

EUROKOD 7 – STAN GRANICZNY UŻYTKOWALNOŚCI

Jacek Pieczyrak

Akademia Techniczno-Humanistyczna, Bielsko-Biała

Streszczenie. W artykule przedstawiono wybrane metody obliczania osiadań fundamentów oraz scharakteryzowano warunki stawiane przez Eurokod 7 w zakresie spełnienia stanu granicznego użytkowości.

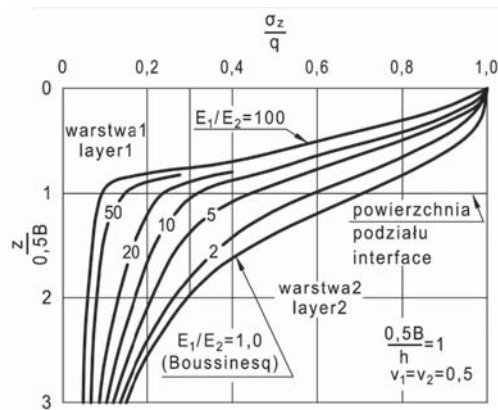
Słowa kluczowe: Eurokod 7, stan graniczny użytkowości, osiadanie fundamentów

WSTĘP

Stan graniczny użytkowości wraz ze stanem granicznym nośności wyczerpują kryteria projektowania posadowień fundamentów [Bieriezancew 1964]. Chętniej i częściej projektuje się ze względu na stan graniczny nośności (pozwala to przyjąć wymiary podstawy fundamentu), jednakże dopiero spełnienie kryterium granicznego stanu użytkowości gwarantuje wymagane zachowanie się konstrukcji spoczywającej na fundamencie. Warto przy tym pamiętać o uwarunkowaniach, które decydują o dokładności obliczanych osiadań fundamentu [Pieczyrak 1992a]. Na przykład wymienić tu można dokładność rozpoznania budowy podłoża gruntowego (i jego uwarstwienia) oraz oceny zarówno wartości modułów odkształcenia gruntu, jak i ich zmiany wraz z głębokością. W zakresie połowych badań modułów odkształcenia gruntu na wyróżnienie zasługują sondowania, w szczególności statyczne.

Istotne znaczenie ma też znajomość rozkładu naprężeń w podłożu gruntowym. Jak dotąd brak jest dokładnej metody określania stanu naprężenia w warstwie gruntu rzeczywistego. Jako prawidłowe stosuje się tu rozwiązanie teorii sprężystości, dotyczące ośrodka jednorodnego i izotropowego. Niekiedy stosuje się poprawki empiryczne przybliżające rozwiązanie teoretyczne do wyników badań albo nieco bardziej złożone modele podłoża (półprzestrzeń anizotropowa, anizotropia warstwowa itp.). W tym stanie rzeczy ustalona wartość prognozowanych przemieszczeń (osiadań) jest jedynie przybliżona.

Przydatność liniowej teorii sprężystości do obliczania przemieszczeń fundamentów badano przez porównanie otrzymanych wyników z wynikami obliczeń wykonanych metodami bardziej wyrafinowanymi [Burland i in. 1977]. Analizy te dla materiałów anizotropowych, niejednorodnych oraz nieliniowych wykazały, że błędy dotyczące rozkładu naprężenia pionowego, ustalone według teorii liniowej sprężystości dla ciał izotropowych, są bardzo małe. Natomiast inne składniki naprężenia oraz przemieszczenia są bardzo wrażliwe na przyjęty model gruntu. Ponadto, jak wykazał Burmister [1956], naprężenie pionowe może się znacząco różnić od przewidywanego przez rozwiązanie Boussinesqa w przypadku warstwy sztywniejszej położonej nad warstwą bardziej ściśliwą. Wynika to z faktu, że ta warstwa górna na ogół powoduje wyraźniejszy zanik obciążenia (rys. 1).



Rys. 1. Rozkład naprężenia pionowego w przypadku warstwy sztywnej spoczywającej na warstwie bardziej odkształcalnej [Burmister 1956]

Fig. 1. Vertical stress distribution in the case of rigid layer founded on the more deformed layer [Burmister 1956]

W wielu przypadkach, szczególnie obiektów niewielkich, odstępuje się od sprawdzania granicznego stanu użytkowości. Dotyczy to zwykle budowli zaliczanych do pierwszej kategorii geotechnicznej.

Artykuł przygotowany został na Konferencję Naukowo-Techniczną „Projektowanie geotechniczne – badania i dobór parametrów” (ProGeotech 2013).

METODY OBLICZANIA OSIADAŃ

U podstaw ustaleń wszelkich form przemieszczeń fundamentów są osiadania (s) wyznaczane w wybranych punktach podłoża. W zastosowaniu inżynierskim osiadania można obliczać jedną z trzech następujących metod:

- odkształceń jednoosiowych (zwana też metodą naprężeń),
- odkształceń trójosiowych (w skrócie zwana metodą odkształceń),
- współczynnika wpływu.

Do czasu wejścia w życie Eurokodu 7 w powszechnym zastosowaniu w Polsce była metoda naprężeń [Pieczyrak 1992b]. Metoda ta była preferowana przez kolejne edycje normy PN-81/B-03020 i jest dobrze znana polskiemu inżynierowi. Wzór podany w artykule Pieczyraka [1992b] zasługuje na uwagę, ponieważ pozwala zastąpić żmudne całkowanie numeryczne prostym obliczeniem. W przypadku podłoża jednorodnego (jednego modułu odkształcenia gruntu) wykonuje się tylko jedno obliczenie. W przypadku podłoża uwarstwionego należy tyle razy skorzystać ze wzoru, ile warstw występuje w podłożu budowli.

Metoda odkształceń [Pieczyrak 1993] w Polsce stosowana jest rzadziej. Jeszcze w mniejszym stopniu jest w użyciu metoda współczynnika wpływu. Metody naprężeń i odkształceń są szczegółowo opisane w wielu podręcznikach [Wiłun 1987, Biernatowski i in. 1987, Pisarczyk 2012]. Metoda współczynnika wpływu [Szymański 2007] jest mało rozpowszechniona w polskiej literaturze przedmiotu. Natomiast w anglosaskiej literaturze jest ona dość powszechna [Bowles 1977, Poulos i Davis 1974, Winterkorn i Fang 1975].

Istotę metody współczynnika wpływu wyraża wzór wyprowadzony z teorii sprężystości:

$$s_i = \frac{I_v \cdot q \cdot B}{E_u} \quad (1)$$

gdzie: s – osiadanie podłoża,

I_v – współczynnik wpływu odkształceń, zależny od geometrii posadowienia,

q – obciążenie podłoża,

B – szerokość obciążonej strefy (fundamentu),

E_u – moduł odkształcenia gruntu bez odpływu.

Współczynnik wpływu (I_v) dla przemieszczeń pionowych pod jednorodnym obciążeniem pasmowym podaje Szymański [2007], za Janbu i inni [1964].

Do tej grupy metod należą formuły empiryczne oparte na wynikach polowych badań gruntu *in situ* (presjometr Menarda, dylatometr Marchettiego, badanie płytą, sondowania). Takie podejście ma ogromne znaczenie praktyczne w przypadku gruntów niespoistych, dla których pobieranie próbek wiąże się z dużymi trudnościami technicznymi. W efekcie pomiary modułów odkształcenia tych gruntów obarczone są dużą niepewnością pomiarową.

W przypadku wykorzystania korelacji między zachowaniem fundamentu i wynikami sondowań przykładowo wymienić można metody Burlanda i Burbidge'a [Lancellotta 2009] oraz Schmertmanna [Schmertmann 1970, Schmertmann i in. 1978].

W metodzie Burlanda i Burbidge'a [1985] wykorzystuje się wyniki badań sondą cylindryczną SPT. Odpowiedni wzór ma postać:

$$s = q' \cdot B^{0,7} \cdot I_c \quad (2)$$

gdzie: s – osiadanie [mm],

q' – średnie efektywne obciążenie [kPa],

B – szerokość fundamentu [m],

I_c – współczynnik wpływu (wskaźnik ściśliwości)

$$I_c = \frac{1,7}{N_{\text{SPT}}^{1,4}} \quad (3)$$

gdzie N_{SPT} – liczba uderzeń sondy SPT.

Wartość N_{SPT} jest średnią arytmetyczną wartości zmierzonych na głębokości wpływu:

$$Z_I = B^{0,7} \quad (4)$$

pod warunkiem, że N_{SPT} rośnie lub jest stałe wraz z głębokością. Autorzy metody głębokość wpływu (Z_I) definiują jako głębokość, na której osiadanie wynosi 25% osiadania odnotowanego na powierzchni przyłożenia obciążenia. Nie ma zbyt wielu udokumentowanych pomiarów terenowych, które pozwoliłyby ocenić tę głębokość. Jednak dane zebrane przez Burlanda i Burbidge'a [1985] pokazują, że chociaż rozrzut jest duży, to głębokość tę można skorelować z szerokością fundamentu (B) w sposób podany wzorem (4).

Metoda Schmertmanna skorelowana jest z wynikami badań sondą CPT. Metoda została zaproponowana przez Schmertmanna [1970], a następnie ulepszona przez Schmertmanna i innych [1978]. Ogólny wzór na osiadanie podłoża uwarstwionego ma postać:

$$s = C_1 \cdot C_2 \cdot \Delta q \cdot \sum_1^n \left(\frac{I_z}{E} \right)_i \cdot \Delta z_i \quad (5)$$

gdzie: C_1 – poprawka empiryczna uwzględniająca wpływ głębokości posadowienia

$$C_1 = 1 - 0,5 \cdot \left(\frac{\sigma'_{vo}}{\Delta q} \right) \geq 0,5 \quad (6)$$

C_2 – poprawka empiryczna uwzględniająca pełzanie gruntu

$$C_2 = 1 + 0,2 \cdot \log \left(\frac{t}{0,1} \right) \quad (7)$$

t – czas [lata],

Δq – naprężenie kontaktowe,

Δz_i – grubość poszczególnych warstw,

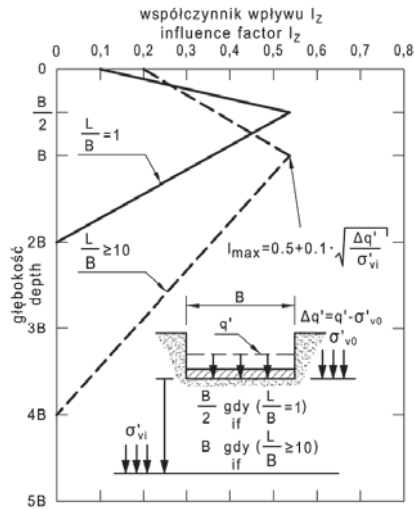
I_z – współczynnik wpływu według rysunku 2,

E – moduł odkształcenia gruntu.

Wartość modułu odkształcenia gruntu (E) jest skorelowana z oporem stożka (q_c) sondy CPT. W szczególności autorzy metody proponują przyjmować:

$$\text{– w warunkach symetrii osiowej: } E = 2,5 \cdot q_c \quad (8)$$

$$\text{– dla warunków płaskiego stanu odkształcenia: } E = 3,5 \cdot q_c \quad (9)$$

Rys. 2. Metoda Schmertmanna, współczynnik wpływu, I_z Fig. 2. Schmertmann method, influencing factor, I_z

Założenia te są spełnione dla piasków normalnie skonsolidowanych, ale mogą prowadzić do przeszacowania osiadania w przypadku piasków przekonsolidowanych.

Przykład ilustrujący sposób obliczenia osiadań metodą Schmertmanna przedstawiony został między innymi przez Daya [2010].

Notabene żadna metoda obliczania osiadań nie jest ścisła. Nawet metody o wyrafinowanym modelu matematycznym są tyle tylko warte, ile warte są wartości przyjmowanych modułów odkształcenia gruntu. Zdecydowanie bardziej realistyczne są moduły określone *in situ*. Jednakże liczba tych pomiarów, z uwagi na niejednorodność gruntów, nie może być zbyt mała.

STAN GRANICZNY UŻYTKOWALNOŚCI

Stan graniczny użyteczności (w polskiej normie PN-81/B-03020 nazywany drugim stanem granicznym) stanowi skodyfikowany zespół działań pozwalających w ogólności stwierdzić, czy zachodzi zależność [PN-EN 1997-1:2008, 2.4.8, s. 31]:

$$E_d \leq C_d \quad (10)$$

gdzie: E_d – wartość obliczeniowa efektu oddziaływań na konstrukcję (przemieszczenia fundamentu) [PN-EN 1997-1:2008, zał. H]: osiadanie – przemieszczenie pionowe (s), różnica osiadań (δ_s), obrót (θ), przechylenie (ω), względne ugięcie, względny obrót, przemieszczenie poziome, amplituda drgań,

C_d – graniczna obliczeniowa wartość efektu oddziaływań, która klasyfikuje element/obiekt do stanu użyteczności.

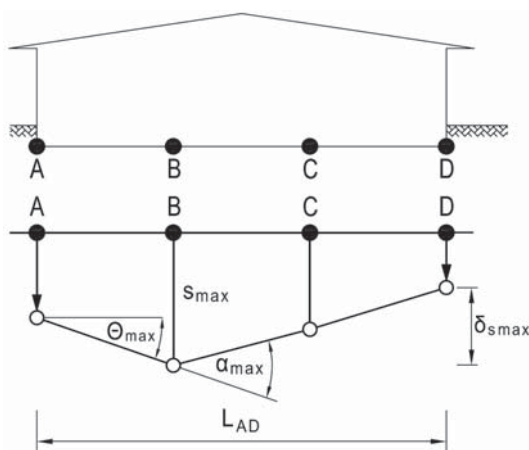
Graniczne wartości przemieszczeń należy ustalić w projekcie posadowienia [PN-EN 1997-1:2008, 2.4.9, s. 31].

Jak to wyraźnie precyzuje Eurokod 7, efekty oddziaływań należy wyrażać w wartościach obliczeniowych (E_d , C_d) i jednocześnie podaje, że wartości współczynników częściowych dla stanów granicznych użyteczności ogólnie zaleca się przyjmować równe 1,0 [PN-EN 1997-1:2008, 2.4.8, (2)]. Tym samym wartości obliczeniowe stają się wartościami charakterystycznymi. Należy zwrócić przy tym uwagę na fakt, że przy sprawdzaniu drugiego stanu granicznego według PN-81/B-03020 korzysta się z wartości charakterystycznych zarówno w odniesieniu do obciążeń, jak i do parametrów geotechnicznych.

Warto też zwrócić uwagę na odmienne definiowanie wartości charakterystycznej przez Eurokod 7 i PN-81/B-03020. Otóż według normy polskiej wartość charakterystyczna jest wartością średnią, czyli 50-procentowym kwantylem gęstości rozkładu danej zmiennej. Innymi słowy, jest to wartość bez probabilistycznego zapasu bezpieczeństwa. Tymczasem według normy europejskiej wartość charakterystyczna może, ale nie musi być 50-procentowym kwantylem gęstości rozkładu zmiennej. Może zatem zawierać probabilistyczny zapas bezpieczeństwa. W tych przypadkach, kiedy według Eurokodu 7 wartość charakterystyczna zawiera probabilistyczny zapas bezpieczeństwa, wówczas w rozumieniu normy PN-81/B-03020 jest ona wartością obliczeniową.

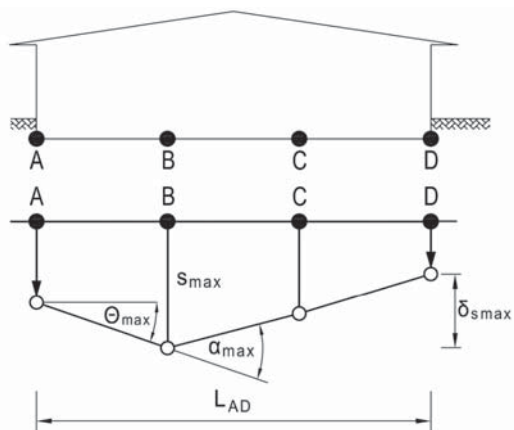
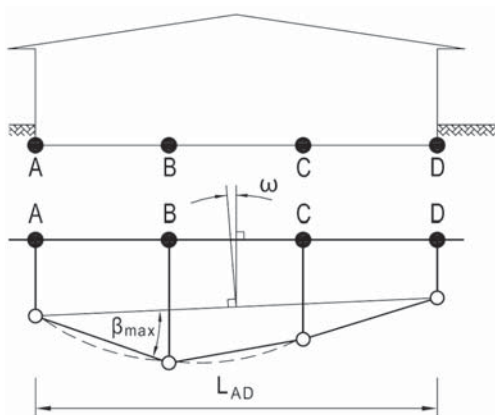
Graficzną ilustrację niektórych definicji przemieszczeń fundamentów [PN-EN 1997-1:2008, zał. H, rys. H.1] przedstawiono na rysunkach od 3 do 5.

Eurokod 7 [PN-EN 1997-1:2008] zawiera wiele szczegółowych zaleceń, które dla dobrze wykształconego inżyniera są oczywiste. Tak więc tutaj przytoczono tylko te, które zdaniem autora są istotne lub różnią się od zaleceń normy PN-81/B-03020. Przy posadowieniu na plastycznych gruntach spoiwstych należy zawsze wykonywać obliczenia osiadań [6.6.1, (3)P]. Dla fundamentów bezpośrednich posadowionych na gruntach spoiwstych w stanie plastycznym do twaroplastycznego, w 2. i 3. kategorii geotechnicznej zaleca się przeprowadzić obliczenia przemieszczeń pionowych (osiadań) [6.6.1 (4)].



Rys. 3. Definicja osiadania (s), różnicy osiadań (δ_s), obrotu (Θ) i odkształcenia kąowego (α)

Fig. 3. Definition of settlement (s), settlements difference (δ_s), turn (Θ) and angle displacement (α)

Rys. 4. Definicja strzałki wygięcia (Δ) i wskaźnika wygięcia (Δ/L)Fig. 4. Definition of deflection arrow Δ and deflection index (Δ/L)Rys. 5. Definicja przechylenia (ω) i obrotu względnego (przeszczenia kąowego, β)Fig. 5. Definition of inclination (ω) and relative turn (angle displacement, β)

Z treści tych zapisów można wyprowadzić wniosek, że nie jest wymagane obliczanie osiadań w przypadku gruntów niespoistych. W odniesieniu do wielu obiektów jest to słuszne założenie, szczególnie w przypadku zagęszczonych gruntów niespoistych.

Przy obliczaniu przemieszczeń fundamentów w celu porównania ich z kryteriami użyteczności należy przyjmować obliczeniowe wartości obciążeń stanu granicznego użyteczności [6.6.1, (5)P]. Zalecenie to należy skonfrontować z powyżej zamieszczoną uwagą na temat wartości współczynników częściowych dla stanów granicznych użyteczności, które Eurokod 7 (jak cytowano wyżej) zaleca przyjmować równe 1,0 [2.4.8, (2)].

W obliczeniach osiadań należy stosować odpowiednio liniowe lub nieliniowe modele sztywności gruntu [6.6.2, (10)P].

Z reguły głębokość podłoża gruntowego przyjmuje się równą głębokości, na której efektywne naprężenie pionowe pochodzące od obciążenia fundamentem (czyli napręże-

nia dodatkowe) osiąga 20% wartości efektywnego naprężenia pionowego, pochodzącego od ciężaru nadkładu gruntu (czyli naprężenia pierwotnego) [6.6.2, (6)]. Natomiast według PN-81/B-03020 wartość ta wynosi 30%.

Obliczenia osiadań powinny obejmować zarówno osiadania natychmiastowe, jak i długotrwałe [6.6.2, (1)P]. W przypadku gruntów częściowo lub w pełni nasyconych wodą zaleca się uwzględniać osiadania natychmiastowe (s_o), osiadania konsolidacyjne (s_1) i osiadania wywołane pełzaniem – konsolidacją wtórną (s_2) [6.6.2, (2)].

Zaleca się stosowanie ogólnie uznanych metod wyznaczania osiadań [6.6.2, (3)].

W załączniku F [PN-EN 1997-1:2008] podano w sposób bardzo ogólny dwie przykładowe metody obliczania osiadań s_o i s_1 gruntów spoistych i niespoistych. Metoda pierwsza – sumowania odkształceń warstw podłoża – może być rozumiana jako metoda naprężeń lub metoda odkształceń. Druga metoda, nazwana uproszczoną metodą ośrodka sprężystego, to metoda współczynnika wpływu. Odpowiedni wzór w Eurokodzie 7 ma postać:

$$s = \frac{p \cdot B \cdot f}{E_m} \quad (11)$$

gdzie: p – nacisk na grunt rozłożony liniowo,

B – szerokość fundamentu,

f – współczynnik osiadania (brak informacji, co do jego wartości),

E_m – wartość obliczeniowa modułu odkształcenia gruntu.

Metodę tę Eurokod 7 zaleca stosować tylko wówczas, gdy naprężenia w podłożu gruntowym nie wywołują znaczącego uplastycznienia gruntu, a zależność między naprężeniem i odkształceniem podłoża gruntowego można uważać za liniową.

Ponadto w załączniku D [PN-EN 1997-2:2009], dotyczącym badań CPT, zamieszczono przykład ilustrujący metodę Schmertmanna obliczania osiadań fundamentów bezpośrednich. W stosunku do metody oryginalnej zmodyfikowany został tu wzór (5) przez zastąpienie całkowania numerycznego całkowaniem klasycznym oraz dodanie współczynnika C_3 , uwzględniającego kształt podstawy fundamentu. Zmieniono również współczynnik liczbowy we wzorze (7), określającym współczynnik C_2 . Zmiany te przedstawiają się następująco:

$$s = C_1 \cdot C_2 \cdot (q - \sigma'_{vo}) \cdot \int_0^z \frac{I_z}{C_3 \cdot E'} \cdot dz \quad (12)$$

$$C_2 = 1,2 + 0,2 \cdot \log\left(\frac{t}{0,1}\right) \quad (13)$$

$$C_3 = 1,25 - \text{dla fundamentów o podstawie kwadratowej, } \alpha = \frac{L}{B} = 1 \quad (14)$$

$$C_3 = 1,75 - \text{dla fundamentów pasmowych, dla których } \alpha > 10 \quad (15)$$

Eurokod 7 konstatuje, że obliczeń osiadań nie należy uważać za dokładne. Dostarczają one jedynie wartości przybliżonych [PN-EN 1997-1:2008, 6.6.1, (6)].

PODSUMOWANIE

Eurokod 7, jako norma europejska, unifikuje szereg norm, które obowiązywały w poszczególnych krajach Europy. W wielu przypadkach powoduje to bardzo istotne zmiany zarówno w podejściu, jak i w stawianych wymaganiach normy. Jednakże w odniesieniu do stanu granicznego użyteczności zmiany te są niewielkie dla polskiego inżyniera. Eurokod 7 nie kwestionuje stosowanych w Polsce metod obliczania osiadań. Proponuje jedynie rozszerzenie tej listy o metodę współczynnika wpływu, skorelowanego z wynikami badań modułu odkształcenia *in situ*. W tym przypadku Eurokod 7 wymienia z nazwy i przybliża metodę Schmertmanna.

Na uwagę zasługują prace Wysokińskiego i innych [2011] oraz Świecy [2011], które są pomocne przy wdrażaniu Eurokodu 7 w polskich warunkach.

PIŚMIENNICTWO

- Bieriezancew W.G., 1964. Obliczanie nośności podłoża gruntowego. Wydawnictwo Arkady, Warszawa.
- Biernatowski K., Dembicki E., Dzierżawski K., Wolski W., 1987. Fundamentowanie, projektowanie i wykonawstwo. T. 1. Podłoże budowlane. Arkady, Warszawa.
- Bowles J.E., 1977. Foundation analysis and design. McGraw-Hill Book Company, New York.
- Burland J.B., Burbidge M.C., 1985. Settlement of foundations on sand and gravel. Proc. I.C.E., 78, 1, 1325.
- Burland J.B., Broms B.B., de Mello V.F., 1977. Behaviour of foundations and structures. S.O.A. Report, IX ICSMFE, Tokyo, 2, 495–546.
- Burmister D.M., 1956. Stress and displacement characteristics of a two-layer rigid base soil system: influence diagrams and practical applications. Proc. Highway Research Board 35, 773–814.
- Day R.W., 2010. Foundation Engineering Handbook. Design and Construction with the 2009 International Building Code. ASCE Press. Mc Graw Hill, New York.
- Janbu N., Bjerrum L., Kjaernsli B., 1964. Veiledning ved losning av fundamenteringsopp-gaver. Norwegian Geotechnical Institute, Report 16, Oslo.
- Lancellotta R., 2009. Geotechnical Engineering. Taylor & Francis, London & New York.
- Pieczyrak J., 1992a. Czynniki decydujące o dokładności oceny osiadań fundamentu. Inżynieria i Budownictwo 3, 87–89.
- Pieczyrak J., 1992b. Analiza osiadań – metoda naprężeń. Inżynieria i Budownictwo 8, 302–304.
- Pieczyrak J., 1993. Analiza osiadań – metoda odkształceń. Inżynieria i Budownictwo 2, 70–74.
- Pisarczyk S., 2012. Fundamentowanie dla inżynierów budownictwa wodnego. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa.
- PN-81/B-03020 Grunty budowlane. Posadowienie bezpośrednio budowli. Obliczenia statyczne i projektowanie.
- PN-EN 1997-1:2008 Eurokod 7. Projektowanie geotechniczne. Część 1: Zasady ogólne.
- PN-EN 1997-2:2009 Eurokod 7. Projektowanie geotechniczne. Część 2: Rozpoznanie i badanie podłoża gruntowego.
- Poulos H.G., Davis E.H., 1974. Elastic solutions for soil and rock mechanics. John Wiley & Sons, Inc. New York.
- Schmertmann J.H., 1970. Static cone to compute static settlement over sand. JSMFD, ASCE, 96, SM3, 1011–1043.
- Schmertmann J.H., Hartman J.D., Brown P.R., 1978. Improved strain influence factor diagrams. JGED, ASCE, Technical Note, 104, GT8, 1131–1135.

- Szymański A., 2007. *Mechanika gruntów*. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- Świeca M., 2011. *Zasady projektowania geotechnicznego w nawiązaniu do Eurokodu 7 z zastosowaniem programów numerycznych*. Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa.
- Wiłun Z., 1987 (i wydania nowsze). *Zarys geotechniki*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa.
- Winterkorn H.F., Fang H-Y., 1975. *Foundation Engineering Handbook*. Van Nostrand Reinhold Company, New York.
- Wysokiński L., Kotlicki W., Godlewski T., 2011. *Projektowanie geotechniczne według Eurokodu 7. Poradnik*. Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa.

EUROCODE 7 – SERVICEABILITY LIMIT STATE

Abstract. In the paper selected calculations methods of foundations settlements and the conditions based on Eurocode 7 in the range of checking serviceability limit state are presented.

Key words: Eurocode 7, serviceability limit state, foundations settlement

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 5.02.2014