

ANALIZA WPŁYWU DŁUGOŚCI SEGMENTU BETONOWEJ BARIERY OCHRONNEJ NA BEZPIECZEŃSTWO RUCHU DROGOWEGO

WACŁAW BORKOWSKI¹, ZDZISŁAW HRYCIÓW², PIOTR RYBAK³
JÓZEF WYSOCKI⁴, ANDRZEJ WIŚNIEWSKI⁵
Wojskowa Akademia Techniczna

Streszczenie

Niniejsza praca stanowi rozwinięcie problematyki bezpieczeństwa ruchu drogowego w aspekcie opracowania systemu betonowych barier ochronnych, rozpraszających energię zderzenia samochodu na drogach o dużym natężeniu ruchu i wysokim zagrożeniu wypadkowym, ze szczególnym uwzględnieniem jej podstawowych parametrów konstrukcyjnych (masy i długości segmentu). Głównym celem przeprowadzonych badań numerycznych było dokonanie oceny jakościowej i ilościowej skutków zderzenia samochodu z betonową barierą drogową zgodnie z obowiązującą normą EN 1317. Obliczenia przeprowadzono w systemie LS - DYNA wykorzystującego metodę elementów skończonych. Pojazd badany o masie 900 kg poruszał się z prędkością początkową 100 km/h, a następnie uderzał w system barier. Badania numeryczne zrealizowano dla segmentów betonowych o długościach: 2, 4, 6, 8 m, dla dwóch wybranych punktów zderzenia. Szczegółowych porównań wyników badań symulacyjnych, otrzymanych dla poszczególnych wariantów obliczeniowych, dokonano na podstawie przebiegów czasowych przyspieszeń wybranych punktów nadwozia samochodu, obliczonych na ich podstawie wskaźników, trajektorii ruchu pojazdu po zderzeniu, a także na podstawie zachowania się betonowej bariery ochronnej.

Słowa kluczowe: bezpieczeństwo bierne, testy zderzeniowe, betonowe bariery ochronne, symulacja komputerowa, LS-DYNA

Wprowadzenie

Dynamiczny rozwój infrastruktury drogowej, powstanie nowych odcinków tras szybkiego ruchu oraz zwiększenie liczby użytkowników i środków transportowych, powoduje zwiększenie intensywności ruchu drogowego, a w efekcie zwiększenie liczby zagrożeń

¹ Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny, ul. gen. S. Kaliskiego 2, 03-139 Warszawa, e-mail: borkowski@wat.edu.pl, tel. 22 683 95 31

² Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny, ul. gen. S. Kaliskiego 2, 03-139 Warszawa, e-mail: zhryciow@wat.edu.pl, tel. 22 683 74 03

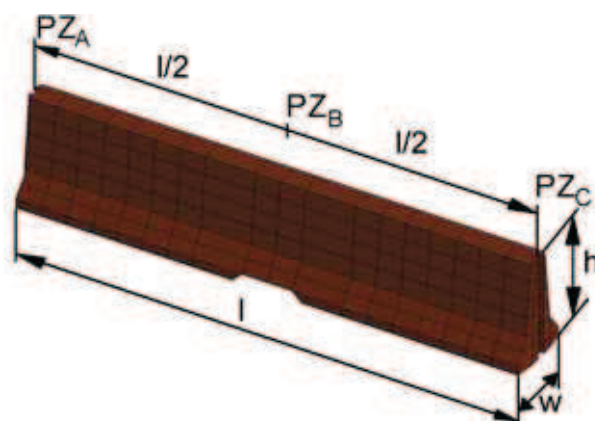
³ Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny, ul. gen. S. Kaliskiego 2, 03-139 Warszawa, e-mail: prybak@wat.edu.pl, tel. 22 683 97 52

⁴ Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny, ul. gen. S. Kaliskiego 2, 03-139 Warszawa, e-mail: jwysocki@wat.edu.pl, tel. 22 683 74 03

⁵ Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny, ul. gen. S. Kaliskiego 2, 03-139 Warszawa, e-mail: wisniewskia@wat.edu.pl, tel. 22 683 97 52

i kolizji drogowych. Uczestniczą w nich wszelkiego rodzaju pojazdy, o zróżnicowanym stanie technicznym, obsługiwane przez kierowców o różnorodnym doświadczeniu. Istotnym problemem są młodzi kierowcy, o małym stażu, impulsywni, niekiedy aroganccy, przekraczający przepisy ruchu drogowego, dosyć często kierujący pojazdami pod wpływem środków odurzających. W celu poprawy warunków bezpieczeństwa oraz minimalizacji skutków wypadków na drogach, w wielu ośrodkach naukowych, prowadzi się intensywne badania eksperymentalne [9, 10] i symulacyjne [3-8] dzięki którym, możliwe jest zmniejszenie skutków kolizji drogowych. Niniejsza praca stanowi rozwinięcie problematyki bezpieczeństwa ruchu drogowego w aspekcie opracowania systemu betonowych barier ochronnych, rozpraszających energię zderzenia samochodu na drogach o dużym natężeniu ruchu i wysokim zagrożeniu wypadkowym, ze szczególnym uwzględnieniem jej podstawowych parametrów konstrukcyjnych (masy i długości segmentu). Do badań numerycznych wykorzystano dwa modele dyskretne, opisane w pracach [4, 5, 6, 7, 8, 11]:

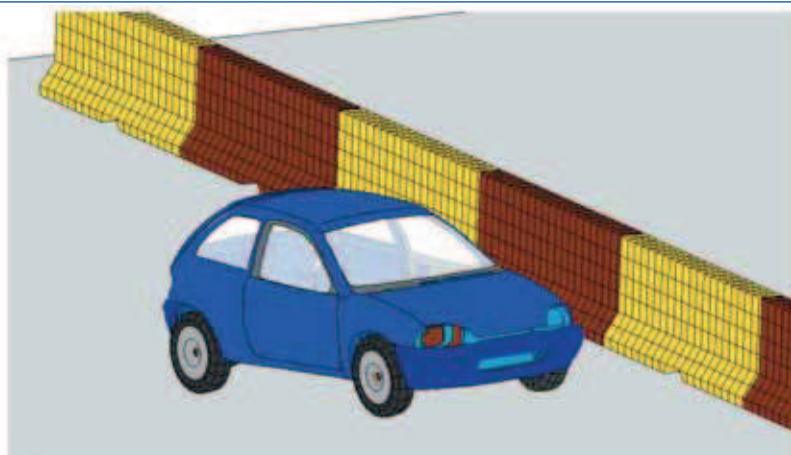
- model systemu betonowych barier, wraz podłożem [4, 8], rys. 1;
- model samochodu Suzuki Swift[11], rys. 3.



Rys. 1. Schemat segmentu betonowej bariery ochronnej: PZA, B, C – punkt zderzenia, początek, środek, koniec segmentu; l ($l/2$) – długość segmentu (połowa segmentu); $h = 810$ mm – wysokość segmentu; $w = 550$ mm – szerokość segmentu

Betonowy system ochronny składa się z segmentów tworzących barierę o długości około 60 m (rys. 2). Każdy z segmentów (rys. 1) stanowi fragment betonowej bariery o stałej wysokości 810 mm i szerokości podstawy 550 mm oraz różnych długościach segmentów (2, 4, 6, 8 m). Model pojedynczego segmentu bariery złożony jest z 524 nieodkształcalnych elementów typu SOLID [12]. Poszczególne segmenty bariery połączone są poprzez sprzęg, którego zadaniem jest przenoszenie sił pomiędzy segmentami przy jednoczesnym zapewnieniu ich wzajemnego obrotu [7].

Model dyskretny pojazdu wraz z betonową barierą ochronną przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Model samochodu Suzuki Swift wraz z betonową barierą [4]

1. Cel i zakres badań

Głównym celem przeprowadzonych badań numerycznych było dokonanie oceny jakościowej i ilościowej skutków zderzenia samochodu z betonową barierą drogową, w której zmieniano długość segmentu (tabela 1) oraz punkt zderzenia (tabela 2).

Tabela 1. Wybrane punkty zderzenia (PZ) zorientowane na segmencie bariery betonowej

Punkt zderzenia PZ	Długość segmentu [m]			
	2	4	6	8
Początek segmentu - PZ _A	✓			✓
Środek segmentu - PZ _B	✓	✓	✓	✓
Koniec segmentu - PZ _C	✓			✓

Tabela 2. Wybrane parametry obliczeniowe segmentu oraz bariery ochronnej wykorzystywane w badaniach symulacyjnych

Segment		Bariera ochronna			
Długość [m]	Masa [kg]	Długość [m]	Lokalizacja punktu zderzenia PZ [m]		
			PZ _A	PZ _B	PZ _C
2	1140	60	20,4	21,1	22,2
4	2335	60	-	22,3	-
6	3540	60	-	20,9	-
8	4740	64	24,6	28,3	31,6

Warunki badań zderzeniowych dla modelu samochodu badawczego przedstawiono w tabeli 3. Przyjęto również, że samochód w każdym teście uderza w barierę przodem, lewą stroną.

Tabela 3. Warunki badań zderzeniowych dla modelu samochodu badawczego wg PN-EN 1317-2

Samochód badawczy	Masa [kg]	Parametry zderzenia		Rodzaj badania	Poziom powstrzymania
		prędkość [km/h]	kąt [°]		
Suzuki Swift	900	100	20	TB11	N2

2. Badania symulacyjne

Badania symulacyjne wykonano w systemie LS - DYNA [3-8, 12] zgodnie z wymaganiami zawartymi w obowiązującej normie EN 1317 [1, 2]. W wyniku przeprowadzonych testów zderzeniowych uzyskano przebiegi czasowe przyspieszeń i prędkości środka masy samochodu, które posłużyły do oceny zachowania się samochodu badawczego oraz betonowej bariery. Do oceny wykorzystano następujące wskaźniki [2]: bezwymiarowy wskaźnik intensywności przyspieszenia ASI (*Acceleration Severity Index*) obliczany według zależności (1) oraz ugięcie dynamiczne (D) i szerokość pracującą (W) bariery. Wymienione zależności zdefiniowane są w [1].

$$ASI = \max \left(\sqrt{\left(\frac{\bar{a}_x(t)}{\hat{a}_x} \right)^2 + \left(\frac{\bar{a}_y(t)}{\hat{a}_y} \right)^2 + \left(\frac{\bar{a}_z(t)}{\hat{a}_z} \right)^2} \right), \quad (1)$$

gdzie:

$$\bar{a}_{x,y,z}(t) = \frac{1}{\delta} \int_t^{t+\delta} a_{x,y,z} dt, \quad (2)$$

$\bar{a}_{x,y,z}(t)$ – składowe przyspieszeń środka masy pojazdu [g],

$\hat{a}_{x,y,z}$ – wartości graniczne przyspieszeń dla poszczególnych kierunków, wynoszą one odpowiednio 12, 9, 10 g dla kierunku wzdłużnego (x), poprzecznego (y) i pionowego (z),

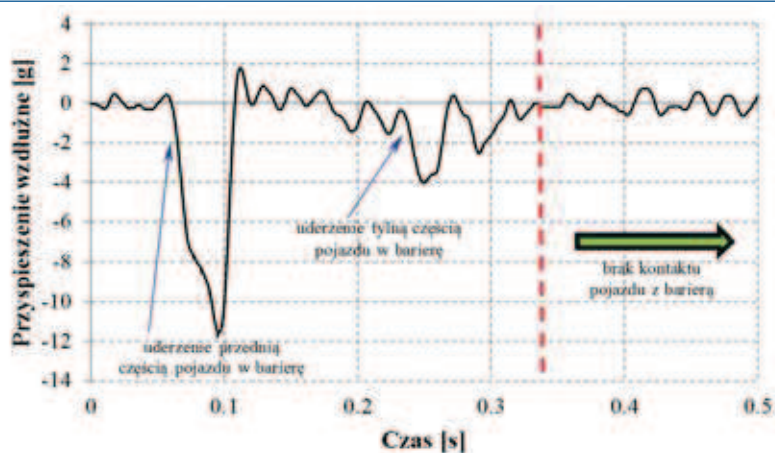
δ – ruchomy przedział czasu ($\delta = 0,05$ s).

Na rys. 3 przedstawiono wybrany przebieg wzdłużnych przyspieszeń środka masy samochodu w funkcji czasu, dla betonowej bariery złożonej z segmentów czterometrowych, na którym wyróżniono, trzy charakterystyczne strefy czasowe:

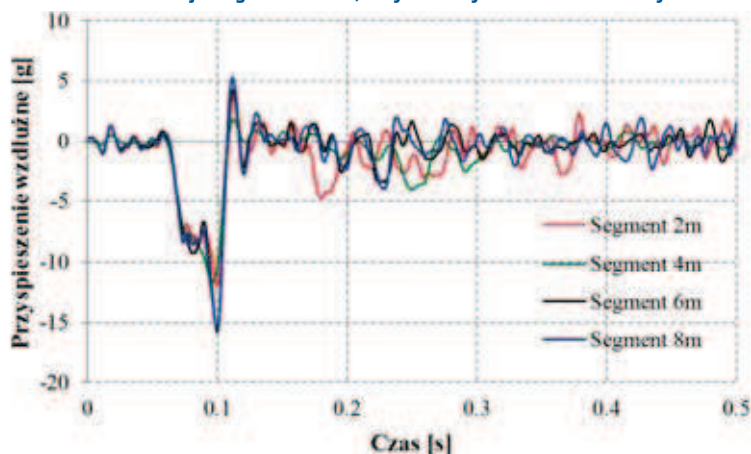
- **pierwsza**, obejmująca czas dojazdu samochodu do punktu zderzenia z barierą;
- **druga**, od chwili zderzenia z barierą przodem samochodu do zderzenia tyłem;
- **trzecia**, obejmuje brak kontaktu samochodu z barierą – samochód porusza się w zakłamanym obszarze odbicia.

W zależności od rozpatrywanej długości bariery i miejsca uderzenia, czas trwania poszczególnych faz różni się od siebie. Dla krótszych segmentów następuje szybsze obrócenie samochodu (również większy kąt) co w konsekwencji prowadzi do szybszego wystąpienia

chwili, w której tył samochodu uderza w barierę. Dla segmentów dwumetrowych widoczne jest ponadto dwukrotne uderzenie tego fragmentu pojazdu. W przypadku dłuższych segmentów, ta faza nie jest już tak wyraźna. Po pierwszym uderzeniu następuje wolniejszy obrót samochodu i segmentów bariery. W rezultacie następuje zetknięcie lewego boku samochodu z barierą i jego prowadzenie po powierzchni zewnętrznej segmentów. W tym przypadku, utrata kontaktu samochodu z barierą występuje później. Widoczne jest to również na przebiegach przyspieszeń wzdłużnych samochodu (rys. 4). W odróżnieniu od krótszych segmentów, dla długich nie jest tak wyraźny przyrost opóźnienia w tym obszarze.



Rys. 3. Przebieg wzdłużnych przyspieszeń środka masy samochodu w funkcji czasu, dla betonowej bariery złożonej z segmentów 4 m, z wyróżnionymi strefami czasowymi



Rys. 4. Przebiegi wzdłużnych przyspieszeń środka masy samochodu w funkcji czasu, podczas próby z betonową barierą złożoną z segmentów o różnych długościach (2, 4, 6, 8 m)

Podobny charakter przebiegu, z wyróżnieniem trzech stref czasowych, otrzymano dla pozostałych konfiguracji bariery, zauważone zmiany dotyczyły strefy drugiej i trzeciej. Charakter zmian zilustrowano na rys. 4.

Przykładowe wartości bezwymiarowego wskaźnika intensywności przyspieszenia ASI, obliczone na podstawie przebiegów czasowych przyspieszeń (x , y , z) środka masy samochodu według zależności (1 i 2) przedstawiono w tabeli 4 oraz w postaci histogramu (rys. 5). Dla zrealizowanych badań zderzeniowych (tabela 4) otrzymano wartości wskaźnika ASI = 1.24 – 1.45. Dla barier złożonych z segmentów 2 i 4 m, poziom intensywności zderzenia osiągnął zakres normatywnego poziomu B ($1 < \text{ASI} \leq 1,4$), natomiast dla barier złożonych z segmentów 4 i 8 m. intensywności zderzenia jest zgodna z poziomem C ($1,4 < \text{ASI} \leq 1,9$) w jego dolnych granicach [2].

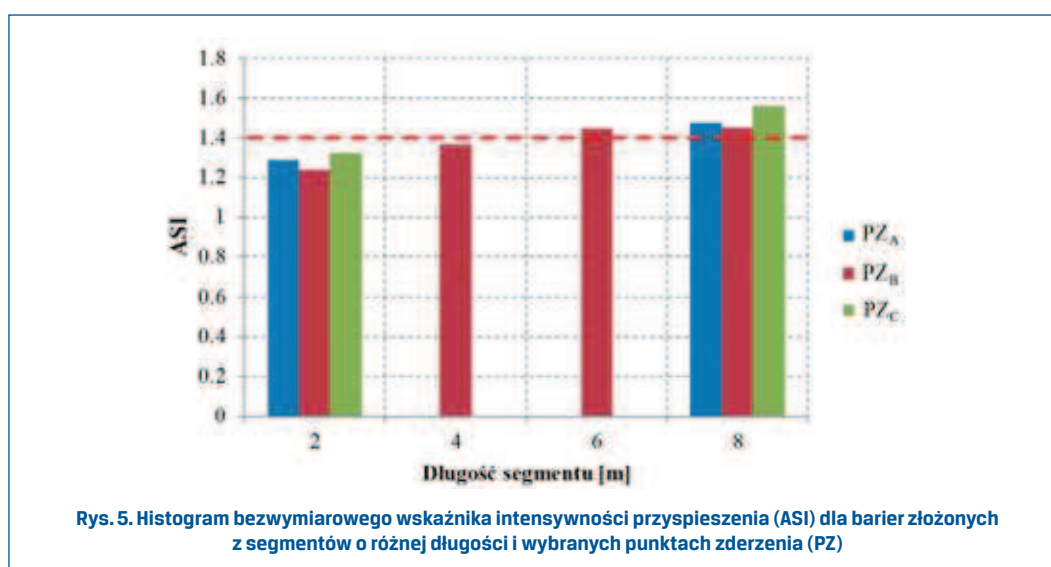
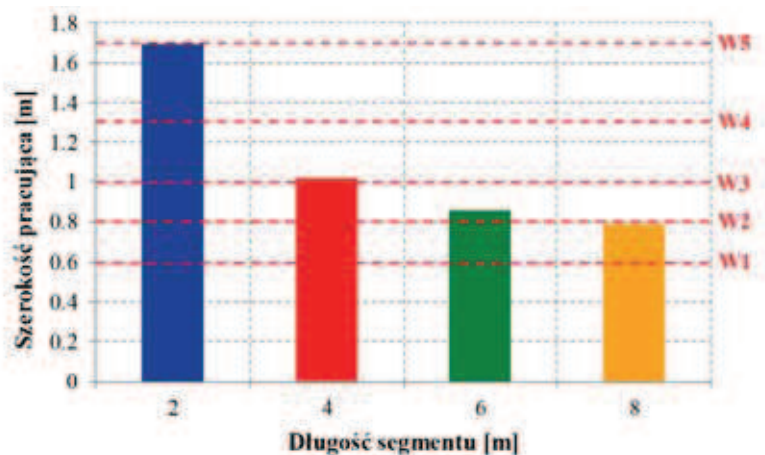


Tabela 4. Wartości bezwymiarowego wskaźnika intensywności przyspieszenia ASI i szerokości pracującej W dla betonowej bariery ochronnej złożonej z segmentów o różnej długości przy uderzeniu w środek segmentu (PZ_B)

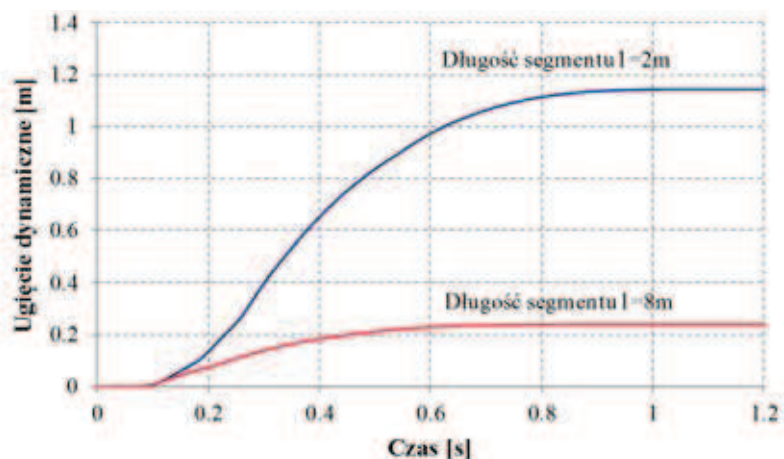
Lp.	Betonowa bariera złożona z segmentów	Wskaźnik intensywności przyspieszenia ASI	Szerokością pracująca W [m]	Ugięcie dynamiczne D [m]
1	2 m	1,24	1,69	1,14
2	4 m	1,37	1,07	0,52
3	6 m	1,44	0,85	0,3
4	8 m	1,45	0,79	0,24

Odształcenie systemu powstrzymującego złożonego z betonowych segmentów scharakteryzowano ugięciem dynamicznym (D) i szerokością pracującą (W). Wyniki badań przedstawiono na rys. 6 i 7 oraz w tabeli 4.

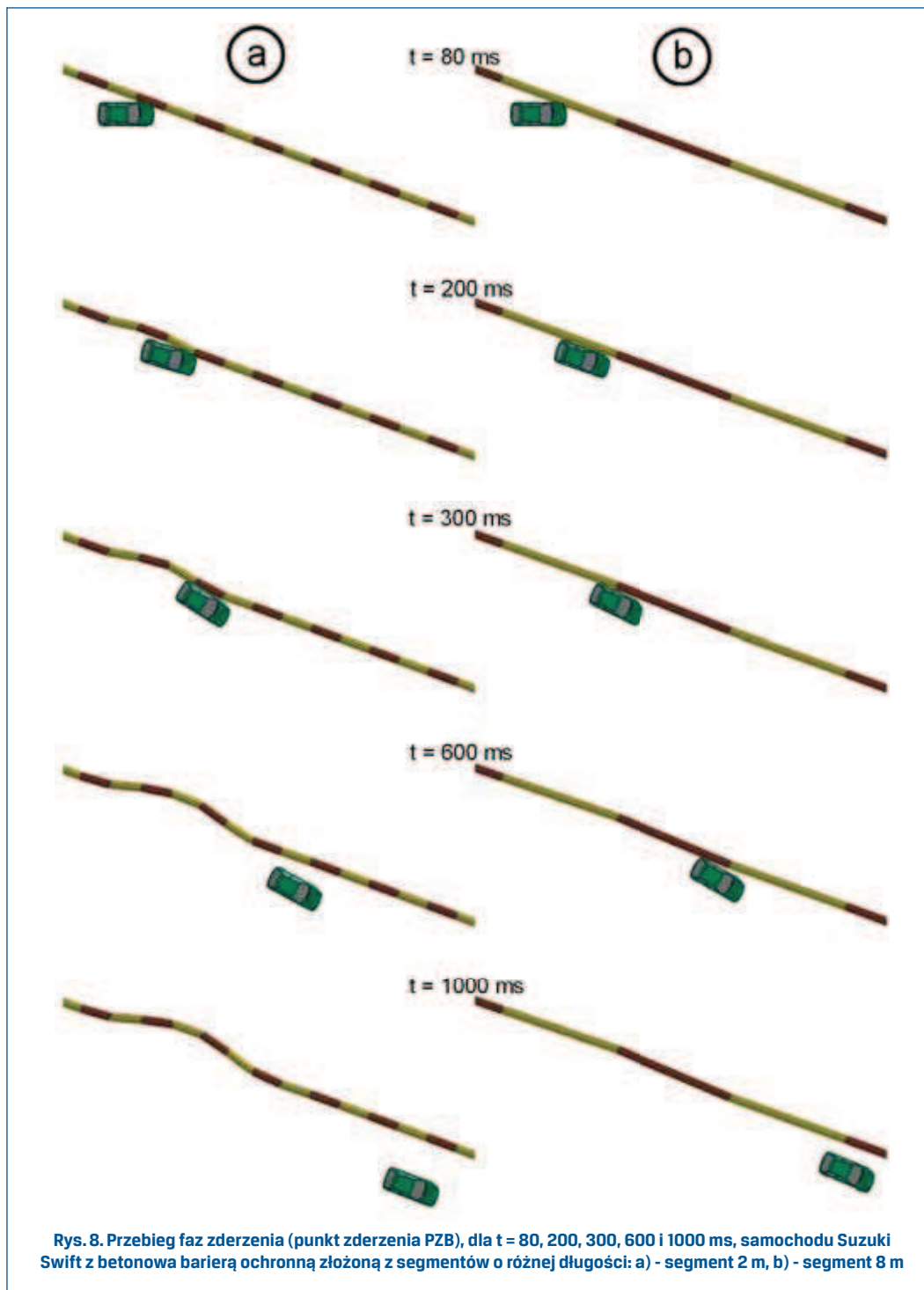


Rys. 6. Szerokość pracująca (W) betonowej bariery ochronnej dla różnej długości segmentu

Zaobserwowane wartości szerokości pracującej (W) zmieniają się w granicach 0,79 – 1,69 m, co odpowiada czterem klasom normatywnym W2 – W5 [2]. Na uwagę zasługują wartości ugięcia dynamicznego D, które mają istotny wpływ na badaną szerokość pracującą. W analizowanych przypadkach stwierdzono zmiany w granicach 0,24 – 1,14 m, przy czym dolna granica dotyczy bariery złożonej z segmentów o długości 8 m, a górna dla bariery z segmentami dwumetrowymi.



Rys. 7. Ugięcia dynamiczne betonowej bariery ochronnej dla dwóch długości segmentów



Dla zilustrowania (rys. 8) przebiegu zderzenia samochodu z betonową barierą ochronną (w dwóch wariantach: z segmentem 2 m – rys. 8a i 8 m – rys. 8b) przedstawiono ich wzajemne położenie, dla wybranych faz ruchu:

- początek symulacji przyjęto dla $t = 0$ ms,
- dojazd samochodu do bariery w $0 < t < 80$ ms
- rozpoczęcie fazy kontaktu samochodu (lewy przód) z barierą dla $t = 80$ ms,
- ciągłej deformacji karoserii (lewy przód i bok samochodu) i zmiany geometrii bariery dla $t = 200$ ms,
- zmiany obszaru kontaktu samochodu (lewy tył) z barierą dla $t = 300$ ms,
- wyjście samochodu z obszaru wzajemnego kontaktu z odkształconą barierą do $t = 600$ ms,
- dalszy ruch samochodu odbywający się w tzw. pasie odbicia.

W zależności od takich czynników jak długość bariery (a tym samym jej masa) oraz miejscem na segmencie, w który uderza samochód, chwile wystąpienia i czas trwania poszczególnych faz różnią się. Najszybsze zmiany następują dla bariery złożonej z krótszych elementów. Ze względu na większe przesunięcia i obroty krótkich segmentów następuje większy obrót samochodu. W efekcie szybciej traci on kontakt z barierą. Niestety, związane jest to jednocześnie ze zwiększeniem kąta odbicia (kąta pomiędzy kierunkiem ruchu samochodu po zderzeniu a linią bariery). W niektórych sytuacjach może to mieć negatywne konsekwencje. Z punktu widzenia spełnienia wymagań normatywnych, może to doprowadzić do naruszenia określonego w normie (EN 1317) dopuszczalnego pola odbicia. W warunkach rzeczywistych może natomiast doprowadzić do niekontrolowanego przejechania samochodu na pas o przeciwnym kierunku ruchu i zaistnienia wtórnego zderzenia z innym pojazdem.

Analizując przemieszczenia segmentów bariery można stwierdzić, że stosowanie krótszych elementów sprzyja tworzeniu się tzw. krzywej łańcuchowej. Sprzyja to rozpraszaniu energii zderzenia, czego skutkiem są mniejsze wartości opóźnień rejestrowanych podczas testów. Stosowanie długich segmentów ogranicza możliwości ich wzajemnego przemieszczania, a tym samym prowadzi również do wzrostu działających sił i przyspieszeń.

3. Podsumowanie

Wyniki wielowariantowych badań symulacyjnych, z wykorzystaniem zaawansowanych systemów numerycznych, potwierdziły wpływ długości segmentu oraz punktu zderzenia (PZ) na przebieg i skutki zderzenia, stanowią również istotne uzupełnienie poprzednich publikacji [3 – 8]. Wybór samochodu o masie 900 kg podyktowany został jego dużą popularnością na europejskim rynku samochodów osobowych oraz wytycznymi zawartymi w aktach normatywnych [2], gdzie badanie TB11 (obejmujące samochody o masie całkowitej 900 kg) występuje na poziomach powstrzymania normalnego N2, podwyższonego H1, H2 i H3 oraz powstrzymania bardzo wysokiego H4a H4b [2]. Metodyka obliczeń numerycznych z powodzeniem może być wykorzystana przy projektowaniu prototypowych i analizie istniejących rozwiązań betonowych systemów ochronnych. Autorzy mają świadomość, że prototypowy system ochronny musi spełnić wymagania normatywne [1, 2],

które sprawdzane są w trakcie badań eksperymentalnych, w certyfikowanych laboratoriach europejskich.

Literatura

- [1] PN-EN 1317-1:2001: *Systemy ograniczające drogę - Część 1: Terminologia i ogólne kryteria metod badań*
- [2] PN-EN 1317-2:2001: *Systemy ograniczające drogę - Część 2: Klasy działania, kryteria przyjęcia badań zderzeniowych i metody badań barier ochronnych.*
- [3] BORKOWSKI W., HRYCIÓW Z., RYBAK P., WYSOCKI J.: *The researches of effectiveness of Road restraint Systems*, Journal of KONB i N, No1(13)2010, Safety and Reliability Systems, str.53-64,Warsaw, 2010.
- [4] BORKOWSKI W., HRYCIÓW Z., RYBAK P., WYSOCKI J.: *Ocena wpływu rodzaju podłoża na zachowanie betonowej bariery ochronnej*, Górnictwo Odkrywkowe nr 4/2010, str. 226-229, Wrocław, 2010.
- [5] BORKOWSKI W., HRYCIÓW Z., RYBAK P., WYSOCKI J.: *Simulation tests on shaping the working width of the concrete protective systems*. Journal of Kones vol. 17, nr 2/2010, str. 43-50, Warszawa 2010.
- [6] BORKOWSKI W., HRYCIÓW Z., RYBAK P., WYSOCKI J.: *Numerical simulation of the standard TB11 and TB32 tests for a concrete safety barrier*. Journal of Kones vol. 17, nr 4/2010, str. 63-71, Warszawa 2010.
- [7] BORKOWSKI W., HRYCIÓW Z., RYBAK P., WYSOCKI J.: *Prototype articulated joint in connections of the concrete protective barrier*. Journal of KONES vol. 18, no 1, Warsaw 2011, str. 85-92.
- [8] BORKOWSKI W., HRYCIÓW Z., RYBAK P., WYSOCKI J.: *Analiza skuteczności betonowych barier ochronnych na łuku drogi*. Przegląd Mechaniczny nr 7-8'12. Warszawa 2012, str. 21-24.
- [9] WICHER J.: *Bezpieczeństwo samochodów i ruchu drogowego*. WKŁ, Warszawa 2004.
- [10] WICHER J.: *Rozpraszanie energii kinetycznej samochodu przez przesuwoną betonową barierę drogową*. Archiwum Motoryzacji 1/2011, Warszawa 2011, s. 97-115.
- [11] <http://www.ncac.gwu.edu/>
- [12] HALLQUIST J. O.: *LS-DYNA. Keyword User's Manual*, V971 R4 Beta, LSTC Co., CA, USA 2009.
- [13] STURTA R., FELLA C.: *The relationship of injury risk to accident severity in impacts with roadside barriers*. International Journal of Crashworthiness Volume 14, Issue 2, 2009.