

# Modelowanie gruntu do zastosowania w testach zderzeniowych drogowych barier ochronnych

D. B. Nycz<sup>1, a)</sup> M. Klasztorny<sup>2, b)</sup>, P. Dziewulski<sup>3, b)</sup>, R. Gieleta<sup>4, b)</sup>, K. Zielonka<sup>5, c)</sup>

<sup>1</sup>Jan Grodek State Vocational Academy, 21 Mickiewicza St., Sanok, PL-38500, Poland

<sup>2</sup>Faculty of Mechanical Engineering, Military University of Technology, 2 Gen. W. Urbanowicza St., PL-00908 Warsaw, Poland

<sup>3</sup>Automotive Industry Institute, 55 Jagiellonska St., PL-03301 Warsaw, Poland

<sup>a)</sup> Corresponding author: dnycz@pwsz-sanok.edu.pl

<sup>b)</sup> marian.klasztorny@wat.edu.pl

<sup>c)</sup> pawel.dziewulski@wat.edu.pl

<sup>d)</sup> roman.gieleta@wat.edu.pl

<sup>e)</sup> k.zielonka@pimot.eu

**Abstrakt.** Opracowano metodykę modelowania układu słupek–grunt do zastosowania w modelowaniu numerycznym testów zderzeniowych drogowych barier ochronnych. Metodykę opracowano na przykładzie słupka Sigma-100 białego w poboczu gruntowe i poddanego testowi zginania ze skręcaniem za pomocą napiętej liny poziomej. Eksperyment walidacyjny wykonano na poboczu placu zderzeniowego w PIMOT w Warszawie. Uwzględniono otoczenie gruntowe słupka w kształcie walca, w którym zamocowany jest słupek. Dla gruntu zastosowano model materiałowy izotropowy \*MAT\_005\_SOIL\_AND\_FOAM w systemie LS-Dyna. Wyznaczono średnie wartości parametrów tego modelu dla gruntów spoistych miękkoelastycznych (S), elastycznych (M) i twardoelastycznych (H). Symulacje przeprowadzono dla modeli numerycznych z elementami bryłowymi gruntu z całkowaniem zredukowanym (ELFORM\_1) i pełnym (ELFORM\_2). Wyniki symulacji pokazano w formie wykresów siła naciągu liny – przemieszczenie górnego punktu słupka oraz w formie deformacji układu słupek – grunt. W przypadku gruntu S i dużych deformacji, nie uzyskano zbieżności dla modelu z całkowaniem pełnym. Wykazano, że test eksperymentalny w PIMOT został wykonany w poboczu gruntowym S słabo utwardzonym.

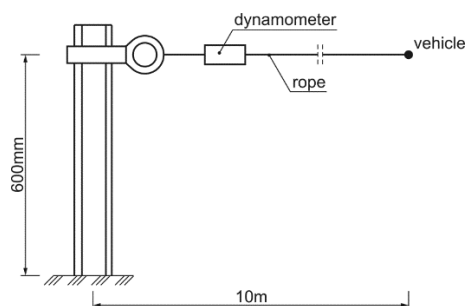
## WSTĘP

Modelowanie układu słupek–grunt jest jednym z kluczowych problemów w modelowaniu numerycznym testów zderzeniowych drogowych barier ochronnych. Dotychczas, podukład słupek–grunt modelowany był za pomocą elementów sprężystych [1, 2] lub elementów bryłowych [3, 4]. Najprostszym modelem gruntu jest model materiałowy \*MAT\_005\_SOIL\_AND\_FOAM [5, 6], który można wykorzystać do opisu materiałów piankowych i gruntu w przypadku, w którym ich właściwości nie są w pełni znane. Analizę interakcji słupek–grunt dla obciążeń statycznych i dynamicznych przedstawiono w pracy [7]. Badania eksperymentalne i modelowanie numeryczne przeprowadzono dla słupka SIGMA. Grunt opisano za pomocą modelu materiałowego \*MAT\_078\_SOIL\_CONCRETE oraz \*MAT\_FHWA\_SOIL [6]. W niniejszej pracy rozwinięto numeryczny opis interakcji słupek–grunt w systemie LS-Dyna, z zastosowaniem bryłowych elementów skończonych dla gruntu.

## PRÓBA EKSPERYMENTALNA ZGINANIA ZE SKRĘCANIEM SŁUPKA SIGMA-100

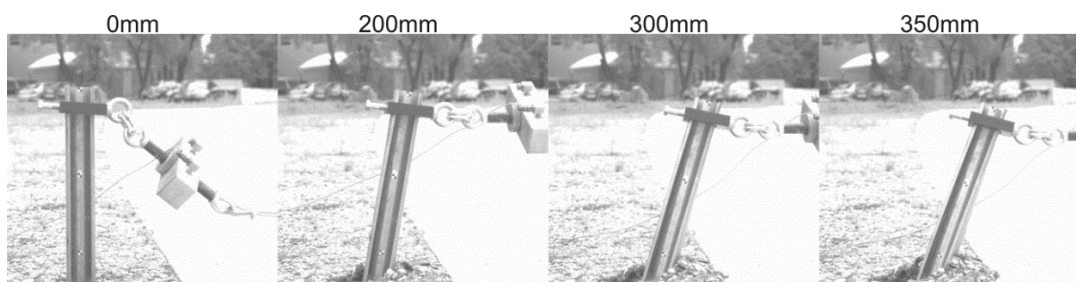
Przedmiotem badań eksperymentalnych jest słupek stalowy SIGMA-100, posadowiony w utwardzonym poboczu gruntowym drogi i poddany statycznej próbie zginania ze skręcaniem. Na słupku zamontowano obejmę stalową, do której zaczepiono głowicę pomiaru siły naciągu liny poziomej. Słupek obciążono za pomocą liny stalowej zaczepionej

do wózka widłowego poruszającego się z prędkością  $\sim 0.05$  m/s (RYS. 1). Badanie przeprowadzono na poboczu płyty betonowej placu zderzeniowego. Słupek wbity w odległości 30 cm od osi pionowej słupka do krawędzi płyty betonowej. Lina napinająca była pozioma w kierunku prostopadłym do krawędzi płyty betonowej. Próbę wykonano w 2017 roku w Przemysłowym Instytucie Motoryzacji w Warszawie.



RYSUNEK 1. Schemat eksperymentalnej próby zginania ze skręcaniem słupka zamocowanego w gruncie

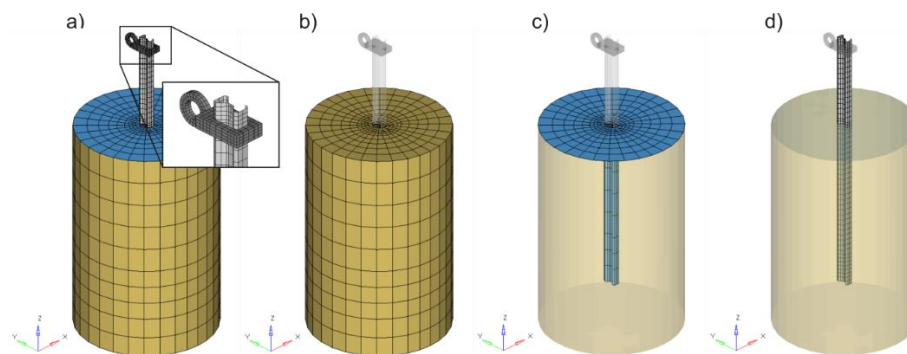
Grunt, w którym osadzono słupek jest typowy dla pobocza dróg: grunt zwięzłospisty (głina piaszczysta zwięzła), konsystencja plastyczna, stan twardoplastyczny, wskaźnik plastyczności  $I_p=20\div 30\%$ . Próbę rejestrowano za pomocą kamery Phantom v12. Do obróbki danych z kamery wykorzystano oprogramowanie TEMA 3D. Na RYS. 2 pokazano deformacje słupka i gruntu dla wybranych przemieszczeń poziomych liny napinającej.



RYSUNEK 2. Eksperymentalne deformacje słupka i gruntu dla wybranych przemieszczeń poziomych liny

## MODEL NUMERYCZNY UKŁADU SŁUPEK–GRUNT

Model numeryczny i materiałowy słupka SIGMA-100 w gruncie opracowano z uwzględnieniem danych katalogowych firmy Stalprodukt S.A. [8]. Uwzględniono otoczenie gruntowe słupka SIGMA-100 w kształcie walca o średnicy 1.00 m i wysokości 1.52 m, z wykorzystaniem bryłowych elementów skończonych o topologii HEXA i PENTA, którym przypisano sformułowanie ELFORM\_1 (8-węzłowy element bryłowy opisany trójliniowymi funkcjami kształtu, z jednym punktem całkowania) lub ELFORM\_2 (8 węzłowy element bryłowy opisany trójliniowymi funkcjami kształtu, pełnocalkowalny – 8 punktów całkowania).



RYSUNEK 3. Model numeryczny układu słupek–grunt: a) pełny model; b) grunt; c) powłoka zamykająca; d) słupek SIGMA-100

Słupki SIGMA-100 jest powłoką siatkowaną za pomocą elementów o topologii QUAD4, którym przypisano sformułowanie ELFORM\_2 (element powłokowy Belytschko–Tsay z jednym punktem całkowania w płaszczyźnie elementu). Obejmę siatkowano za pomocą bryłowych elementów skończonych o topologii HEXA i PENTA, którym przypisano sformułowanie ELFORM\_1 [6, 9]. Model numeryczny układu słupki–grunt pokazano na RYS. 3.

Przyjęto model materiałowy izotropowy stali \*MAT\_PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY (\*MAT\_024). Grunt, w którym osadzony jest słupki SIGMA-100, odwzorowany został za pomocą modelu \*MAT\_005\_SOIL\_AND\_FOAM. Obejmę stalową opisano za pomocą modelu materiałowego \*MAT\_020\_RIGID. Uwzględniono tłumienie sztywnościowe ze współczynnikiem tłumienia 0.10 w gruncie i 0.03 w słupku. Pomiędzy słupkiem SIGMA-100 a powłoką zamykającą zdefiniowano model kontaktu \*CONTACT\_AUTOMATIC\_SINGLE\_SURFACE, ze współczynnikiem tarcia 0.30. Do gruntu przypisano dodatkowo model kontaktu wewnętrznego \*CONTACT\_INTERIOR, w celu eliminacji efektu ujemnej objętości [6, 9].

## PARAMETRY MODELU MATERIAŁOWEGO \*MAT\_005\_SOIL\_AND\_FOAM

Model \*MAT\_005\_SOIL\_AND\_FOAM jest prostym modelem opisującym materiały piankowe i grunt w przypadku, gdy ich właściwości nie są w pełni znane. W przypadku, gdy granica płynięcia jest bardzo mała, model może zachowywać się jak płyn. Może być stosowany w sytuacjach, gdy materiał piany lub grunt ograniczone są strukturą zewnętrzną lub gdy wprowadzone są ograniczające warunki brzegowe [9].

Model gruntu wymaga podania modułu ścinania i modułu ściśliwości przy odciążeniu, trzech współczynników definiujących powierzchnię graniczną przy ścinaniu, wartości ciśnienia odciążenia przy rozciąganiu oraz krzywą ciśnienie-odkształcenie objętościowe (do 10 punktów) definiującą ściśliwość [3].

Na podstawie [11, 12] określono zakresy i wartości średnie modułu sprężystości  $E$ , modułu ścinania  $G$ , liczby Poissona  $\nu$ , kohezji  $c$  oraz kąta tarcia wewnętrznego  $\phi$  dla gruntów spoistych: S (miękkoplastyczny), M (plastyczny), H (twardoplastyczny). W TABELI 1 zestawiono wyznaczone wartości średnie parametrów modelu materiałowego \*MAT\_005\_SOIL\_AND\_FOAM dla ww. gruntów.

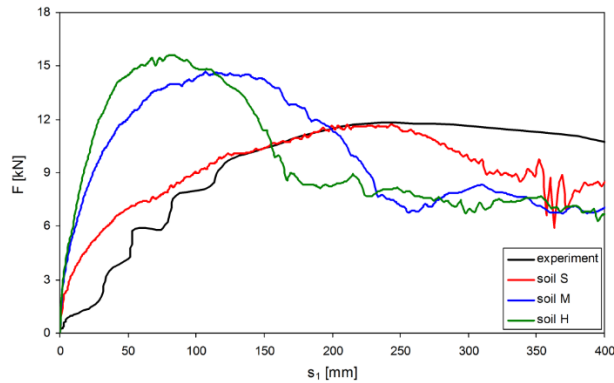
**TABELA 1.** Wartości średnie parametrów modelu materiałowego \*MAT\_005\_SOIL\_AND\_FOAM dla gruntów S, M i H

Parametr	S	M	H	jednostka
RO	$2.1 \times 10^{-9}$	$2.1 \times 10^{-9}$	$2.1 \times 10^{-9}$	T/mm <sup>3</sup>
G	2.75	10	27.5	MPa
BULK	32.1	64.2	129.9	MPa
A0	$5.828 \times 10^{-4}$	$1.160 \times 10^{-3}$	$2.395 \times 10^{-3}$	MPa <sup>2</sup>
A1	$1.028 \times 10^{-2}$	$1.913 \times 10^{-2}$	$3.661 \times 10^{-2}$	MPa
A2	$4.530 \times 10^{-2}$	$7.885 \times 10^{-2}$	$1.399 \times 10^{-1}$	-
PC	-2	-2	-2	MPa
Pi / EPSi = K	10.7	21.4	43.4	MPa

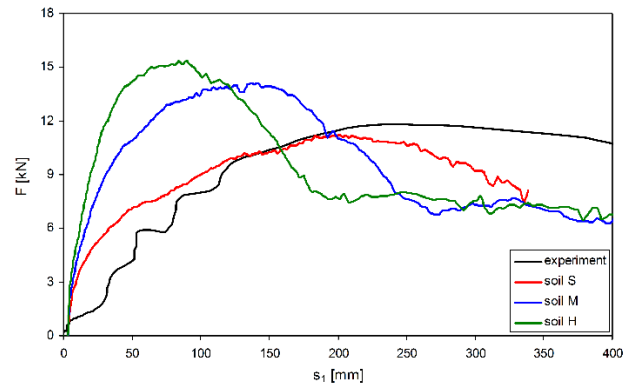
## WYNIKI SYMULACJI PRÓBY ZGINANIA ZE SKRĘCANIEM SŁUPKA W GRUNCIE

Na RYS. 4 pokazano wykresy symulacyjne  $F(s_1)$  ( $F$  – siła naciągu liny,  $s_1$  – przemieszczenie poziome górnego punktu kontrolnego słupka) odpowiadające zastosowaniu elementów skończonych z całkowaniem zredukowanym (ELFORM 1; IHQ=6; QM=0.03), dla gruntów spoistych S, M, H, na tle wykresu eksperymentalnego. Ze względu na całkowanie zredukowane, wprowadzono sztywnościową procedurę przeciwdziałania klepsydrowaniu według Belytschko-Bindemana (IHQ=6; assumed strain, co-rotational stiffness formulation) [6, 9]. Obliczenia numeryczne wykonano za pomocą solvera LS-Dyna v971 r7 (procedura explicit, prędkość przemieszczenia poziomego liny w symulacji 2.10 m/s). Odpowiedź układu przy symulacyjnej prędkości ruchu liny jest również quasi-statyczna.

Na RYS. 5 pokazano wykresy symulacyjne  $F(s_1)$  przy zastosowaniu elementów skończonych z całkowaniem pełnym (ELFORM 2), dla gruntów spoistych S, M i H, na tle wykresu eksperymentalnego. W przypadku gruntu S, dla którego uzyskano najlepszą zgodność z wynikiem eksperymentalnym, obliczenia zostały przerwane przy przemieszczeniu  $s_1=338.7$  mm punktu kontrolnego 1, ze względu na wystąpienie ujemnej objętości elementów skończonych.



RYSUNEK 4. Wykresy  $F(s_1)$  odpowiadające elementom skończonym gruntu z całkowaniem zredukowanym dla gruntów S, M i H, na tle wykresu eksperymentalnego



RYSUNEK 5. Wykresy  $F(s_1)$  odpowiadające elementom skończonym gruntu z całkowaniem pełnym dla gruntów S, M i H, na tle wykresu eksperymentalnego

## WNIOSKI KOŃCOWE

Zakresy zmienności parametrów gruntów spoistych miękkoplastycznych (S), plastycznych (M) i twardoplastycznych (H) są duże. W praktyce, pobocza gruntowe dróg są wykonane z gruntu spoistego plastycznego (M) i utwardzone. Ze względu na dowolną lokalizację drogi, w symulacjach testów zderzeniowych drogowych barier ochronnych autorzy rekomendują przyjęcie gruntu spoistego plastycznego (M) o średnich wartościach parametrów mechanicznych podanych w niniejszej pracy.

Do modelowania pobocza gruntowego w testach zderzeniowych drogowych barier ochronnych, symulowanych za pomocą systemu LS-Dyna, autorzy rekomendują model \*MAT\_005\_SOIL\_AND\_FOAM, przy zastosowaniu elementów skończonych bryłowych z całkowaniem zredukowanym (ELFORM\_1) oraz uwzględnieniu kontaktu wewnętrznego \*CONTACT\_INTERIOR.

Wykazano, że test eksperymentalny w PIMOT został wykonany w poboczu wykonanym z gruntu spoistego miękkoplastycznego (S), słabo utwardzonego przed wbiciem słupka.

## PODZIĘKOWANIE

Praca wykonana w ramach grantu statutowego Katedry Mechaniki i Informatyki Stosowanej Wydziału Mechanicznego WAT.

## REFERENCES

1. A. O. Atahan, *Simulation* **78**, 587-599 (2002).
2. M.-H. Noh, S.-Y. Lee, *Thin-Walled Structures*, **120**, 138–152 (2017).
3. M. Klasztorny D. B. Nycz, P. Szurgott, *International Journal of Crashworthiness* **21**, 644-659 (2016).
4. M. Gutowski, E. Palta, H. Fang, *Advances in Engineering Software* **114**, 85–97 (2017).
5. D. W. Harris, *Computer Material Models for Soils, Rock, and Concrete Using FLAC and DYNA*, Report DSO-06-01, (U.S. Dept. of the Interior Bureau of Reclamation, Technical Service Center, Denver, Colorado, 2006).
6. J. O. Hallquist, *LS-DYNA Keyword User's Manual*, (LSTC, Livermore, CA, USA, 2007).
7. W. Wu, R. Thomson, *International Journal of Impact Engineering* **34**, 883–898 (2007).
8. System N2 W4 (SP-05/2), (Stalprodukt S.A., Bochnia, 2011).
9. J. O. Hallquist, *LS-DYNA Theory Manual*, (LSTC, Livermore, CA, USA, 2006).
10. M. A. Thomas, D. E. Chitty, M. L. Gildea, C. M. T'Kindt, *Constitutive Soil Properties for Cuddeback Lake, California and Carson Sink, Nevada*, (NASA/CR-2008-215345, 2008).
11. [http://home.agh.edu.pl/~cala/prezentacje/3wyklad\\_ZG.pdf](http://home.agh.edu.pl/~cala/prezentacje/3wyklad_ZG.pdf), uploaded 2017/07/15.
12. [http://home.agh.edu.pl/~cala/prezentacje/6wyklad\\_ZG.pdf](http://home.agh.edu.pl/~cala/prezentacje/6wyklad_ZG.pdf), uploaded 2017/07/15.