

Lidia Fedorowicz*, Jan Fedorowicz*

UWZGLĘDNIENIE PREKONSOLIDACJI W OCENIE STANU GRANICZNEGO W ROZLUŻNIAJACYM SIĘ PODŁOŻU GÓRNICZYM**

1. Wprowadzenie

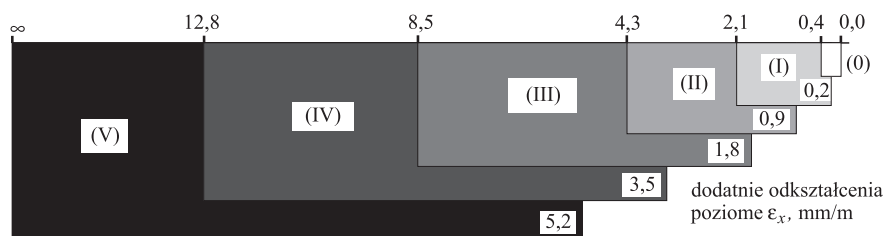
Założenie, że prawidłowo prowadzona eksploatacja może wywołać jedynie kontrolowane, ciągłe deformacje powierzchni terenu, które nie powinny być przyczyną stanów awaryjnych w konstrukcji zabezpieczonej na wpływy górnicze, okazuje się w wielu przypadkach dużym uproszczeniem w stosunku do rzeczywistości. Skutki działalności górniczej obserwujemy głównie na Śląsku. Na powierzchni ujawniają się zwykle w formie deformacji określanych jako niecki górnicze, którym towarzyszy w określonych sytuacjach powstawanie zalewisk. Jeżeli dochodzi do nadmiernego wyężenia deformującej się konstrukcji budowlanej, powstają w niej charakterystyczne postaci uszkodzeń. Nieraz są one czytelnym obrazem bądź nadmiernych przemieszczeń pionowych (a dokładniej różnic przemieszczeń w obrębie konstrukcji), bądź lokalnej dominacji odkształceń poziomych w rzeczywistym stanie deformacji podłoża górniczego; przy czym skutki przypadku drugiego czytelniejsze są zwykle w konstrukcjach o charakterze liniowym. Wpływ eksploatacji na budowle ujawnia się także (szczególnie w pewnych rejonach Śląska) w postaci nadmiernych i wymagających rektyfikacji wychyleń.

Sposoby obliczeniowego przekazywania deformacji podłoża górniczego na współpracującą z nią konstrukcję budowlaną klasycznie związane są z wielkościami wskaźników deformacji terenu [10], traktowanych dla potrzeb inżynierii budowlanej jako „składowe” przewidywanego stanu deformacji powierzchni. Mówienie o możliwości wyraźnej dominacji jednego ze wskaźników w pełnym obrazie rzeczywistego stanu deformacji ma coraz lepsze udokumentowanie w postaci zarejestrowanych pomiarów *in situ*. Obrazuje to np. rysunek 1, sporządzony na bazie tablicy opublikowanej w pozycji [4], pokazujący przedziały

* Wydział Budownictwa, Politechnika Śląska, Gliwice

** Obliczenia numeryczne wykonano w ACK CYFRONET, Kraków, w ramach grantu MNiI/SGI2800/PSląska/039/2004. Praca posiada wsparcie finansowe Komitetu Badań Naukowych nr 1505/T07/2005/28

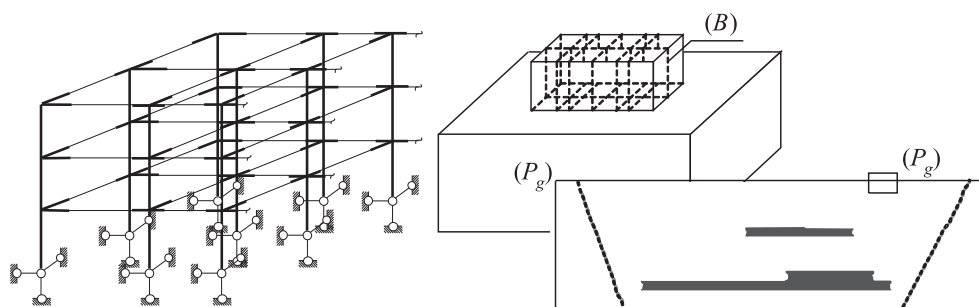
występowania dodatnich odkształceń poziomych ε_x dla poszczególnych kategorii terenu górniczego z odchyleniem standardowym, które nie przekroczy 95%.



Rys. 1

Odpowiedzialne zatem podejście do analizy pracy układu konstrukcja budowlana — podłoże górniczne zawiera w sobie konieczność rozważenia problemów związanych z kolejnymi zadaniami:

- 1) budowę adekwatnego układu obliczeniowego $(B)-(P_g)$, budowla — deformujące się podłoże górniczne (rys. 2),
- 2) doбором modeli konstytutywnych obu podukładów, podłoża gruntowego i budowli, w układzie obliczeniowym $(B)-(P_g)$, oraz
- 3) odpowiednim przyjęciem przewidywanego stanu deformacji podłoża górniczego i przetworzeniem go na obciążenie kinematyczne podukładu (P_g) .



Rys. 2

Spełnienie powyższych zadań ma prowadzić do właściwej oceny pracy konstrukcji na podłożu odkształcającym się w wyniku eksploatacji górniczej.

Ocenę tę jednak można przeprowadzić na dwa sposoby:

- 1) w sposób klasyczny — posługując się metodami mechaniki budowli (schematy prętowe na rys. 2), przy podłożu opisanym w sposób parametryczny, oraz
- 2) stosując analizy numeryczne MES, przestrzenne lub płaskie.

Ogólnie uznaje się, że w przypadku analiz typu (1), w których zastosowanie znajdują klasyczne sposoby przekazywania deformacji podłoża na podukład (B), (np. [8, 10]), otrzymywane wyniki mają charakter „konserwatywny”, zapewniający bezpieczeństwo analizowanej budowli.

W przypadku analiz typu (2) — z podłożem gruntowym w postaci płaskiego lub przestrzennego podukładu (P_g) — wiarygodność wyników analizy układów (B)–(P_g) jest szczególnie silnie związana z:

- zastosowanym modelem podłoża gruntowego, oraz
- wprowadzonymi do obliczeń warunkami brzegowymi.

Stany awaryjne konstrukcji na terenach górniczych wiążą się zazwyczaj z pojawieniem się dużych, znacznie przekraczających prognozowane stanów deformacji swobodnej (nieobciążonej konstrukcją) powierzchni terenu górniczego, a co za tym idzie odpowiednimi deformacjami warstwy podłoża współpracującej z konstrukcją budowlaną. Ocena takich stanów wymaga oczywiście analiz typu (2).

Poniższa praca poświęcona jest przedstawieniu warunków, jakie zdaniem autorów powinny być spełnione dla adekwatnego odtworzenia rzeczywistego stanu granicznego w numerycznym modelu podłoża w układzie obliczeniowym (B)–(P_g), konstrukcja budowlana-górnice podłoże gruntowe.

2. Zastosowanie Modelu Coulomba–Mohra w numerycznej ocenie wytrzymałości podłoża w stanie granicznym wywołanym rozluźnieniem gruntu

Zjawisko zniszczenia w gruncie jest ogólnie rezultatem zmobilizowania maksymalnych naprężeń ścinających, jakich grunt może doznać np. pod wpływem zmiany obciążenia. W podłożu górniczym stan osiągnięcia wytrzymałości gruntu na ścinanie wiąże się zwykle z wymuszonymi eksploatacją przemieszczeniami i odkształceniami gruntu. W pewnych obszarach podłoża gruntowego, które podlega deformacjom górniczym, może dojść do powstania stanu równowagi granicznej. Wskazywać na to mogą w pewnych przypadkach zarówno wartości pomierzonych deformacji powierzchni terenu, jak i obserwacje zachowania przypowierzchniowych warstw podłoża, sygnalizujące zagrożenie pojawienia się deformacji nieciągłych [5–7]. Niezmiernie istotne w opisie zachowania rozluźnianego (lub zagęszczanego) podłoża gruntowego są wyniki badań laboratoryjnych [3], analizowane szeroko w pozycjach [5, 6] (rys. 4). Obserwacje stanów naprężenia i odkształcenia w podłożu gruntowym mogą bazować także na wynikach analiz numerycznych; przy czym można stwierdzić, że większość analiz numerycznych w zagadnieniach inżynierskich bazuje głównie z uwagi na klarowność parametrów wytrzymałościowych (φ , c), na sprężysto-idealnie plastycznym opisie pracy gruntu.

Przeprowadźmy zatem analizę numeryczną poziomo rozluźnianego podłoża górnictwo, opisanego modelem sprężysto-idealnie plastycznym o powierzchni plastyczności Coulomba–Mohra (rys. 3). Wraz ze wzrostem wymuszanego przyrostowo rozluźnienia gruntu, czyli ze wzrostem wartości całkowitego odkształcenia podłoża ϵ_x^f , postępuje proces powiększania się strefy, w której ustala się stan równowagi plastycznej poprzedzającej plastyczne zniszczenie. W strefie tej naprężenia poziome osiągają wartość:

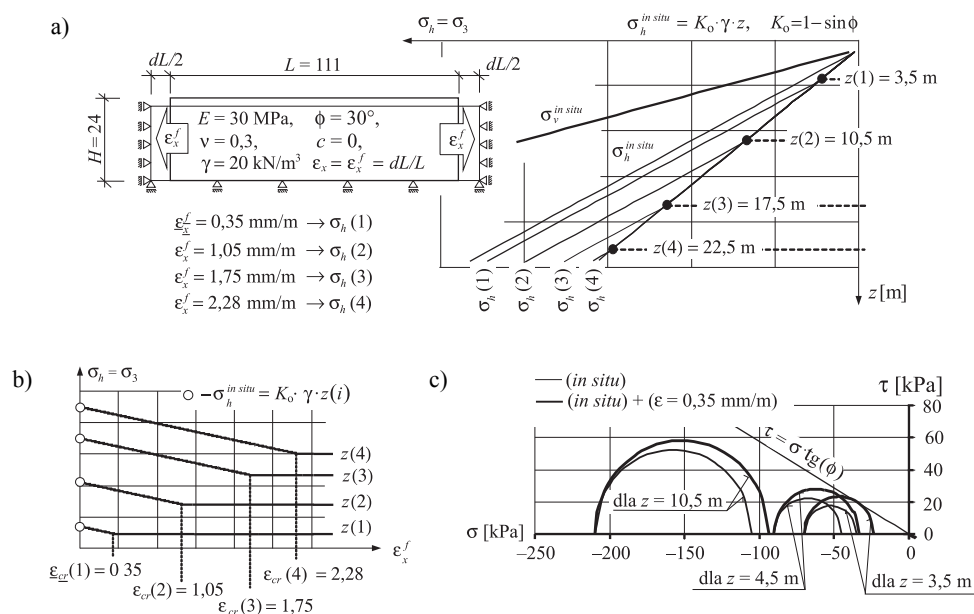
$$\sigma_h(z) = K_a^n \cdot \sigma_v(z) = K_a^n \cdot \gamma \cdot z, \quad (1)$$

gdzie: wartość współczynnika parcia aktywnego odpowiadająca stanowi Rankina [9] zgodnie z rozwiązaniem teoretycznym wynosi $K_a = (1 - \sin\phi)/(1 + \sin\phi)$; wartość określona numerycznie (rys. 3a) $K_a^n = K_a = 0,333$ dla kąta tarcia wewnętrznego $\phi = 30^\circ$.

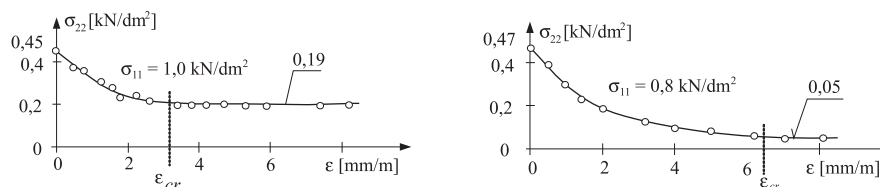
Istotne jest stwierdzenie, że w podłożu (P_g) opisanym modelem Coulomba–Mohra proces tworzenia się i powiększania strefy równowagi plastycznej zachodzi zawsze w kierunku od powierzchni terenu w głąb podłoża gruntowego (rys. 3a, 3c).

Rysunek 3b przedstawia otrzymane w modelu Coulomba–Mohra funkcje: przyrost poziomego odkształcenia podłoża ϵ_x^f (wzrost rozluźnienia gruntu) — zmiany naprężenia poziomego σ_h (σ_3).

Zależności te wyznaczają, dla określonych wartości naprężeń pionowych $\sigma_v = \sigma_1 = \gamma \cdot z$, krytyczne wartości odkształceń $\epsilon_{cr}(z)$, przy których od powierzchni do danej głębokości (z) ustala się rankinowski stan równowagi plastycznej.



Rys. 3



Rys. 4

Za [7]

W modelu Coulomba–Mohra otrzymuje się zatem nie tylko:

- uproszczony obraz rzeczywistego, nieliniowego zachowania się rozluźnianego (lub zagęszczanego) gruntu (badania laboratoryjne — rysunek 4 za [7]), ale co istotniejsze
- zdecydowanie nierealistyczne wartości odkształceń krytycznych towarzyszących uplastycznieniu gruntu, co wiąże się z natychmiastowym (od początku realizacji procesu wymuszania odkształceń ϵ_x) pojawianiem się stanu granicznego w przypowierzchniowej warstwie modelu. Stan ten należy, odwołując się do wyników badań z rysunku 4, odnieść do wartości odkształceń krytycznych otrzymywanych przy określonych wartościach naprężeń głównych, reprezentujących naprężenia *in situ*.

3. Analiza podłoża w stanie granicznym w modelu stanu krytycznego *Modified Cam-Clay* (MCC)

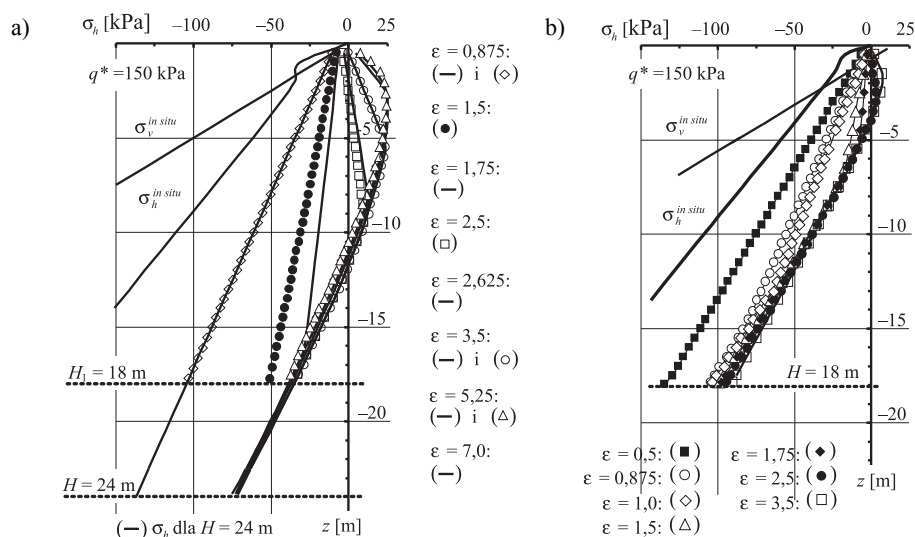
Realistyczny opis zachowania gruntu powinien łączyć opis stanu naprężenia z wynikającymi stąd zmianami objętości. W modelach stanu krytycznego występuje sprzężenie oceny wytrzymałości gruntu w naprężeniach z rejestracją zmiany odkształceń objętościowych w przestrzeni (p, q, e) lub (p, q, V) , gdzie p, q — są to niezmienniki stanu naprężenia, e — wskaźnik porowatości, V — objętość specyficzna określona jako $V = 1 + e$.

Przeanalizujmy zatem proces powstawania stanu granicznego w rozluźniającym się podłożu górnym, o określonej historii obciążenia w przeszłości, powtarzając analizy przedstawione w rozdziale 2 w modelu MCC (OC). Dla gruntu prekonsolidowanego (OC) o dwóch różnych wartościach przeciążenia q^* wprowadzono rozkład naprężeń σ_h *in situ* według Wrotha [9], oraz następujące parametry modelu: $\lambda = 0,066$, $\kappa = 0,0074$, $M = 1,2$, $\nu = 0,3$, $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$ [1, 2].

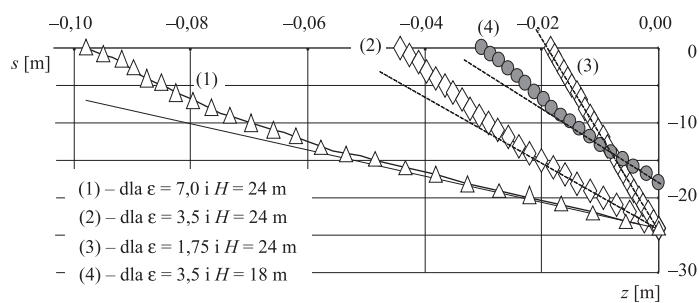
Podłoże (P_g) — o stopniu prekonsolidacji gruntu określonym wartością przeciążenia w przeszłości $q^* = 150 \text{ kPa}$ — poddano stanowi wzrastających deformacji poziomych powodujących jego rozluźnienie. Na rysunku 5a widzimy obraz postępującej, wraz ze wzrostem rozluźnienia gruntu, redukcji wartości naprężeń poziomych σ_h . Zmieniające się naprężenia główne (σ_v, σ_h) przechodzą wpierw w stan normalnej konsolidacji (na powierzchni stanu SBS), aby wraz z postępującym rozluźnieniem gruntu osiągnąć czynny stan graniczny (stan równowagi plastycznej reprezentowanej przez wartości $(\sigma_v, K_a \cdot \sigma_v)$).

Należy zwrócić uwagę na to, że graniczny stan równowagi plastycznej tworzy się w modelu z historią obciążenia na dolnym brzegu modelu podłoża gruntowego i rozszerza się w miarę wzrostu odkształceń ϵ_x w kierunku powierzchni. Obliczenia powyższe przeprowadzono dwukrotnie, przy wysokościach modelu (P_g): $H = 24$ m i $H_1 = 18$ m ($L = 111$ m, niezmienna). Widzimy, że zmiany wysokości modelu nie wpłynęły na przebieg procesu powstawania czynnego stanu Rankina w analizowanym podłożu. Na rysunku 5b powtórzono analizę procesu tworzenia się stanu granicznego w podłożu (P_g) o stopniu przeciążenia w przeszłości wyrażonym wartością $q^* = 50$ kPa. Podłoże poddano procesowi rozluźniania w sposób identyczny jak uprzednio.

Uzupełnieniem rysunku 5a jest rysunek 6, pokazujący wpływ wysokości modelu numerycznego na ocenę wartości dodatkowych osiadań $s(z)$ w analizowanym podłożu (P_g).



Rys. 5



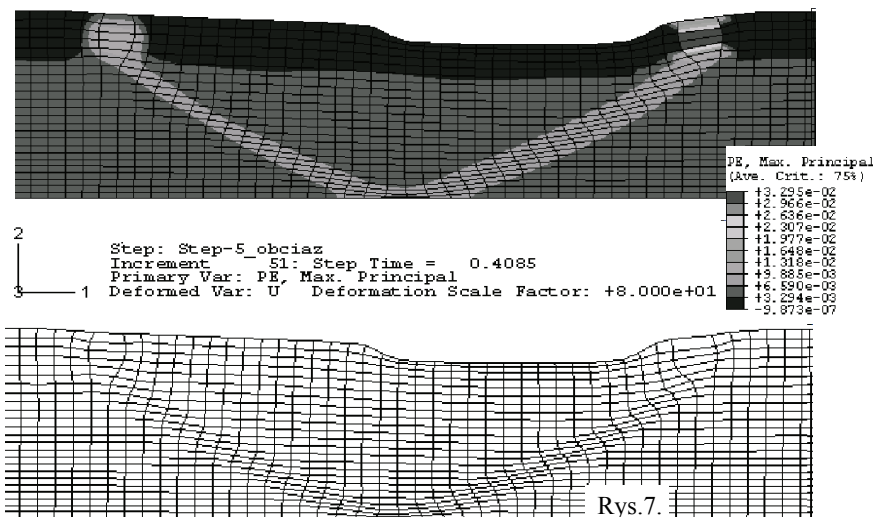
Rys. 6

4. Obciążenie rozluźnionego podłoża górniczego w modelu (MCC). Wnioski

Jeżeli podłoże górnicze zagrożone jest powstaniem stanu granicznego związanego z nadmiernym rozluźnieniem (ewentualnie zagęszczeniem) gruntu, to dla bezpiecznej, bezawaryjnej pracy konstrukcji istotna jest dodatkowo ocena zmiany stanu deformacji pionowych. Powstawaniu stanu granicznego Rankina w podłożu prekonsolidowanym towarzyszy zjawisko lokalnych zmian sztywności podłoża. Może to tłumaczyć przyczyny niektórych awarii budowli wiotkich (np. drogi, nasypy), lecz wrażliwych na duże, a w określonych warunkach gruntowych także nierównomierne deformacje podłoża. Jeżeli cały maszyn grunty jest wyteżony tak, że naprężenia główne w każdym punkcie zachowują ten sam kierunek, wtedy zgodnie z teorią Rankina istnieje sieć potencjalnych linii poślizgu, jednakowo nachylonych do płaszczyzn głównych. Poniższy rysunek przedstawia końcowy etap przeprowadzonej analizy numerycznej, w której otrzymano stan odpowiadający awarii w podłożu gruntowym.

Symulacja pracy podłoża (P_g) z rozdziału 3 przeprowadzona została w dwóch etapach:

- 1) rozluźnienie gruntu wywołane działaniem odkształceń poziomych dochodzących do wartości $\epsilon_x = 7$ mm/m, przy których stan równowagi plastycznej obejmuje większość obszaru podłoża (P_g) z wyjątkiem pasa przy powierzchni terenu o miąższości ok. 1,5 m,
- 2) przyrostowe obciążenie podłoża na długości $L_1 = 15$ m. Istniejąca w modelu możliwość przemieszczeń poziomych w obrębie dolnej krawędzi warstwy podłoża będącej w stanie granicznym doprowadza do utraty stateczności podłoża przy wartości obciążenia $q = 30$ kPa (rys. 7).



Rys. 7

5. Wnioski

- 1) Ocenę stopnia zagrożenia wystąpieniem czynnego stanu granicznego w podłożu górnicy należy przeprowadzać przy uwzględnieniu prekonsolidacji podłoża gruntowego.
- 2) Ocena wartości odkształceń krytycznych, towarzyszących powstawaniu stanu granicznego na określonej głębokości rozluźniającego się podłoża górnicy w modelu MCC (OC), jest niesprzeczna z dostępnymi wynikami badań laboratoryjnych.
- 3) Przy ocenie dodatkowych przemieszczeń pionowych podłoża pod konstrukcją narażoną na wpływ działania odkształceń poziomych podłoża ϵ_x należy zwrócić uwagę na to, że wartości te związane są wysokością numerycznego modelu podłoża.

LITERATURA

- [1] *Fedorowicz L., Fedorowicz J.*: Numeryczna ocena wytrzymałości gruntu na ścinanie w podłożu podlegającym deformacjom górnicy. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, nr 1756, seria Budownictwo, z. 111, Konferencja Naukowa z okazji 70-lecia urodzin Profesora Macieja Gryczmańskiego „Teoretyczne i praktyczne aspekty Geotechniki”, 2007, 149–156
- [2] *Fedorowicz L.*: Zagadnienie kontaktowe budowla — podłoże gruntowe. Część I. Kryteria modelowania i analiz podstawowych zagadnień kontaktowych konstrukcja budowlana — podłoże gruntowe. Gliwice, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria Budownictwo, nr 1729, z. 107, 2006
- [3] *Glinko H.*: Rozpękanie gruntu w świetle jego reologicznych własności. Katowice, Główny Instytut Górnictwa, 1973 (praca doktorska)
- [4] *Kowalski A.*: Nieustalone górnicy deformacje powierzchni w aspekcie dokładności prognoz. Katowice, Prace Naukowe Głównego Instytutu Górnictwa, nr 871, 2007
- [5] *Kowalski A.*: Problemy prognoz deformacji powierzchni w Górnicy Śląskim Zagłębiu węglowym. Prace Naukowe Głównego Instytutu Górnictwa „Problemy ochrony obiektów budowlanych na terenach górnicy”, Kwartalnik, wydanie specjalne, nr V/2007, 2007, 103–106
- [6] *Kwiatkiewicz J.*: Wybrane problemy geotechniki terenów górnicy. Wrocław, Wydawnictwo PAN Oddział w Katowicach, Komisja Górnictwa, Zakład Narodowy im. Ossolińskich, 1982
- [7] *Kwiatkiewicz J.*: Obiekty budowlane na terenach górnicy. Katowice, Wydawnictwo Głównego Instytutu Górnictwa 2007
- [8] Praca zbiorowa: Ochrona powierzchni przed szkodami górnicy. Katowice, Wydawnictwo Śląsk 1980
- [9] *Whitlow R.*: Basic Soil Mechanics. Edinburgh, Longman Group UK Limited 1995
- [10] Wytyczne projektowania budynków na terenach górnicy. Warszawa, Wydawnictwo Instytutu Techniki Budowlanej 2004