LESŁAW KWAŚNIEWSKI<sup>1)</sup>

## ANALIZA DYNAMICZNA ODDZIAŁYWANIA RUCHOMEGO KOŁA NA POKRYWĘ STUDNI KABLOWEJ

**STRESZCZENIE.** W pracy przedstawiono wyniki symulacji komputerowych interakcji pomiędzy przejeżdżającym kołem a betonową pokrywą studni kanalizacji kablowej. Wykorzystując najnowsze możliwości programów numerycznych opartych na Metodzie Elementów Skończonych z jawnym schematem całkowania po czasie, zagadnienie rozwiązano w sposób jak najlepiej oddający jego rzeczywisty charakter. W modelu numerycznym uwzględniono wzajemne oddziaływanie kontaktowe pomiędzy obracającym się, trójwymiarowym, pneumatycznym kołem a złożoną z trzech materiałów; betonu, żeliwa i stali zbrojonej, odkształcalną konstrukcją pokrywy. Rozpatrzono jedenastkę przypadków, różniących się sposobem i poziomem obciążenia, usytuowaniem pokrywy względem powierzchni najazdu, i typem modelu materiałowego dla części betonowej. Otrzymane wyniki pozwalają na oszacowanie maksymalnych naprężeń i określenie współczynnika dynamicznego obciążenia, wyrażającego względny wzrost wielkości opisujących odpowiedź konstrukcji ze względu na efekty dynamiczne.

### 1. WSTĘP

Efektom przecinania się kierunków telekomunikacyjnej kanalizacji kablowej i sieci dróg jest częste występowanie w ciągu drogi zwieńczeń studni kablowych. Uszkodzenia pokryw studni kablowych stwarzają problemy techniczne i ekonomiczne dla służb odpowiedzialnych za stan nawierzchni i mogą być zagrożeniem dla bezpieczeństwa

<sup>1)</sup> dr inż. – Wydział Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej

użytkowników dróg. Wymagania techniczne i eksploatacyjne dla kanalizacji kablowej określają głównie normy zakładowe operatorów [1]. Podstawowym dokumentem określającym zasady badania i konstruowania zwieńczeń wpustów i studzienek jest Polska Norma PN-EN 124:2000 [2], która określa min. podział na klasy wytrzymałościowe, sposób badania oraz wymagane poziomy obciążenia dla poszczególnych klas. Badanie polega na quasi-statycznym wciskaniu sztywnego stempla o określonych wymiarach, umieszczonego centralnie na badanej pokrywie, podpartej wzdłuż obwodu. Należy określić obciążenie niszczące oraz trwałe odkształcenie, występujące po pięciokrotnym obciążeniu do poziomu  $2/3$  obciążenia badawczego, wymaganego dla danej klasy. Trwałe odkształcenie określa się na podstawie pomiaru ugięcia, które porównuje się z wymiarami geometrycznymi pokrywy, wyrażonymi przez średnicę koła wpisanego w obrys pokrywy.

Z powodu braku publikacji bezpośrednio dotyczących rozpatrywanego tutaj zagadnienia, czyli analizy oddziaływań między kołem a pokrywą studni kanalizacyjnej, należy odnieść się do szerokiej literatury poświęconej pokrewnym zagadnieniom interakcji między pojazdem a nawierzchnią drogową. Prace, w których w sposób obliczeniowy analizuje się rozkłady naprężeń i odkształceń w podłożu, od obciążenia imitującego oddziaływanie koła, można podzielić generalnie na dwie grupy: prace analityczne i numeryczne. Do pierwszej grupy należą prace, w których stosuje się dla podłoża wyidealizowane modele obliczeniowe, oparte na teorii płyt i teorii sprężystości. Oddziaływanie pojazdu jest reprezentowane przez nieruchome lub przemieszczające się obciążenia punktowe, liniowe lub ciśnienie. Rozwiązania są uzyskiwane analitycznie lub pół-analitycznie przy pomocy szeregów i transformat. Przegląd tego typu prac można znaleźć w [3] i [4]. Ogólnie można stwierdzić, że są to prace oparte na dużych uproszczeniach w założeniach, ale charakteryzujących się dużą dokładnością samych rozwiązań. Niektóre z takich rozwiązań (np. [4] i [5]) mogą posłużyć jako materiał porównawczy, do weryfikacji modeli numerycznych.

Do drugiej grupy należą prace, w których modele obliczeniowe mają bardziej realistycznie odzwierciedlać fizyczny aspekt zagadnienia, ale rozwiązanie jest oparte na metodach przybliżonych, głównie na metodzie elementów skończonych. Rozległą bibliografię, zawierającą ponad dwieście cytowań prac opublikowanych w latach 1994-97, zawarto w [6]. Podstawowym rozróżnieniem wśród stosowanych podejść numerycznych jest sposób, w jaki uwzględnia się w modelu dyskretnym, wielowarstwowy ośrodek reprezentujący konstrukcję nawierzchni i jak reprezentowane jest obciążenie pochodzące od koła. W wielu, także współczesnych pracach, podłoże jest modelowane dwuwymiarowymi elementami jak dla płaskiego stanu naprężenia [7], [8]. Mniej liczne są prace, gdzie konstrukcja nawierzchni jest reprezentowana przez trójwymiarowy wycinek zbudowany z elementów bryłowych [9], [10]. Stosowane są głównie modele konstytutywne sprężyste [10] i lepko-sprężyste [7]. Obciążenie statyczne [7] lub pulsacyjne [10] jest najczęściej reprezentowane jako równomiernie rozłożone na powierzchni dla modeli 3D [9] lub liniowe dla modeli płaskich [8]. Nieliczne są prace, w których oddziaływanie koła jest przedstawione jako przemieszczające się obciążenie rozłożone, np. w postaci kontaktu z uwzględnieniem składowych poprzecznych i podłużnych [10]. Z kolei prace, w których nacisk jest

położony na odzwierciedlenie rzeczywistych naprężeń kontaktowych w bliskim sąsiedztwie pod kołem, ograniczają się do zagadnień statycznych [10]. Założenia upraszczające, dotyczące kształtu i wymiarów powierzchni docisku i rozkładu obciążenia, oparte są na skomplikowanych badaniach eksperymentalnych z zastosowaniem specjalnie skonstruowanych urządzeń pomiarowych [11], [12]. Zdecydowana większość autorów wykorzystuje komercyjne programy numeryczne oparte na MES, takie jak ABAQUS [9], ADINA [10], ANSYS [7].

Celem prezentowanej pracy było określenie rozkładu naprężeń, przemieszczeń i odkształceń w przekrojach wybranej pokrywy pod przejeżdżającym kołem obciążonym zadaną siłą. Nie ograniczono rozważań do warunków panujących w trakcie quasi-statycznego badania normowego, ale uwzględniono także ekstremalne warunki panujące w czasie eksploatacji. Wykorzystując najnowsze możliwości symulacji komputerowych, zagadnienie rozwiązano w sposób jak najlepiej oddający rzeczywisty charakter wzajemnego oddziaływania pomiędzy obracającym się kołem a złożoną z trzech materiałów, betonu, żeliwa i stali zbrojeniowej, odkształcalną konstrukcją pokrywy. Otrzymane wyniki mają pozwolić na oszacowanie maksymalnych naprężeń i określenie współczynnika dynamicznego obciążenia, wyrażającego względny wzrost wielkości opisujących odpowiedź konstrukcji ze względu na efekty dynamiczne.

Symulacje komputerowe wykonano za pomocą komercyjnego programu LS-DYNA, opartego na metodzie elementów skończonych [13]. W zasadniczej części, przeznaczonej do obliczeń dynamicznych, LS-DYNA jest programem typu explicit, z jawnym schematem całkowania równań ruchu przy pomocy metody różnic centralnych. Jest to program niezwykle przydatny w nieliniowej, trójwymiarowej analizie obiektów odkształcalnych, obejmującej odkształcenia niesprężyste, ze zniszczeniem włącznie. Program jest szeroko stosowany w przemyśle motoryzacyjnym i lotniczym do symulacji krótkotrwałych zdarzeń dynamicznych takich jak próby zderzeniowe. Wyróżnia się bogatą biblioteką modeli materiałowych oraz efektywnymi algorytmami kontaktu.

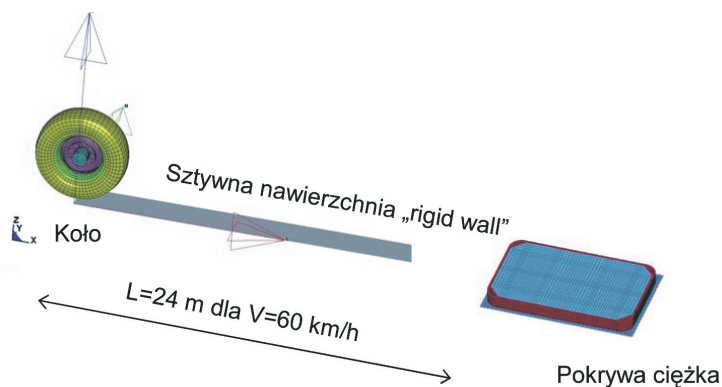
Do obliczeń wykorzystano klaster obliczeniowy znajdujący się na Wydziale Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej. Zastosowano wersję MPP (ang. *Massive Parallel Processing*) programu LS-DYNA, dedykowaną do obliczeń równoległych.

## 2. OPIS ZAGADNIENIA

### 2.1. ZAŁOŻENIA DO ANALIZY

Wszystkie prezentowane analizy i wyniki obliczeń, odnoszą się do tzw. pokrywy ciężkiej zwykłej (OCZ), o przewidywanej klasie wytrzymałości B125 [2], której wymiary i konstrukcja są opisane w [1]. W celu ograniczenia liczby elementów skończonych w modelu MES, i tym samym skrócenia czasu obliczeń, rozpatrywane podstawowe zagadnienie dynamiczne, jest reprezentowane przez trzy obiekty: model pokrywy, model koła i podłoża nieodkształcalne, znajdujące się pomiędzy położeniem

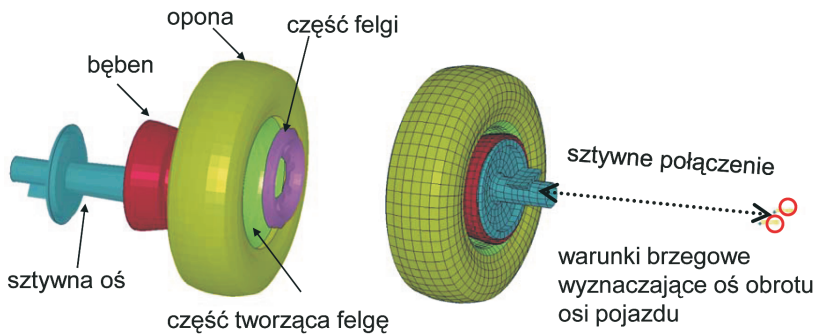
początkowym koła a pokrywą, oraz za pokrywą. Nieodkształcalne podłoże jest odwzorowane, jako warunek brzegowo-kontaktowy [14]. Rozważono oddziaływanie tylko pojedynczego koła samochodu ciężarowego na konstrukcję pokrywy, o zadanych parametrach dla materiałów sprężystych i niesprężystych. Schemat zadania przedstawiono na rysunku 1. Wybrane koło ma masę 94,2 kg, średnicę 768 mm, i ciśnienie wewnątrz opony 350 kPa. Oddziaływanie reszty pojazdu jest reprezentowane przez zadane obciążenie skupione o wielkości stałej w czasie, ale o wektorach przemieszczających się wraz z kołem. Obciążenie w postaci dwóch sił skupionych jest przyłożone do fragmentu sztywnej osi, w podłużnej płaszczyźnie symetrii opony. Wypadkowa tego obciążenia wynosi połowę lub około jedną czwartą standardowego obciążenia na oś  $P = 115$  kN [15], pomniejszoną o ciężar własny koła (wraz z uwzględnionym fragmentem osi). Należy podkreślić, że rozpatrywane tutaj obciążenie maksymalne jest znacznie wyższe od obciążeń rzeczywistych generowanych przez pojazdy wyposażone w tego typu koła. Największe obciążenia rzeczywiste są przenoszone na podłoże za pośrednictwem tylnych osi samochodów ciężarowych, najczęściej z podwójnymi kołami o większych rozmiarach [16]. Rozpatrywane w niniejszej pracy przypadki należy uznać za ekstremalne ukierunkowane na pokazanie doraźnych mechanizmów zniszczenia pokrywy.



Rys. 1. Konfiguracja początkowa dla modelu MES  
Fig. 1. Initial configuration of FE model

W momencie rozpoczęcia symulacji, koło zadaną początkową prędkością ruchu obrotowego i postępowego, toczy się, bez poślizgu, po sztywnej powierzchni. Prędkość ruchu posuwistego koła jest utrzymywana na stałym poziomie dzięki narzuceniu stałej w czasie prędkości sztywnej, nieobracaającej się części osi (rys. 2). Od chwili  $t = 0$  s przyłożone jest w kierunku pionowym, stałe w czasie, przyspieszenie ziemskie. Ponadto w początkowym okresie, wynoszącym 0,001 s, siła przyłożona do sztywnej osi, narasta liniowo od zera do wartości końcowej. Siła skupiona  $P$  pozostaje stała w dalszej części symulacji. Po ok. 1,4 s (w zależności od założonej prędkości ruchu postępowego) koło zjeżdża ze sztywnej nawierzchni na konstrukcję pokrywy. Konstrukcja pokrywy jest oparta na sztywnej, nieruchomej ramce (rys. 3) za pośrednictwem więzów jednostronnych, tj. kontaktu z tarciem. W okresie początkowym,

dzięki zastosowaniu dużego globalnego tłumienia, następuje redukcja drgań koła, wywołanych nagłym przyłożeniem obciążenia. W okresie tym następuje również „dopasowanie” do podłoża będącego w ruchu koła, dzięki zdefiniowaniu kontaktu z tarcie, między sztywnym podłożem a oponą. Opona odkształca się w wyniku oddziaływania z podłożem, a samo koło obraca się w sposób regularny. Zdefiniowano również odrębny kontakt pomiędzy górną powierzchnią pokrywy a oponą.



Rys. 2. Model MES koła samochodu Ford Econoline Van [17]

Fig. 2. FE model of wheel from Ford Econoline Van [17]



Rys. 3. Siatka elementów skończonych pokrywy ciężkiej, oraz części składowe: oparcie, rama z prętami zbrojeniowymi oraz wypełnienie betonowe

Fig. 3. FE mesh for selected cover of precast concrete manhole and its components: supporting frame, cast iron frame with rebars, concrete fill

## 2.2. MODEL KOŁA

Do zbudowania modelu koła wykorzystano fragment modelu MES samochodu Ford Econoline Van, opracowany przez National Crash Analysis Center (NCAC) na George Washington University [17]. Wykorzystany model numeryczny jest jednym z wielu modeli stosowanych w wirtualnych próbach zderzeniowych, które mogą być importowane nieodpłatnie z serwera NCAC. Zastosowany model MES koła przedstawiono na rysunku 2. Model składa się z następujących części: opony, dwóch części tworzących felgę, bębna i sztywnej osi. Wszystkie wymienione części są zbudowane z elementów powłokowych, przy czym elementy dla opony mają przypisany materiał liniowo-sprężysty z parametrami określonymi przez NCAC [17], dla osi zastosowano materiał sztywny, pozostałe części mają zadany model materiału sprężysto-plastyczny z parametrami jak dla stali węglowej. Obrót koła względem przesuwanej się sztywnej osi jest zdefiniowany przez warunek kinematyczny typu „Joint\_Revolute”. Ruch obrotowy kół w chwili  $t = 0s$  jest definiowany jako warunek początkowy, przez zadanie prędkości kątowej, odpowiedniej do założonej prędkości pojazdu i promienia koła. Dzięki zastosowaniu dostępnej w programie LS-DYNA specjalnej opcji „AIRBAG”, koła pojazdu są przedstawione w modelu jako trójwymiarowe obiekty hydrauliczne z zadaniem ciśnieniem wewnątrz opon [14]. Ponadto, aby utrzymać koło w położeniu pionowym, zadano odpowiednie warunki brzegowe do dwóch węzłów, sztywno związanych z osią obrotu i znajdujących się w połowie oryginalnej osi pojazdu (w płaszczyźnie symetrii samochodu), tak jak to pokazano na rysunku 2.

## 2.3. MODEL POKRYWY

Konstrukcja pokrywy O CZ o wymiarach odpowiednio  $997 \times 597 \times 80$  mm jest złożona z czterech części pokazanych na rysunku 3, tj. ramy żeliwnej, haczyków służących do podnoszenia, prętów zbrojeniowych oraz wypełnienia betonowego. Rama żeliwna i wypełnienie betonowe są modelowane ośmiowęzłowymi elementami bryłowymi, haczyki (mające znaczenie drugorzędne) elementami powłokowymi czterowęzłowymi, a pręty zbrojeniowe dwuwęzłowymi elementami belkowymi. Wymienione części składowe są ze sobą połączone poprzez wspólne węzły. Taki sposób połączenia odzwierciedla pełną interakcję między różnymi komponentami.

Monolityczna konstrukcja pokrywy jest wsparta na nieruchomej, płaskiej ramie (rys. 3), modelowanej elementami powłokowymi, z zadaniem materiałem idealnie sztywnym [14]. Na powierzchni styku, pomiędzy pokrywą a ramą wsporczą, zdefiniowano więzy jednostronne w postaci kontaktu z tarciami. Przyjęto współczynnik tarcia 0,6. Sama rama stanowiąca oparcie, jest zamocowana w czterech narożach, tak jak to przedstawiono schematycznie na rysunku 3.

## 2.4. MODELE KONSTITUTYWNE

Podstawowe parametry materiałowe dla części składowych pokrywy, przyjęte na podstawie opracowania [15], zestawiono w tablicy 1.



Tablica 1. Podstawowe właściwości materiałowe części składowych pokrywy  
Table 1. Basic material properties for cover components

Cześć składowa	Gęstość	Moduł Younga	Współczynnik Poissona	Wytrzymałość
[kg]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[GPa]	[-]	[MPa]
Rama żeliwna i haczyki	7800	115	0,27	225
Pręty zbrojeniowe	7850	205	0,30	350
Beton	2200	33,47	0,19	$f_c = 50$ $f_t = 4,08$

Dla stali zbrojeniowej i żeliwa zastosowano model materiału sprężysto-plastycznego ze wzmocnieniem, wykorzystujący warunek plastyczności Hubera-Misesa-Hencky'ego (HMH). Przyjęto odcinkowo liniowe aproksymacje zależności między naprężeniem a odkształceniem, z pominięciem wpływu prędkości odkształcenia.

O ile modelowanie właściwości mechanicznych metali nie sprawia trudności, o tyle uwzględnienie w obliczeniach, niesprężystych właściwości betonu, aż do momentu zniszczenia, jest ciągle dużym wyzwaniem dla modelowania numerycznego. Jako materiał jednocześnie kruchy i porowaty, beton niezbrojony wykazuje zróżnicowaną wytrzymałość na rozciąganie i ściskanie, nieliniowe zachowanie przy równomiernym trójosiowym ścisaniu i wzrost wytrzymałości na ścinanie przy wzroście równomiernego ściskania [18]. W niniejszej pracy zastosowano najnowszy, dostępny w programie LS-DYNA, model konstytutywny, oparty na pracach Malvara i Simonsa [19]. W rozpatrywanym modelu materiałowym, o oznaczeniu 72R3 [14], zastosowano opcję automatycznego generowania wszystkich potrzebnych danych wsadowych, na podstawie ustalonej przez użytkownika minimalnej liczby parametrów, na które składają się gęstość i wytrzymałość na ściskanie (oraz parametry potrzebne do konwersji jednostek). Program wyznacza potrzebne parametry, krzywe i równanie stanu, na podstawie obszernego zestawu danych eksperymentalnych.

Zastosowany model materiałowy jest oparty na opisie, w którym rozdzielono części kulistą i dewiatorową tensorów naprężenia i odkształcenia [19]. Zależność pomiędzy średnim naprężeniem  $p = -\frac{1}{3} \cdot \sigma_{ii}$  a zmianą objętości jest opisana równaniem stanu. W opisie dewiatorowym zależność pomiędzy naprężeniem a odkształceniem pozostaje sprężysta do momentu, gdy punkt opisujący stan bieżący w przestrzeni naprężeniowej, osiąga pierwszą powierzchnię graniczną  $s_y$ , odpowiadającą wstępnemu uplastycznieniu. Naprężenie może dalej wzrastać, aż do momentu osiągnięcia drugiej powierzchni granicznej, odpowiadającej naprężeniom maksymalnym  $s_m$ , a przy dalszym wzroście odkształceń spada, aż do momentu osiągnięcia trzeciej powierzchni granicznej, dla naprężeń resztkowych  $s_r$ . Proces obciążania może być opisany w ten sposób, że stan naprężenia wyznacza w przestrzeni naprężeniowej punkt na powierzchni bieżącej  $s$ , która przemieszcza się między trzema ustalonymi powierzchniami granicznymi, opisanymi, jako funkcje naprężenia średniego  $p$  z wykorzystaniem ośmiu parametrów  $a_i$  [19]:

$$s_y = a_{0,y} + \frac{P}{a_{1,y} + a_{2,y}P}, \quad (1)$$

$$s_m = a_0 + \frac{P}{a_1 + a_2P}, \quad (2)$$

$$s_r = \frac{P}{a_{1f} + a_{2f}P}, \quad (3)$$

gdzie  $s, s_y, s_m, s_r$  oznaczają różnice między ekstremalnymi naprężeniami głównymi. Parametry  $a_i$  są wyznaczone na podstawie danych eksperymentalnych z zastosowaniem metody regresji [18]. Obliczeniowo, powierzchnia bieżąca  $s$ , jest ekstrapolowana między powierzchnią naprężeń maksymalnych  $s_m$  i jedną z dwóch pozostałych [19]:

$$s = \eta(\lambda) (s_m - s_{\min}) + s_{\min} \quad (4)$$

gdzie:

$s_{\min} = s_y$  lub  $s_{\min} = s_r$ , w zależności od wartości odkształceń,

$\eta$  – jest funkcją zmodyfikowanej miary zastępczego odkształcenia plastycznego  $\lambda$ , które z pominięciem wrażliwości na prędkość deformacji może wyrażać się wzorem [19]:

$$\lambda = \int_0^{\varepsilon^p} \frac{d\varepsilon^p}{(1 + p / f_t)^{b_1}}, \quad (5)$$

gdzie:

$d\varepsilon^p$  – jest przyrostem zastępczego odkształcenia plastycznego,

$f_t$  – jest wytrzymałością na rozciąganie (przy jednoosiowym rozciąganiu),

$b_1$  – jest stałym współczynnikiem określającym charakter zmienności naprężeń w wyniku zniszczenia (tzw. *softening*), różnym dla ściskania i rozciągania.

Przyrost zastępczego odkształcenia plastycznego wyraża się wzorem:

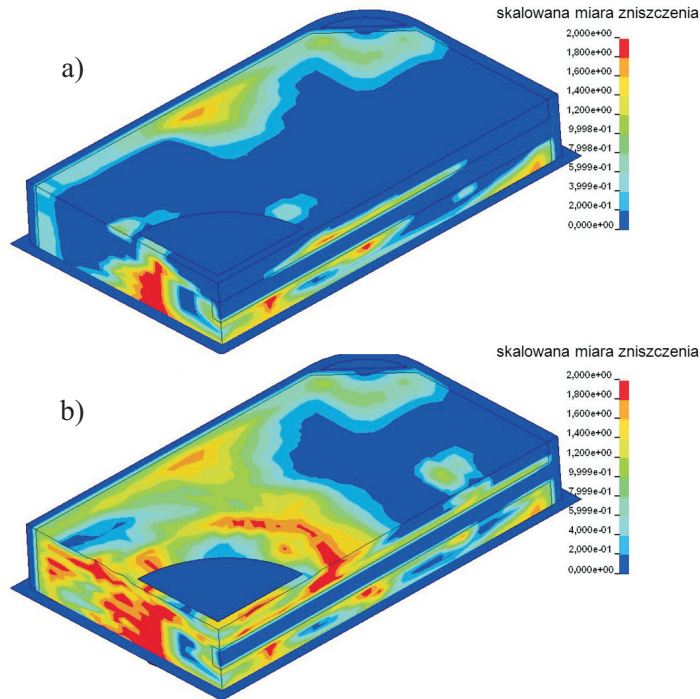
$$d\varepsilon^p = \sqrt{\frac{2}{3} d\varepsilon_{ij}^p d\varepsilon_{ij}^p}. \quad (6)$$

Zmodyfikowane zastępcze odkształcenie plastyczne  $\lambda$  (5) jest używane także do obliczania skalowanej miary zniszczenia  $\delta$  [14]:

$$\delta = \frac{2\lambda}{(\lambda + \lambda_m)}, \quad (7)$$



gdzie  $\lambda_m$  odpowiada maksimum funkcji  $\eta$  i określa moment osiągnięcia powierzchni granicznej  $s_m$ . Kontury, (mapy) skalowanej miary zniszczenia  $\delta$  identyfikują potencjalny rozkład rys w betonie (rys. 4).



Rys. 4. Kontury skalowanej miary zniszczenia  $\delta$  (7) dla modelu wycinka  $\frac{1}{4}$  pokrywy: a) w momencie osiągnięcia maksymalnego obciążenia, b) po wyczerpaniu nośności  
 Fig. 4. Contours of scaled damage measure  $\delta$  (7) for quarter model: a) at the moment of maximum loading, b) after failure

W ostatnich latach wykonano wiele pracy w celu polepszenia korelacji pomiędzy modelem konstytutywnym 72R3 a wynikami laboratoryjnymi. Niektóre z usprawnień dotyczących powierzchni granicznych (1 - 3), doprowadziły do bardziej złożonych sformułowań opartych na trzech niezmiennikach i opisie segmentowym [19]. Szczegółowy opis samego modelu konstytutywnego i weryfikacja z badaniami laboratoryjnymi są przedstawione w [18] i [19].

### 3. WYNIKI OBLICZEŃ

#### 3.1. ZAKRES ANALIZY

Wykonano obliczenia dla serii 11 przypadków opisanych w tabelicy 2. Rozpatrywane przypadki są ze sobą logicznie powiązane i zebrane w pięciu grupach, oznaczonych S, 0, L, G, D.

Tablica 2. Opis rozpatrywanych przypadków obliczeniowych  
 Table 2. Description of considered computational cases

Lp.	Grupa	Przypadek	Opis	Model materiałowy dla betonu	Maksymalne obciążenie statyczne [kN]	Czas trwania symulacji [s]	Czas trwania kontaktu między kołem a pokrywą [s]	
1	S	S1	STEMPEL ¼ pokrywy	72R3 + zniszczenie	$P_u$	10	0,1 – 10	
2	0	01	Nieruchome koło	72R3	29,67	1,6	0 – 1,6	
3		02		72R3	57,50	1,6	0 – 1,6	
4		03		sprężysty	57,50	1,6	0 – 1,6	
5	L	L1	Ruchome koło 60 km/h $h = 0$ mm (pokrywa w licu powierzchni najazdu)	72R3	29,67	1,6	1,43 – 1,51	
6		L2		72R3	57,50	1,6	1,43 – 1,51	
7		L3		sprężysty	57,50	1,6	1,43 – 1,51	
8	G	G1	Ruchome koło 60 km/h $h = +10$ mm	72R3	29,67	1,6	1,43 – 1,51	
9		G2		72R3	57,50	1,6	1,43 – 1,51	
10	D	D1	Ruchome koło 60 km/h $h = -10$ mm	72R3	29,67	1,6	1,43 – 1,51	
11		D2		72R3	57,50	1,6	1,43 – 1,51	

W przypadku S1 rozpatrzono quasi-statyczne wciskanie sztywnego stempla zgodnie z wytycznymi normy [2]. Wykorzystując symetrię zadania, ograniczono model do  $\frac{1}{4}$  pokrywy.

Trzy przypadki z grupy 0 (zero), opisujące stan naprężeń i odkształceń pod nieruchomym kołem, stanowią materiał porównawczy dla pozostałych obliczeń. Określenie „nieruchome koło” zastosowane w tablicy 2 oznacza, że nie zadano prędkości w kierunku podłużnym. W rozpatrywanych przypadkach koło, ma możliwości przemieszczania się zgodnie z warunkami brzegowymi opisanymi w punkcie 2.2 (rys. 2).

Grupa L skupia trzy podstawowe przypadki obliczeniowe, w których koło przejeżdża po pokrywie z prędkością 60 km/h. W celach porównawczych rozpatrzono dwa poziomy obciążenia oraz model sprężysty. W tych przypadkach pokrywa znajduje się w licu powierzchni najazdu.

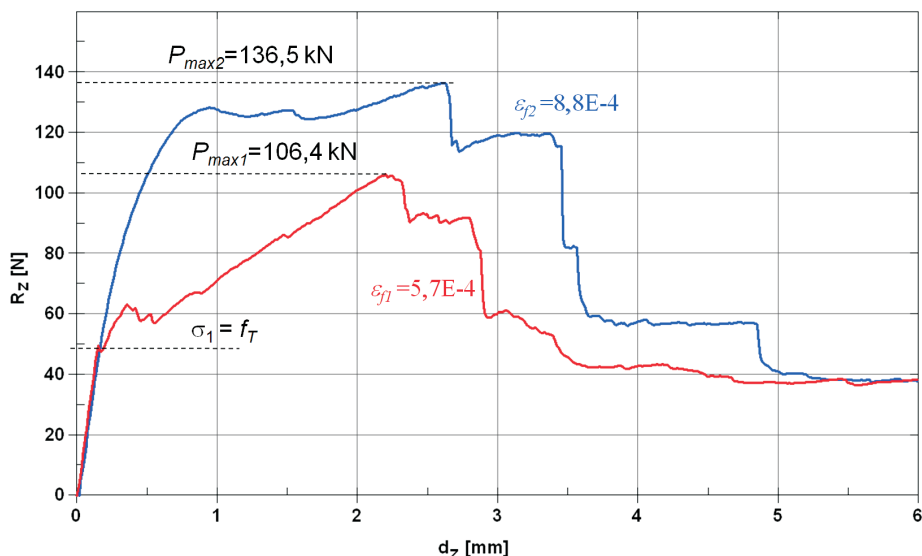
Po dwa przypadki skupione w grupach G i D uwzględniają błędy w ułożeniu pokrywy względem powierzchni najazdu. W przypadkach z grupy G, pokrywa jest wysunięta 10 mm do góry, a w przypadkach z grupy D 10 mm do dołu. Rozpatrzono każdorazowo dwa poziomy obciążenia 29,67 kN i 57,50 kN (z uwzględnieniem ciężaru własnego koła i fragmentu osi).

### 3.2. OBCIĄŻENIE STEMPEM

Na rysunkach 4 i 5 pokazano wyniki obliczeń dla modelu wycinka  $\frac{1}{4}$  pokrywy, obciążonego sztywnym stemplem. Od spodu, fragment ramy jest oparty na sztywnym podłożu, a od góry jest wciskany sztywny, okrągły stempel. Warunki podparcia i obciążenia odpowiadają warunkom, które występują przy próbach laboratoryjnych, prowadzonych zgodnie z normą [2]. Na powierzchniach przekrojów pionowych, zadano warunki wynikające z symetrii.

Na rysunku 5 przedstawiono tzw. ścieżki równowagi, wyrażające zależność między obciążeniem (dla całej płyty) a przemieszczeniem pionowym sztywnego stempla. Pokazano dwie krzywe, jedną otrzymaną dla standardowego zestawu parametrów dla modelu betonu, wygenerowanego automatycznie przez program, oraz drugą z modyfikacją dla fazy rozciągania, opisującą redukcję wytrzymałości betonu w wyniku pojawienia się rys. W drugim przypadku zwiększono odkształcenie niszczące (przy którym naprężenie rozciągające spada do zera) przy rozciąganiu z  $\varepsilon_{f1} = 5,7E-4$  do  $\varepsilon_{f2} = 8,8E-4$ , co znacznie zwiększyło obciążenie graniczne [19]. Ze względu na ułożenie zbrojenia w niewielkiej odległości od płaszczyzny obojętnej, zniszczenie pokrywy jest zdeterminowane przez wytrzymałość betonu na rozciąganie. Wyznaczone, dla obydwu zestawów danych, oszacowania obciążenia maksymalnego  $P_{\max 1} = 106,4$  kN i  $P_{\max 2} = 136,5$  kN występują przy zbliżonych przemieszczeniach  $d_{z1} = 2,2$  mm i  $d_{z2} = 2,8$  mm. Otrzymane wyniki pozostają w dobrej korelacji z wielkością  $P_{\max} = 118$  kN obliczoną numerycznie z wykorzystaniem programu ABAQUS i analizy statycznej [15]. Wyniki eksperymentalne, wymienione w pracy [1] wykazywały bardzo duży rozrzut, ze średnią wartością także poniżej poziomu wymaganego

dla danej klasy zwięźceń, w tym przypadku 125 kN. Na rysunku 5 zaznaczono również poziom obciążenia (ok. 49 kN), przy którym maksymalne naprężenie główne w betonie, osiąga wartość wytrzymałości na rozciąganie ( $\sigma_1 = f_T$ ). Ten poziom obciążenia można w przybliżeniu przyjąć za początek zarysowania części betonowej. Na rysunku 4 pokazano mechanizm zniszczenia pokrywy, związany z wyczerpaniem nośności w części betonowej. Przedstawiono kontury skalowanego parametru zniszczenia (7), w momencie osiągnięcia maksymalnego obciążenia i w fazie zniszczenia. Pokazane koncentracje parametru zniszczenia, wskazujące strefy zarysowania, są tutaj głównie spowodowane wyczerpaniem nośności betonu na rozciąganie i ścinanie.

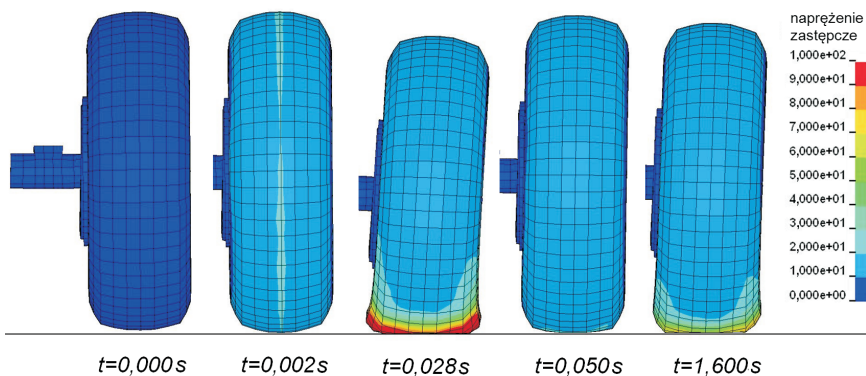


Rys. 5. Ścieżki równowagi dla dwóch zestawów danych dla betonu z  $\varepsilon_{f1} = 5,7E-4$  i  $\varepsilon_{f2} = 8,8E-4$   
Fig. 5. Load paths for two sets of input data for concrete with  $\varepsilon_{f1} = 5.7E-4$  and  $\varepsilon_{f2} = 8.8E-4$

### 3.3. OBCIĄŻENIE NIERUCHOMYM KOŁEM

W rozpatrywanych tutaj przypadkach obliczeniowych, oznaczonych jako grupa 0 w tabelicy 2, zamiast stemplem, konstrukcja pokrywy jest obciążana kołem przemieszczającym się tylko w kierunku pionowym. Koło nie doznaje wymuszonego przemieszczenia w kierunku poziomym (prędkość początkowa  $V_0 = 0 \text{ m/s}$ ) i jest umiejscowione centralnie nad konstrukcją pokrywy. Od chwili  $t = 0 \text{ s}$ , koło zaczyna się przemieszczać pionowo pod wpływem sił grawitacji i zadanego obciążenia  $P$ .

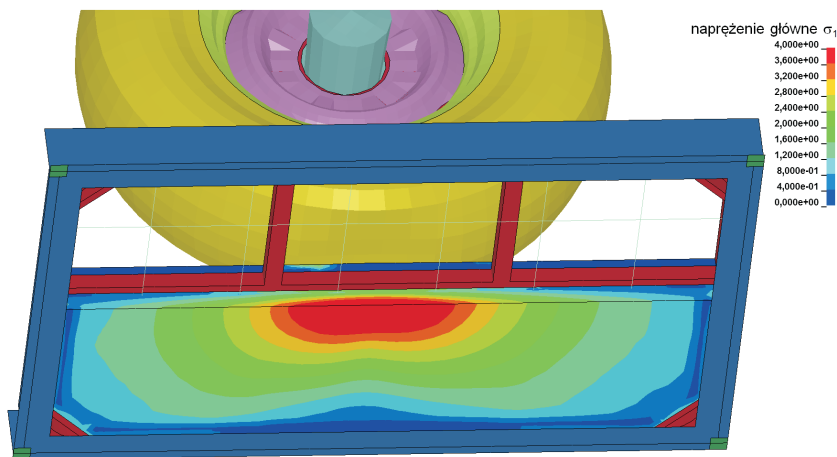
Na rysunku 6 przedstawiono deformacje opony, dla czterech wybranych momentów, w trakcie symulacji oddziaływania koła ze sztywnym podłożem. Stan ukazany w chwili  $t = 0,002 \text{ s}$ , pokazuje bezpośredni efekt działania ciśnienia wewnętrznego, realizowanego poprzez opcję „AIRBAG”. W wyniku działania przyjętego globalnego tłumienia, proporcjonalnego do prędkości węzłowych, ruch pionowy koła szybko zanika i jest osiągnięta równowaga statyczna.



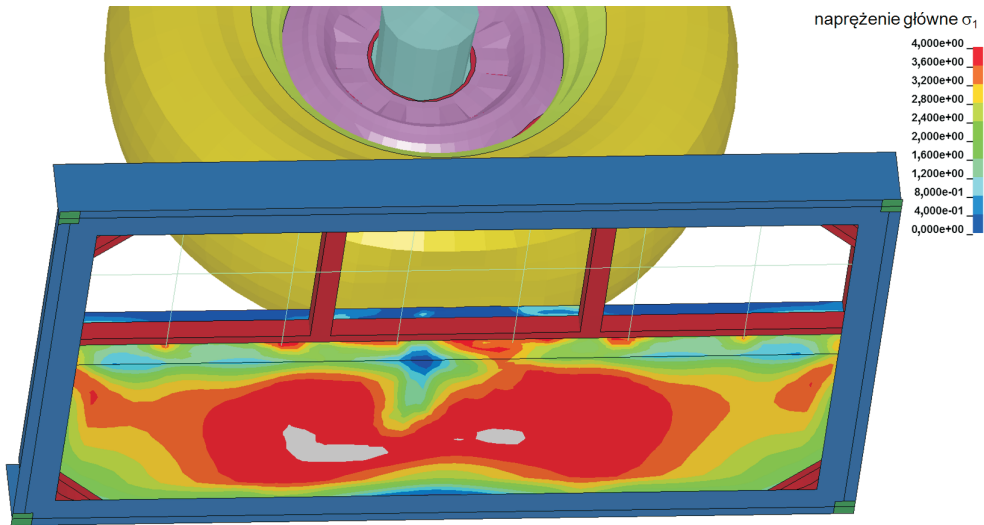
Rys. 6. Deformacje opony pod wpływem sił grawitacji i zadanego obciążenia dla wybranych chwil czasowych, kontury naprężenia zastępcze w MPa  
 Fig. 6. Deformation in tire under gravity and applied loading for selected time instances, contours of effective stress in MPa

Przyjęto dwa poziomy obciążenia  $P_I = 29,67$  kN i  $P_{II} = 57,50$  kN. W przypadku 03 obciążenie narasta gwałtownie do wielkości  $P_{II} = 57,50$  kN w ciągu 0,001 s. W modelach 01 i 02 zastosowano model 72R3 dla betonu, a w przypadku 03 model materiału sprężystego.

Na rysunkach 7 i 8 pokazano kontury maksymalnego naprężenia głównego  $\sigma_1$  w części betonowej na końcu symulacji, dla przypadku 01:  $P_I = 29,70$  kN i przypadku 02:  $P_{II} = 57,50$  kN. Na rysunku 9 przedstawiono kontury naprężenia zastępcze HMM  $\sigma_{HMM}$  w ramie żeliwnej, dla przypadku 02:  $P_{II} = 57,50$  kN. Maksymalne naprężenie jest znacznie mniejsze od granicy plastyczności dla żeliwa, ustalonej w [15] na poziomie 120 MPa. Wykres na rysunku 10 przedstawia ugięcie w punkcie centralnym na spodzie pokrywy dla przypadków 01, 02 i 03.

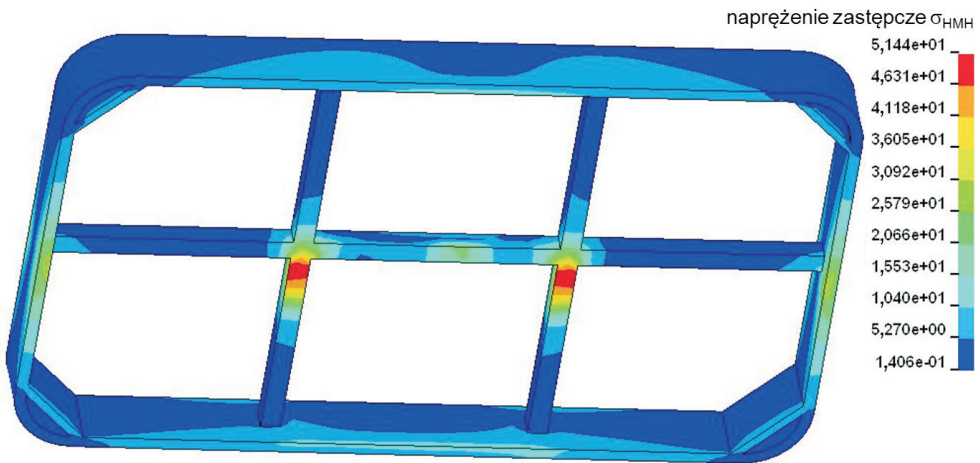


Rys. 7. Kontury maksymalnego naprężenia głównego  $\sigma_1$  [MPa] w części betonowej, dla przypadku 01:  $P_I = 29,70$  kN  
 Fig. 7. Contours of maximum principal stress  $\sigma_1$  [MPa] in concrete for case 01:  $P_I = 29,70$  kN



Rys. 8. Kontury maksymalnego naprężenia głównego  $\sigma_1$  [MPa] w części betonowej, dla przypadku 02:  $P_{II} = 57,50$  kN

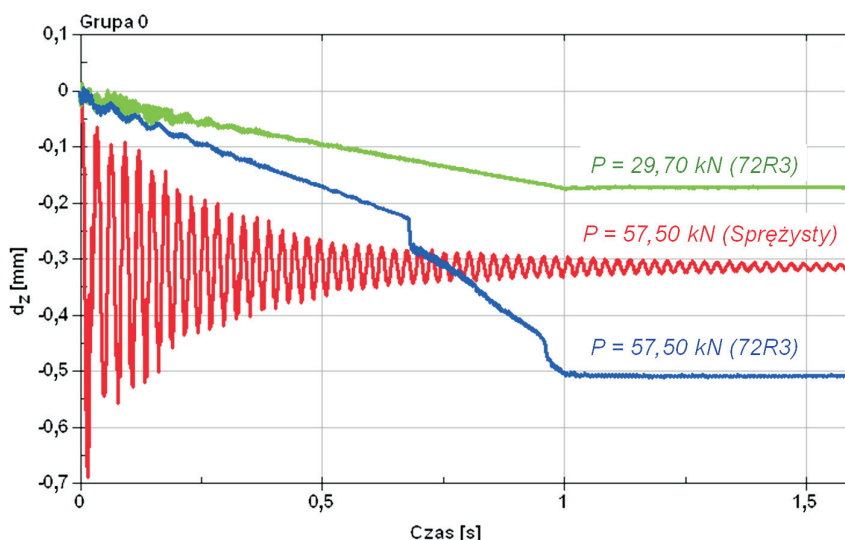
Fig. 8. Contours of maximum principal stress  $\sigma_1$  [MPa] in concrete for case 02:  $P_{II} = 57.50$  kN



Rys. 9. Kontury naprężenia zastępczego  $\sigma_{HMH}$  [MPa] w ramie żeliwnej – przypadek 02:  $P_{II} = 57,50$  kN

Fig. 9. Contours of effective stress  $\sigma_{HMH}$  [MPa] in cast iron frame for case 02:  $P_{II} = 57.50$  kN





Rys. 10. Ugięcie w punkcie centralnym na spodzie pokrywy dla przypadków 01, 02 i 03 (z materiałem sprężystym)

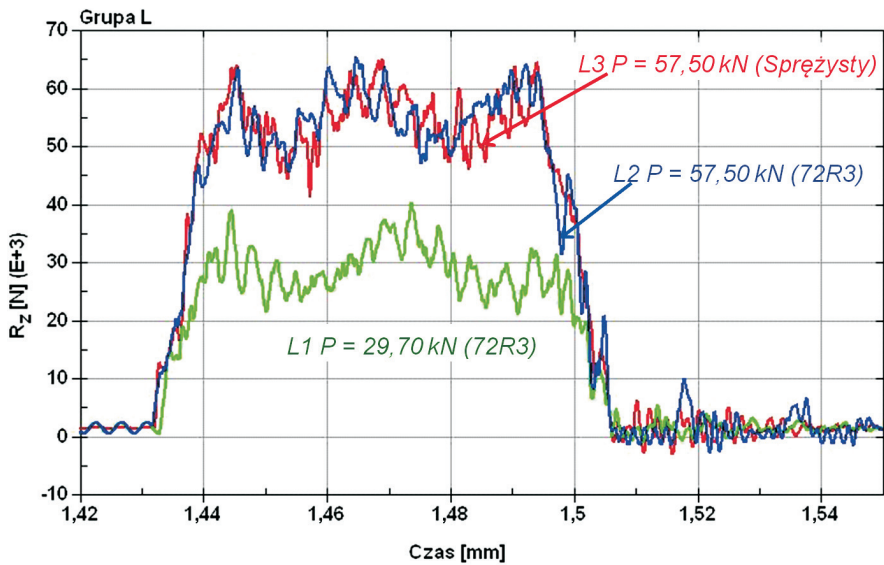
Fig. 10. Time histories of deflection for cases 01, 02, and 03 (with elastic material)

Pokazane powyżej wyniki wykazują, że przy statycznym obciążeniu kołem, w przypadku pierwszego poziomu obciążenia, odpowiedź konstrukcji jest w zakresie sprężystym, a maksymalne naprężenia rozciągające w betonie zbliżają się do wytrzymałości na rozciąganie,  $f_t = 4$  MPa. Przy drugim poziomie obciążenia, część objętości betonu zajmuje materiał o właściwościach zdegradowanych, w wyniku wcześniejszego przekroczenia wytrzymałości na rozciąganie (mikro rysy). Skutkuje to także zwiększonym ugięciem  $d_z = 0,5$  mm w stosunku do modelu sprężystego  $d_z = 0,3$  mm (rys. 10).

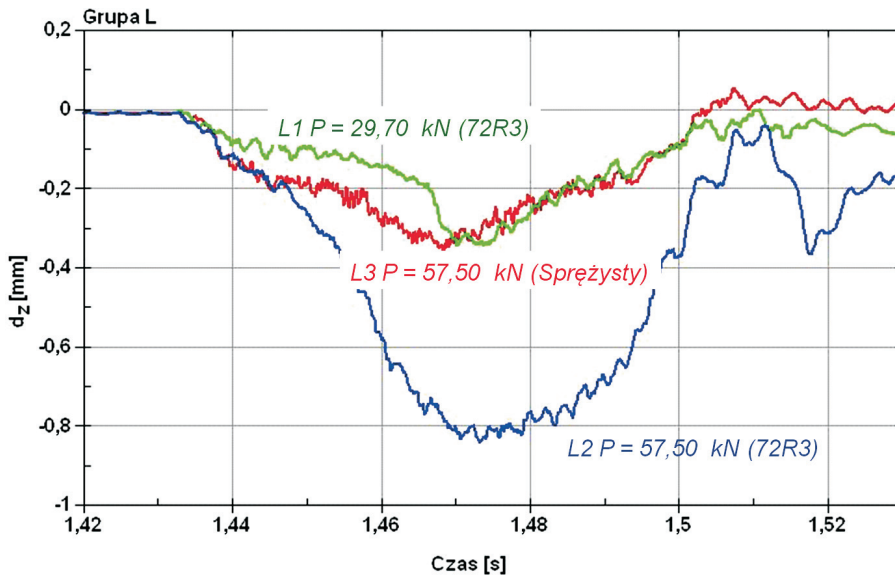
### 3.4. PRZEJAZD PRZEZ POKRYWĘ UMIESZCZONĄ W LICU DROGI

Grupa L obejmuje przypadki, w których symulowany jest przejazd koła z prędkością 60 km/h po pokrywie, której górna powierzchnia znajduje się w licu powierzchni najeżdzu.

Na rysunku 11 pokazano zmienność w czasie wypadkowej pionowych reakcji w zamocowaniach ramy pokrywy, dla przypadków L1, L2 i L3 (z materiałem sprężystym), a na rysunku 12 wykresy ugięcia w środku pokrywy. O ile zmienność w czasie reakcji dla przypadków L2 i L3, jest zbliżona, o tyle w przypadku ugięć widać wyraźną różnicę, wskazującą na ujawnienie się właściwości nieliniowych betonu, przy ekstremalnym poziomie obciążenia. W tabelicy 3 podano maksymalne chwilowe wielkości reakcji, wielkości obciążenia statycznego i współczynnik dynamiczny, określony jako:



Rys. 11. Zmienność w czasie wypadkowej pionowych reakcji w zamocowaniach ramy pokrywy, dla przypadków L1, L2 i L3 (z materiałem sprężystym)  
 Fig. 11. Time histories of resultant vertical reactions in frame supports for cases L1, L2, and L3 (with elastic material)



Rys. 12. Zmienność w czasie ugięcia w środku pokrywy, w przypadkach L1, L2 i L3 (z materiałem sprężystym)  
 Fig. 12. Time histories of deflection in the middle of cover for cases L1, L2, and L3 (with elastic material)

$$\phi_D = \frac{R_D - R_S}{R_S} \cdot 100\% , \tag{8}$$

gdzie:

$R_S$  – jest wielkością statyczną pionowych reakcji (obciążenia) w zamocowaniach ramy pokrywy,

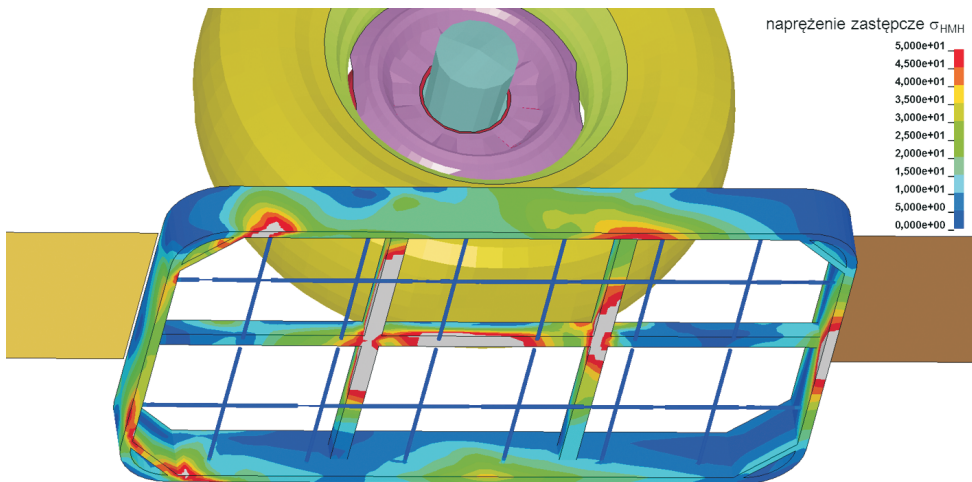
$R_D$  – jest wielkością dynamiczną tych samych reakcji, równą chwilowemu maksimum.

Tablica 3. Porównanie wypadkowych reakcji pionowych w zamocowaniach ramy pokrywy dla przypadków L1, L2, L3

Table 3. Comparison of resultant vertical reactions in frame supports for cases L1, L2, L3

Przypadek obliczeniowy	$R_S$	$R_D$ ( $\max \dot{R}_z(t)$ )	Współczynnik dynamiczny (8)
	[kN]	[kN]	[%]
L1	29,67	40,62	57,1
L2	57,50	65,80	14,4
L3	57,50	65,35	13,7

Porównanie współczynnika dynamicznego dla dwóch poziomów obciążenia, wskazuje na znany np. w dynamice mostów fakt, że im większe jest obciążenie, tym mniejszy jest współczynnik dynamiczny. Na rysunku 13 przedstawiono wykres naprężenia zastępczego  $\sigma_{HMH}$  w ramie żelaznej z ekstremalną wielkością równą 64 MPa.

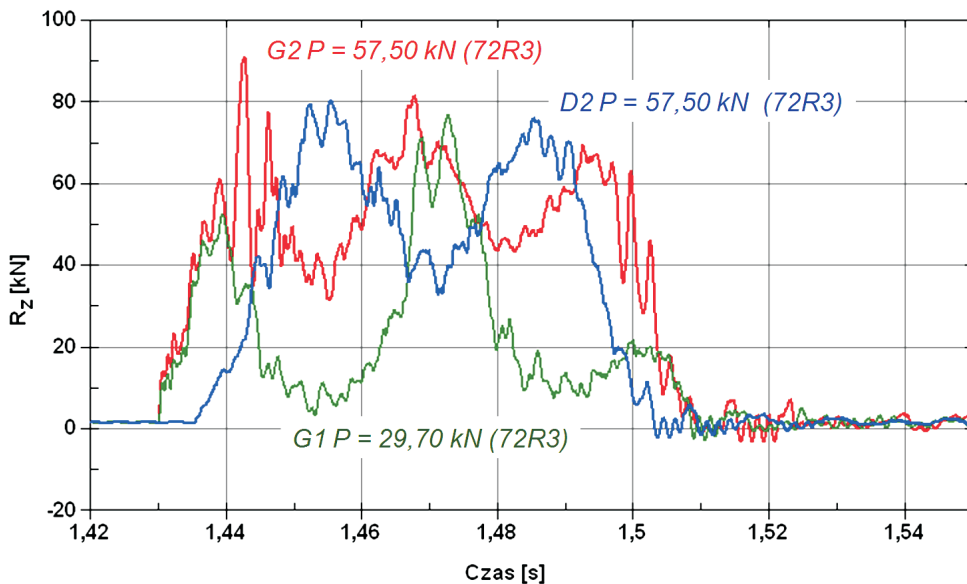


Rys. 13. Kontury naprężenia zastępczego  $\sigma_{HMH}$  [MPa] w ramie żelaznej, przypadek L2  
 Fig. 13. Contours of effective stress  $\sigma_{HMH}$  [MPa] in cast iron frame for case L2

### 3.5. WPŁYW BŁĘDÓW MONTAŻU NA EFEKT DYNAMICZNY

W przypadkach obliczeniowych grup G i D uwzględniono błędy montażu pokrywy. W pierwszym przypadku pokrywa wystaje 10 mm ponad powierzchnię najazdu, w drugim przypadku znajduje się 10 mm poniżej.

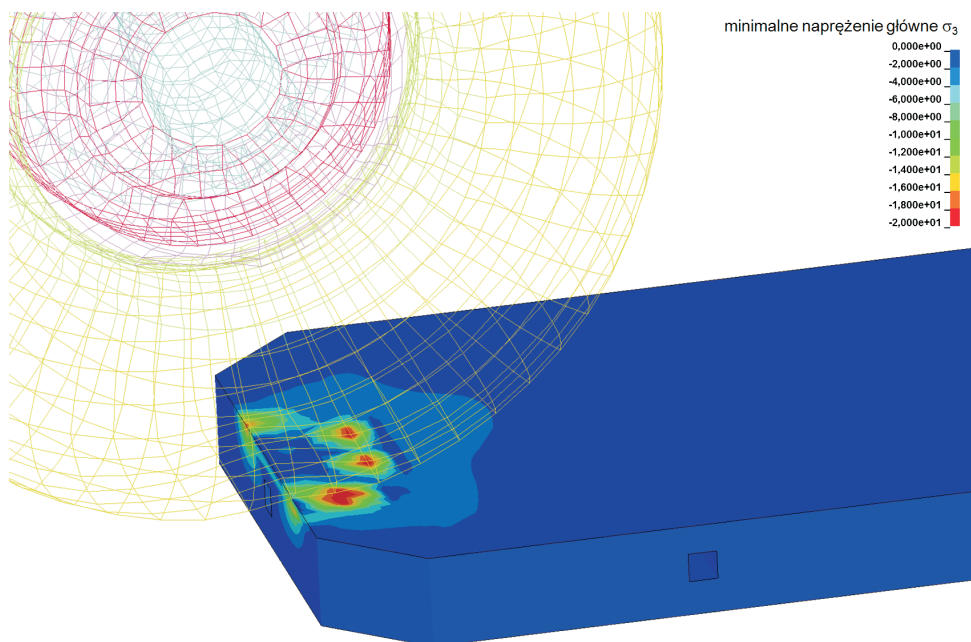
Na rysunku 14 porównano krzywe zmienności w czasie wypadkowych reakcji dla przypadków G1, G2 i D2. Na rysunku 15 i 16 pokazano dla przypadku G2 kontury naprężeń głównych, odpowiednio minimalnego  $\sigma_3$  i maksymalnego  $\sigma_1$  w części betonowej, w chwili najazdu i w momencie, gdy koło znajduje się nad pokrywą.



Rys. 14. Zmienność w czasie wypadkowej pionowych reakcji w zamocowaniach ramy pokrywy, dla przypadków G1, G2 i D2

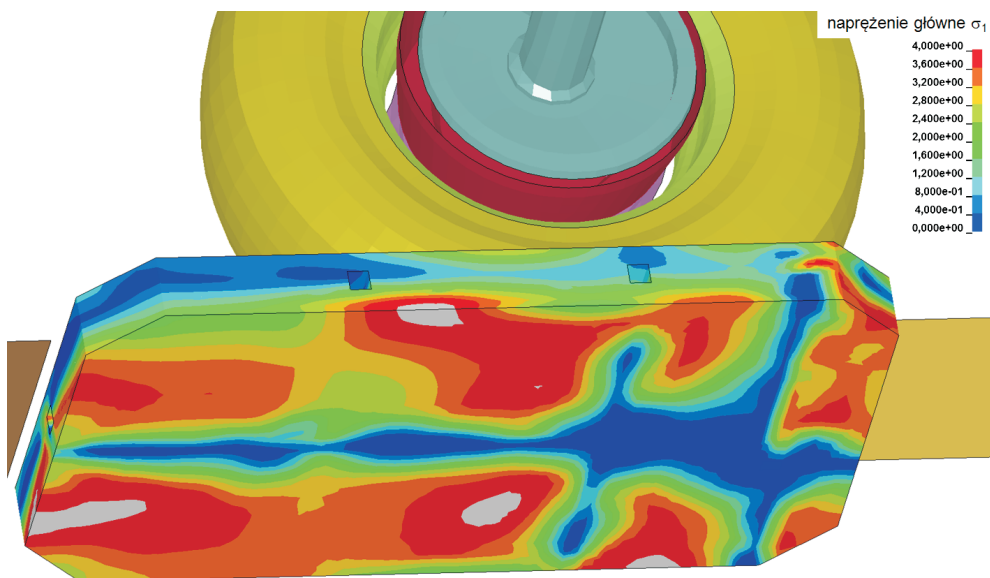
Fig. 14. Time histories of resultant vertical reactions in frame supports for cases G1, G2, and D2

Prezentowane wyniki pokazują, że obydwa przypadki mają charakter ekstremalny, zarówno ze względu na poziom obciążeń chwilowych, jak i wielkości naprężeń w części betonowej i ramie żeliwnej. Największe obciążenie chwilowe (dokładnie wypadkowa pionowych reakcji w zamocowaniach ramy pokrywy) występuje dla przypadku G2, a największy efekt dynamiczny zarejestrowano dla przypadku G1. We wszystkich rozpatrywanych tutaj przypadkach następuje przekroczenie granicy plastyczności w ramie żeliwnej i degradacja znacznej części wypełnienia betonowego.



Rys. 15. Kontury minimalnego naprężenia głównego  $\sigma_3$  [MPa] w części betonowej, przypadek G2,  $t = 1,44$  s

Fig. 15. Contours of minimal principal stress  $\sigma_3$  [MPa] in concrete for case G2, at  $t = 1.44$  s



Rys. 16. Kontury maksymalnego naprężenia głównego  $\sigma_1$  [MPa] w części betonowej, przypadek G2,  $t = 1,46$  s

Fig. 16. Contours of maximal principal stress  $\sigma_1$  [MPa] in concrete for case G2, at  $t = 1.46$  s

## 4. PODSUMOWANIE

W tabelicy 4 zestawiono wielkości ekstremalne i wartości współczynnika dynamicznego obliczone na podstawie wzoru (8), dla przypadków L2, G2, D2 ( $P_{II} = 57,50$  kN). Największy efekt dynamiczny zarejestrowano tutaj dla przypadku G2, czyli gdy pokrywa wystaje 10 mm ponad powierzchnię najazdu. Należy pamiętać, że zastosowany model koła nie uwzględnia dynamicznego oddziaływania zawieszenia, występującego w rzeczywistym pojeździe.

Tablica 4. Porównanie wypadkowych reakcji pionowych w zamocowaniach ramy pokrywy w przypadkach L2, G2, D2

Table 4. Comparison of reactions vertical reactions in frame supports for cases L2, G2, D2

Przypadek obliczeniowy	$R_s$	$R_D$ ( $\max R_z(t)$ )	Współczynnik dynamiczny (8)
	[kN]	[kN]	[%]
L2	57,50	65,80	14,4
G2	57,50	90,06	56,6
D2	57,50	80,73	40,4

Przedstawione wyniki symulacji komputerowych pokazują, że przyjęty drugi poziom obciążenia  $P_{II} = 57,50$  kN jest ekstremalny. Uzyskane wielkości obciążeń chwilowych, zbliżają się do siły granicznej, a naprężenia w części żeliwnej przekraczają wartość granicy plastyczności. Najniekorzystniejsze są przypadki z grupy G, w których pokrywa wystaje ponad powierzchnię jezdni. Należy nadmienić, że w przeprowadzonych symulacjach tak duże obciążenie było przyłożone do jednego koła, podczas gdy w rzeczywistych, ciężkich pojazdach najbardziej obciążone tylne osie samochodów ciężarowych składają się z podwójnych kół.

Przy mniejszym obciążeniu, najbardziej wyteżoną jest część betonowa, ze względu na niską wytrzymałość na rozciąganie i niekorzystne efekty dynamiczne. Uzyskane rozkłady naprężeń w czasie, pokazują, że w przeciwieństwie do obciążenia statycznego, w wyniku drgań pokrywy, naprężenia rozciągające pojawiają się praktycznie w całej części betonowej. Z mechanicznego punktu widzenia zastosowanie betonu zwykłego, jako wypełnienia w konstrukcji pokrywy jest więc niekorzystne.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Czagowiec Z., Glinicki M.A., Kowalski P.: Ocena stanu technicznego betonowych pokryw studni kanalizacji kablowej stosowanych w ciągach drogowych. Drogi i Mosty nr 3/2009
- [2] PN-EN 124:2000 Zwieńczenia wpustów i studzienek kanalizacyjnych do nawierzchni dla ruchu pieszego i kołowego. Zasady konstrukcji, badania typu, znakowanie, kontrola jakości. PKN, Warszawa 2000



- 
- [3] *Cai Y., Cao Z., Sun H., Xu C.*: Dynamic response of pavements on poroelastic half-space soil medium to a moving traffic load. *Computers and Geotechnics*, 36, 2009, 52 - 60
- [4] *Szcześniak W.*: Wybrane zagadnienia z dynamiki płyt. OW PW, Warszawa 2000
- [5] *Sun L.*: Analytical dynamic displacement response of rigid pavements to moving concentrated and line loads. *International Journal of Solids and Structures*, 43, 2006, 70 - 83
- [6] *Mackerle J.*: Finite element and boundary element analysis of bridges, roads and pavements - A bibliography (1994-1997). *Finite Elements in Analysis and Design*, 29, 1998, 65 - 73
- [7] *Mulungye R.M., Owende P.M.O., Mellon K.*: Finite element modelling of flexible pavements on soft soil subgrades. *Materials and Design*, 28, 2007, 739 - 756
- [8] *Akbulut H., Aslantas K.*: Finite element analysis of stress distribution on bituminous pavement and failure mechanism. *Materials and Design*, 26, 2005, 383 - 387
- [9] *Hadi M., Bodhinayake B.C.*: Non-linear finite element analysis of flexible pavements. *Advances in Engineering Software*, 34, 2003, 657 - 662
- [10] *Novak M., Birgisson B., Roque R.*: Near-surface stress states in flexible pavements using measured radial tire contact stresses and ADINA. *Computers and Structures*, 81, 2003, 859 - 870
- [11] *Krarup J.*: Measured and Calculated Pavement Response in the Danish Testing Machine. *Vehicle-Road Interaction*, STP 1225 ASTM, 89, 1994, 1 - 4
- [12] *Pottinger M.G.*: The three-dimensional contact stress field of solid and pneumatic tires. *Tire Science and Technology*, 20, 1, 1992, 3 - 32
- [13] *Hallquist J.O.*: LS-DYNA Theoretical Manual. Livermore Software Technology Corporation, Livermore, California, 2006
- [14] *Hallquist J.O.*: LS-DYNA Keyword user's Manual. Livermore Software Technology Corporation, Livermore, California, 2006
- [15] *Szcześniak W. i inni*: Analiza nośności pokryw studni kanalizacji kablowej pod obciążeniem statycznym, Raport wewnętrzny do projektu rozwojowego nr N R04 0007 04 wykonany na zlecenie IBDiM, Warszawa 2009
- [16] *Owende P.M.O., et al.*: Minimizing distress on flexible pavements using variable tyre pressure. *Journal of Transportation Engineering ASCE*, 127, 3, 2001, 254 - 62
- [17] FHWA/NHTSA National Crash Analysis Center at George Washington University. Public Finite Element Model Archive, Washington 2009. Available at: <http://www.ncac.gwu.edu/vml/models.html>
- [18] *Schwer L.E., Malvar L.J.*: Simplified concrete modeling with \*MAT\_CONCRET\_DAMAGE\_REL3. LS-DYNA Anwenderforum, Bamberg 2005
- [19] *Malvar L.J., Simons D.*: Concrete Material Modeling In Explicit Computations. Workshop on Recent Advances in Computational Structural Dynamics and High Performance Computing, USAE Waterways Experiment Station, 24-26 April 1996

## **INFORMACJE DODATKOWE**

Niniejszy artykuł przedstawia część badań prowadzonych w ramach Projektu Badawczo-Rozwojowego nr 04 0007 04.

## **DYNAMIC ANALYSIS OF INTERACTION BETWEEN WHEEL AND COVER OF PRECAST CONCRETE MANHOLE**

### **Abstract**

The paper presents results of computer simulations for interaction between a rolling wheel and a typical cover of precast concrete manhole used for telecommunication network. Applying the most recent features of computer programs based on the Finite Element Method with the explicit time integration, the work was focused on the realistic representation of the actual problem. In the numerical model the interaction is traced between a rotating, three dimensional, pneumatic wheel and a detailed model of the selected cover with all component materials represented separately. Eleven cases were studied with different types and levels of loading, position of the cover and material representation for concrete. A new sophisticated constitutive model for concrete with a three invariant formulation for the failure surfaces, available in program LS-DYNA, was adopted for some of the calculations. The results allow for estimating maximum stresses and dynamic impact factors featuring dynamic effects of the wheel to cover interaction.