

dr inż. Szymon Skibicki^{1)*}

ORCID: 0000-0002-2918-7759

dr inż. Adam Zieliński¹⁾

ORCID: 0000-0001-7949-1831

prof. dr hab. inż. Maria Kaszyńska¹⁾

ORCID: 0000-0002-8867-6974

prof. dr inż. Andrzej S. Nowak²⁾

ORCID: 0000-0002-9957-3030

Analiza sztywności połączenia segmentów stalowych barier tymczasowych do separacji ruchu

Connection stiffness analysis of steel temporary barrier segments for traffic safety system

DOI: 10.15199/33.2022.12.08

Streszczenie. W artykule przedstawiono prace badawcze dotyczące weryfikacji sztywności połączenia różnych wariantów łączników barier względem odcinka liniowego. Wynikiem było określenie sztywności modelu przez analizę funkcji siła-przemieszczenie pasa dolnego i górnego oraz analiza wpływu rodzaju połączenia na deformację łącznika. Autorskie stanowisko pomiarowe i analizy umożliwiły wybór najlepszego wariantu łącznika systemu barier tymczasowych do separacji ruchu spełniających wymagania normy EN 1317-2.

Słowa kluczowe: bariera drogowa; bariera drogowa tymczasowa; bariera stalowa; badania laboratoryjne.

Abstract. The paper presents research work on the verification of the stiffness connection of different variants of barrier connectors in relation to the linear section. As a result, the stiffness of the model was determined by analyzing the force-displacement function of lower and upper chords. In addition the effect of the connectors type on the deformation of barrier system was analysis. The author's measurement method allow to choose the best variant of the temporary barrier connector for traffic separation system that meets the requirements of the EN 1317-2 standard.

Keywords: traffic barrier; traffic temporary barrier; steel barrier; laboratory tests.

Zwiększenie bezpieczeństwa na drogach jest jednym z kluczowych zagadnień dzisiejszej inżynierii komunikacyjnej. Infrastruktura transportowa wymaga okresowych remontów, napraw oraz przebudów. Przyczyny takiego stanu rzeczy, to coraz większy ruch uliczny, uszkodzenia spowodowane oddziaływaniem środowiska oraz nieprawidłowe użytkowanie dróg. Obecnie coraz więcej robót drogowych wykonuje się na jezdniach, przy utrzymaniu dróg otwartych dla ruchu. Ponadto połączenie coraz większego natężenia ruchu oraz pracy na drogach w nocy wpływa na zwiększenie ryzyka dla pracowników. Wymienione sytuacje przekładają się na rosnącą liczbę wypadków drogowych [1 – 3].

Jednym ze sposobów zapewnienia bezpieczeństwa ruchu drogowego jest zastosowanie przenośnych barier dro-

gowych wygradzających jezdnię i pobocze. Takie rozwiązanie techniczne ogranicza możliwość zjazdu z pasa ruchu pojazdu, a co za tym idzie spowodowanie zagrożenia dla życia i zdrowia pracujących osób [4].

Tymczasowe bariery, które stanowią główny system zapewnienia bezpieczeństwa podczas robót na drogach, nie mają stałego połączenia z gruntem, dlatego też istotne jest wykonanie bariery o odpowiedniej masie i sztywności podłużnej [5 – 7]. Innym ważnym zagadnieniem tego typu barier jest aspekt ekonomiczny. Masa bariery, która w istotny sposób może zwiększyć poziom bezpieczeństwa, zwiększa też jej koszty [8].

Stworzenie nowego systemu barier spełniającego odpowiednie normy europejskie (m.in. EN 1317-2 [9]) wymaga kosztownych prac wdrożeniowych oraz testów zderzeniowych w pełnej skali. W wielu przypadkach, w celu ograniczenia kosztów projektu bariery, stosuje się analizę zaawansowanymi programami z wykorzystaniem metody elementów skończonych, np. LS-DYNA [7, 10 – 12]. Opracowanie szczegó-

wego modelu obliczeniowego oraz wykonanie testów zdarzeniowych pozwala na optymalizację procesu projektowego tego typu elementów [13 – 15]. Metoda elementów skończonych nie zawsze jest jednak wystarczająca do pełnego odwzorowania zachowania się barier [5, 6, 8]. Finalny produkt wymaga każdorazowo wykonania pełnoskalowych testów zderzeniowych [5, 6]. Należy podkreślić, że bardzo trudnym do modelowania miejscem bariery tymczasowej jest łącznik między jej segmentami, którego sztywność zdecydowanie wpływa na sztywność globalną całego systemu barier. Dodatkowo w tym przypadku niezbędne są testy laboratoryjne lub zderzeniowe do kalibracji modelu obliczeniowego.

Celem badań przedstawionych w artykule było sprawdzenie sztywności poszczególnych łączników w odniesieniu do elementu liniowego, który wykazuje maksymalną możliwą sztywność danej bariery. Prezentowane badania są częścią prac wykonanych w ramach projektu RPO nr RPZP.01.01.00-32-0008/17 o nazwie *Projekt badawczo-rozwojowy*

¹⁾ Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska

²⁾ Auburn University, Department of Civil Engineering, USA

^{*} Adres do korespondencji: szymon.skibicki@zut.edu.pl

przedsiębiorstwa „GP” Sp. z o.o. prowadzący do wdrożenia innowacyjnej tymczasowej Bariery Ochronnej T1/W1 jako systemu Techniki Bezpieczeństwa Ruchu Drogowego [16].

Metoda badań

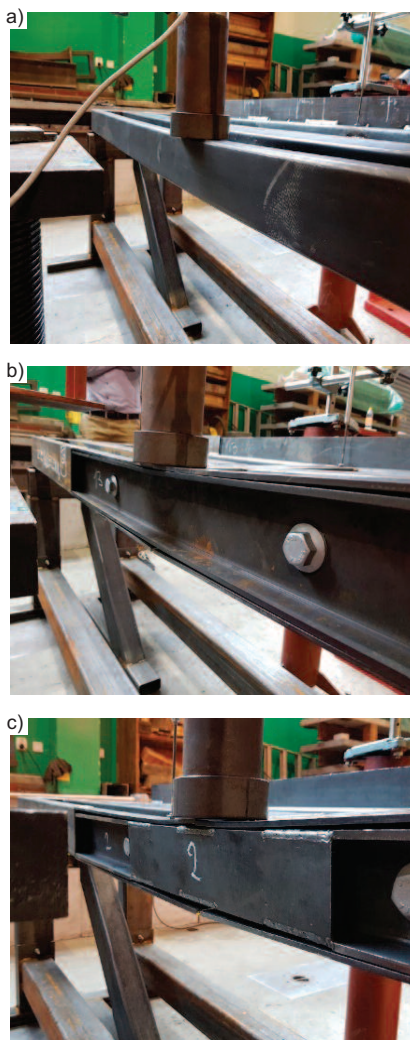
Badania laboratoryjne przeprowadzono na fragmentach stalowych barier w skali 1: 1. Miały one na celu symulację uderzenia pojazdu w system barier zgodnie z testami zderzeniowymi. Głównym celem badań było porównanie sztywności łącznika w odniesieniu do odcinka liniowego oraz wybór rozwiązania konstrukcyjnego. Zwiększenie sztywności łącznika znacznie poprawia pracę całego systemu barier. Ze względu na ekonomię, technologię i konieczność szybkiego montażu barier w miejscu docelowym (na placu budowy odcinka drogowego) istotne jest odpowiednie zaprojektowanie łącznika (nie tylko ze względów na jego nośność, ale także sposób montażu). W nawiązaniu do wymienionych wyżej czynników technologicznych przebadano cztery rodzaje laboratoryjnych modeli barier (tabela 1), które różnią się sposobem wykonania łącznika. Fotografie 1 i 2 przedstawiają opisane bariery. Podstawowy liniowy model bariery składał się z sześciu różnych części zaprezentowanych na rysunku 1:

- pas górny wykonany z rury kwadratowej (RK) 120 x 40 x 3;
- pas środkowy 2 x C 100 x 40 x 2;
- słupek pośredni rozstawiony co 1 m z profilu RK 100 x 40 x 3;
- pas dolny z profilu U 120 x 40 x 4;
- blacha podstawy o przekroju 240 x 10;

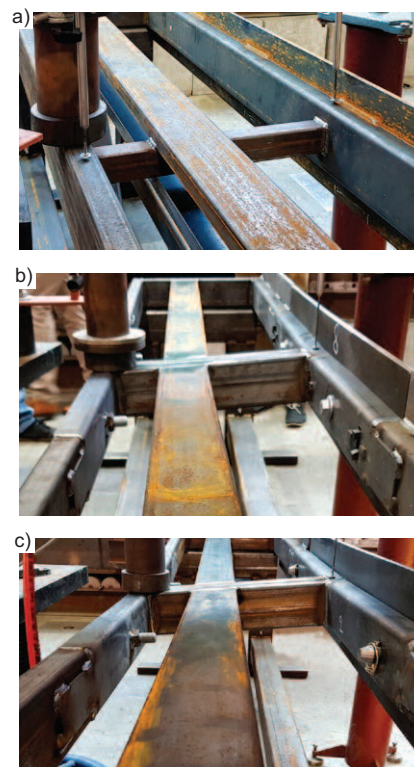
Tabela. 1. Rodzaje przebadanych barier

Table 1. Types of tested barriers

Model	Typ bariery	Pas górny – typ profilu w połączeniu	Pas górny – typ połączenia	Pas dolny – typ połączenia
BS 120	liniowy (liniowy fragment bariery bez łącznika)	–	–	–
BS 120/UW	łącznik (fragmenty dwóch segmentów barier połączonych łącznikiem)	profil U 110 x 40 x 5	śrubowe 2 x M20 kl. 5.6	śrubowe 2 x M20 kl. 5.6
BS 120/UW + ZW		profil U 110 x 40 x 5		trzcien średnicy 20 mm kl. 5.6 z zawleczką stalową
BS 120/UW+BL		profil U 110 x 40 x 5 z wzmocnieniem w postaci dospawanej blachy 4 mm		śrubowe 2 x M20 kl. 5.6



Fot. 1. Rodzaj łącznika pasa górnego badanych barier: a) bariera liniowa (BS 120); b) profil U (BS 120/UW lub BS 120/UW + ZW); c) profil U wzmocniony blachą (BS 120/UW + BL)
 Photo 1. Type of upper flange connector of the tested barriers: a) linear barrier (BS 120); b) U profile (BS 120/UW or BS 120/UW + ZW); c) U profile reinforced with metal sheet (BS 120/UW + BL)

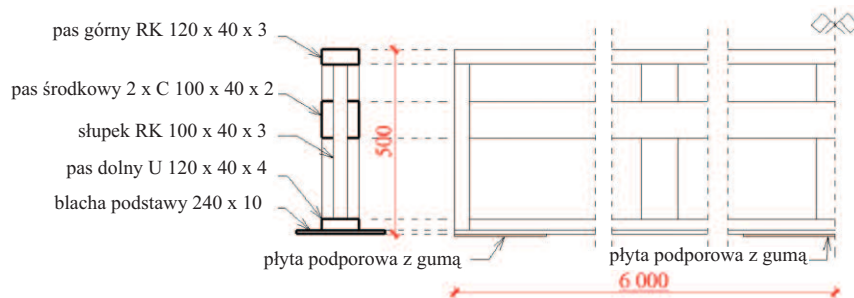


Fot. 2. Rodzaj łącznika pasa dolnego badanych barier: a) bariera liniowa; b) łącznik śrubowy; c) łącznik z zawleczką
 Photo 2. Type of the bottom flange connector of the tested barriers: a) linear barrier; b) connector with bolt; c) connector with cotter pin

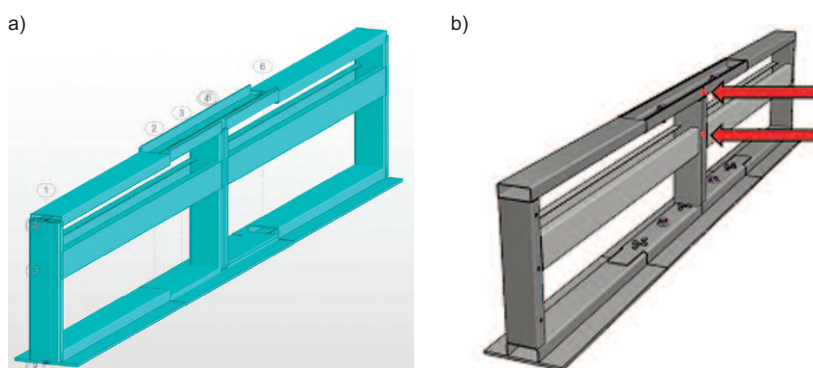
- płyta podporowa o wymiarach 560 mm x 300 mm x 10 mm w rozstawie 3 m, składająca się z blachy podporowej stalowej grubości 5 mm oraz gumy specjalnego przeznaczenia o twardości 45 w skali Shore’a i grubości 5 mm. Wszystkie profile wykonano ze stali S235 J2.

W celu przygotowania stanowiska badawczego do statycznych testów bariery przeanalizowano rozkład sił wewnętrznych w barierze i łączniku oraz ustalono wartości obciążenia, które można przyłożyć do bariery, aby określić jej sztywność. Wykonano kilka modeli obliczeniowych w programie wykorzystującym metodę elementów skończonych (rysunek 2a) i na podstawie analiz wybrano odpowiednią rozpiętość elementu.

Dodatkowo analizy wykazały, że przy obciążeniu rzędu 30 kN, przyłożonym do pasa górnego lub środkowego, ugięcie bariery wyniesie 15 – 30 mm w zależności od testowanego modelu oraz charakterystyki ma-



Rys. 1. Schemat badanej bariery tymczasowej
Fig. 1. Scheme of the tested temporary barrier



Rys. 2. Model numeryczny do doboru stanowiska badawczego (a); miejsce przyłożenia siły w schemacie belki wolno podpartej: pas górny lub pas środkowy (b)
Fig. 2. Numerical model for selection of test stand (a); location of force application on the simply supported beam: on top chord or on middle chord (b)

teriałowej. Na podstawie tych wyników ustalono, że jest to wystarczające przemieszczenie, żeby obliczyć i porównać sztywność barier. Ustalono, że bariera będzie obciążana do 30 kN, a następnie odciążana. Analiza obliczeniowa modelu bariery z wykorzystaniem oprogramowania MES umożliwiła ustalenie zakresu przyłożonej siły do 30 kN oraz rozpiętość osiową elementu – 2,40 m.

Badania odcinków liniowych oraz łączników barier przeprowadzono w schemacie belki wolno podpartej o jednej podporze przegubowej przesuwniej, a drugiej podporze przegubowej nieprzesuwnej. Przeguby uzyskano za pomocą płytek centrujących, natomiast podporę nieprzesuwną przez dodanie specjalnych trzpieni, które zatrzymywały przesuwną barierę. Przyłożenie siły było punktowe i obejmowało dwie lokalizacje: pas górny i pas środkowy (rysunek 2b). Lokalizacja przyłożenia obciążenia miała za zadanie jak najbardziej wyteżyć model bariery, a zarazem zasymulować wpływ uderzenia pojazdu. Wynikiem testów była wartość ugięcia mierzona cyfrowo za pomocą czuj-

ników indukcyjnych przyłożonych do pasa dolnego i górnego w środku rozpiętości modelu bariery. Do pomiaru przemieszczeń wykorzystano czujniki przemieszczeń LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*) o dokładności 0,01 mm oraz siłomierz 50 kN. Dane pomiarowe były rejestrowane za pomocą mostka tensometrycznego HBM QuantumX. Fotografia 3 prezentuje stanowisko do badań statycznych barier tymczasowych.

Tabela 2. Wyniki badań laboratoryjnych sztywności systemów barier
Table 2. Laboratory tests results of the barrier system stiffness

Model	Miejsce przyłożenia siły	Siła [kN]	Ugięcie [mm]		Sztywność (zakres 7 – 14 kN) [kN/mm]		Współczynnik zmiany sztywności W_{st} [%]	
			pas dolny	pas górny	pas dolny	pas górny	pas dolny	pas górny
BS 120	pas środkowy	30,07	-2,12	-11,78	7,66	3,23	100,0	100,0
	pas górny	29,33	0,25	-20,21	26,00	3,23	100,	100,0
BS 120/UW	pas środkowy	29,03	-16,54	-26,82	2,04	1,25	26,7	38,6
	pas górny	30,67	-18,49	-41,67	1,96	1,04	7,5	32,3
BS 120/UW + ZW	pas środkowy	32,12	-30,12	-39,02	1,52	1,27	19,8	39,4
	pas górny	29,32	-15,60	-28,34	2,59	1,04	10,0	32,0
BS 120/UW+BL	pas środkowy	30,15	-12,34	-24,02	2,59	1,70	33,8	52,8
	pas górny	31,24	-16,43	-41,36	3,03	0,99	11,6	30,6



Fot. 3. Stanowisko podczas badań statycznych barier tymczasowych
Photo 3. Test stand during static laboratory tests of temporary barriers

Wyniki i analiza badań laboratoryjnych

Średnie wyniki sztywności odcinków liniowych oraz łączników systemów barier zestawiono w tabeli 2. Każdorazowo przebadano trzy próbki barier danego modelu. Współczynnik zmienności (CoV) wynosił 1,56 – 7,93%. Analizowano ugięcie w czasie obciążania i odciążania bariery, sztywność obliczoną na podstawie nachylenia quasi-liniowego odcinka w zakresie 7 – 14 kN oraz współczynnik zmiany sztywności, definiujący procentową wartość sztywności modelu bariery z łącznikiem do liniowego modelu bariery wg wzoru (1).

$$W_{st} = \frac{K_{con}}{K_{lin}} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (1)$$

gdzie:

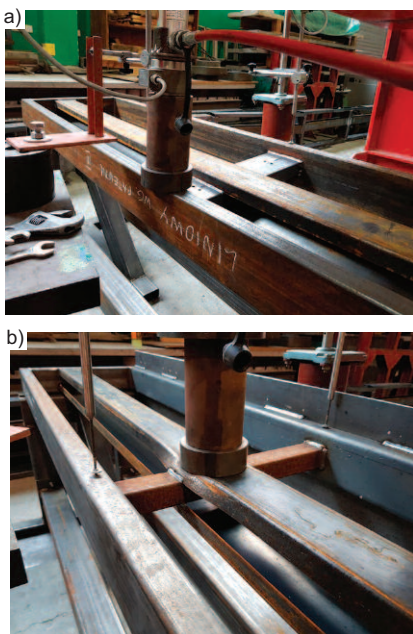
W_{st} – współczynnik zmiany sztywności [%];

K_{con} – sztywność modelu systemu barier z łącznikiem (BS 120/UW; BS 120/UW + ZW; BS 120/UW + BL);

K_{lin} – sztywność modelu systemu barier w odcinku liniowym (BS 120).

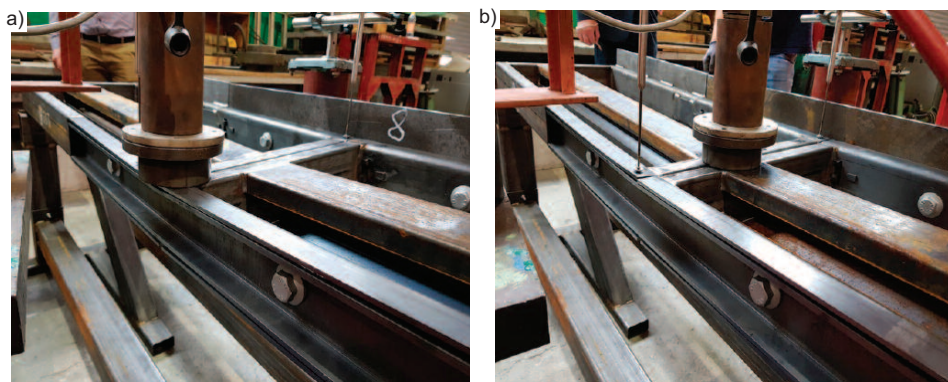
Na podstawie wyników badań stwierdzono, że wszystkie analizowane bariery z łącznikami wykazują zdecydowanie większe ugięcie niż liniowy model bariery. Sytuacja ta przekłada się na znaczną redukcję sztywności. Współczynnik zmiany sztywności (1) przedstawiony w tabeli 2 potwierdza redukcję sztywności barier z łącznikiem o 47,2 – 69,4%, w przypadku pasa górnego oraz 66,2 – 92,5% w pasie dolnym w odniesieniu do modelu liniowego bariery. Analizowano dwie lokalizacje przyłożenia siły (fotografie 4 i 5). Mniejszą utratę sztywności wykazało przyłożenie siły do pasa środkowego. Zależność siła – przemieszczenie w przypadku przyłożenia sił na pas górny przedstawiono na rysunku 3, a na pas dolny na rysunku 4. Model liniowy BS120 poza mniejszym przemieszczeniem wykazuje mniejsze odkształcenia trwałe – dłuższy przebieg odkształceń sprężystych (rysunki 3a i 4a).

Najmniejszą redukcję sztywności, w stosunku do modelu liniowego, wykazało we wszystkich przypadkach obciążenie rozwiązanie BS 120/UW + BL, czyli zawierające w połączeniu pro-



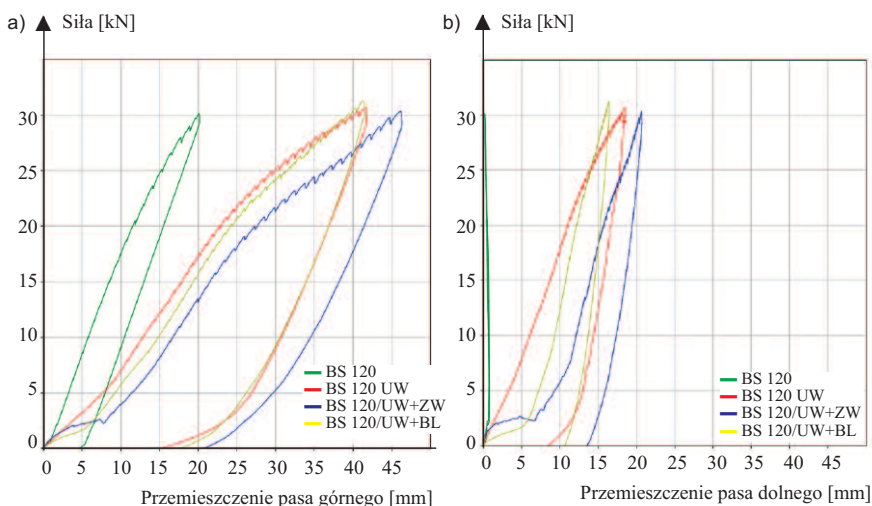
Fot. 4. Model bariery liniowej BS 120 podczas badań: a) przyłożenie siły do górnego pasa; b) przyłożenie siły do środkowego pasa

Photo 4. Model of the linear barrier BS 120 during the laboratory tests: a) application of the force on the top chord; b) application of the force on the center chord



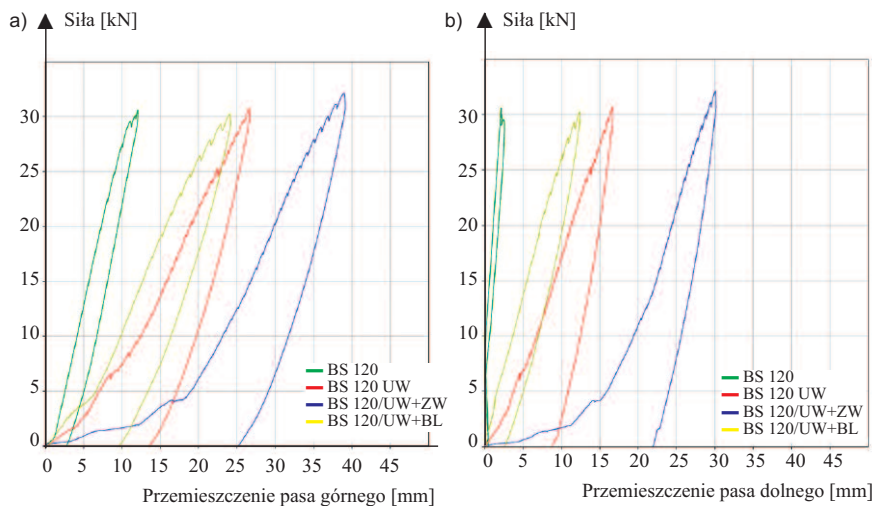
Fot. 5. Model łącznika bariery BS 120 / UW podczas badań: a) przyłożenie siły do górnego pasa; b) przyłożenie siły do środkowego pasa

Photo 5. Model of the barrier BS 120/UW connector during the tests: a) application of the force on the top chord; b) application of the force on the center chord



Rys. 3. Wyniki przemieszczenia bariery przy oddziaływaniu siły na pas górny: a) przemieszczenie pasa górnego; b) przemieszczenie pasa dolnego

Fig. 3. Barrier displacement results for force applied to the upper chord: a) top chord displacement; b) bottom chord displacement



Rys. 4. Wyniki przemieszczenia bariery przy oddziaływaniu siły na pas środkowy: a) przemieszczenie pasa górnego; b) przemieszczenie pasa dolnego

Fig. 4. Barrier displacement results for force applied to the middle chord: a) top chord displacement; b) bottom chord displacement

fil U z dodatkowo dospawaną blachą. Analizując połączenia tylko z profilem U stwierdzono, że dużo większą sztywnością charakteryzował się model z połączeniem śrubowym (BS 120 / UW). Należy zwrócić uwagę, że poza najmniejszym współczynnikiem zmiany sztywności w przypadku modelu BS 120 / UW + ZW widoczny jest bardzo duży wzrost przemieszczenia przy małej sile w początkowym okresie obciążenia. Spowodowane jest to poślizgiem w złączu trzpieniowym z zawleczką. Istniejące luzy w łączniku z zawleczką wpływają globalnie nawet na przemieszczenie się blachy przy łączniku (fotografia 6a). W przypadku połączenia śrubowego ten efekt nie występuje (fotografia 6b).



Fot. 6. Wynik badania modelu bariery z łącznikiem: a) połączenie na trzpień z zawleczką dolnego pasa; b) połączenie śrubowe dolnego pasa

Photo 6. Test results of the barrier model with a connector: a) cotter pin connection of the bottom chord; b) bolt connection of the lower chord

Analiza pokazuje, że ta sytuacja jest szczególnie dobrze widoczna na przemieszczeniu pasa dolnego niezależnie od miejsca przyłożonej siły. Zarówno na rysunku 3, jak i rysunku 4 widać znaczne przemieszczenie pasa dolnego bariery BS 120/UW + ZW przy bardzo niewielkiej zmianie sił (do 2,5 kN). Charakter pracy tej bariery znacznie się różni od pozostałych testowanych barier.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono autorską koncepcję badań laboratoryjnych stałych tymczasowych barier do separacji ruchu. Przyjęta metoda umożliwia badanie redukcji sztywności łącznika bariery, wybór najlepszego rozwiązania technicznego oraz późniejszą walidację badawczo-modelową w programach MES [7].

Badania potwierdziły znaczną redukcję sztywności barier z łącznikiem

w porównaniu z barierą liniową (od 47,2% do 92,5% w zależności od sytuacji badawczej). Na podstawie przedstawionej w artykule analizy wybrano łącznik w postaci profilu UW połączonego z dodatkową blachą (BS 120/UW + BL). Badania wykazały, że zastosowanie łącznika trzpieniowego z zawleczką zmniejsza sztywność globalną bariery w porównaniu z łącznikami z połączeniami śrubowymi. Z tego powodu pomimo dłuższego czasu montażu, zalecane są połączenia śrubowe. Weryfikacja skuteczności zaproponowanych rozwiązań jest możliwa po wykonaniu zaawansowanych modeli numerycznych oraz przeprowadzeniu testów zderzeniowych (ang. crash tests) w skali naturalnej.

Przedstawione badania zostały wykorzystane w wyborze rozwiązania bariery ochronnej T1/W1, która pozytywnie przeszła testy zderzeniowe w skali naturalnej i została wdrożona do produkcji [7, 16].

Literatura

- [1] Dane OECD (The Organisation for Economic Co-operation and Development) na temat wypadków w transporcie publicznym. <https://data.oecd.org/transport/road-accidents.htm> (data dostępu: 05.09.2022).
- [2] Motor Vehicle – Introduction – Injury Facts. Informacje na temat wypadków w ruchu drogowym wg agencji NSC (National Safety Council). <https://injuryfacts.nsc.org/> (data dostępu: 05.09.2022).
- [3] Bezpieczeństwo stref pracy na autostradach wg NIOSH CDC (The National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), Centre for Diseases Control and Prevention (CDC)). <https://www.cdc.gov/niosh/> (data dostępu: 05.09.2022).
- [4] MASH. Manual for Assessing Safety Hardware. American Association of State Highway Transportation Officials. 2016.
- [5] Kaszyńska M, Zieliński A, Skibicki S. Projektowanie drogowych tymczasowych barier

ochronnych dla samochodów osobowych. Przegląd Budowlany. 2021; 92 (5–6): 18 – 25.

[6] Fang C, Rasmussen JD, Bielenberg RW, Lechtenberg KA, Faller RK, Linzell DG. Experimental and numerical investigation on deflection and behavior of portable construction barrier subjected to vehicle impacts. *Engineering Structures*. 2021; <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112071>.

[7] Pachocki Ł, Bruski D. Modeling, simulation, and validation of a TB41 crash test of the H2/W5/B concrete vehicle restraint system. *Archiv. Civ. Mech. Eng.* 2020; <https://doi.org/10.1007/s43452-020-00065-7>.

[8] Addink KH, Rohde JR, Preifer BG. Development of a temporary barrier system for off-road applications. Research Report No. TRP-03-66-98; 1998.

[9] PN-EN 1317-2. Systemy ograniczające drogę. Część 2: Klasy działania, kryteria przyjęcia badań zderzeniowych i metody badań barier ochronnych i balustrad. Central Secretariat, Rue de Stasart 36, B-1050, Brussels, Belgium. 2011.

[10] Kwasniewski L, Li H, Wekezer J, Malachowski J. Finite element analysis of vehicle-bridge interaction, *Finite Elements in Analysis and Design*. 2006, DOI: 10.1016/j.finel.2006.01.014.

[11] Ray MH. The use of finite element analysis in roadside hardware design. *International Journal of Crashworthiness*. 1997; <https://doi.org/10.1533/cras.1997.0053>.

[12] Kwasniewski L, Li H, Nimbalkar R, Wekezer J. Crashworthiness assessment of a paratransit bus, *International Journal of Impact Engineering*. 2006; doi: 10.1016/j.ijimpeng.2005.03.007.

[13] Neves RR, Fransplass H, Langseth M, Driemeier L, Alves M. Performance of some basic types of road barriers subjected to the collision of a light vehicle. *J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* 2018; <https://doi.org/10.1007/s40430-018-1201-x>.

[14] Yin H, Fang H, Wang Q, Wen G. Design optimization of a MASH TL-3 concrete barrier using RBF-based metamodelling and nonlinear finite element simulations. *Engineering Structures*. 2016; <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.02.009>.

[15] Whitworth HA, Bendidi R, Marzougui D, Reiss R. Finite element modeling of the crash performance of roadside barriers. *International Journal of Crashworthiness*. 2004; <https://doi.org/10.1533/ijcr.2004.0270>.

[16] Kaszyńska M, Nowak A, Zieliński A, Skibicki S. Projekt badawczo-rozwojowy przedsiębiorstwa „GP” Sp. z o.o. prowadzący do wdrożenia w działalności gospodarczej innowacyjnej tymczasowej Bariery Ochronnej T1/W1 jako systemu Techniki Bezpieczeństwa Ruchu Drogowego. Raport końcowy projektu. Szczecin; 2020.

Informacja o finansowaniu badań

Przedstawione badania zostały sfinansowane z projektu RPO nr RPZP. 01.01.00-32-0008/17 o nazwie „Projekt badawczo-rozwojowy przedsiębiorstwa „GP” Sp. z o.o. prowadzący do wdrożenia w działalności gospodarczej innowacyjnej tymczasowej Bariery Ochronnej T1/W1 jako systemu Techniki Bezpieczeństwa Ruchu Drogowego”.

Przyjęto do druku: 08.11.2022 r.