MODELOWANIE WPLYWU DRGAŃ DROGOWYCH NA PRZEMIESZCZENIA W STREFIE POŚLIZGU ZBOCZA PRZY UWZGLĘDNIENIU FAL IMPULSOWYCH

W artykule zaprezentowano modelowanie wpływu drgań drogowych na przemieszczenia w strefie poślizgu przy uwzględnieniu fal impulsowych. Analizie poddano obszar, w którym w 2010 r. wystąpiły ruchy osuwiskowe. Przeprowadzono symulacje wpływu prędkości poruszania się źródła drgań na wielkości generowanych w strefie poślizgu przemieszczeń pionowych. Obciążenia od przejeżdżających samochodów ciężarowych, zostały uwzględnione w postaci impulsowego wymuszenia kinematycznego. Symulacje numeryczne przeprowadzono w programie opartym na metodzie elementów skończonych.

WSTĘP

Głównymi czynnikami aktywnymi, które wpływają na możliwość powstania osuwisk są procesy geologiczne i warunki hydrogeologiczne. Procesami geologicznymi, które prowadzą do osunięć się gruntu jest erozja oraz występujące w pobliżu trzęsienia ziemi. Istotny jest poziom wód gruntowych, ponieważ woda zmienia właściwości mechaniczne ośrodka gruntowego, co może skutkować utratą stateczności skarpy lub zbocza. Duże znaczenie ma jest wzrost wilgotności gruntu wywołany intensywnymi opadami oraz gwałtownymi roztopami na wiosnę. Kolejnym, równie istotnym czynnikiem przyczyniającym się do powstawania terenu osuwiskowego jest działalność człowieka. Przyczyną uaktywnienia się osuwiska może być podcięcie stoku podczas budowy drogi lub linii kolejowej oraz nadmierne obciążenie zabudową tego obszaru. Istotne są również drgania związane z ruchem pociągów czy samochodów oraz prowadzonymi w pobliżu robotami ziemnymi. Wiele osuwisk powstaje w wyniku nałożenia się czynników naturalnych i antropogenicznych. W warunkach fliszu karpackiego trzy czynniki przyczyniają się głównie do powstawania osuwisk. Jest to budowa geologiczna fliszu charakteryzująca się specyfiką naprzemianległych warstw piaskowca i łupka oraz warstwą zwietrzałego koluwium. Rzeźba terenu oraz intensywne i długotrwałe opady atmosferyczne. Trzecim czynnikiem jest działalność człowieka a w szczególności drgania wywołane ruchem samochodowym. Zagrożenia związane z ruchami osuwiskowymi tj. uszkodzenia korpusu drogowego, sfalowania nawierzchni, obrywy skarp drogi wraz z poboczem, deformacje nawierzchni, spękania podmurówek i ścian na obszarze osuwiska obserwowano i rejestrowano w latach 1998 – 2010. W 2010 roku osuwisko uaktywniło się. Bardzo wysoka aktywność osuwiska po opadach w okresie 17-19 maja spowodowała uszkodzenie drogi, budynków mieszkalnych, gospodarczych i letniskowych. Na rysunku 1 przedstawiono uszkodzenia drogi w wyniku ruchów osuwiskowych.

W artykule przeanalizowano model drogi na osuwisku Just – Tęgorze i zadano sygnał imitujący drgania samochodu ciężarowego przejeżdżającego z różną prędkością. Zadano sygnał impulsowy sinusoidalny i sygnał impulsowy liniowy. Poruszany problem został podjęty w jednej z części pracy doktorskiej T. Manterysa [1]. Obciążenie dynamiczne zamodelowano jako obciążenie punktowe w postaci siły skupionej, przykładanej do nawierzchni drogowej w jednakowych ustalonych odstępach czasu, w zależności od przyjętej

prędkości pojazdu. Przyjęto, że czas trwania kontaktu pomiędzy oponą a nawierzchnią wyniesie 0.02s. Odstępy czasu pomiędzy kolejnymi obciążeniami generowanymi przez siłę skupioną odpowiadają czasowi jaki jest potrzebny na pokonanie odległości równej 4m odpowiadającej rozstawowi osi w samochodzie. Sygnał przyłożonego obciążenia do modelu zdyskretyzowano przyrostami czasu, równymi 0.1s. Przykładowe sygnały przyjęte do modelowania w pracy [1] przedstawiono na rysunku 1 i 2. Na rysunku 2 jest to sygnał dla prędkości auta ciężarowego 20 km/godz. Na rysunku 3 jest sygnał dla prędkości 50 km/godz.

Rys. 1. Uszkodzenia na DK75 w km 52+350 – 52 + 381 (2010 r.) [1]

Rys. 2. Sygnał przyjęty do modelowania dla prędkości 20km/h [1]

Rys. 3. Sygnał przyjęty do modelowania dla prędkości 50km/h [1]

Rys. 4. Przeszacowania pionowe dla poszczególnych zakresów prędkości dla obciążenia 115 kN na oś [11]

1. ZAŁOŻENIA DO OBLICZEŃ

1.1. Geometria i parametry modelu

Wpływ drgań drogowych, generowanych od poruszających się po nawierzchni samochodów ciężarowych, na rozwój potencjalnej powierzchni poślizgu przeprowadzono na przekroju geologiczno-inżynierskim (rys. 1.1) w ciągu km 51+900 do 52+700 DK nr 75 [1].

Rys. 1.1 Fragment przekroju geologiczno-inżynierskiego analizowanego osuwiska na DK 75 Tęgorze-Just [1]

W modelowaniu numerycznym uwzględniono uproszczony przebieg warstw geotechnicznych. Budowę nawierzchni asfaltowej i warstw podbudowy przyjęto na podstawie [2], dla nawierzchni asfaltowej-podatnej. Parametry warstw geotechnicznych zestawiono w tabl. 1

Tab. 1. Parametry warstw przyjęte w modelu numerycznym na podstawie [1]

Nazwa/Sym.	ϕ [°]	c [kPa]	γ [kN/m ³]	E_0 [MPa]	ν [-]	ξ [-]
Naw. asfaltowa	-	-	25.00	3000.00	0.30	0.05
Podbudowa	-	-	22.00	250.00	0.30	0.05
la2	12.00	18.00	18.64	14.00	0.20	0.05
lb	15.00	23.00	22.56	33.00	0.30	0.05
la3	15.00	23.00	18.64	17.00	0.16	0.05
lc	32.00	1.00	22.56	167.00	0.30	0.05
Va2	40.00	100.00	22.66	200.00	0.43	0.05

Parametry fizyczno-wytrzymałościowe gruntów: kąt tarcia wewnętrznego ϕ , spójność, ciężar objętościowy γ , moduł okształcenia E_0 , współczynnik Poissona ν , przyjęto zgodnie z literaturą [1],[4].

1.2. Model numeryczny

Model numeryczny rozpatrywanego przekroju opracowano w programie MIDAS GTS NX, przeznaczonym do symulacji ośrodków gruntowych. Analizę numeryczną przeprowadzono w płaskim stanie odkształcenia i przestrzennym stanie naprężenia. Na rys. 1.2 przedstawiono płaski model numeryczny poddany analizie.

Rys. 1.2. Model numeryczny przekroju

Model zdyskretyzowano czworobocznymi elementami skończonymi. Wielkość elementu przyjęto równą 0.5m na podstawie zależności podanych w [3]. Dobrana wielkość siatki zależy od częstotliwości sygnału i prędkości rozchodzenia się fali w danym ośrodku:

$$h_e \leq \frac{v}{10f_{\max}} \quad (1.1)$$

gdzie:

v - najniższa wartość prędkości fali, [m/s],

$f_{\max}$ – maksymalna wartość częstotliwości, [Hz].

Uwzględniono efekt tłumienia geometrycznego i materiałowego. W całkowaniu równania ruchu zastosowano model tłumienia Rayleigha [5]. Efekt odbicia zminimalizowano, poprzez zastosowanie na brzegach pionowych modelu warunków pola swobodnego (free field) [6]. Do opisu zachowania ośrodka gruntowego, przyjęto model konstytutywny Coulomba-Mohra, uwzględniający sprężysto-plastyczne zachowanie materiału. Na rys. 1.3 przedstawiono kryterium Coulomba-Mohra w osiach naprężenia głównego [7].

Rys. 1.3. Hipoteza Coulomba-Mohra

Hipotezę Coulomba-Mohra można opisać jako:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = -\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin \varphi + c \cos \varphi \quad (1.2)$$

gdzie:

σ_1 i σ_3 - naprężenia główne [kPa]

φ - kąt tarcia wewnętrznego gruntu [°]

c - kohezja [kPa].

W obliczeniach numerycznych uwzględnia się hipotezę Coulomba-Mohra w ujęciu niezmienników tensora naprężeń I_1 , J_2 i kąta Lodego θ [7][8]:

$$f(I_1, J_2, \theta) = -\frac{1}{3} I_1 \sin \varphi + \sqrt{J_2} (\cos \varphi + \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \theta \sin \varphi) - c \cos \varphi = 0$$

$$f(I_1, J_2, \theta) = -\frac{1}{3} I_1 \sin \psi + \sqrt{J_2} (\cos \varphi + \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \theta \sin \psi) - c \cos \psi = 0 \quad (1.3)$$

gdzie:

f - funkcja zniszczenia

g - funkcja plastyczności

I_1 - niezmiennik aksjatora naprężeń

J_2 - niezmienniki dewiatora naprężeń

φ - kąt nachylenia krzywej w zakresie sprężystym

c - kohezja

θ - kąt Lodego

ψ - kąt nachylenia krzywej w zakresie plastycznym

1.3. Sygnał impulsowy

W symulacjach numerycznych uwzględniono wymuszenie w postaci obciążenia pionowego nawierzchni drogowej. Przyjęta wartość obciążenia wyniosła 115 kN/oś, co jest równoważne z naciskiem pojedynczego koła pojazdu, równego 57,5 kN [9]. Zgodnie z zaleceniami podanymi w [2], wartość obciążenia pionowego zastąpiono równomiernym naciskiem opony na nawierzchnię, o kołowej powierzchni oddziaływania, równej $p=850$ kPa. Uwzględniono dwie wartości prędkości v pojazdów ciężarowych. Opisywały one powolny ruch pojazdu oraz jazdę pojazdu z maksymalną dopuszczalną wartością prędkości, na analizowanym odcinku drogi wojewódzkiej nr 75.

Obciążenie w postaci nacisku zamodelowano przy wykorzystaniu funkcji impulsowych, w celu zminimalizowania efektu nagłego przyłożenia obciążenia do krawędzi modelu i związanych z tym niepożądanych drgań modelu. Zastosowano dwa rodzaje funkcji impulsowych, dla różnych wartości prędkości. Pierwszy rodzaj funkcji impulsowej, uwzględniony w symulacji numerycznej uwzględniał liniowy przyrost obciążenia do wartości maksymalnej $p_0=850$ kPa. Drugą rodzaj impulsu przyjęto w postaci funkcji sinusoidalnej wyrażonej wzorem $p(t)=p_0 \sin^2(\pi t t)$ [10]. Dla prędkości 20 km/h, założono czas trwania obciążenia impulsowego 0.06s. Przyjęto częstotliwość próbkowania sygnału równą 16Hz. W celu symulacji przejazdu samochodu ciężarowego, przyjęto rozstaw osi równą

4m i czas trwania 3s. Dla prędkości 50 km/h, dobrano czas trwania obciążenia impulsowego 0.02s, zgodnie z [2]. Częstotliwość próbkowania numerycznego sygnału wyniosła 40 Hz. Czas trwania przejazdu samochodu ciężarowego był równy 3s. Rysunki. 1.4a i 1.4b przedstawiają funkcje impulsowe uwzględnione w symulacji numerycznej dla czasu trwania kontaktu koło-nawierzchnia.

Rys. 1.4a. Intensywność obciążenia p_0 , w funkcji czasu, dla różnej częstotliwości ruchu pojazdu, funkcje sinusoidalne

Rys. 1.4b. Intensywność obciążenia p_0 , w funkcji czasu, dla różnej częstotliwości ruchu pojazdu, funkcje liniowe

Na rys. 1.5 pokazano przebieg wymuszenia kinematycznego zadanego w modelu numerycznym uwzględniający czas trwania ruchu samochodu ciężarowego.

Rys. 1.5. Sinusoidalne funkcje impulsowe dla dwóch typów prędkości ruchu pojazdów ciężarowych

2. WYNIKI SYMULACJI NUMERYCZNYCH

Wyniki symulacji numerycznych modelu poddanego wymuszeniu kinematycznemu w postaci funkcji impulsowych charakteryzujących różną prędkość poruszania się samochodów ciężarowych przedstawiono w punktach zlokalizowanych na rys. 2.1 (pkt_1 do pkt_5). Punkty pkt_4 i pkt_5 znajdują się na czynnej powierzchni poślizgu analizowanego fragmentu osuwiska.

Rys. 2.1. Model numeryczny osuwiska z lokalizacją punktów pomiarowych

Rysunek 2.2 przedstawia wynik symulacji numerycznej w postaci przemieszczeń pionowych. Wartości otrzymano dla sinusoidalnej funkcji impulsowej, charakteryzującej pojazd ciężarowy poruszający się z prędkością $v=20\text{ km/h}$.

Rys. 2.2. Przemieszczenia pionowe uzyskane dla wymuszenia sinusoidalną funkcją impulsową, dla prędkości $v=20\text{ km/h}$

Rys. 2.3. charakteryzuje przemieszczenia pionowe dla prędkości $v=20\text{ km/h}$ liniowego wymuszenia impulsowego.

Rys. 2.3. Przemieszczenia pionowe uzyskane dla wymuszenia liniową funkcją impulsową, dla prędkości $v=20\text{ km/h}$

Na rys. 2.4. i 2.5. przedstawiono wykresy przemieszczeń pionowych uzyskane dla wymuszenia odpowiadającego prędkości pojazdu ciężarowego $v=50\text{ km/h}$, zrealizowanego w postaci funkcji impulsowych.

Rys. 2.4. Przemieszczenia pionowe uzyskane dla wymuszenia sinusoidalną funkcją impulsową, dla prędkości $v=50\text{ km/h}$

Rys. 2.5. Przemieszczenia pionowe uzyskane dla wymuszenia liniową funkcją impulsową, dla prędkości $v=50\text{ km/h}$

PODSUMOWANIE

Otrzymane wyniki przemieszczeń pionowych dla różnych prędkości pojazdów ciężarowych, pochodzących od wymuszeń w postaci funkcji impulsowych, nieznacznie różnią się między sobą. Również wartości przemieszczeń otrzymane w pracy doktorskiej [11] wskazują na zbliżone deformacje powstałe po obciążeniu impulsowym w strefie poślizgu. Ze względu na zalecenia podane w [2],[10], w analizach numerycznych wpływu obciążeń dynamicznych na propagację powierzchni poślizgu, na czynnym osuwisku, analizie poddano wymuszenie zaimplementowane sinusoidalną funkcją impulsową. Uzyskane wyniki wskazują na rosnące przemieszczenia pionowe dla prędkości 20 km/h . Wartości przemieszczeń pionowych dla prędkości 20 km/h są znacznie większe niż uzyskane dla prędkości 50 km/h . Dłuższy czas kontaktu obciążenia w postaci nacisku opony z nawierzchnią sprzyja rozwojowi trwałych odkształceń. Nasuwa to pytanie, czy słuszne jest stosowanie ograniczeń prędkości na drogach przebiegających na obszarach zagrożonych ruchami masowymi. Odpowiedź nie jest jednoznaczna i zależy od budowy geologicznej rozpatrywanego obszaru, częstotliwości drgań własnych ośrodka gruntowego, zadanego wymuszenia, czy paramet-

trów fizyczno-wytrzymałościowych gruntu. Poruszany problem potwierdza tezy postawione w pracy doktorskiej [11].

BIBLIOGRAFIA

1. Dokumentacja Geologiczno-Inżynierska dla opracowania systemu zabezpieczeń strefy osuwiskowej nr MPL0051 w ciągu drogi krajowej nr 75, km od 51+900 do 52+700 w miejscowości Tęgoborze-Just
2. Judycki J., i inni, *Katalog typowych konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych*, GDDKiA, 2013
3. Itasca Consulting Group Inc., FLAC, Fast Lagrangian Analysis of Continua. User's Guide, Minneapolis, (2005)
4. Wilun Z., *Zarys Geotechniki*, WKŁ, Warszawa 2010,
5. Nielsen H., *Towards a Complete Framework for Seismic Analysis in Abaqus*, Eng., Eng.and Comput. Mech., Vol 167, EM1, pp. 3-12, (2013)
6. Lysmer J., Kuhlemeyer R. L., Finite Dynamic model for infinite media, J ENG MECH DIV-ASCE, Vol. 95, No. EM4, pp. 859-876, (1969)
7. MIDAS GTS NX, *Manual specification*, 2018
8. Wrańa B., *Lectures on soil mechanics*, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2014
9. Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 2 marca 1999 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie (Dz. U. z dn. 14 maja 1999 r.)
10. Tutka P., Nagórski R., *Analiza dynamiczna nawierzchni drogowej pod obciążeniem impulsowym*. Autobusy. Eksploatacja i testy. 12/2017 s.1367-1370
11. Manterys T., *Wpływ obciążenia dróg ruchem pojazdów na aktywność osuwisk na terenach fliszu karpackiego*. Praca doktorska realizowana na Politechnice Krakowskiej, prom. Dr hab. inż. Elżbieta Pilecka.

Modeling of the influence road vibrations on movements in the slide zone under impact waves

In the paper, modeling of the effect of road vibrations on displacements in the slide zone, taking into account impulse waves is presented. The analysis was carried out for an area in which landslide movements occurred in 2010. The analysis concerning the influence of the vibration source's speed was carried out. The influence of the generated load on the values of vertical displacements created in the slide zone was analyzed. Loads from moving trucks have been included in the form of kinematic impact. Numerical simulations were carried out using a program based on the Finite Element Method.

Autorzy:

dr hab. inż. **Elżbieta Pilecka**, prof. PK – Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Lądowej, Instytut Mechaniki Budowli, Katedra Współdziałania z Podłożem.

mgr inż. **Dariusz Szwarewski** – Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Lądowej, Instytut Mechaniki Budowli, Katedra Współdziałania z Podłożem, dszwarkowski@pk.edu.pl

JEL: R42 DOI: 10.24136/atest.2018.066

Data zgłoszenia: 2018.05.21 Data akceptacji: 2018.06.15