

*Bogumił Wrana\*, Michał Kowalski\**

## ODPOWIEDŹ NASYPU ZBROJONEGO GEOSYNTETYKAMI NA OBCIĄŻENIA PARASEJSMICZNE

---

### 1. Wstęp

W artykule rozważane jest zagadnienie metody obliczeń nasypu wzmocnionego geosyntetykami na obciążenia parasejsmiczne pochodzące od wstrząsów wywołanych eksploatacją górniczą. W artykule podano metodę zalecaną w normach obliczeń nasypów, opartą na koncepcji poślizgu bryły sztywnej [5], którą po raz pierwszy podał Newmark [6]. Przegląd stosowanych wzorów koncepcji bryły sztywnej zawarty jest w artykule Linga [4]. Koncepcja ta była stosowana przy praktycznym projektowaniu ziemnych zapór [1].

Na tle metody normowej, poślizgu bryły sztywnej, w artykule przedstawiono metodę rozwiązania komputerowego. Przedstawiono rozwiązanie równania ruchu nasypu wzmocnionego geosyntetykami w postaci płaskiego stanu odkształcenia przy wymuszeniu kinematycznym jako wymuszeniu parasejsmicznym. Obliczenia przykładowe wykonano przy zastosowaniu programu FLAC, który stosuje metodę różnic skończonych do dyskretyzacji obszaru nasypu i gruntu.

### 2. Metoda poślizgu bryły sztywnej

Metoda poślizgu bryły sztywnej opiera się na założeniu ruchu bryły sztywnej po powierzchni gruntu pod wpływem obciążenia sejsmicznego (por. rys. 1), gdzie współczynnik przyspieszenia obliczany jest ze wzoru:

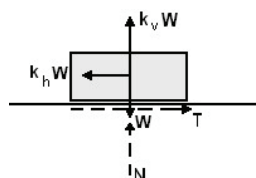
$$k = \sqrt{k_h^2 + (1 \pm k_v)^2} \quad (1)$$

gdzie:  $k_v$  oraz  $k_h$  to współczynniki pionowego i poziomego przyspieszenia.

---

\* Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska, Kraków

Współczynnik  $k_v$  przyjmowany jest ze znakiem plus lub minus w celu uzyskania niekorzystnej sytuacji projektowej. W projektowaniu na wpływy sejsmiczne współczynnik  $k_v$  przyjmowany jest z map krajowych obszarów sejsmicznych.



Rys. 1. Metoda poślizgu bryły sztywnej

Zgodnie z rysunkiem 1 siła tarcia  $T$  i reakcji  $N$  wynosi:

$$\begin{aligned} T &= k_h W, \\ N &= (-k_v)W \end{aligned} \quad (2)$$

oraz siła tarcia zgodnie z prawem Coulomba wynosi:

$$T = N \operatorname{tg} \phi \quad (3)$$

Z porównania (2) oraz (3) otrzymamy wartości graniczne współczynników granicznego przyspieszenia:

$$k_{hy} = (1 - k_v) \operatorname{tg} \phi \quad \text{lub} \quad k_{hy} = (1 + k_v) \operatorname{tg} \phi \quad (4)$$

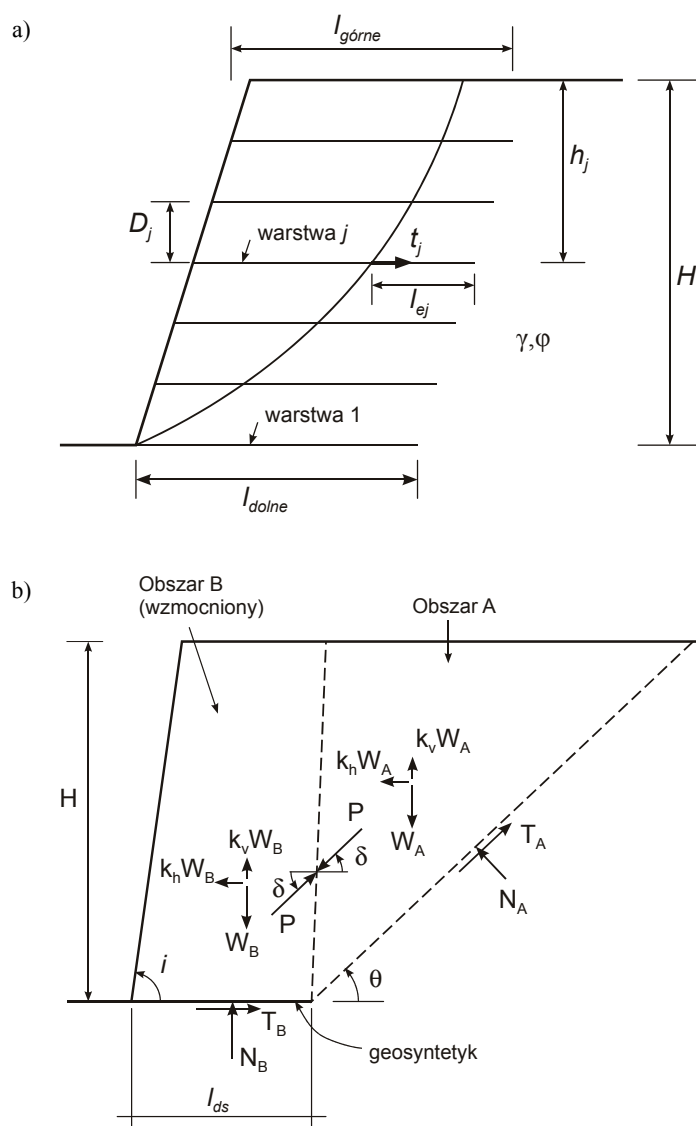
Jeśli  $k_{hy}$  przekracza wielkość normową  $k_h$ , to wtedy występuje poślizg bryły sztywnej o wartość przemieszczenia:

$$d = \iint (k_h - k_{hy}) \cdot g \cdot dt \quad (5)$$

### 3. Metoda normowa obliczeń nasypów wzmocnionych geosyntetykami

Przy projektowaniu nasypów wzmocnionych geosyntetykami uwzględnia się kilka warunków granicznych. Jednym z nich jest warunek wewnętrznej stateczności na zerwanie i na poślizg, z którego określona jest długość i wytrzymałość warstwy geosyntetyku. Drugim warunkiem jest zewnętrzna stateczność całej budowli na poślizg i na obrót. Wzory obliczeniowe sprawdzenia warunku stateczności wewnętrznej i zewnętrznej można znaleźć w pracy Leshchinskiego i in. [2].

Wzory na stateczność wewnętrzną wyprowadzane są przy założeniu warunku Rankine–Coloumba (por. rys. 2a). Położenie płaszczyzny poślizgu określa się przez wprowadzenie podziału klina odłamu na dwie części, wydzielając część w której znajduje się geosyntetyk oraz część bez geosyntetyku (por. rys. 2b). Proponowane wzory uwzględniają maksymalne wielkości przyspieszeń w kierunku pionowym zgodnie i przeciwnie do siły ciężkości.



Rys. 2. Analiza stateczności nasypu zbrojonego: a) lokalna, b) globalna

Współczynnik parcia gruntu zbrojonego  $K$  wyznacza się z warunku równowagi sił rozciągających w geosyntetyku i sił parcia gruntu:

$$K = \frac{\sum t_j}{0,5\gamma H^2} \text{ — dla całego nasypu,} \quad (6a)$$

$$K_j = \frac{t_j}{\gamma \cdot h_j \cdot D_j} \text{ — dla } j\text{-tej warstwy,} \quad (6b)$$

gdzie:

$\gamma$  — jest ciężarem objętościowym gruntu,

$H$  — jest wysokością nasypu,

$h_j$  — jest głębokością  $j$ -tej warstwy geosyntetyku liczoną od korony,

$t_j$  — jest wymaganą wytrzymałością geosyntetyku w  $j$ -tej warstwie liczoną z warunku lokalnej stateczności na poślizg

$D_j$  — różnica poziomów między  $j$ -tą warstwą a warstwą  $j + 1$ .

Wymagana wytrzymałość geosyntetyku i jego długość określona jest wzorem:

$$L_c = \frac{l_c}{H}, \quad (7)$$

$$L_{ds} = \frac{l_{ds}}{H}$$

gdzie  $l_c$  oraz  $l_{ds}$  jest wymaganą długością zakotwienia z uwagi na siłę rozciągającą w geosyntetyku oraz wymaganą długością zakotwienia z uwagi na poślizg geosyntetyku.

W praktycznych obliczeniach na podstawie wymaganej długości  $l_c$  oraz  $l_{ds}$  na koronie i spodzie nasypu wyznaczane są długości pośrednie przez interpolację liniową.

W każdej  $j$ -tej warstwie siła rozciągająca w geosyntetyku musi być mniejsza od wartości granicznej. W praktycznych obliczeniach ten warunek graniczny sprawdzany jest w najniższych  $m$  warstwach.

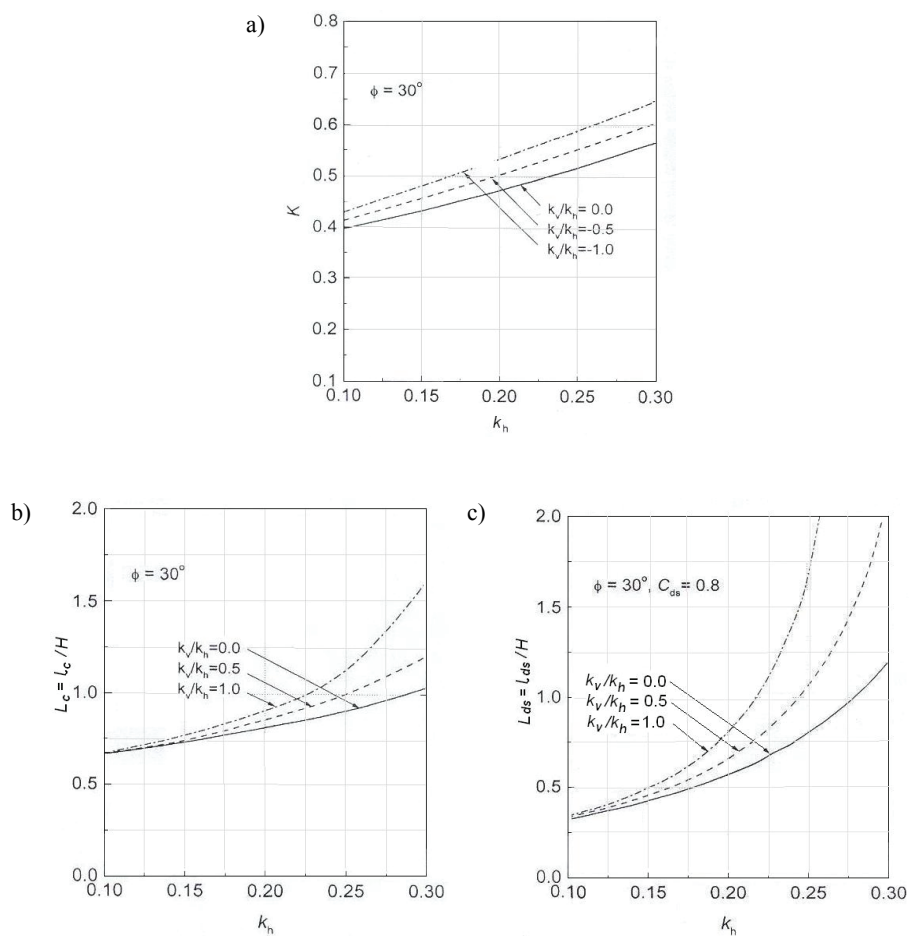
Na rysunku 3 przedstawiono przykładowe wykresy wartości  $K$ ,  $L_c$  oraz  $L_{ds}$  dla kąta tarcia wewnętrznego  $\phi = 30^\circ$  oraz  $C_{ds} = \frac{\text{tg}\phi_s}{\text{tg}\phi}$ , wykresy przytoczono za pracą Leshchinsky'ego [2].

Wymagana długość zakotwienia geosyntetyku w gruncie  $l_{ej}$  jest określana przy znanej wielkości siły rozciągającej  $t_j$  w warstwie  $j$ -tej:

$$l_{ej} = \frac{t_j}{2(1 - k_v) \cdot \sigma_{vj} C_i \tan \phi}, \quad (8)$$

gdzie  $\phi$ ,  $C_i$ ,  $\sigma_{vj}$  to kąt tarcia wewnętrznego, współczynnik interakcji grunt–geosyntetyk oraz średnia wartość naprężeń przecięcia w  $j$ -tej warstwie geosyntetyku.

Współczynnik  $C_i$  to stosunek wytrzymałości geosyntetyku na wyciąganie do wytrzymałości gruntu, tj. do  $\tan \phi$ .



**Rys. 3.** Wykresy wartości  $K$ ,  $L_c$  oraz  $L_{ds}$  dla kąta tarcia wewnętrznego  $\phi = 30^\circ$

Ling i Leshchinsky [3] zaproponowali wzory na współczynnik płynięcia  $k_{hy}$  oraz przesmyczceń granicznych w postaci uproszczonej:

$$k_{hy} = \frac{W_B C_{ds} \tan \phi + W_A \tan(\phi - \alpha) \Lambda}{W_B (1 + \lambda C_{ds} \tan \phi) + W_A [1 + \lambda \tan(\phi - \alpha)] \Lambda} \quad (9)$$

$$d = (1 + \lambda C_{ds} \tan \phi) \iint (k_h - k_{hy}) g \cdot dt \quad (10)$$

gdzie  $W_A$  oraz  $W_B$  oznaczają ciężar gruntu zbrojonego oraz gruntu klina odłamu (por. rys. 2b),

$$\lambda = k_{vo}/k_{ho},$$

$$\Lambda = \frac{1 - C_{ds} \tan \delta \tan \phi}{1 - \tan \delta \tan(\phi - \alpha)},$$

$$C_{ds} = \frac{\tan \phi_s}{\tan \phi},$$

gdzie:

- $\phi_s$  — kąt tarcia między gruntem a geosyntetykiem,
- $\phi$  — kąt tarcia wewnętrznego gruntu,
- $\delta$  — kąt tarcia wewnętrznego gruntu między warstwami geosyntetyku (wynoszący od  $\phi$  do  $\phi/2$ ),
- $\alpha$  — kąt nachylenia płaszczyzny poślizgu wyznaczony numerycznie lub na podstawie wzorów doświadczalnych [7].

#### 4. Analiza numeryczna nasypu zbrojonego geosyntetykami

Rozważany jest problem analizy dynamicznej nasypu zbrojonego geosyntetykami przy obciążeniu parasejsmicznym pochodzącym od wstrząsów wywołanych eksploatacją górnictw. Zastosowano tu model płaskiego stanu odkształcenia do analizy nasypu, posługując się macierzowym równaniem ruchu:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{d}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{d}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{d}(t) = -\ddot{\mathbf{a}}(t)\mathbf{M} \quad (11)$$

gdzie:

- $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{C}$  i  $\mathbf{K}$  — to kolejno macierz mas, tłumienia i sztywności modelu,
- $\ddot{\mathbf{d}}(t)$ ,  $\dot{\mathbf{d}}(t)$ ,  $\mathbf{d}(t)$  — to kolejno przyspieszenia, prędkości i przemieszczenia w węzłach modelu,
- $\ddot{\mathbf{a}}(t)$  — to przyspieszenia w podporowych stopniach swobody.

Na pionowych brzegach modelu zastosowano specjalne warunki brzegowe pochłaniające energię fal (ang. *quiet boundary*).

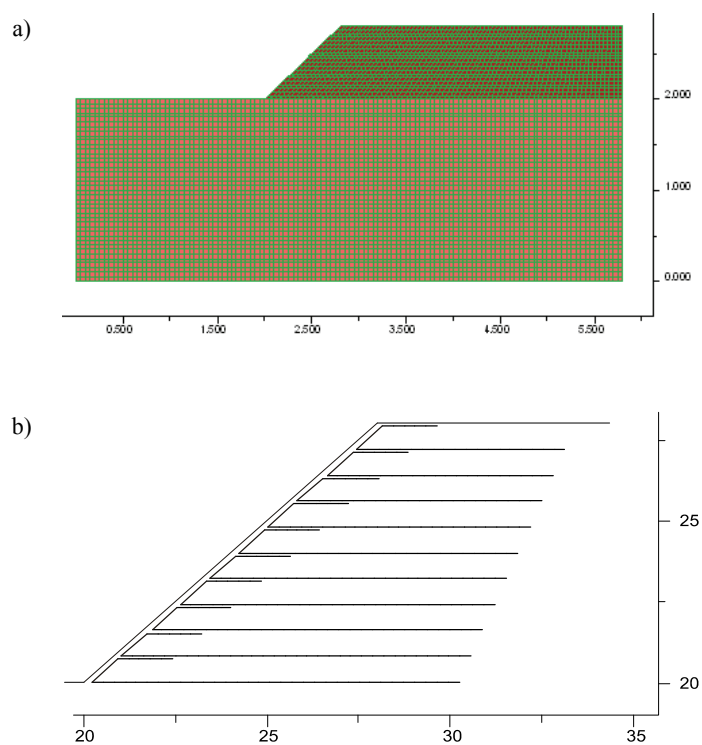
Nieliniowe fizyczne równanie ruchu (11) rozwiązano przez numeryczne całkowanie w 2048 chwilach czasowych. Do obszaru gruntu zastosowano model plastyczności Coulom-

ba–Mohra, parametry gruntu przedstawiono w tabeli 1, a geosyntetyk został zamodelowany jako jednowymiarowy element z nieliniową charakterystyką fizyczną.

TABELA 1  
Parametry przyjęte do obliczeń

| Warstwa           | Gęstość objętościowa [kg/m <sup>3</sup> ] | Kąt tarcia wewnętrznego [°] | Kohezja [kPa] | Moduł Younga [MPa] | Współczynnik Poissona [-] |
|-------------------|---|-----------------------------|---------------|--------------------|---------------------------|
| Grunt pod nasypem | 2200                                      | 18                          | 20            | 100                | 0.25                      |
| Nasyp             | 2000                                      | 35                          | 7             | 60                 | 0.25                      |

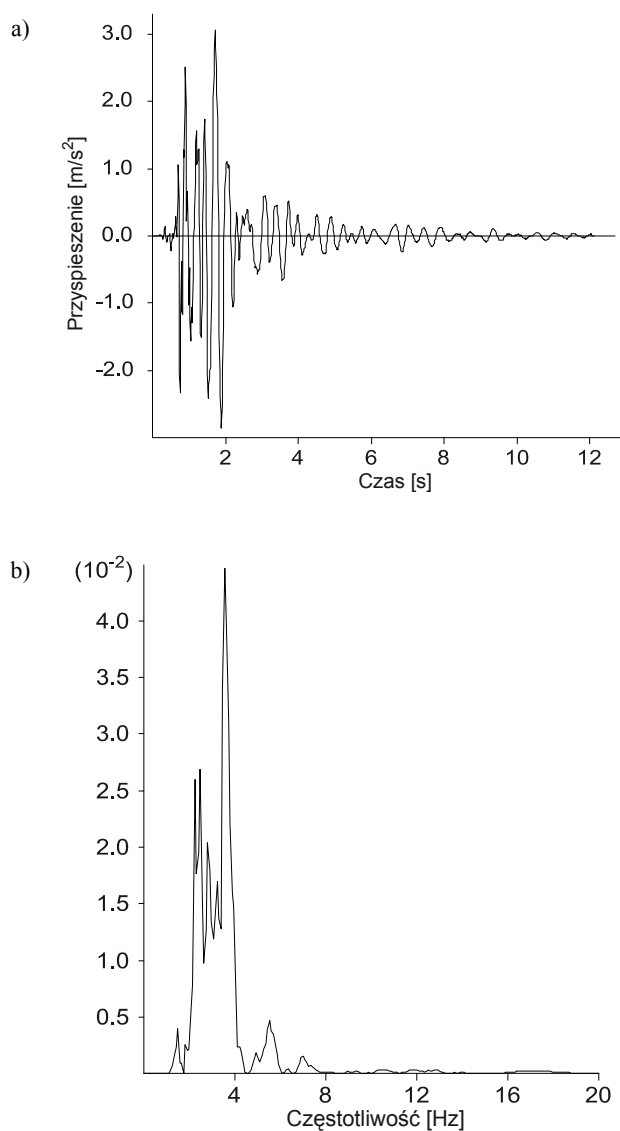
Na rysunku 4 przedstawiono geometrię rozważanego nasypu wraz z gruntem pod nasypem (por. rys. 4a) oraz rozkład warstw geosyntetyków zastosowanych do zbrojenia nasypu (por. rys. 4b).



Rys. 4. Nasyp: a) geometria rozważanego obszaru gruntu, b) rozkład warstw zbrojenia geosyntetykami

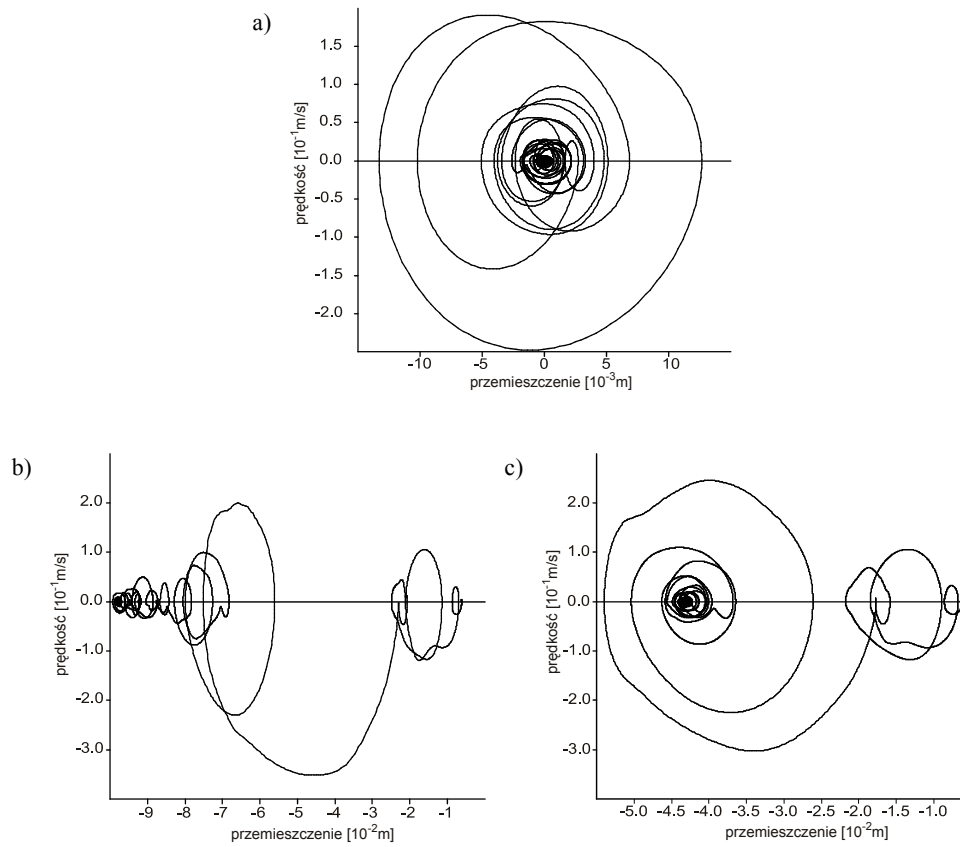
Na rysunku 5 przedstawiono charakterystykę wymuszenia parasejsmicznego pochodzącego od odstrzałów w kopalni Szombierki, rysunek 5a to przebieg w czasie wymuszenia, rysunek 5b to transformata Fouriera wymuszenia.

Na rysunku 6 przedstawiono przebiegi przemieszczeń pionowych w czasie dla górnej krawędzi skarpy nasypu z zastosowaniem zbrojenia geosyntetykami oraz bez zastosowania geosyntetyków, a na rysunku 7 — przemieszczenia pionowe korony nasypu.

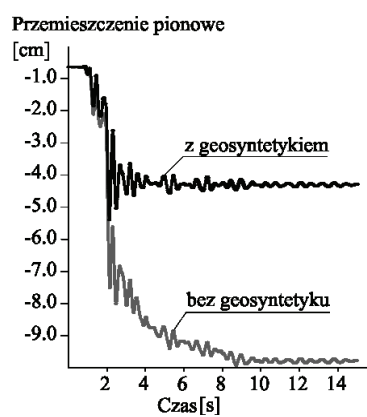


**Rys. 5.** Wymuszenia parasejsmiczne: a) przebieg w czasie, b) transformata Fouriera





**Rys. 6.** Pionowy ruch górnej krawędzi skarpy nasypu: a) rozwiązanie sprężyste, b) model nieliniowy bez geosyntetyków, c) model nieliniowy z geosyntetykami



**Rys. 7.** Przemieszczenia pionowe korony nasypu

## 5. Wnioski i uwagi końcowe

W artykule przedstawiono metody obliczenia nasypu zbrojonego geosyntetykami na obciążenia parasejsmiczne pochodzące z eksploatacji górniczej.

Przedstawiono dwie główne metody obliczeń: metodę obliczeń stosowaną w normach inżynierskich oraz metodę obliczeń komputerowych. Metoda obliczeń inżynierskich bazuje na uproszczonych modelach, lecz uwzględnia wpływ niejednorodności charakterystyk materiałowych i niejednorodności obciążeń, przez co pozwala na bezpieczne projektowanie inżynierskie. Natomiast metoda obliczeń komputerowych bazuje na modelach materiału w ramach teorii plastyczności gruntu i nieliniowym opisie zachowania się geosyntetyku przy konkretnym obciążeniu dynamicznym, zatem metoda ta pozwala na uzyskanie dokładniejszej odpowiedzi konstrukcji, lecz ta odpowiedź jest ściśle związana z przyjętymi założeniami i na ogół nie można jej uogólnić.

### LITERATURA

- [1] *Haynes M.E., Franklin A.G.*: Rationalizing the Seismic Coefficient Method. Miscellaneous paper GL-84-13. Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, Vicksburg, MS, 1984
- [2] *Leshchinsky D., Ling H.L., Hanks G.*: Unified design approach to geosynthetic reinforced slopes and segmental walls. *Geosynth. Int.* 2(5), 1995, 845–881
- [3] *Ling H.I., Leshchinsky D.*: Effects of vertical acceleration on seismic design of geosynthetic-reinforced soil structure. *Geotechnique* 48(3), 1998, 347–373
- [4] *Ling H.I.*: Recent application of sliding block theory to geotechnical design. *Soil Dyn. Earthquake Eng.* 21(3), 2001, 189–197
- [5] *Ling H.I.*: Application of sliding block concept to geosynthetic-constructed facilities. in: *Ling H.I., Leshchinsky D., Tatsuoka F., Reinforced Soil Engineering. Advances in Research and Practice*, Marcel.Dekker, Inc., 2003, s. 95–111
- [6] *Newmark N.M.*: Effects of earthquakes on dams and embankments. *Geotechnique* 15(2), 1965, 139–159
- [7] *Richards R., Elms D.G.*: Seismic passive resistance of tied-back walls. *J.Geotech. Eng. ASCE* 118(7), 1992, 996–1011