficient solution to the problem.

3. APPROACH

This paper presents a simple and easy procedure to quantify the problem of fatigue in bridges from everyday truck traffic. From the perspective of fatigue in a bridge due to traversing vehicles, the frequency and magnitude of moving axle loads and the spacing between them in time are treated as the most important parameters [15]. The analysis was performed to compute fatigue cycles using axle weight and spacing data obtained from one of the WIM sites located on a busy corridor in Pakistan. Fatigue analysis of bridge elements and details would not be complete without deep knowledge of structural geometry, material properties and environmental factors contributing to fatigue [16]. A case study was performed on a simply supported RC T-beam bridge to evaluate flexural fatigue stress histogram data for steel and concrete. This information can be used for fatigue verification and assessment of bridges. The results obtained from this study are specific to the region of the chosen WIM site, therefore, variation in the traffic composition and trends must be considered to examine bridges outside the region.

4. FATIGUE SAFETY ASSESSMENT UTILIZING WIM DATA

4.1. PREVIOUS WORK

WIM systems have been extensively used in recent years by highway and bridge engineers to monitor real-time traffic data [17]. Applications of this technology have been mostly focused on capturing extreme load events which potentially threaten the ultimate load capacity of a bridge structure. Until recently, due to shortcomings in WIM

pojazdów w ruchu; stąd w celu oceny obiektów położonych poza tym obszarem uwzględnić należy inny rozkład i trendy zachodzące w ruchu drogowym.

4. OCENA BEZPIECZEŃSTWA ZMĘCZENIOWEGO W OPARCIU O DANE ZE STACJI WAŻENIA POJAZDÓW W RUCHU

4.1. WYKORZYSTANIE DOSTĘPNYCH DANYCH

Systemy ważenia pojazdów w ruchu (WIM) były w ostatnich latach szeroko wykorzystywane przez drogowców i mostowców w celu monitorowania danych ruchu drogowego w czasie rzeczywistym [17]. Technologia była wykorzystywana w pierwszym rzędzie do wychwytywania wartości obciążeń ekstremalnych, potencjalnie niebezpiecznych z punktu widzenia nośności konstrukcji obiektu. Jak dotąd, niedokładność samej technologii oraz ograniczone możliwości przechowywania danych uniemożliwiały długoterminowe monitorowanie danych z ruchu drogowego co zmuszało badaczy do korzystania z technik symulacji i ekstrapolacji umożliwiających pracę z ograniczonymi zbiorami danych, takich jak metoda Monte Carlo czy analiza wartości ekstremalnych.

W ciągu ostatnich kilku lat nastąpił jednak znaczący rozwój technologii ważenia pojazdów w ruchu WIM dzięki wykorzystaniu bardziej zaawansowanego sprzętu i nieznanym wcześniej metod. Możliwości technologii jeszcze bardziej zwiększyła dostępność kompaktowych urządzeń o dużej pojemności pamięci umożliwiającej gromadzenie danych ruchu drogowego uzyskiwanych przez okresy liczone w miesiącach, a nawet w latach. Dostęp do archiwalnych danych z zakresu obciążeń ruchem drogowym ma zasadnicze znaczenie dla miarodajnego oszacowania skutków oddziaływania obciążeń zmęczeniowych na obiekty mostowe.

W większości badań zmęczeniowych dane ze stacji WIM były wykorzystywane do tworzenia indywidualnych modeli obciążeń zmęczeniowych lub kalibracji gotowych modeli zawartych w normach projektowych. Johan Maljaars [18] przeprowadził weryfikację zmęczenia drogowych obiektów inżynierskich zlokalizowanych w Europie przy wykorzystaniu danych zebranych na stacjach ważenia pojazdów WIM w okresie 10 lat (2008-2018) stwierdzając, że dostępne w Eurokodzie modele obciążeń zmęczeniowych nie zapewniają prawidłowego odwzorowania rzeczywistych obciążeń ruchu drogowego. Korzystając z zebranych na WIM danych, zaproponował więc nowy model obciążeń zmęczeniowych przewidziany do wykorzystania w przypadku obiektów inżynierskich zlokalizowanych w krajach europejskich. Inny model obciążeń zmęczeniowych opracowany na podstawie danych ze stacji WIM został zaproponowany w pracy

technology and limitations of data storage capabilities, long-term monitoring of traffic data was not possible and researchers were confined to the use of simulation and extrapolation techniques over short datasets, like the Monte Carlo Method or the Extreme Value Method.

Over the past few years, WIM technology has seen a rapid advancement, as it now involves more sophisticated equipment and techniques than ever before. The availability of large data storage devices with compact design has made possible to collect traffic stream data spanning over from months to years. The historical information about traffic loading is crucial in determining reliable estimates of fatigue load effects in bridges.

In fatigue studies, WIM data has been mostly used for defining site-specific fatigue load models or calibrating the existing fatigue load models provided in the design codes. Johan Maljaars [18] carried out fatigue verification of European road bridges utilizing WIM data collected over 10 years (2008 to 2018) and concluded that the existing fatigue load models in Eurocode fail to represent the actual traffic loads. He then proposed a new fatigue load model for European bridges based on the collected WIM data. Similarly, Carneiro et al. [19] proposed a fatigue load model for Brazilian highway bridges based upon WIM data obtained from two major national highways. It was demonstrated that the present Brazilian live load model does not present a uniform bias factor for bridges with different span lengths. Laman and Nowak [20] performed site-specific WIM studies to evaluate component-specific stress spectra for steel girder bridges. Wang et al. [21] utilized WIM data to acquire fatigue load spectrum on typical concrete bridges of different types and noted that the fatigue stress of RC T-beam bridge is higher than hollow slab and box girder bridge. Jacob and Labry [22] utilized multiple short-duration WIM datasets of heavy traffic and checked the compliance of critical details of steel-concrete composite bridges with the relevant design codes. The induced traffic action effects were computed using traffic flow simulation software named CASTRO-LCPC. Similarly, Zhuang et al. [23] evaluated fatigue performance of short-span RC T-beams considering the overloading effect and observed a substantial reduction in fatigue life due to the pronounced stress range increase. Yan et al. [24] proposed a framework for evaluating fatigue lifetime reliability of short to medium span bridges under site-specific stochastic truck loading. The computational framework was demonstrated by performing a case study on a prestressed RC T-girder bridge considering a stochastic fatigue truck-load model based on site-specific WIM

Cameiro et al. [19]. Dane z ruchu drogowego pochodziły w tym przypadku z dwóch stacji pomiarowych zlokalizowanych na drogach szybkiego ruchu w Brazylii. Stwierdzono, że stosowany obecnie w Brazylii model obciążeń ruchomych nie wykazuje jednakowego współczynnika odchylenia w przypadku obiektów o różnej długości przęsła. Laman i Nowak [20] przeprowadzili badania danych ze stacji WIM w celu wyznaczenia widm naprężeń w konkretnych elementach mostów stalowych o konstrukcji belkowej. Wang et al. [21] z kolei wykorzystali dane ze stacji pomiarowych do uzyskania spektrum obciążeń zmęczeniowych w obiektach o konstrukcjach różnego typu, stwierdzając większe naprężenia w obiektach żelbetowych z belek typu T w porównaniu do mostów z przęsłami o przekroju płyty otworowej oraz skrzynkowym. Jacob i Labry [22] wykorzystali szereg krótkookresowych zbiorów danych ze stacji WIM i sprawdzili zgodność wyników uzyskanych w krytycznych punktach obiektów o konstrukcji zespolonej stalowo-betonowej z wymaganiami obowiązujących norm projektowych. Oddziaływania ruchu zostały wyznaczone obliczeniowo przy wykorzystaniu programu do symulacji ruchu CASTRO-LCPC. Zhuang et al. [23] przeprowadzili natomiast ocenę trwałości zmęczeniowej żelbetowych belek typu T o małej rozpiętości z uwzględnieniem oddziaływań przeciążonych pojazdów i stwierdzili bardzo znaczącą redukcję trwałości zmęczeniowej w wyniku znaczącego wzrostu zakresu naprężeń. Yan et al. [24] zaproponowali schemat oceny trwałości zmęczeniowej obiektów o przęsłach krótkich i średnich na podstawie modelu stochastycznego obciążenia ruchem – charakterystycznego dla konkretnej lokalizacji. Schemat obliczeń przedstawiono, przeprowadzając studium przypadku obiektu o konstrukcji belkowej z belek żelbetowych typu T z wykorzystaniem stochastycznego modelu obciążenia ruchem pojazdów ciężarowych opracowanego na podstawie wyników pomiarów pochodzących ze stacji WIM. Wang et al. [25] przeprowadzili analizę uszkodzeń zmęczeniowych obiektów o konstrukcji belkowej, wyznaczając widmo obciążeń zmęczeniowych z bazy danych wyników ze stacji WIM. Stwierdzono ścisły związek między zjawiskami zmęczeniowymi a układem osi pojazdów; nie potwierdzono przy tym wpływu większych wartości dopuszczalnej masy całkowitej pojazdu na zmęczenie obiektu.

4.2. ZBIERANIE DANYCH NA STACJACH WIM

W Pakistanie jednostką odpowiedzialną za egzekwowanie dopuszczalnego nacisku na oś i dopuszczalnej masy całkowitej pojazdu (DMC) jest NHA, który w tym celu zbudował stacje ważenia pojazdów wyposażone w wagi statyczne oraz systemy WIM w szeregu lokalizacji na drogach krajowych. Na wielu z zarządzanych przez NHA obiektach udział ruchu

measurements. Wang et al. [25] performed fatigue damage analysis of girder bridges by establishing fatigue load spectrum from the WIM database. It was concluded that the fatigue load effects are closely related to the configuration of axles and do not necessarily increase with the GVW of a vehicle.

4.2. WIM DATA COLLECTION

The NHA, being responsible for enforcement of limits of axle weights and Gross Vehicular Weights (GVWs), has installed static weigh stations and WIM systems at several locations on the national highways of Pakistan. In many bridges, lighter traffic is considered to induce stress cycles below the endurance limit of the bridge elements [15, 22]. Therefore, only the traffic data of trucks, routinely operational over the national highways, have been considered in this study. Traffic data of about 101,608 trucks were obtained from Mullan-Mansoor WIM station located on the national highway N-5 for a total duration of 90 days from January to March 2013. N-5 carries 60% of the entire traffic of the country and is the longest (1,819 km) National Highway, extending from the port city of Karachi to the Pakistan-Afghan border at Torkham. Part of N-5 where Mullan-Mansoor WIM Station is located is anciently known as Grand Trunk Road (G.T. Road). The site is equipped with a slow-type WIM system giving information about vehicle license plate, date and time of entry, individual axle weights, axle spacings, and GVWs. This data is sufficient to establish the loading trends of different types of trucks traversing the bridges in the vicinity of the weighing station site.

4.3. ANALYSIS OF WIM DATA

N-5 is considered as a heavy volume roadway with an Average Daily Truck Traffic (ADTT) of more than 1,100 near the weighing station site, as shown in Fig. 3. The frequency of 2- and 3-axle trucks at the site is significantly higher than other truck types and contributes 77% of the total truck volume. Typical truck types along with their axle widths and axle spacing, compiled on the basis of collected truck traffic data, are shown in Table 1.

Fig. 4 shows the GVW distribution of the recorded data. The GVW histogram is characterized by two distinct peak values of frequency. The first peak corresponds to a relatively high percentage of heavy small trucks (2- or 3-axle) and the second to a relatively high percentage of heavy large trucks (5- or 6-axle). According to the GVW regulations specified by NHA, the relative percentage of compliant (legally operational) and non-compliant (overloaded) trucks is shown in Fig. 5. Statistical analysis of WIM data reveals that 52%

pojazdów ciężarowych jest nieznaczny, a pojazdy osobowe nie wywołują cykli naprężeniowych wpływających na trwałość zmęczeniową elementów konstrukcji obiektu [15, 22]. W związku z tym w niniejszych badaniach uwzględniono jedynie dane ruchu drogowego dotyczące pojazdów ciężarowych, regularnie użytkowanych na drogach krajowych. W badaniach wykorzystano dane z ważenia 101 608 pojazdów uzyskane na stacji WIM Mullan-Mansoor – usytuowanej na drodze krajowej N-5, zgromadzone w okresie 90 dni od stycznia do marca 2013. Droga N-5 łącząca miasto portowe Karaczi z miejscowością Torkham na granicy z Afganistanem ma 1819 km długości, co oznacza, że jest najdłuższą z wszystkich dróg krajowych. Przenosi ona 60% całkowitego ruchu na sieci drogowej Pakistanu. Odcinek drogi N-5, na którym zlokalizowana jest rozpatrywana stacja, leży w ciągu pradawnego szlaku komunikacyjnego Grand Trunk Road, co wskazuje na jego przeznaczenie do obsługi ruchu ciężarowego. Zbudowany na stacji wolnoprzjazdowy system ważenia w ruchu rejestruje tablicę rejestracyjną pojazdu, datę i czas wjazdu, naciski poszczególnych osi, odstęp między osiami oraz wartości masy całkowitej. Powyższe dane są wystarczające do wyznaczenia trendów obciążeniowych różnego rodzaju pojazdów ciężarowych przejeżdżających przez obiekty mostowe zlokalizowane w pobliżu rozpatrywanej stacji ważenia.

4.3. ANALIZA DANYCH WIM

Droga N-5 klasyfikowana jest w kategorii dróg o dużym natężeniu ruchu, przy wartości dobowego natężenia ruchu ciężarowego (ang. *ADTT*) na poziomie powyżej 1100 określonego w pobliżu stacji ważenia w miejscu przedstawionym na Rys. 3. Udział pojazdów ciężarowych o dwóch i trzech osiach w całkowitym ruchu pojazdów ciężarowych wynosił tam 77%, czyli wyraźnie więcej niż w innych miejscach. Tabl. 1 zawiera zestawienie typowych rodzajów pojazdów ciężarowych wraz z rozstawami kół i osi opracowane na podstawie zebranych danych z ruchu drogowego.

Table 1. Trucks axle widths and spacings
Tablica 1. Rozstawy kół i osi pojazdów ciężarowych

Truck type / Liczba osi	Axle configuration / Układ osi	Axle width / Rozstaw kół [m]	Axle spacing / Rozstaw osi [m]				
			1-2	2-3	3-4	4-5	5-6
2-axle / 2-osiowy	1+1	2.2	4.6	–	–	–	–
3-axle / 3-osiowy	1+tandem / 1+podwójna	2.3	6	1.4	–	–	–
4-axle / 4-osiowy	1+1+tandem / 1+1+podwójna	2.5	3.4	6.8	1.3	–	–
5-axle / 5-osiowy	1+1+tridem / 1+1+potrójna	2.5	3.4	5.1	1.3	1.4	–
5-axle / 5-osiowy	1+tandem+tandem / 1+podwójna+podwójna	2.5	4.5	1.4	4.6	1.4	–

of 3-axle trucks are overloaded. Axle loads and GVWs from the heaviest trucks along with the corresponding legal limits specified by NHA are tabulated in Table 2. The overloading at the site is substantial and in the case of 2-axle trucks was found to be nearly 340% of the allowable GVW specified under NHA regulations. This high rate of overloading is common in 2-axle trucks, as they possess high vertical load capacity on the rear and therefore, carry heavy loads to the extent of the dimensional limit instead of the tonnage limit. On the other hand, cargo trucks having 5- or 6-axes present a less severe case of overloading at the site, as they usually operate over long routes and mostly carry shipment containers with restricted weight and volume. The safety concepts incorporated in the design of bridges and multiple load distribution paths in their structural system may allow them to safely carry these high overloads from distinct events without any problem.

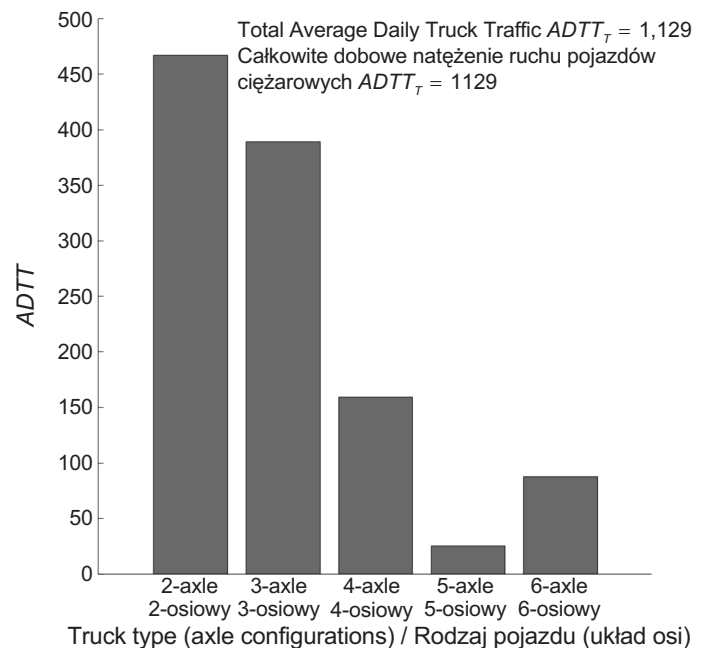


Fig. 3. Average Daily Truck Traffic (ADTT) at Mullan-Mansoor, GT-Road (N-5)

Rys. 3. Dobowe natężenie ruchu pojazdów ciężarowych (ADTT) na stacji ważenia Mullan-Mansoor, droga krajowa N-5

Rozkład masy całkowitej pojazdu wg danych pomiarowych przedstawiono na Rys. 4. Histogram mas całkowitych zawiera dwa wyraźne szczyty częstości przejść osi. Pierwszy szczyt odpowiada relatywnie wysokiemu udziałowi małych pojazdów ciężarowych (2- lub 3-osiowych), a drugi relatywnie wysokiemu udziałowi pojazdów o dużej masie całkowitej (5- lub 6-osiowych). Rys. 5 przedstawia udział procentowy pojazdów spełniających i nie spełniających (przekraczających) warunki dot. DMC podane w przepisach NHA. Z przeprowadzonej analizy statystycznej danych ze stacji ważenia wynika, że przeciążonych było 52% pojazdów trójosiowych. W Tabl. 2 podano naciski osi i rzeczywiste masy całkowite najcięższych pojazdów wraz z odpowiednimi wartościami DMC określonymi w przepisach NHA. Przeciążenia stwierdzone w miejscu pomiaru były znaczące, np. rzeczywista ciężar całkowity pojazdów dwuosiowych wynosiła prawie 340% wartości DMC podanej w przepisach NHA. Tak wysoki poziom przeciążenia jest typowy w przypadku pojazdów dwuosiowych, które umożliwiają przewóz dużych ładunków, a ograniczeniem staje się nie ładowność, lecz faktyczna pojemność pojazdu. Mniejsze były natomiast przeciążenia pojazdów 5- i 6-osiowych, co tłumaczyć można długimi trasami przejazdu i przewożeniem przeważnie kontenerów, czyli ładunków o ograniczonej wadze i objętości. Uwzględnione w projekcie zasady bezpieczeństwa konstrukcji oraz wiele schematów przenoszenia obciążeń przez układ konstrukcyjny umożliwiają bezpieczne przeniesienie ww. dużych przeciążeń. Z drugiej strony, z punktu widzenia wytrzymałości zmęczeniowej nawet średnie obciążenia od ruchu pojazdów mogą prowadzić do zmęczeniowego uszkodzenia konstrukcji, jeśli powtarzają się dostatecznie często. Analizowane dane ze stacji ważenia pojazdów w ruchu potwierdzają częste przeciążenia pojazdów, mogące potencjalnie powodować uszkodzenia zmęczeniowe obiektów mostowych zlokalizowanych w pobliżu rozpatrywanej stacji ważenia. Jest to zagadnienie budzące poważne obawy i wymagające szczególnej uwagi ze względu na bardzo powolny rozwój uszkodzeń zmęczeniowych, które pozostają niezauważone aż do momentu nagłego zniszczenia konstrukcji.

However, from a fatigue viewpoint, even moderate traffic loads, if they occur frequently, can cause fatigue damage to a structure. The studied WIM data presents frequent overloading, which can potentially produce fatigue distress in the bridge structures located in the vicinity of the chosen WIM station. The matter is of serious concern as the fatigue damage occurs at a very slow rate and usually remains unnoticed until the structure suddenly collapses; therefore, it requires special attention.

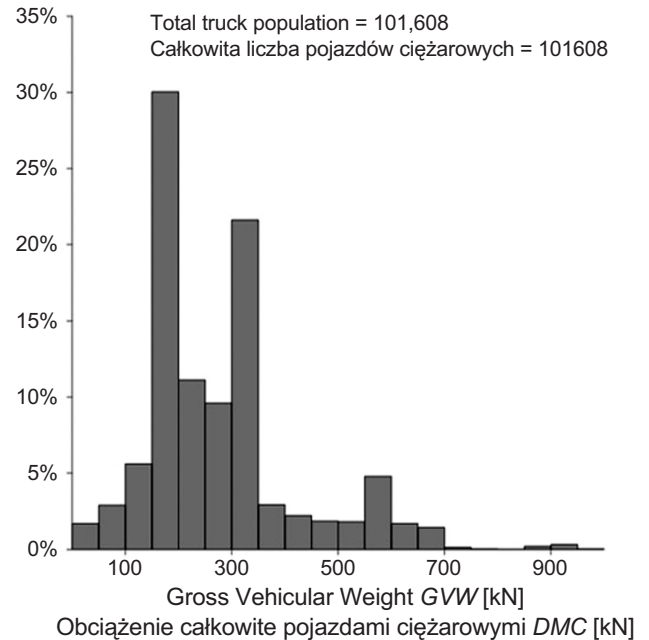


Fig. 4. Histogram showing the frequency of Gross Vehicular Weight (GVW) of trucks at Mullan-Mansoor, GT-Road (N-5)
Rys. 4. Histogram przedstawiający udział pojazdów ciężarowych w obciążeniu całkowitym na stacji ważenia Mullan-Mansoor zlokalizowanej na drodze krajowej N-5

Table 2. Comparison of compliant NHA and heaviest intercepted axle loads and GVW
Tablica 2. Porównanie wymagań NHA oraz maksymalnych przekroczeń obciążenia osi i DMC

Truck type Rodzaj pojazdu		Weight / Obciążenie [kN]						GVW DMC	Maximum overloading [%] Maksymalne przeciążenie
		Axle 1 Oś 1	Axle 1 Oś 2	Axle 3 Oś 3	Axle 3 Oś 4	Axle 4 Oś 4	Axle 6 Oś 6		
2-axle / 2-osiowy (1+1)	NHA	54	118	–	–	–	–	172	340.1
	Heaviest / Maksymalne	202	383	–	–	–	–	585	
3-axle / 3-osiowy (1+2)	NHA	54	108	108	–	–	–	270	264.4
	Heaviest / Maksymalne	147	274	293	–	–	–	714	
4-axle / 4-osiowy (1+1+2)	NHA	54	118	108	108	–	–	387	242.9
	Heaviest / Maksymalne	88	291	281	280	–	–	940	
5-axle / 5-osiowy (1+2+2)	NHA	54	108	108	108	108	–	486	154.7
	Heaviest / Maksymalne	81	240	129	136	166	–	752	
6-axle / 6-osiowy (1+2+3)	NHA	54	108	108	105	105	105	574	178.2
	Heaviest / Maksymalne	91	215	213	134	142	228	1023	

4.4. OBLICZENIOWE WYZNACZANIE SKUTKÓW OBCIĄŻEŃ ZMĘCZENIOWYCH

4.4.1. Modelowanie analityczne

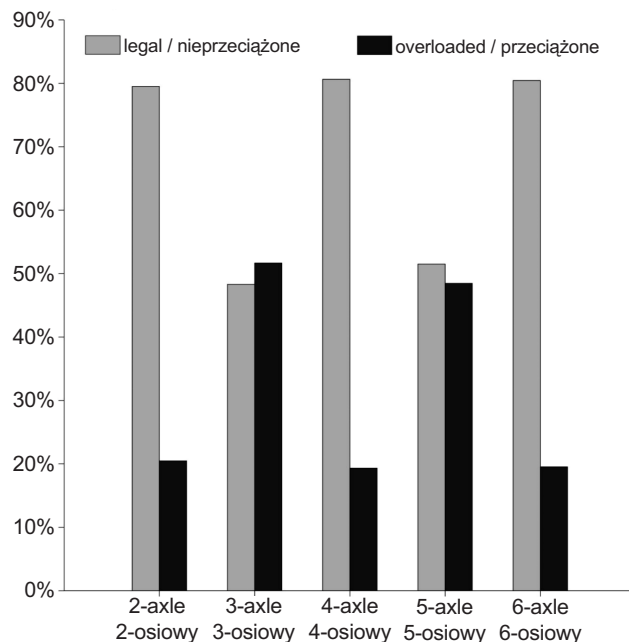
W celu obliczeniowego wyznaczenia efektów obciążeń zmęczeniowych obiektów mostowych o schemacie belki swobodnie podpartej i o długości przęsła mieszczącej się w przedziale 8-40 m opracowano jednowymiarowy model dźwigara przeznaczony do analizy efektu bicia zmęczeniowego. Zastosowanie uproszczonego modelu statycznego pozwala na analizę dużego zbioru danych, przynosząc jednocześnie oszczędność czasu i zasobów.

4.4.2. Symulacja łącznych efektów oddziaływania ruchu

Opracowano program komputerowy bazujący na analizie linii wpływu w celu wyznaczenia efektów oddziaływań wywołanych przejazdem pojazdu ciężarowego (ze skokiem co 0,1 m) w krytycznych przekrojach modelu obiektu mostowego. W normalnych warunkach drogowych powstawanie kolumn pojazdów ciężarowych nie zdarza się zbyt często i stąd efekt przejazdu pojazdów ciężarowych w małej odległości od siebie należy uznać za nieznaczny [26]. Wobec tego analizę przeprowadzono, przyjmując każdorazowo jako reprezentatywny przejazd pojedynczego pojazdu.

4.4.3. Symulacja lokalnych efektów obciążeń spowodowanych ruchem

Zmęczenie materiału jest zjawiskiem lokalnym, a więc w celu zrozumienia mechanizmu występującego w przypadku obiektów mostowych niezbędna jest ocena efektów obciążenia zmęczeniowego w przekrojach krytycznych. Ocena efektów zmęczenia występujących w elementach i połączeniach elementów obiektów mostowych wymaga nie tylko wyznaczenia widma obciążeń zmęczeniowych, lecz także szczegółowej analizy geometrii konstrukcji, właściwości materiałowych i wpływu czynników zewnętrznych. W okresie ostatnich kilkudziesięciu lat w Pakistanie konstrukcje belkowe z żelbetowych belek typu T o schemacie wolnopodpartej belki były najbardziej popularnym rozwiązaniem stosowanym w przypadku obiektów o krótkich przęsłach. Większość istniejących obiektów wybudowanych w latach 80. i 90. posiada pomosty o budowie modułowej, różniące się długością przęsła, geometrią oraz wykorzystanymi materiałami. Konstrukcje tego typu charakteryzują się zazwyczaj niską wytrzymałością betonu, a w procesie ich projektowania zgodnie z normą WPCPHB z 1967 roku nie uwzględniano efektów zmęczenia obciążeniowego. Wobec gorszych parametrów wytrzymałości konstrukcji oraz większej podatności na uszkodzenie niezmiernie ważne w przypadku takich obiektów jest zbadanie oddziaływania obciążeń



Truck type (axle configurations) / Rodzaj pojazdu (układ osi)

Fig. 5. Relative percentage of overloaded and legally operating trucks at Mullan-Mansoor, GT-Road (N-5).

Rys. 5. Procentowy udział pojazdów przeciążonych oraz nieprzeciążonych na stacji ważenia Mullan-Mansoor zlokalizowanej na drodze krajowej N-5

4.4. CALCULATION OF FATIGUE LOAD EFFECTS

4.4.1. Analytical modeling

A one-dimensional line-girder model was developed to calculate fatigue load effects of simply supported bridges with span lengths ranging from 8 to 40 meters. Due to its inherent simplicity, the model is capable of dealing with large datasets saving time and resources.

4.4.2. Simulation of global traffic action effects

A computer program based on influence line analysis was developed to determine the induced action effects at critical sections of the bridge model from the passage of trucks in steps of 0.1m. Under normal traffic conditions, the bunching of trucks is not very common and the net effect of closely spaced trucks can be considered small [26]. Therefore, the analysis was based upon single truck passages across the model.

4.4.3. Simulation of local traffic action effects

Since fatigue is a localized phenomenon, in order to understand the mechanism of fatigue in bridges it is essential to evaluate the induced effects of fatigue loading at its critical components. Evaluation of fatigue effects in the bridge

zmęczeniowych. Do przedstawienia obliczeniowego sposobu wyznaczenia miejscowych efektów oddziaływań zmęczeniowych występujących w przypadku dźwigarów i połączeń wybrano most Kamra Bridge zlokalizowany w pobliżu stacji WIM Mullan-Mansoor. Wytypowany obiekt (Rys. 6) został zbudowany w latach 90. i ma trzy przęsła, przenoszące dwa pasy ruchu. Przyjęto następujące parametry konstrukcji obiektu:

- długość przęsła: 10 500 mm,
- szerokość jezdni: 7 390 mm,
- powierzchnia przekroju poprzecznego dźwigara: $765,1 \times 10^3 \text{ mm}^2$,
- rozstaw dźwigarów: 1 850 mm,
- moment bezwładności dźwigara: $I_g = 82135.4 \times 10^6 \text{ mm}^4$,
- granica plastyczności stali zbrojenia podłużnego: $f_y = 420 \text{ MPa}$,
- wytrzymałość betonu na ściskanie: $f'_c = 15 \text{ MPa}$.



Fig. 6. Kamra Bridge with contiguous spans
Rys. 6. Most Kamra Bridge o konstrukcji złożonej z przylegających do siebie przęseł

Szczegóły przekroju poprzecznego mostu Kamra Bridge przedstawia Rys. 7. Wytrzymałość na ściskanie betonu przyjęto na bardzo niskim poziomie ze względu na liczne przypadki potwierdzenia niskich wytrzymałości charakterystycznych w betonowych obiektach mostowych powstałych w tym samym okresie.

Odpowiedź poszczególnych dźwigarów konstrukcji mostu na oddziałujące na nie obciążenia zewnętrzne można wyznaczyć metodą doświadczalną lub korzystając z metod analitycznych. W niniejszym badaniu wykorzystano procedurę analityczną zalecaną dla obiektów o konstrukcji płytowo-belkowej w specyfikacji AASHTO LRFD [13]. W ramach tej procedury

elements and details requires not only determination of the spectrum of fatigue loading, but also deep knowledge of structural geometry, material properties and environmental factors contributing to fatigue. Over the past few decades, bridges with simple RC T-beam girders covering short spans remained the most popular and widely used configurations in Pakistan. Most of the existing bridges from the 1980s and the 1990s are known to have simple RC T-beam girders with modular configuration in terms of spans, geometry and material used. These bridges generally exhibit low characteristic concrete strengths and are known to have been designed according to WPCPHB, 1967 which does not account for fatigue considerations in the design process. The study of fatigue load effects on these structures is of particular interest, considering the fact that they have inferior structural characteristics and are more susceptible to fatigue damage. One representative structure, known as the Kamra Bridge, located near the Mullan-Mansoor WIM Station, was selected for computation of local fatigue action effects on its girders and details. The candidate bridge (Fig. 6) was constructed in the 1990s and contains three contiguous spans supporting two traffic lanes. The structural details of the bridge are:

- span length: 10,500 mm,
- roadway width: 7,390 mm,
- cross-sectional area of the girder: $765.1 \times 10^3 \text{ mm}^2$,
- spacing of girders: 1,850 mm,
- moment of inertia of the girder: $I_g = 82135.4 \times 10^6 \text{ mm}^4$,
- longitudinal steel yield stress: $f_y = 420 \text{ MPa}$,
- concrete compressive strength: $f'_c = 15 \text{ MPa}$.

The cross-sectional details of the Kamra Bridge are presented in Fig. 7. Very low compressive strength of concrete has been adopted in the calculations, as it is not uncommon to find low values of concrete strength in bridges constructed in that period.

The response of individual bridge girders to external loading can be evaluated using experimental or analytical procedures. A simple analytical procedure for slab-girder bridges defined by AASHTO LRFD [13] was applied to obtain shear and moment distribution factors for its interior and exterior girders. The girder distribution factors for Kamra Bridge are listed in Table 3. Considering a single truck passage over the bridge at a time, the exterior girder presents the critical case for both moment and shear, with a 60% contribution to the global bridge response. The global action effects were thus reduced to simulate member-level response in terms of bending moment and shear. Subsequently, the section level response of the girder was also evaluated,

wyznacza się wartości współczynników rozkładu ścinania oraz momentu dla środkowych i skrajnych dźwigarów. Współczynniki powyższe uzyskane dla obiektu Kamra Bridge zestawiono w Tabl. 3. W przypadku, gdy każdorazowo przyjmie się przejazd jednej ciężarówki przez most, elementem o znaczeniu krytycznym z punktu widzenia zarówno momentu, jak i ścinania, stają się dźwigary skrajne, przejmujące 60% ogólnej reakcji konstrukcji. W ten sposób ograniczono znaczenie sumarycznych efektów oddziaływań podczas symulacji reakcji w zakresie momentów i ścinania na poziomie poszczególnych elementów konstrukcji obiektu. Następnie oceniono również odpowiedź na poziomie przekroju dźwigara, aby szczegółowo przeanalizować odpowiedni stan naprężenia. Na Rys. 8 przedstawiono przyjęte w analizie właściwości materiałowe betonu i zbrojenia. Rys. 9 przedstawia z kolei odpowiedź na poziomie przekroju dźwigara o konstrukcji belki typu T w obiekcie Kamra Bridge uzyskaną przy użyciu programu Response-2000.

in order to analyse the corresponding state of stress in its detail. The material properties for concrete and reinforcement utilized for analysis are presented in Fig. 8. Fig. 9 shows the sectional response of the T-beam girder of the Kamra Bridge using Response-2000 Software.

Table 3. Live load girder distribution factors for Kamra bridge

Tablica 3. Współczynniki rozkładu obciążeń ruchomych na dźwigary mostu belkowego Kamra Bridge

Girder Położenie dźwigara	No. of loaded lanes Liczba obciążonych pasów obliczeniowych	Distribution factor Współczynnik rozkładu	
		Moment Momentu	Shear Ścinania
Interior Wewnętrzny	One design lane loaded Jeden pas	0.48	0.60
	Two or more design lanes loaded Dwa lub więcej pasów	0.62	0.68
Exterior Skrajny	One design lane loaded Jeden pas	0.60	0.60
	Two or more design lanes loaded Dwa lub więcej pasów	0.48	0.41

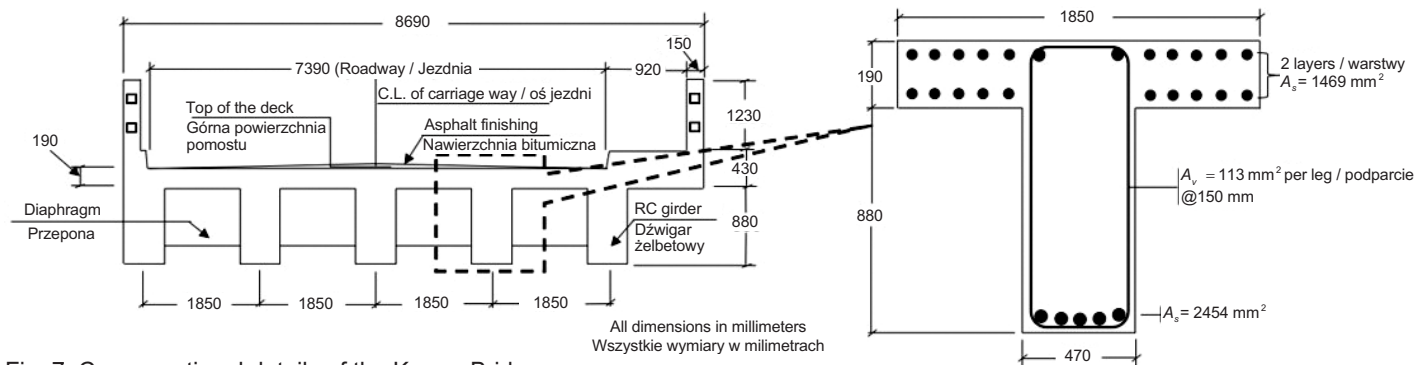


Fig. 7. Cross-sectional details of the Kamra Bridge
Rys. 7. Przekrój poprzeczny konstrukcji mostu Kamra Bridge

4.4.4. Liczenie i analiza cykli obciążeniowych

Wyniki symulacji przejazdów pojedynczych pojazdów zostały ze sobą połączone w sposób pozwalający uzyskać przebiegi reakcji. Przebiegi reakcji uzyskane metodą obliczeniową są złożone z natury, stąd prawidłowa ocena efektów zmęczenia wymaga ich rozdzielenia na składowe. W związku z tym, w celu obliczenia liczby cykli dla każdego rozpatrywanego parametru, tj. momentu, ścinania i naprężenia, skorzystano z algorytmu metody "rain-flow cycle counting" RFM [27]. Na koniec, w celu uzyskania histogramów rozkładu częstotliwości, poszczególne cykle policzono z uwzględnieniem przedziałów.

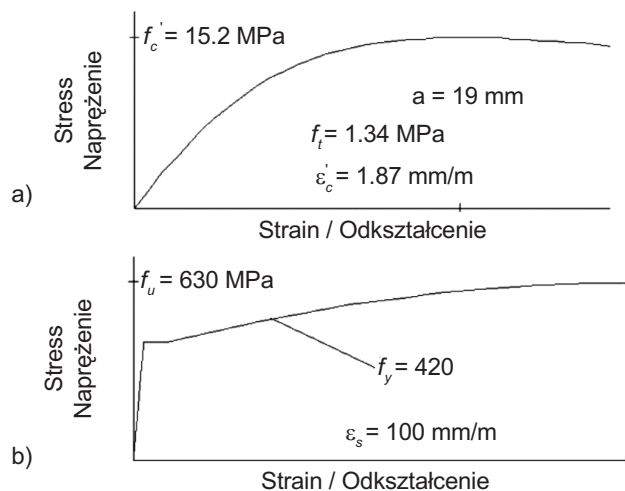


Fig. 8. Material constitutive behavior: a) concrete, b) reinforcement
Rys. 8. Zależność konstytutywna materiału: a) beton, b) zbrojenie

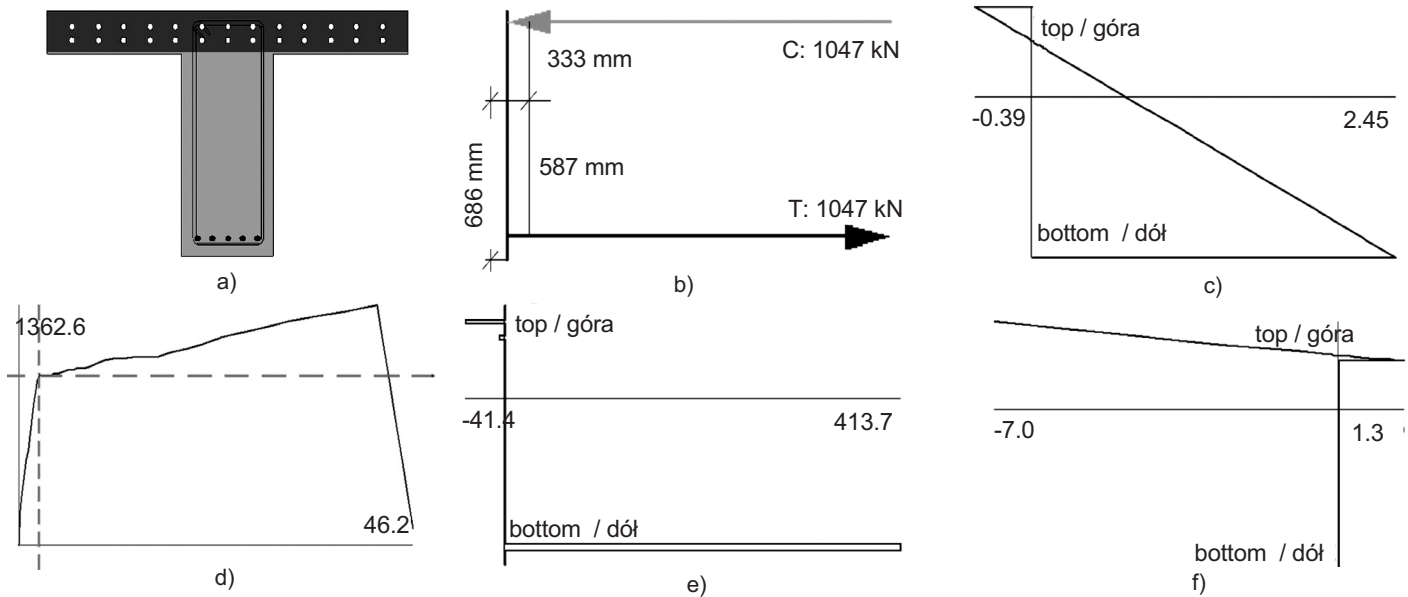


Fig. 9. Sectional response of T-Beam Girder of the Kamra Bridge using Response-2000 Software: a) cross-section, b) control: M-Phi, c) internal forces, d) longitudinal reinforcement stress, e) longitudinal strain, f) longitudinal concrete stress

Rys. 9. Siły wewnętrzne i naprężenia w przekroju dźwigara mostu Kamra Bridge o konstrukcji belki typu T wyznaczone przy wykorzystaniu programu Response-2000: a) przekrój, b) parametr kontrolny: M-Phi, c) siły wewnętrzne, d) naprężenie w zbrojeniu podłużnym, e) odkształcenie podłużne, f) naprężenie w betonie

4.4.5. Weryfikacja stanu granicznego zmęczenia

Obliczenia stanu granicznego zmęczenia dla zbrojenia podłużnego dolnego przeprowadzono zgodnie z zaleceniami normy ACI-215, wg której naprężenie w prostych prętach żebrowanych nie może przekraczać wartości obliczonej zgodnie z poniższym wzorem [28]:

$$S_r = 161 - 0,33 \cdot S_{\min}, \quad (1)$$

S_r – wartość graniczna zakresu naprężeń [MPa], która powinna być nie mniejsza niż 138 MPa,

S_{\min} – minimalna wartość algebraiczna naprężenia [MPa] (przyjmująca wartość dodatnią dla rozciągania i ujemną dla ściskania).

Ta wartość graniczna zakresu naprężeń określa maksymalne naprężenie, przy którym mało prawdopodobne jest przekroczenie trwałości zmęczeniowej w projektowym okresie użytkowania obiektu.

4.5. WYNIKI

4.5.1. Globalne efekty obciążeń zmęczeniowych

Wyniki symulacji obciążeń od ruchu można wyrazić w prostej postaci cyklicznych zmian amplitudy momentu i sił ścinających, bez konieczności wyznaczania widma oddziałujących

4.4.4. Cycle counting and analysis

Traffic simulation results of individual truck crossings were stitched together to produce response histories. The computed response histories are generally complex in nature and need to be decomposed for proper quantification of fatigue effects. Thus, the rain-flow cycle counting algorithm [27] was employed to count the number of cycles for any parameter of interest, like moment, shear or stress. Finally, the individual cycles were distributed into bins to get frequency distribution histograms.

4.4.5. Fatigue verification

Fatigue verification was performed on the bottom longitudinal reinforcement as per ACI-215 recommendations, such that the stress range in the straight deformed bars must not exceed the value calculated from the following formula [28]:

$$S_r = 161 - 0,33 \cdot S_{\min}, \quad (1)$$

S_r – the limiting value of stress range in MPa, not to be adopted as less than 138 MPa,

S_{\min} – the algebraic minimum stress in MPa (taken positive in tension and negative in compression).

This threshold value of stress range defines the maximum value of stress range below which the fatigue failure is not likely to occur during the service life of a bridge.

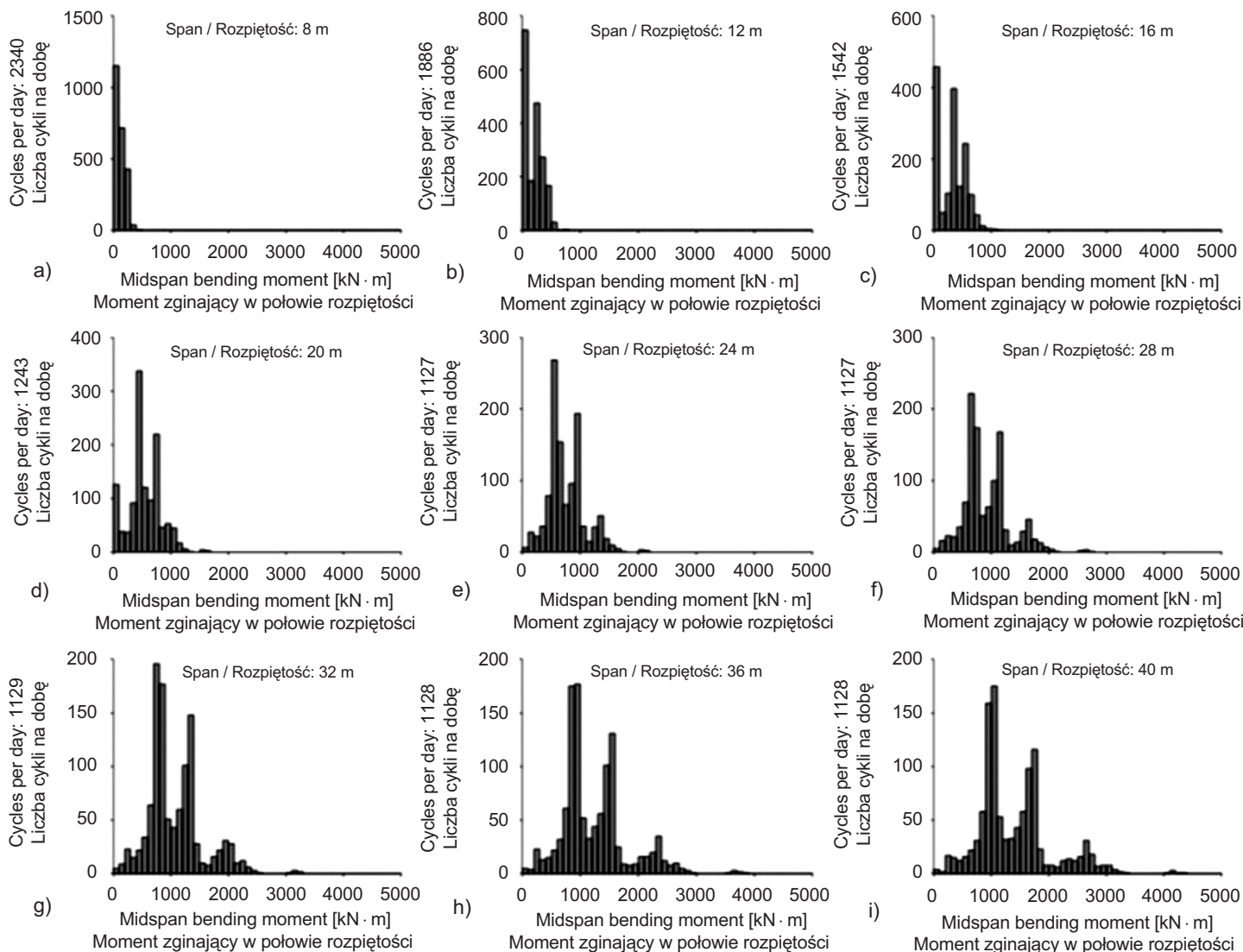


Fig. 10. Frequency distribution (histograms) of midspan bending moments in simply supported spans: a) 8 m, b) 12 m, c) 16 m, d) 20 m, e) 24 m, f) 28 m, g) 32 m, h) 36 m, i) 40 m

Rys. 10. Rozkłady częstotliwości (histogramy) momentów zginających w połowie rozpiętości w przęsłach o schemacie belki wolnopodpartej: a) 8 m, b) 12 m, c) 16 m, d) 20 m, e) 24 m, f) 28 m, g) 32 m, h) 36 m, i) 40 m

na obiekt obciążeń zmęczeniowych. Przeprowadzono symulacje obciążeń od ruchu dla obiektów o długości przęsła od 8 m do 40 m z uwzględnieniem wszystkich pojazdów ciężarowych zarejestrowanych przez system WIM w ustalonym 90-dniowym okresie pomiarów. Otrzymane histogramy momentów w połowie rozpiętości oraz sił ścinających na końcach przęseł analizowanych obiektów, sprowadzone do dobowych wartości średnich, odwzorowano odpowiednio na Rys. 10 i Rys. 11. Przedstawienie danych histogramu w formie liczby cykli na dobę jest przydatne w celu porównania intensywności obciążeń zmęczeniowych między różnymi stacjami WIM [15]. Uzyskane wyniki wskazują, że wraz ze zwiększaniem długości przęsła występuje stopniowa zmiana danych

4.5. RESULTS

4.5.1. Global fatigue effects

Traffic simulation results can be simply expressed in the form of bending moment and shear amplitude cycles which define the spectrum of fatigue loading on bridges. Traffic simulations of all the trucks within the WIM dataset collected over a defined period (90 days) were performed over bridges with span lengths between 8 and 40 meters. The resulting midspan moment and end-shear histograms of these bridges, reduced to a single day average value, are presented in Fig. 10 and Fig. 11, respectively. The representation of histogram data in cycles per day is useful for

dotyczących momentu zginającego w połowie rozpiętości, polegająca na przesunięciu od większej liczby cykli o mniejszej amplitudzie w stronę małej liczby cykli o dużej amplitudzie. Ponadto, ogólna liczba cykli zmian momentu zginającego pośrodku rozpiętości spada wraz ze wzrostem długości przęsła do długości 24 m, a powyżej tej długości pozostaje już na zbliżonym poziomie. Jeśli chodzi natomiast o siły ścinające na końcach przęseł, w zakresie analizowanych długości przęsła nie stwierdzono istotnej zmiany w danych histogramowych.

comparisons of the severity of fatigue loading with other WIM sites [15]. The results indicate that with the increase in bridge span, there is a gradual shift in midspan bending moment histogram data from a greater number of cycles of low amplitude to a few cycles of high amplitudes. Also, the overall number of midspan bending moment amplitude cycles decreased with an increase in span lengths up to 24 meters, beyond which it remained more or less constant. For the case of end-shears, no substantial change in histogram data was observed for the considered span lengths.

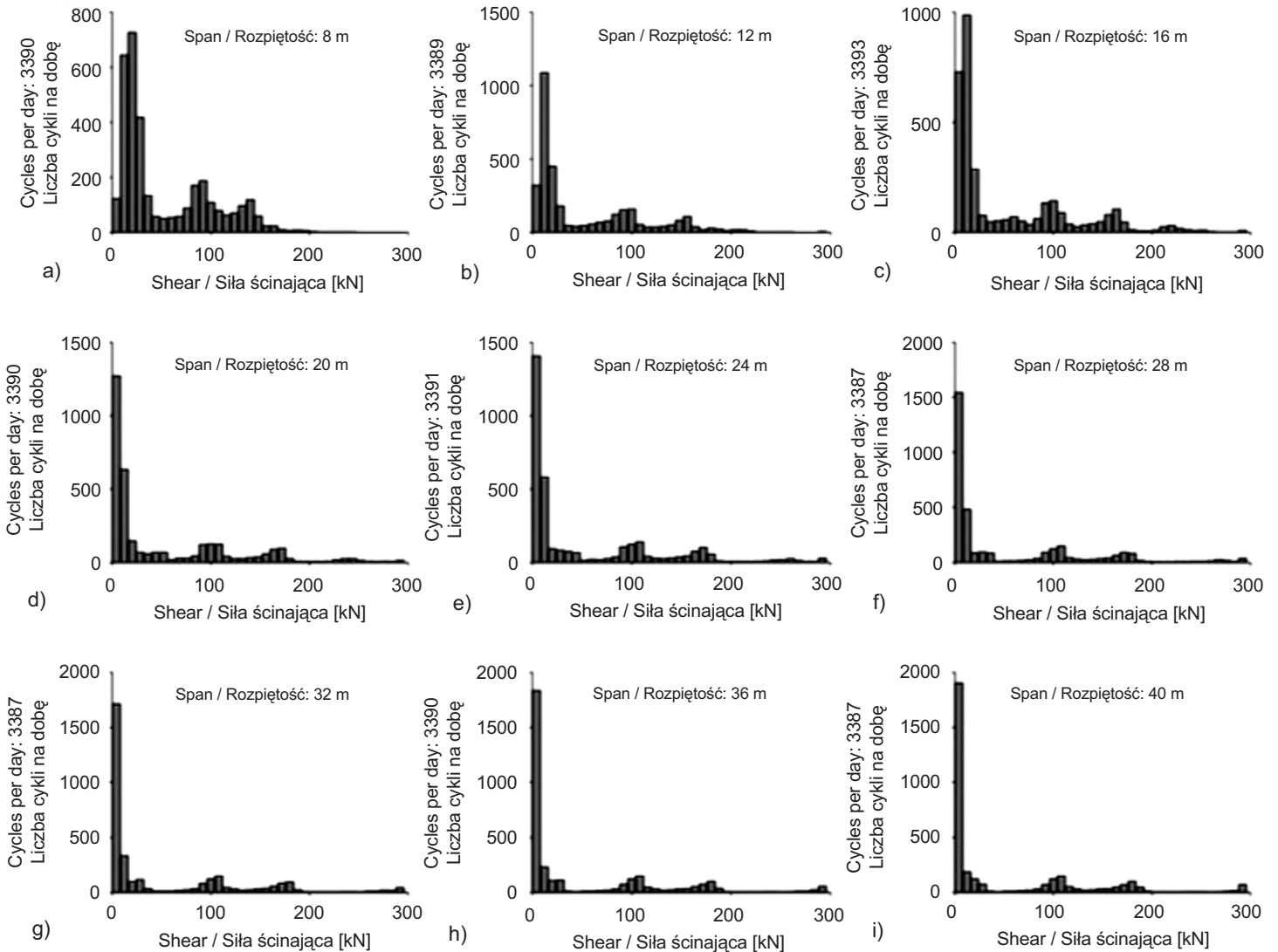


Fig. 11. Frequency distribution (histograms) of end-shears in simply supported spans: a) 8 m, b) 12 m, c) 16 m, d) 20 m, e) 24 m, f) 28 m, g) 32 m, h) 36 m, i) 40 m

Rys. 11. Rozkłady częstotliwości (histogramy) sił ścinających na końcach przęseł o schemacie belki wolnopodpartej i rozpiętości: a) 8 m, b) 12 m, c) 16 m, d) 20 m, e) 24 m, f) 28 m, g) 32 m, h) 36 m, i) 40 m

4.5.2. Lokalne efekty obciążeń zmęczeniowych (studium przypadku: Kamra Bridge)

Trwałość zmęczeniowa konstrukcji lub elementu konstrukcji zależy od wytrzymałości zmęczeniowej ich części składowych. Stąd istotne znaczenie ma określenie lokalizacji najbardziej wyęzonych elementów konstrukcji, gdzie wpływ obciążeń zmęczeniowych jest największy. Najbardziej wyęzonym przekrojem z uwagi na efekty zmęczeniowe przy zginaniu jest środek rozpiętości skrajnego dźwigara. Najbardziej istotnym parametrem z punktu widzenia obliczeń trwałości zmęczeniowej jest amplituda naprężeń. Dlatego też ocenie poddano wyniki symulacji ruchu pojazdów w postaci histogramów zakresów naprężeń powstających w prętach zbrojenia dolnego oraz w górnych włóknach belki betonowej w połowie rozpiętości skrajnych dźwigarów. Histogramy dla zbrojenia i betonu zostały sprowadzone do dobowych wartości średnich i w tej formie są przedstawione odpowiednio na Rys. 12 i 13.

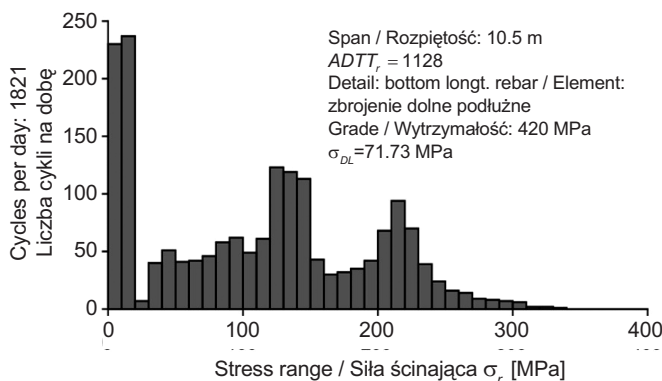


Fig. 12. Stress range histogram of bottom longitudinal rebar at midspan of exterior girder of the Kamra Bridge
Rys. 12. Histogram zakresów naprężeń w zbrojeniu dolnym w połowie rozpiętości skrajnego dźwigara mostu Kamra Bridge

Minimalny obliczeniowy zakres naprężeń f_{min} w zbrojeniu dolnym podłużnym, wywołanych ciężarem własnym pomostu, wynosi 71,7 MPa. Wyniki symulacji ruchu pojazdów ciężarowych wskazują na znaczący udział cykli obciążeń o dużych amplitudach (tj. powyżej 138 MPa, czyli obliczonej z równania (1) wartości granicznej naprężeń zmęczeniowych dla nieograniczonej czasowo trwałości użytkowej) w głównych prętach zbrojenia. Jednocześnie cykle obciążeń w betonie wywoływały zakres naprężeń przypadający znacznie poniżej $0,3f_c$, co wyklucza możliwość zniszczenia betonu w stanie granicznego zmęczenia. Obliczając ww. charakterystyczne histogramy naprężeń zmęczeniowych również dla innych obiektów zlokalizowanych wzdłuż analizowanej sieci dróg można łatwo sklasyfikować te obiekty pod względem stopnia zmęczenia. Zauważyć należy jednak, że zdarzenia wywołujące zakresy naprężeń na poziomie poniżej granicznej

4.5.2. Local Fatigue Effects (Case Study: The Kamra Bridge)

The fatigue life of a structure or a member is dependent upon the fatigue strength of its constituent elements. Therefore, it is important to identify the location of critical elements in a structure, where the influence of fatigue loading is maximum. The midspan of the exterior girder of the Kamra Bridge presents the critical case for the assessment of flexural fatigue effects. Stress range is considered as the most essential parameter in fatigue calculations. Therefore, results of truck traffic simulation in the form of stress range histograms for the bottom longitudinal rebars and the concrete top fibres at the midspan of the exterior girder were evaluated. These histograms for reinforcement and concrete were reduced to a single day average value, and are presented in Fig. 12 and Fig. 13, respectively.

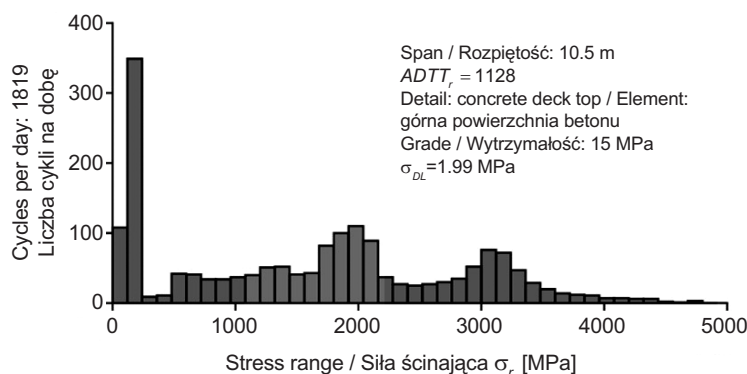


Fig. 13. Stress range histogram of top concrete fibers at midspan of exterior girder of the Kamra Bridge
Rys. 13. Histogram zakresów naprężeń górnych włókien betonu w połowie rozpiętości skrajnego dźwigara mostu Kamra Bridge

The minimum stress range f_{min} in the bottom longitudinal reinforcement resulting from the self-weight of the bridge deck was calculated as 71.7 MPa. Truck traffic simulation results show that main longitudinal rebars experience a significant number of stress cycles with high range magnitudes (i.e., > 138 MPa, which is the threshold limit of fatigue stress for infinite life evaluated from equation (1)). However, stress range cycles in concrete were found to be well below $0,3f_c$, thereby eradicating any chance of fatigue failure in concrete. When such signature fatigue stress histograms are also computed for other bridges in a network, one can easily assign fatigue ranking to these bridges, based on fatigue severity. However, stress range events below the endurance limit of any structural detail have a very small impact on its fatigue life; thus, they may be ignored in fatigue calculations.

trwałości jakiegokolwiek elementu konstrukcji mają bardzo mały wpływ na trwałość zmęczeniową i w związku z tym mogą zostać pominięte w obliczeniach zmęczeniowych.

5. DYSKUSJA I WNIOSKI

Przedmiotem niniejszych badań była analiza stanu granicznego zmęczenia drogowych obiektów inżynierskich zlokalizowanych na terenie Pakistanu przy wykorzystaniu danych ruchu drogowego z pomiaru obciążenia pojazdami ciężarowymi na stacji WIM Mullan Mansoor.

Analiza uzyskanych w ten sposób zbiorów danych wykazała obecność dużej liczby znacznie przeładowanych pojazdów ciężarowych o rzeczywistej masie całkowitej sięgającej 340% wartości DMC podanej przez NHA. W rezultacie również całkowite efekty zmęczeniowe wyznaczone metodą analizy linii wpływu na analitycznych modelach obiektów mostowych o długości przęsła 8-40 m dały wyższe widmo obciążeń zmęczeniowych. Jednocześnie ogólna liczba cykli amplitudy momentu zginającego w połowie rozpiętości spada wraz ze wzrostem długości przęsła do długości 24 m, a powyżej tej długości pozostaje już na zbliżonym poziomie. Globalna reakcja zmęczeniowa obiektu mostowego została wyznaczona dla lokalizacji w zasięgu wybranej stacji WIM, lecz nie może zostać wykorzystana do charakteryzowania obciążeń zmęczeniowych i poziomu zmęczenia w przypadku innych lokalizacji.

Wyniki efektów zmęczenia wywołanych cyklicznym zginaniem na podstawie analizy przypadku mostu Kamra Bridge wskazują, że główne zbrojenie podłużne dźwigarów poddane jest znaczącej liczbie cykli naprężeń prowadzących do uszkodzenia zmęczeniowego. Jednocześnie naprężenia powstające w betonie przy takim samym stanie obciążenia kształtują się na niższym poziomie. Z uzyskanych wyników można wywnioskować, że o awarii zmęczeniowej obiektów o konstrukcji z żelbetowych belek typu T decyduje przede wszystkim wytrzymałość zmęczeniowa zbrojenia pracującego na rozciąganie, nawet przy bardzo niskiej wytrzymałości betonu. Analizowane w niniejszych badaniach przykładowe widma naprężeń zmęczeniowych można również wykorzystać do celów analizy porównawczej uszkodzeń zmęczeniowych obiektów zlokalizowanych na rozpatrywanej sieci dróg. Powyższe informacje można wykorzystać w ramach systemu zarządzania do klasyfikacji obiektów, co pozwoli inżynierom i odpowiedzialnym organom na ustalenie priorytetów i harmonogramów przeglądów i konserwacji.

6. DALSZE PRACE

W niniejszym badaniu wykorzystano dane pochodzące z jednej stacji WIM. W celu uzyskania obrazu widma obciążeń zmęczeniowych dla obiektów mostowych zlokalizowanych

5. DISCUSSION AND CONCLUSIONS

The underlying issue of fatigue in highway bridges of Pakistan was investigated using truck traffic data from the Mullan Mansoor WIM station.

Analysis of the WIM dataset indicates the presence of a large number of heavily overloaded trucks, with overloading as much as 340% of the permissible GVW specified by NHA. Consequently, the global fatigue effects evaluated using influence line analysis over analytical bridge models with span lengths ranging between 8 and 40 meters yielded a higher spectrum of fatigue loading. However, the overall number of midspan bending moment amplitude cycles decreased with increasing span lengths up to 24 meters, beyond which it remained more or less constant. The global fatigue response of a bridge is specific to the region of the chosen WIM site and cannot be used in characterizing fatigue loading and its severity at different WIM sites.

The results of flexural fatigue effects from the case study performed on the Kamra Bridge show that the main longitudinal reinforcement of its girders experiences a significant number of fatigue damaging stress cycles. Concrete, on the other hand, is subjected to lower stress levels under the same state of loading. It can be concluded from the results that the fatigue failure in RC T-beam bridges, even with very low strength concrete, is mainly influenced by the fatigue strength of its tensile reinforcement. The signature fatigue stress spectrums evaluated in this study can also be used for drawing a comparison of fatigue distress in bridges within a network. This information can be incorporated in the bridge management framework to assign fatigue ratings of bridges, where bridge engineers and the relevant agencies can prioritize their inspection and maintenance schedules accordingly.

6. FUTURE WORK

The study utilizes data from a single WIM site. More data from other WIM sites in a network is required to portray the spectrum of fatigue loading in other regions. For the determination of reliable fatigue estimates, seasonal variations in traffic composition may also be captured using long-term WIM monitoring. A more rigorous approach could be applied to study of fatigue in bridges by considering the effects of vehicular velocities, impact loading, headway distances and presence of multiple vehicles. Furthermore, the stress range histograms can be used to predict fatigue life estimates of in-service bridges, once combined with Miner's cumulative damage rule along with the material's S-N curve [29].

w innych obszarach sieci drogowej konieczne jest zatem przeanalizowanie danych z innych stacji WIM. Ponadto w celu uzyskania miarodajnych szacunków zmęczenia ustalić należałoby również sezonowe zmiany struktury ruchu drogowego przez długookresowy monitoring pojazdów na stacjach WIM. W badaniach zmęczenia obiektów mostowych zastosować można również bardziej rygorystyczne podejście, uwzględniając oddziaływanie prędkości pojazdów, obciążenia dynamiczne, odległości między kolejnymi pojazdami oraz jednoczesną obecność więcej niż jednego pojazdu. Ponadto dla celów prognozowania trwałości zmęczeniowej eksploatowanych obiektów wykorzystać można histogramy zakresu naprężeń, stosując prawo Minera (dot. kumulacji szkody zmęczeniowej) oraz wykres Wöhlera (tzw. krzywą S-N) materiałów [29].

INFORMACJE DODATKOWE

Autorzy pragną podziękować pakistańskiemu Zarządowi Dróg Krajowych NHA za przekazanie danych ze stacji ważenia pojazdów w ruchu. Badanie zrealizowano przy wsparciu Centrum Inżynierii Sejsmicznej oraz Wydziału Budownictwa na Politechnice w Peszawarze.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] *Donghuang Y., Yuan L., Ming Y., Naiwei L.*: Lifetime Fatigue Reliability Evaluation of Short to Medium Span Bridges under Site-specific Stochastic Truck Loading. *Advances in Mechanical Engineering*, **9**, 3, 2017, DOI: 10.1177/1687814017695047
- [2] News Desk. Has Pakistani Government stopped implementing Axel Load Limit Law? *Global Village Space*, <https://www.globalvillagespace.com/has-pakistani-government-stopped-implementing-axel-load-limit-law/>
- [3] *Schijve J.*: Fatigue of Structures and Materials in the 20th Century and the State of the Art. *International Journal of Fatigue*, **25**, 8, 2003, DOI: 10.1016/S0142-1123(03)00051-3
- [4] *Arshad M.A.*: A Comparative Study of Live Loads for the Design of Highway Bridges in Pakistan. *International Journal of Bridge Engineering*, **4**, 3, 2016, 49-60
- [5] *Shahid S., Ahmad I., Arshad M.A.*: An Assessment of Vehicular Live Loads for Bridge Design in Pakistan. *International Journal of Bridge Engineering*, **6**, 1, 2018, 9-22
- [6] National Highways Safety Ordinance. Government of Pakistan, 2000, <http://pakistancode.gov.pk/pdf/files/administrator79f454ff038827bacaf1758984d449f7.pdf> (11.02.2022)
- [7] NTRC Axle Load Survey on National Highway & Motorway Network of Pakistan (NTRC-334). Ministry of Communications, Government of Pakistan, 2020, [http://www.ntrc.gov.pk/ntrc_studies/NTRCAXLELOADSURVEYONNATIONALHIGHWAYMOTORWAYNETWORKOPAKISTAN\(NTRC-334\)DEC2020.pdf](http://www.ntrc.gov.pk/ntrc_studies/NTRCAXLELOADSURVEYONNATIONALHIGHWAYMOTORWAYNETWORKOPAKISTAN(NTRC-334)DEC2020.pdf) (11.02.2022)
- [8] *Khan S.U., Ayub T., Qadir A.*: Effect of Overloaded Vehicles on the Performance of Highway Bridge Girder: A Case Study. *Procedia Engineering*, **77**, 2014, 95-105, DOI: 10.1016/j.proeng.2014.07.010
- [9] *Shoaib S., Qureshi L.A., Fahad M.*: Development of Live Load Calibration Factor for State Highway Bridge Design of Pakistan. *International Journal of Advanced Structures and Geotechnical Engineering*, **4**, 3, 2015, 165-172
- [10] UN.ESCAP: Strengthening the Capacity of ESCAP Member States to Harmonize Standards on Weights, Dimensions and Emmissions of Road Vehicles for Facilitation of Transport along the Asian Highway Network. Study Report, 2019, <https://hdl.handle.net/20.500.12870/285> (11.02.2022)
- [11] *Maddah N.*: Fatigue Life Assessment of Roadway Bridges based on Actual Traffic Loads. PhD thesis, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Switzerland, 2013, DOI: 10.5075/epfl-thesis-5575
- [12] Howard, Needles, Tammen & Bergendoff Int. Inc: Code of Practice Highway Bridges, Government of West Pakistan Highway Department, Lahore, 1967
- [13] AASHTO LRFD Bridge Design Specifications. 7th edition, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, 2014
- [14] *Brühwiler E.*: Rational Approach for the Management of a Medium Size Bridge Stock. IABMAS'08: 4th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, Seoul, 2008
- [15] *Treacy M., Brühwiler E.*: Fatigue Loading Estimation for Road Bridges Using Long Term Wim Monitoring. In: *Advances in Safety, Reliability and Risk Management*, Taylor & Francis Group, London, 2012

ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to acknowledge the National Highway Authority (NHA) of Pakistan for providing the WIM data. The research was jointly supported by the Earthquake Engineering Centre and the Department of Civil Engineering, University of Engineering and Technology, Peshawar.

- [16] *Ye X.W., Su Y.H., Han J.P.*: A State-of-the-Art Review on Fatigue Life Assessment of Steel Bridges. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014, 956473, DOI: 10.1155/2014/956473
- [17] *Yu Y., Cai C., Deng L.*: State-of-the-Art Review on Bridge Weigh-in-Motion Technology. *Advances in Structural Engineering*, **19**, 9, 2016, 1514-1530, DOI: 10.1177/1369433216655922
- [18] *Maljaars J.*: Evaluation of Traffic Load Models for Fatigue Verification of European Road Bridges. *Engineering Structures*, **225**, 2020, 111326, DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.111326
- [19] *Carneiro A.L., Portela E., Bittencourt T.N.*: Development of Brazilian Highway Live Load Model for Unlimited Fatigue Life. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, **13**, 4, 2020, DOI: 10.1590/s1983-41952020000400007
- [20] *Laman J.A., Nowak A.S.*: Fatigue Load Models for Girder Bridges. *Journal of Structural Engineering*, **122**, 7, 1996, 726-733, DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1996)122:7(726)
- [21] *Wang C., Zhai M., Zhang P., Duan L., Chen X.*: Fatigue safety monitoring and assessment of short and medium span concrete girder bridges. *International Conference on Performance-based and Life-cycle Structural Engineering*, Brisbane, 2015, DOI: 10.14264/uql.2016.928
- [22] *Jacob B., Labry D.*: Evaluation of the Effects of Heavy Vehicles on Bridges Fatigue. *7th International Symposium on Heavy Vehicle Weights & Dimensions*, Delft, 2002
- [23] *Zhuang H., Zhang J., Jiang R.*: Fatigue Flexural Performance of Short-Span Reinforced Concrete T-Beams Considering Overloading Effect. *Baltic Journal of Road & Bridge Engineering*, **15**, 2, 2020, 89-110, DOI: 10.7250/bjrbe.2020-15.474
- [24] *Yan D., Luo Y., Yuan M., Lu N.*: Lifetime fatigue reliability evaluation of short to medium span bridges under site-specific stochastic truck loading. *Advances in Mechanical Engineering*, **9**, 3, 2017, DOI:10.1177/1687814017695047
- [25] *Wang T.L., Liu C., Huang D., Shahawy M.*: Truck Loading and Fatigue Damage Analysis for Girder Bridges based on Weigh-in-Motion Data. *Journal of Bridge Engineering*, **10**, 1, 2005, 12-20, DOI: 10.1061/(ASCE)1084-0702(2005)10:1(12)
- [26] *Moses F., Schilling C.G., Raju K.S.*: Commentary on New Fatigue Design and Evaluation Procedures. *NCHRP Project 12-28(3)*, 1987
- [27] *Downing D., Socie D.F.*: Simple Rainflow Counting Algorithms. *International Journal of Fatigue*, **4**, 1, 1982, 31-40, DOI: 10.1016/0142-1123(82)90018-4
- [28] *ACI Committee 215*: Considerations for Design of Concrete Structures Subjected to Fatigue Loading (ACI 215R-92), American Concrete Institute, Detroit, 1992
- [29] *Miner M.A.*: Cumulative Damage in Fatigue. *Journal of Applied Mechanics*, **12**, 3, 1945, 159-164, DOI: 10.1115/1.4009458