Badania systemów powstrzymujących pojazd przed wypadnięciem z drogi,

ze szczególnym uwzględnieniem obiektów inżynierskich – cz. II

dr inż. Marcin Budzyński
prof. dr hab. inż. Krzysztof Wilde
dr hab. inż. Kazimierz Jamroz, prof. PG
prof. dr hab. inż. Jacek Chróścielewski
dr hab. inż. Wojciech Witkowski, prof. PG
dr inż. Stanisław Burzyński
mgr inż. Dawid Bruski
mgr inż. Łukasz Jeliński
mgr inż. Łukasz Pachocki
Politechnika Gdańska
Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska

Zagrożenia systemów transportowych, w tym m.in. wypadki drogowe, stanowią duży procent niepożądanych zdarzeń występujących podczas korzystania z drogi. W ramach projektu RoSE (Road Safety Equipment) opisane zostały zagrożenia w otoczeniu dróg, testy poligonowe oraz efekty testów numerycznych na przykładzie barier mostowych.

Identyfikacja zagrożeń w otoczeniu dróg

Na podstawie licznych badań terenowych (nie tylko w Polsce) związanych z inspekcją infrastruktury drogowej pod kątem bezpieczeństwa zidentyfikowano szereg źródeł zagrożeń w otoczeniu dróg [18]. Wybrane źródła zagrożeń zilustrowano dokumentacją fotograficzną (rys. 3). Do źródeł zagrożeń najczęściej występujących w otoczeniu dróg należą:

- drzewa przy krawędzi jezdni (w odległości do 3,5 metra od krawędzi jezdni) – rys. 3a,
- inna zieleń ograniczająca widoczność,
- zbyt strome pochylenia skarp bez zabezpieczenia – rys. 3b,
- elementy uzbrojenia terenu, które nie są podatne na uderzenie – rys. 3c,
- bariery drogowe o nieprawidłowych cechach i parametrach – rys. 3d,
- podpory obiektów inżynierskich bez zabezpieczenia,
- urządzenia odwodnienia – ścianki czołowe przepustów drogowych,
- zły stan techniczny poboczy.

Analizując dane o zdarzeniach drogowych, oceniano indywidualne ryzyko wystąpienia wypadków związanych z otoczeniem (rys. 4). Ryzyko indywidualne definiowane jest w tym przypadku jako liczba wypadków, w których wystąpiły ofiary śmiertelne lub ciężko ranne w odniesieniu do pracy przewozowej na danym odcinku drogi (miliard pojazdokilometrów na rok) – jako miara koncentracji wypadków z ofiarami ciężko rannymi i śmiertelnymi. Zbudowano mapę ryzyka, która pozwala na identyfikację najbardziej niebezpiecznych odcinków dróg. W celu tworzenia map przyjęto pięciostopniową skalę zagrożenia i dla klasy „ryzyko wysokie" oraz „ryzyko bardzo wysokie" należy podjąć odpowiednie działania naprawcze.

Testy poligonowe

W celu wyboru testów zderzeniowych dla potrzeb projektu RoSE wykonano obszerne studium literatury oraz przeprowadzono liczne konsultacje z ekspertami. Szczegółowo rozpoznano dotychczas przeprowadzone badania poligonowe barier ochronnych, aby stworzyć odpowiednią bazę danych z już przeprowadzonych testów zderzeniowych. Po analizie ogólnodostępnych raportów lub raportów pozyskanych przez zespół autorów wyłoniono zestaw problemów, które nie były lub były w niewielkim stopniu rozpoznane i na tej podstawie zrealizowano sześć testów poligonowych (rys. 5). Były to:

1. Badanie zderzeniowe typu TB32 przeprowadzone dla drogowej bariery stalowej dla odcinka bariery zainstalowanego po łuku poziomym o promieniu 400 metrów. Dodatkowo wykonano powtórne uderzenie w tym samym miejscu urządzenia, co było szczególnie istotne do określenia potencjalnej szerokości strefy wolnej od przeszkód za barierą (rys. 5a-b).
2. Badanie zderzeniowe typu TB32 dla drogowej bariery linowej dla odcinka bariery zainstalowanej po łuku o promieniu 400 metrów. Dodatkowo wykonano powtórne uderzenie w tym samym miejscu urządzenia. Uzasadnieniem był mało rozpoznany problem zachowania się barier na łukach poziomych, szczególnie przy uderzeniu w barierę po wewnętrznej (wypukłej) krawędzi jezdni na łuku poziomym (rys. 5c-d).
3. Badanie zderzeniowe typu TB11 przeprowadzone dla bariery mostowej (niskiej) stalowej zamontowanej na płycie betonowej z krawężnikiem o wysokości 14 cm. Dodatkowo wykonano powtórne uderzenie w tym samym miejscu urządzenia. Uzasadnieniem jest konieczność lepszego rozpoznania zachowania się pojazdu w wyniku uderzenia w krawężnik i barierę drogową ze szczególnym uwzględnieniem parametru ASI (rys. 5e-f).
4. Badanie zderzeniowe typu TB51 przeprowadzone dla bariery mostowej (niskiej) stalowej zamontowanej na płycie betonowej z krawężnikiem o wysokości 14 cm. Uzasadnieniem jest konieczność lepszego rozpoznania zachowania się pojazdu w wyniku uderzenia w krawężnik i barierę drogową ze szczególnym uwzględnieniem wychylenia (rys. 5g-h).
5. Badanie zderzeniowe typu TB32 przeprowadzone dla połączenia drogowej bariery linowej z barierą stalową. Uzasadnieniem jest konieczność lepszego rozpoznania zachowania się systemu oraz wpływu na pojazd dla połączenia często stosowanego w Polsce (rys. 5i-j).
6. Badanie zderzeniowe typu TB51 przeprowadzone dla bariery stalowej i kolumny oświetleniowej umieszczonej w szerokości pracującej bariery. Bariera stalowa

a)

b)

c)

d)

Rys. 3. Przykłady źródeł zagrożeń w otoczeniu drogi

ma parametry H2-W4-A, a kolumna znajduje się w klasie HE100. W Polsce można spotkać wiele rozwiązań, gdzie występują obiekty w szerokości pracującej bariery (kolumny oświetleniowe, bramownice itp.). Brak jest dokładnego rozpoznania, jak działa system i jakie są skutki w przypadku uderzenia w takiej lokalizacji, szczególnie z uwzględnieniem wtargnięcia pojazdu (rys. 5k-l).

Testy numeryczne

Bariery ochronne są powszechnie stosowanymi urządzeniami bezpieczeństwa ruchu drogowego na obiektach mostowych. Rola barier mostowych jest szczególnie istotna, biorąc pod uwagę ewentualne szkody, jakie mógłby wyrządzić pojazd uderzający w konstrukcję mostu lub zjeżdżający z niego na drogę lub torowisko przebiegające pod obiektem. Systemy ochronne są projektowane tak, aby były w stanie rozproszyć energię kinetyczną ciężkich pojazdów przy relatywnie małej wartości szerokości pracującej oraz intruzji pojazdu [14]. Ponadto, jak każda bariera, musi ona jednocześnie spełnić określone wymagania dotyczące wartości oddziaływań przekazywanych na pasażera pojazdu osobowego podczas zderzenia z badanym systemem ograniczającym drogę. Testy tego typu przeprowadzane są na poligonach badawczych, np. Instytutu Badawczego Ochronnych Systemów w Inowrocławiu, gdzie zespół doświadczonych pracowników najpierw przygotowuje poligon badawczy i testowany system ochronny, następnie przebieg zderzenia jest rejestrowany kamerami szybko-klatkowymi oraz czujnikami ruchu zamontowanymi wewnątrz pojazdu, na koniec rezultat jest fotografowany i sporządza się raport z badania. Dodać należy, że pojazdy stosowane w tego typu testach muszą być w pełni sprawne i dopuszczone do ruchu drogowego. Ta sama zasada dotyczy systemów ochronnych. Niepodważalną zaletą takiego podejścia jest możliwość przeanalizowania zachowania bariery oraz pojazdu w trakcie zderzenia w warunkach rzeczywistych oraz w pewnym stopniu kontrolowanych. Przeprowadzone w ramach projektu RoSE testy poligonowe opisano i zilustrowano w poprzednich częściach artykułu. Niestety równocześnie jest to zadanie trudne do prawidłowego przeprowadzenia, nader kosztowne oraz posiadające pewne ograniczenia.

Z uwagi na to oraz na możliwości dostępne w dzisiejszych czasach coraz częściej tego typu testy przeprowadzane są w środowisku wirtualnym, np. w systemie LS-DYNA [15, 16]. Możliwe staje się to z powodu coraz szerszego dostępu do wysokowydajnych jednostek obliczeniowych, które są w stanie bardzo sprawnie rozwiązywać macierzowe układy równań algebraicznych występujące w Metodzie Elementów Skończonych (MES). Symulacje numeryczne z wykorzystaniem MES pozwalają na matematyczny opis zjawisk zachodzących w rzeczywistości. Po prawidłowym przygotowaniu i rozwiązaniu zadania możliwe jest na przykład dokładne przeanalizowanie mechaniki zderzenia, odczytanie sił interesujących z perspektywy projektowania i analizy działania systemu, a następnie przetestowanie opracowanego na tej podstawie prototypu. Badać można również istniejące już rozwiązania dla przypadków, które nie zostały wcześniej przewidziane bądź sprawdzone. Kolejnym atutem wykorzystywania metod numerycznych jest możliwość optymalizacji projektowanych konstrukcji, na przykład redukcja masy wykorzystanego materiału przy zachowaniu funkcjonalności systemu.

Rys. 4. Mapa ryzyka dla wypadnięć z jezdni

W artykule zaprezentowana została tematyka systemów powstrzymujących pojazd przed wypadnięciem z drogi. Podczas codziennego użytkowania dróg występuje szereg zagrożeń, które wpływają na bezpieczeństwo. Badanie, identyfikacja i klasyfikacja zagrożeń stanowią istotny element utrzymania dróg. Artykuł stanowi drugą część podjętej problematyki. Pierwsza została opublikowana w magazynie Mosty nr 3-4/19 str. 66-68.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Rys. 5. Testy poligonowe w ramach projektu RID3A

Wszystko to przeprowadzane jest przy relatywnie niskich kosztach w porównaniu do pełnowymiarowych testów zderzeniowych. Przeprowadzając symulacje numeryczne w środowisku MES, należy jednak być świadomym ograniczeń i problemów związanych z tą metodą. Przede wszystkim podczas opracowywania rezultatów należy pamiętać o uproszczeniach, z którymi wiąże się modelowanie numeryczne. Nie można również traktować wyników analizy bezkrytycznie.

W celu ilościowej oceny wiarygodności rezultatu symulacji numerycznych wymagane jest przeprowadzenie tzw. testu walidacyjnego w oparciu o normy PD CEN/TR 16303 [17]. Porównuje się wyniki uzyskane w wirtualnym teście z rezultatem pełnowymiarowego testu zderzeniowego. Uzyskane rezultaty muszą spełnić określone kryteria. Ponadto konieczne jest sprawdzenie szeregu warunków dodatkowych, które weryfikują poprawność analizy, jak np. sprawdzenie, czy całkowita suma energii w trakcie symulacji jest stała. Jeżeli w trakcie symulacji badany model numeryczny spełni określone warunki, można uznać go za wiarygodny, czyli zgodnie z nazewnictwem angielskim *validated*. Tak sprawdzony model może posłużyć do dalszych analiz parametrycznych, jak np. w autorskich pracach [18-21]. Możliwości wykorzystania symulacji numerycznych do badań właściwości urządzeń bezpieczeństwa ruchu drogowego oraz metodykę budowy modelu obliczeniowego testu zderzeniowego wraz z kilkoma przykładami jego zastosowania przedstawiono w artykule [29].

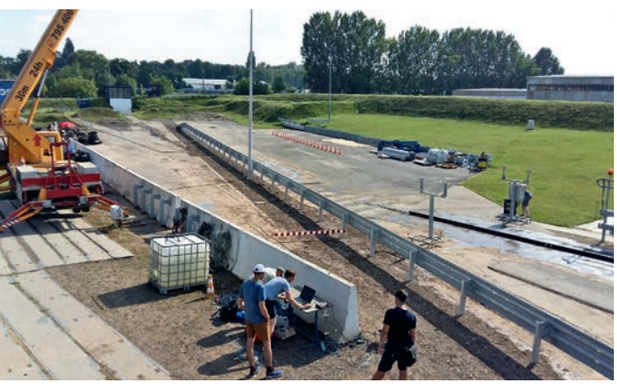
W ramach projektu RID 3A „Urządzenia Bezpieczeństwa Ruchu Drogowego" przeprowadzono ok. 390 symulacji numerycznych różnych przypadków kolizji drogowych. Pośród wykonanych analiz 94 dotyczyło bariery stosowanej na obiektach mostowych w Polsce. Rozważano barierę klasy H2/W3/B. Wśród badań przeprowadzono m.in. symulację normowego testu TB51, tj. uderzenie w barierę autobusem o masie ok. 13 t z prędkością 70 km/h pod kątem 20° [14]. Wybrane chwile czasowe przebiegu autorskich symulacji MES przedstawiono na rys. 6. Modelowany odcinek systemu ochronnego składa się z bariery mostowej o długości 24 m, do której na obu jej końcach dołączono barierę drogową o długości 27 m. Poszczególne części badanego odcinka bariery zdyskretyzowano za pomocą 214 006-powłokowych elementów skończonych (ES). Do opisu relacji konstytutywnych dla części stalowych użyto prawa odcinkowo-liniowo-plastycznego. Krzywe rozciągania dla stali uzyskano z własnych prób rozciągania jednoosiowego.

g)

h)

i)

j)



k)

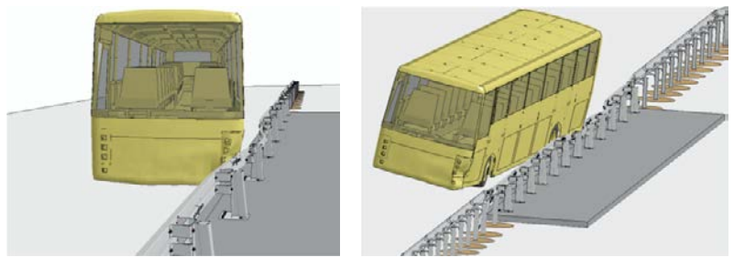
l)

Poszczególne elementy systemu połączone są ze sobą śrubami o geometrii zbliżonej do rzeczywistych łączników śrubowych (11 568 objętościowych ES). Śrubom zadano wstępne naprężenia mające symulować ich dokręcenie. Bariera zakotwiona została w kapie chodnikowej przy pomocy sformułowania **CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID* [15, 16], które pozwala na przybliżony opis pracy kotew w ośrodku betonowym. Kapę podzielono na 72 048 objętościowych ES. Zachowanie tej części systemu podlega prawu konstytutywnemu dotyczącego elementów betonowych – **MAT_CSCM* [15, 16, 23, 24]. Użyty opis materiału pozwala na obliczanie parametrów pękania kruchego oraz ciągliwego na podstawie tzw. energii pękania [23, 24]. Przydatność wybranego modelu materiału została już wielokrotnie potwierdzona przez zespoły na całym świecie [25-27]. Opisany fragment bariery następnie dołączono z obu stron do 27-metrowych odcinków bariery drogowej tak, aby poprawnie odwzorować sztywność na połączeniu barier. System drogowy podzielono na 273 804-powłokowe ES, a jej poszczególne części połączono ze sobą przy pomocy podejścia uproszczonego opisanego np. w pracach [19, 28]. Poniżej poziomu terenu słupki bariery zostały otoczone objętościowymi ES w kształcie „doniczek", jak to pokazano np. w pracy [29]. Sumarycznie cały modelowany ośrodek gruntowy składa się z 59472 objętościowych ES. Grunt otaczający słupki przyjęto jako jednorodny i jego zachowanie opisano za pomocą deterministycznego równania stanu, do którego dane materiałowe otrzymano na podstawie zewnętrznych badań laboratoryjnych. Sumarycznie cały model zawiera 719 170 ES. Całość pracy poświęcona modelowaniu w efekcie przyniosła pozytywny wynik walidacji symulacji numerycznej pełnowymiarowego testu zderzeniowego. Warto zaznaczyć, że w symulacjach numerycznych wykorzystano model opracowany przez Norweski Zarząd Dróg Publicznych (Norwegian Public Road Administration), który różnił się od autobusu użytego w teście poligonowym. Różnice w geometrii pojazdu rzeczywistego i jego wirtualnego odpowiednika są tylko jednym z czynników wpływających na to, że symulacja numeryczna nigdy w pełni nie pokryje się z rezultatem testu poligonowego. Kolejnym powodem jest incydentalny charakter samego zderzenia, który sprawia, że problematyczne byłoby ponowne uzyskanie tego samego wyniku nawet na poligonie badawczym. Stąd można przyjąć, że w tym konkret-

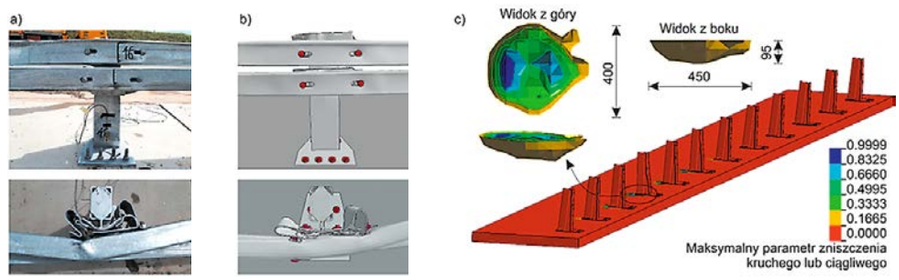
Piśmiennictwo

1. CovaT.J., Conger S.: *Transportation Hazards*.„Transp. Eng. Handb.", 801/2003, 1-50. doi:10.1177/1056492611419798
2. Jamroz K.: *Metoda zarządzania ryzykiem w inżynierii drogowej.* Politechnika Gdańska, 2011.
3. *Global Status Report on Road Safety*. WHO, 2015.
4. Budzyński M., Kustra W.: *Analiza zagrożeń na jednorodnych odcinkach dróg*. „Drogownictwo", 4/2012, 112-115.
5. Budzyński M., Jamroz K., Jelinski L., Antoniuk M.: *Why are Trees Still Such a Major Hazard to Drivers in Poland?* [In:] Transportation Research Procedia (TRA), Warszawa 2016.
6. Budzyński M., Jamroz K.: *Strategia zmniejszenia liczby i skutków wypadnięcia pojazdu z drogi*. „Drogownictwo", 4-5/2009, s. 134-142.
7. Cafiso S., La Cava G.: *Identification of hazard location and ranking of measures to improve safety on local rural roads. Final research report*. 2007.
8. Van Petegem J.W.H., Wegman F.: *Analyzing road design risk factors for run-off-road crashes in the Netherlands with crash prediction models*. „J. Safety Res.", vol. 49, no. February 2014, pp. 121-127.
9. *Aashto Roadside Design Guide.* 2011.
10. Brodie C., Jurewicz C., Steinmetz L., Phillips C., Cairney P., Veith G.: *Improving Roadside Safety. Summary Report.*
11. Yannis G.: *Best practice for cost-effective road safety infrastructure investments.* 2008.
12. Ridder S. de, Horst R. van der, Thomson R.: *Project RISER: Roadside Infrastructure for Safer European Roads*. Sustain Growth Program, 1998.
13. La Torre F.: *SAVeRS Selection of Appropriate Vehicle Restraint Systems*. February 2014.
14. *PN-EN 1317-1-5*, 2010.
15. Hallquist J.O.: *LS-DYNA Theory Manual.* 2006.
16. *LS-DYNA Keyword User's Manual.* LSTC, 2015.
17. *PD CEN/TR 16303-1-4*, 2012.
18. Wilde K., Jamroz K., Bruski D., Budzyński M., Burzyński S., Chróścielewski J., Witkowski W.: *Curb-to-Barrier Face Distance Variation in a TB51 Bridge Barrier Crash Test Simulation.* „Arch. Civ. Eng.", 63 (2)/2017.
19. Burzyński S., Chróścielewski J., Pachocki Ł.: *Finite element method simulations of various cases of crash tests with N2/W4/A steel road barier.* MATEC Web Conf. 2018, p. 231.
20. Bruski D., Witkowski W.: *Numerical studies on the influence of selected construction features and road conditions on the performance of road cable barriers.* MATEC Web Conf. 2018, p. 231.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl



Rys. 6. Przebieg symulacji normowego testu TB51 z barierą mostową H2/W3/B



Rys. 7. Widok deformacji słupka bariery: a – test poligonowy, b – symulacja numeryczna, c – szczegół uszkodzeń konstrukcji

nym zagadnieniu dążenie do rezultatów w pełni pokrywających się z rzeczywistością jest bezcelowe. Z tego powodu oraz po spełnieniu warunków normowych uznano w badaniach własnych, że jest to wynik satysfakcjonujący.

Widok deformacji jednego ze słupków w rzeczywistym teście zderzeniowym oraz w odpowiadającej mu symulacji przedstawiono na rys. 7a, b. Jak można zaobserwować, uzyskane wyniki są jakościowo zbliżone do rzeczywistości. Dodatkowo na rys. 7c przedstawiono mapę zniszczeń betonu dla kapy chodnikowej. Można tam również znaleźć izopowierzchnie zniszczeń betonu w pobliżu jednego ze słupków bariery po uderzeniu autobusu.

Podsumowanie i kierunki dalszych prac

Na podstawie dotychczasowych prac autorów w zakresie zarządzania bezpieczeństwem infrastruktury drogowej, ze szczególnym uwzględnieniem otoczenia dróg oraz szczegółowych badań prowadzonych nad systemami powstrzymującymi pojazd przed wypadnięciem z jezdni, można sformułować następujące wnioski:

1. Zarządzanie bezpieczeństwem ruchu drogowego jest procesem bardzo złożonym, musi uwzględniać znaczną liczbę niewiadomych oraz zjawisk losowych. W związku z tym wymaga stosowania nowoczesnych narzędzi umożliwiających identyfikację źródeł zagrożeń i zagrożeń.
2. Elementy infrastruktury drogowej należą do grupy czynników w znacznym stopniu odpowiedzialnych za powstawanie wypadków (jednak ich udział procentowy jest mniejszy niż czynników ludzkich – zachowania, błędy użytkowników ruchu drogowego) i jednocześnie czynniki infrastrukturalne dominują pod względem wpływu na konsekwencje wypadków z udziałem pojedynczego pojazdu (wypadnięcia, wywrócenia pojazdu, uderzenia w element otoczenia drogi).
3. Dominującymi czynnikami infrastrukturalnymi odpowiedzialnymi za konsekwencje wypadków drogowych z udziałem jednego pojazdu są te związane z otoczeniem dróg, co w znacznym stopniu wynika z braku odpowiednich regulacji i przepisów w tym zakresie. Konieczne jest opracowanie odpowiednich zasad porządkujących proces projektowania i utrzymania sieci drogowej. Blisko 20% wszystkich ofiar śmiertelnych na polskich drogach to skutek wypadnięcia pojazdu z jezdni.
4. Koniecznie jest budowanie i rozwijanie modeli określających wpływ czynników na miary bezpieczeństwa ruchu drogowego, co pozwoli wprowadzać odpowiednie zmiany w przepisach w zakresie projektowania i utrzymania infrastruktury drogowej.

Związane z realizacją projektu RID 3A badania wnoszą nowe elementy wiedzy z zakresu projektowania dróg, inżynierii ruchu drogowego i utrzymania dróg oraz metodyki wykonywania zaawansowanych symulacji numerycznych testów zderzeniowych z uwzględnieniem danych doświadczalnych. Rozwój modeli szacowania wypadków drogowych i ich skutków w przypadku braku urządzeń BRD lub ich błędnego stosowania ma duże znaczenie poznawcze i praktyczne z uwagi na ich wykorzystanie w planowaniu i projektowaniu infrastruktury drogowej.

Badania wpływu rodzaju urządzeń BRD i ich zastosowania w różnych warunkach drogowo-ruchowych na funkcjonalność i bezpieczeństwo urządzeń BRD zastosowanych na różnych obiektach drogowych stanowią podstawę do formułowania nowoczesnych metod projektowania, budowy i eksploatacji infrastruktury drogowej z uwzględnieniem istotnej roli tych urządzeń w zapewnieniu jej bezpieczeństwa.

Wyniki przeprowadzonych prac badawczych posłużą także do opracowania zbioru rekomendacji i zaleceń stanowiących podstawę do sformułowania nowych wytycznych dla projektantów, producentów i wykonawców urządzeń BRD oraz instrukcji dla firm utrzymujących te urządzenia. Zastosowanie wytycznych pozwoli na kształtowanie bezpiecznej infrastruktury drogowej i umożliwi wyeliminowanie najczęściej stosowanych dotychczas błędów. ❑

21. Pachocki Ł., Wilde K.: *Numerical simulation of the influence of the selected factors on the performance of a concrete road barrier H2/W5/B*. MATEC Web Conf. 2018, p. 231.
22. Murray Y.D.: *Users Manual for LS-DYNA Concrete Material Model 159*. 2007.
23. Murray Y.D., Abu-Odeh A., Bligh R.: *Evaluation of LS-DYNA Concrete Material Model 159*. 2007.
24. Bielenberg R.W., Faller R.K., Quinn T.E., Sicking D.L.: *Development of a retrofit, low-deflection, temporary concrete barrier system*. 2014.
25. Wu Y., Crawford J.E., Magallanes J.M.: *Performance of LS-DYNA Concrete Constitutive Models*. 12th Int. LS-DYNA Users Conf. 2012.
26. Jiang H., Zhao J.: *Calibration of the continuous surface cap model for concrete*. „Finite Elem. Anal. Des.", 97/2015.
27. Bruski D., Burzyński S., Chróścielewski J., Pachocki Ł., Wilde K., Witkowski W.: *The influence of position of the post or its absence on the performance of the cable barrier system*. MATEC Web Conf. 219, 2018.
28. Wilde K., Bruski D., Burzyński S., Chróścielewski J., Pachocki Ł., Witkowski W.: *Symulacje numeryczne jako wsparcie badania właściwości barier ochronnych*. „Magazyn Autostrady", 6/2018 doi:10.1177/1056492611419798.