

## OCR a YSR, czyli klasyczne i współczesne poglądy na prekonsolidację gruntów spoistych

Tomasz Szczepański\*



**OCR versus YSR — a discussion of classic and today's views on preconsolidation of clayey soils.** Prz. Geol., 55: 405–410.

*S u m m a r y.* Overconsolidation ratio (OCR) is commonly used in different geology disciplines. It is considered crucial for proper evaluation of engineering-geological properties of soil. On its basis it is possible to assess the thickness of both the glacier covering in the past a given area, and eroded layers. However, as clearly indicated by the soil mechanics research over the past two decades, some applications of this parameter assume too much simplification of the preconsolidation origin. A revision of the classic and current views is presented along with the results of model experiments on Mio-Pliocene clays.

**Key words:** preconsolidation, overconsolidation ratio OCR, yield stress ratio YSR, Mio-Pliocene clays

W latach trzydziestych XX wieku Casagrande stwierdził, że grunty mają rodzaj „pamięci”, w której utrwalają się informacje o historii obciążeń danego gruntu oraz innych procesach, jakim podlegał. Informacje te w pewnym stopniu zachowują się w strukturze gruntu. Jako że termin struktura jest używany w wielu dziedzinach geologii i ma rozległe znaczenia, aby uniknąć terminologicznego nieporządku, należy sprecyzować, jak będzie on rozumiany i używany w tym artykule. Nomenklatura dotycząca tej tematyki bowiem nie jest jeszcze do końca sprecyzowana ani w polskiej, ani w światowej literaturze. Strukturą gruntu autor będzie nazywał ułożenie i powiązanie ze sobą składników gruntu (ang. *fabric* i *bonding*, Lambe & Whitman, 1969; Mitchell, 1976, 1993). Termin ten obejmuje wszystkie cechy gruntu, które powodują, że ma on inne właściwości mechaniczne niż wykonana z niego pasta gruntowa, czyli — w tym rozumieniu — grunt pozbawiony struktury (ang. *destructured*). Definicja ta jest zbliżona do spotykanej w literaturze dotyczącej mechaniki gruntów (Chandler, 2000; Liu & Carter, 1999, 2000; Paszyk-Stepkowska, 1966a, b). Termin *fabric* ma wyrażać układ, rozmieszczenie, geometryczne cechy ziaren i cząstek (wielkość, kształt), parametry geometryczne przestrzeni porowej i jej procentowy udział (Grabowska-Olszewska, 1990; 1998). *Bonding* są to powiązania między składnikami gruntu, ale nie tylko wynikające z sił tarcia, lecz również (szczególnie w odniesieniu do gruntów ilastych) wynikające z występowania zjawisk elektrostatycznych, elektromagnetycznych lub innych. Na ilość, siłę i zakres tych powiązań ma wpływ wiele czynników, m.in. skład mineralny, ciśnienie, temperatura, skład chemiczny wody porowej w trakcie sedymentacji, substancja organiczna, ale także szybkość sedymentacji czy stan naprężeń (Cotecchia & Chandler, 1997; Mitchell, 1976). Podsumowując: struktura w gruncie naturalnym jest wynikiem fizycznych i chemicznych warunków, jakie panowały w trakcie sedymentacji, konsolidacji, późniejszego starzenia czy odprężania.

Naprężenie prekonsolidacji często jest interpretowane jako sumaryczny obraz obciążeń i źródło informacji o

historii gruntu. Według definicji Casagrande'a (1936) jest to maksymalne „zapamiętane” przez grunt naprężenie efektywne, jakiemu podlegał on w swojej historii geologicznej. Casagrande stworzył pierwszą metodę graficzną pozwalającą na odczytanie naprężenia prekonsolidacji  $\sigma'_p$  z krzywej ściśliwości gruntu w układzie  $e = f(\log \sigma'_v)$ , gdzie  $e$  — wskaźnik porowatości,  $\sigma'_v$  — pionowe naprężenie efektywne.

Istnieje wiele metod wyznaczania  $\sigma'_p$ , z których 12 przykładowych jest powszechnie wymienianych w literaturze. Są to metody: Casagrande'a, Janbu (2 metody), Tavenas'a, Burmistera, Van Zelsta, Schmertmanna, Butterfielda, Olda, Leberta i Horna, Jose, Sällforsa (Dias Junior & Pierce, 1995; Senol & Saglamer, 2000). Zaznaczmy, że pomysłów jest więcej niż wymienionych metod. Ogólnie wyróżnia się metody bezpośrednie, gdzie odczytu  $\sigma'_p$  dokonuje się bezpośrednio z krzywej charakterystycznej dla danej metody (metody Tavenas'a, Janbu), oraz metody graficzne, gdzie należy wykonać konstrukcję geometryczną, aby znaleźć  $\sigma'_p$ . Mnogość metod dobitnie świadczy po pierwsze o tym, jak ważnym zagadnieniem jest prawidłowe określenie  $\sigma'_p$ , a po wtóre o tym, jak trudne jest to wbrew pozorom zadanie. Nasuwa się pytanie, skoro wyniki otrzymywane kolejnymi metodami nie do końca nas satysfakcjonują, czy prawidłowe są założenia? Może nie doceniamy procesów, które wpływają na naprężenie prekonsolidacji, zrzucając winę na czynniki techniczne czy interpretacyjne poszczególnych metod? Prowadzone są prace nad nowymi sposobami określania  $\sigma'_p$ , które mają zmniejszyć wady i niedociągnięcia starych metod (Becker i in., 1987; Dias Junior & Pierce, 1995; Senol & Saglamer, 2000). Wciąż jednak najbardziej rozpowszechnioną i najczęściej używaną jest właśnie metoda graficzna Casagrande'a (1936), mimo wytykanych niedoskonałości — głównie pewnej subiektywności wyboru punktu maksymalnego przegięcia krzywej ściśliwości.

Znając naprężenie prekonsolidacji oraz obecnie działające naprężenie efektywne  $\sigma'_{vo}$ , można obliczyć stopień prekonsolidacji OCR (*overconsolidation ratio*),

$$OCR = \frac{\sigma'_p}{\sigma'_{vo}} \quad [1]$$

którego wartość równa 1 wskazuje na grunt normalnie skonsolidowany, OCR większy od 1 natomiast świadczy o

\*Instytut Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej, Wydział Geologii Uniwersytetu Warszawskiego, ul. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa; tom@uw.edu.pl

gruncie prekonsolidowanym. Grunty, o których na podstawie *OCR* mogliśmy powiedzieć, że są normalnie skonsolidowane, są rzadkością (mimo przesłanek geologicznych sugerujących brak obciążeń w przeszłości) — wrócimy do tego w dalszej części artykułu.

Miarą prekonsolidowania gruntu ma być wykazywane przezeń naprężenie prekonsolidacji i wynikający z niego, wyznaczany dotychczas, współczynnik *OCR*. Nie wszystkie przyczyny prekonsolidacji zostały jednak zidentyfikowane. Co do jednego panuje względna zgodność: wyróżnia się dwie główne składowe, czy grupy czynników, wpływające na efekt prekonsolidacji. Jedną z nich jest prekonsolidacja *stricte* mechaniczna, wpływająca na porowatość osadu, spowodowana obciążeniem wyżej zalegających w przeszłości geologicznej warstw bądź ładolodu lub zmiennym położeniem zwierciadła wód gruntowych. Tę składową Casagrande założył jako dominującą przyczynę prekonsolidacji, co, niestety, obowiązuje do dzisiaj. Drugą składową jest prekonsolidacja pozorna (*apparent overconsolidation* — *AOC*; Dadey i in., 1991; Izbicki & Strużyk, 2002), do której przyczyn zalicza się procesy, takie jak: zmiany wilgotności gruntu, cementacja, wtórna ściśliwość, rekrytalizacja minerałów, wymiana jonowa, modyfikacje adsorpcyjnej warstwy wodnej lub międzycząsteczkowych sił przyciągania minerałów ilastych, zmiany na kontakcie ziaren pod zwiększonym ciśnieniem (*cold welding*) i inne.

Słabo rozpoznany jest ilościowy wpływ procesów związanych z prekonsolidacją pozorną na odczytywane naprężenie prekonsolidacji. Istnieje pokaźna literatura wskazująca jakościowe oddziaływanie procesów cementacyjnych na prekonsolidację. Dogłębną analizę jednego z takich przykładów znajdujemy np. w pracy Dadey'a i in. (1991). Przedstawili oni profil ilastych osadów pelagicznych północno-zachodniego Oceanu Spokojnego, gdzie istnieją dowody na niezakończoną sedymentację przez ostatnich 65 mln lat. Taka historia naprężeń powinna dawać w rezultacie grunty normalnie skonsolidowane, podczas gdy analizowany profil wykazuje bardzo duże odstępstwo od przewidywanego wyniku, mianowicie pierwsze 20 m jest silnie prekonsolidowane (na głębokości 2 m *OCR* = 16 i maleje z głębokością). Wyniki badań SEM i EDS jako przyczynę wykazały obecność silnych scementowań na kontakcie cząstek, agregatów i domen ilastych, wywołanych rekrytalizacją bądź wytrącaniem związków składających się z żelaza, manganu, glinu, krzemu, wapnia, potasu.

W tabeli 1 zostały przedstawione dane pochodzące z różnych prac, które sygnalizują występowanie czynnika cementującego, wpływającego na naprężenie prekonsolidacji.

Istnieją również skrajne opinie, że oprócz najmłodszych, aktualnie sedymentujących, nie istnieją lub są w zupełnej mniejszości grunty ilaste, które wykazałyby normalne skonsolidowanie, pomimo przesłanek i dowodów geologicznych, że nie były one obciążone w swojej historii. Taką tezę stawiają Leonards (1972), Mitchell (1993), a także Schmertmann (1991) i nie są w swych przekonaniach odosobnieni. Ten ostatni przedstawia wiele przykładów wyższego od jedności *OCR* pomierzonego w gruntach, gdzie powinien on wynosić 1. Tę zmianę Schmertmann przypisuje zjawisku starzenia gruntu. W swojej pracy przytacza również przykłady wyników badań, które pierwotnie wskazywały na *OCR* < 1, podczas gdy po późniejszej weryfikacji, z użyciem lepszej jakości próbek

czy też doskonalszych metod badawczych, otrzymano *OCR* = 1,2 (patrz też Hansbo i in., 1981). Pojawiają się również wyniki badań gruntów z terenu Polski, o których wiadomo na podstawie dowodów geologicznych, że w przeszłości nie były obciążone ponad obecną wartość wynikającą z ciężaru nadkładu, a ich *OCR* jest nawet kilkakrotnie większy od 1. Przykładem mogą być tu ility warwowe okolic Warszawy (Zawrzykraj, 2005).

W świetle zwiększającej się liczby danych eksperymentalnych rośnie przekonanie wielu autorów, co do większego znaczenia prekonsolidacji pozornej (określanej też jako wytrzymałość strukturalna czy wpływ starzenia) w całości procesu (Bjerrum & Lo, 1963; Griffiths & Joshi 1988; Boone & Lutenegeger, 1997; Liu & Carter, 1999, 2000). Od wpływu praktycznie pomijanego przechodzimy do przypisywania temu czynnikowi znaczenia na równi z prekonsolidacją mechaniczną (Leroueil & Vaughan, 1990). Tego kierunku nie odzwierciedla jak na razie polska literatura. Pozostaje dyskusyjne, czy trafniejszym jest określanie zjawiska jako „prekonsolidacja pozorna”, „tworzenie struktury”, czy może „starzenie gruntu”.

Wszystkie te określenia mają ząębające się definicje i podobne znaczenie, w istocie rzeczy sprowadzają się do określenia spektrum zjawisk wpływających na zmianę parametrów i zachowania się gruntu wraz z upływem czasu. Często różne określenia są stosowane do opisu zbliżonych rezultatów badań. Termin zaproponowany na potrzeby dysertacji doktorskiej autora to **wzmocnienie strukturalne**. Na rycinie 1 podjęto próbę zestawienia procesów, stymulujących je czynników i ich interakcji wpływających na naprężenie uplastycznienia. Zdaniem autora, na całkowity efekt prekonsolidacji (wyrażony przez naprężenie uplastycznienia) wpływają wszystkie zestawione czynniki, natomiast pojęcie naprężenia prekonsolidacji jest ciągle rozumiane (interpretowane) jako wynikające tylko z prekonsolidacji właściwej i to rozróżnienie zostało zilustrowane na rycinie 1.

Po przeanalizowaniu powyższych danych wydaje się zatem, że słuszny jest postulat Burlanda (1990). Zaproponował on mianowicie, by określenie naprężenie prekonsolidacji i współczynnik *OCR* zarezerwować dla sytuacji, gdy mówimy o wartościach szacowanych na podstawie znanej historii geologicznej, czyli o spodziewanej wartości stopnia prekonsolidowania danego gruntu z dobrze rozpoznaną historią obciążeń geologicznych (nadkład, lodowiec, wahania wód gruntowych). Rzeczywisty parametr odczytywany z krzywych ściśliwości, z użyciem jakiegokolwiek z metod, Burland proponuje nazywać pionowym naprężeniem uplastycznienia (*vertical yield stress*) i oznaczać  $\sigma'_{vy}$ , a wynikający z tego naprężenia współczynnik uplastycznienia (*yield stress ratio*) określa YSR:

$$YSR = \frac{\sigma'_{vy}}{\sigma'_{vo}} \quad [2]$$

czyli stosunek naprężenia uplastycznienia  $\sigma'_{vy}$  do obecnie działającego naprężenia efektywnego  $\sigma'_{vo}$ .

Propozycja rozszerzenia terminologii jest polemiczna (Suchnicka, 2005). Na pierwszy rzut oka może się wydawać, że proponowana zmiana jest czysto formalna i nomenklaturowa — że jest nazywaniem tego samego inaczej. Nie, jeśli za zmianą nazewnictwa pójdzie zmiana rozumienia tych terminów. Dotychczasowe, przytoczone na początku, definicje terminów *OCR* i naprężenia prekonso-

**Tabela 1. Czynniki cementujące i ich wpływ na właściwości gruntów (za Boone'em & Luteneggerem, 1997; uzupełniona)**  
**Table 1. Cementing agents and their suspected effect on properties of soils (after Boone & Lutenegger, 1997; completed)**

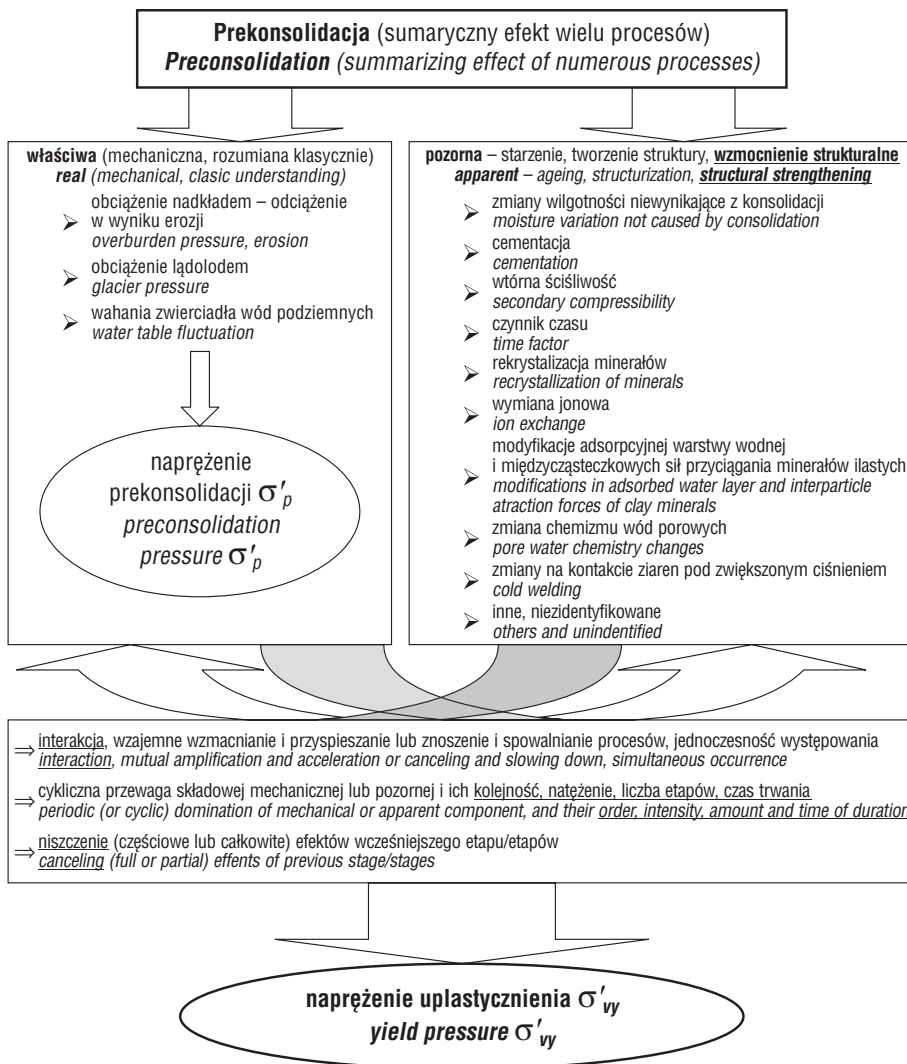
Czynnik cementujący <i>Cementing agent</i>	Prawdopodobny wpływ na właściwości geol.-inż.* <i>Suspected effect on geo-eng. properties</i>	Lokalizacja gruntu <i>Deposit location</i>	Rodzaj gruntu** <i>Deposit type**</i>	Autorzy badań <i>Source</i>
Nieokreślony <i>Unspecified</i>	Powstawanie powiązań między cząstkami gruntu; wzrost wytrzymałości, $\sigma'_p$ <i>Particle bonding; increases strength, <math>\sigma'_p</math></i>	Lilla Edet — Szwecja ( <i>Sweden</i> )	GM	Bjerrum & Wu, 1960
Węglany, tlenki Fe, krzemionka, związki Al, materia organiczna <i>Carbonates, iron oxides, sili- cates, aluminates, organic matter</i>	Agregacja drobnych cząstek; wzrost wytrzymałości na ścinanie <i>Aggregation of fines; increases in shear strength</i>	—	—	Lambe, 1960; Soderblom, 1966
Nieokreślony <i>Unspecified</i>	Powstawanie powiązań między cząstkami gruntu; wzrost $S_u$ <i>Particle bonding; increases <math>S_u</math></i>	Skabo — Szwecja ( <i>Sweden</i> )	GM	Bjerrum & Lo, 1963
Węglany <i>Carbonates</i>	Powstawanie powiązań między cząstkami gruntu <i>Particle bonding</i>	New Liskeard, Ontario	GL	Townsend, 1965
Materia organiczna, węglany, gips, związki Al i Fe <i>Organic matter, carbonates, gypsum, Al and Fe compounds</i>	Powstawanie powiązań między cząstkami gruntu; wzrost $\sigma'_p$ i wytrzymałości <i>Particle bonding; increases <math>\sigma'_p</math> strength</i>	—	—	Bjerrum, 1967
Tlenki Fe, sól <i>Iron oxides, salt</i>	Wzrost $\sigma'_p$ <i>Increases <math>\sigma'_p</math></i>	płw. Labrador <i>Labrador Peninsula</i>	GM	Kenney i in., 1967 <i>Kenney et al., 1967</i>
Al i wodorotlenki Fe <i>Al and Fe hydroxides</i>	Powstawanie powiązań między cząstkami gruntu; wzrost wytrzymałości <i>Particle bonding, increases strength</i>	Toulouste, Quebec	GM	Conlon, 1966; Quigley, 1968
Węglany <i>Carbonates</i>	Powstawanie wiązań cementacyjnych <i>Cementation bonding</i>	St. Jean de Vianney, Quebec	GM	Moum & Zimmie, 1972
Sól, węglany, tlenki Fe <i>Salt, carbonates, iron oxides</i>	Wzrost $\sigma'_p$ i wytrzymałości; obniżenie $\epsilon_f$ <i>Increases <math>\sigma'_p</math> strength; decreases <math>\epsilon_f</math></i>	Outardes, Quebec	GL	Loiselle i in., 1971 <i>Loiselle et al., 1971</i>
Sól, węglany, wodorotlenki Fe i Al <i>Salt, carbonates, Al and Fe hydroxides</i>	Wzrost wytrzymałości przy małych obciążeniach <i>Increases strength at low stresses</i>	dolina Rz. Św. Wawrzyńca <i>St. Lawrence River valley</i>	GM	Sangrey, 1972a
Sól, węglany, wodorotlenki Fe i Al <i>Salt, carbonates, Al and Fe hydroxides</i>	Wzrost wytrzymałości przy małych obciążeniach <i>Increases strength at low stresses</i>	Mattagami, Quebec	GL	Sangrey, 1972a
Amorficzne Al i Fe; Mg i Ca, sól <i>Amorphous Al and Fe; Mg and Ca, salt</i>	Wzrost $S_u$ i $S_i$ ; Mg obniża $S_i$ <i>Increases <math>S_u</math> and <math>S_i</math>; Mg decreases <math>S_i</math></i>	Drammen — Norwegia ( <i>Norway</i> )	GM	Moum i in., 1971 <i>Moum et al., 1971</i>
Węglany, amorficzne Si, Al, tlenki Fe <i>Carbonates, amorphous Si, Al, Fe oxides</i>	Powoduje cementację oraz jest zmiany $S_i$ <i>Results in cementation and related to <math>S_i</math></i>	Kanada <i>Canada</i>	GL; GM	Quigley, 1980
Węglany <i>Carbonates</i>	Wzrost wytrzymałości; kruche zachowanie <i>Increases strength; brittle behaviour</i>	Northampton, Massachusetts	GL	Bemben, 1982
Węglany <i>Carbonates</i>	Wywołuje zmiany $S_i$ <i>Directly related to <math>S_i</math></i>	Hawkesbury, Ontario	GL	Quigley i in., 1985 <i>Quigley et al., 1985</i>
Węglany <i>Carbonates</i>	Wpływa na $\sigma'_p$ , $S_u$ <i>Affects <math>\sigma'_p</math>, <math>S_u</math></i>	Zat. Jamesa — Kanada <i>James Bay — Canada;</i> Taranto — Włochy ( <i>Italy</i> )	GM; L	Jamiolkowski i in., 1985 <i>Jamiolkowski et al., 1985</i>
Węglany <i>Carbonates</i>	Wpływa na zmiany $S_u$ i ścisłości <i>Variation in <math>S_u</math> and compressibility</i>	Hertfordshire — W. Brytania ( <i>UK</i> )	TILL	Little, 1989
Węglany <i>Carbonates</i>	Wpływa na $\sigma'_p$ , $S_u$ , $G_o$ , OCR, $K_o$ <i>Affects <math>\sigma'_p</math>, <math>S_u</math>, <math>G_o</math>, OCR, <math>K_o</math></i>	Fucino — Włochy ( <i>Italy</i> )	L	Burghignoli i in., 1991 <i>Burghignoli et al., 1991</i>
Węglany, Fe, Si <i>Carbonates, Fe, Si</i>	Wpływa na $\sigma'_p$ , OCR <i>Affects <math>\sigma'_p</math>, OCR</i>	Plecewice	GL	Zawrzykraj, 2005

\* $\epsilon_f$  — odkształcenia w momencie zniszczenia (*strains at failure*),  $G_o$  — moduł ścinania (*shear modulus*),  $K_o$  — współczynnik parcia bocznego gruntu (*coefficient of earth pressure at rest*), OCR — stopień prekonsolidacji (*overconsolidation ratio*),  $S_i$  — wrażliwość wytrzymałościowa (*strength sensitivity*),  $S_u$  — wytrzymałość na ścinanie w warunkach bez drenażu (*undrained shear strength*),  $\sigma'_p$  — naprężenie prekonsolidacji (*preconsolidation pressure*)

\*\*GL — glacialimiczne (*glaciolacustrine*), GM — glacialmorskie (*glacial marine*), L — limniczne (*lacustrine*), TILL — glina lodowcowa (*glacial till*)

lidacji są, zdaniem autora, tak silnie powiązane i zakorze-  
nione, że zmiana ich postrzegania nie jest prosta, zatem  
wprowadzenie dodatkowego terminu odnoszącego się do  
fundamentalnej właściwości gruntu (uplastycznienia,

zmiany zachowania po przekroczeniu pewnego  
obciążenia) może być bardzo użyteczne. OCR dalej funk-  
cjonowałby w kontekście geologicznym, a YSR w kontek-  
ście mechaniki gruntów czy geologii-inżynierskiej.



## Wyniki badań i dyskusja

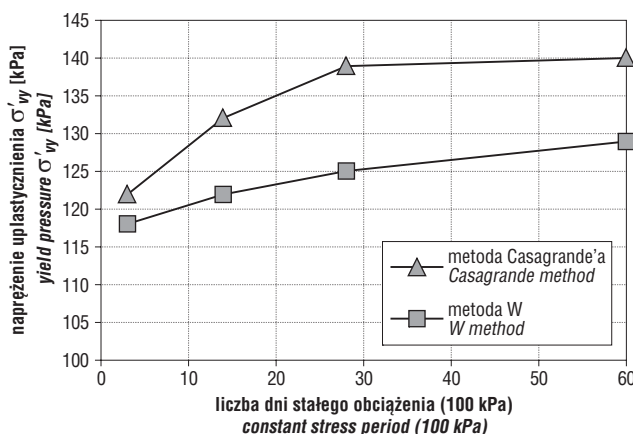
Jako przykład wpływu różnych czynników na napężenie uplastycznienia, w tym przypadku długości okresu obciążenia, na rycinie 2 są przedstawione wyniki badań autora (Szczepański, 2005) polegających na obciążeniu serii próbek jednorodnej pasty ilu mio-pleceńskiego do stałego obciążenia 100 kPa i pozostawieniu ich pod tym obciążeniem przez różny czas. Po zadanym czasie dla każdej z próbek było określane napężenie uplastycznienia. Posłużono się dwoma różnymi metodami — klasyczną Casagrande’a i mało znaną metodą W (Becker i in., 1987), opartą na parametrze pracy na jednostkę objętości. Niezależnie od zastosowanej metody uzyskano wzrastające wartości  $\sigma'_{vy}$  wraz z upływem czasu.

Podobne zależności (wzrost wartości  $\sigma'_{vy}$ ) otrzymano, konsolidując serię próbek tej samej pasty gruntowej (lecz o zmienionym chemizmie wody porowej — dodano chlorku sodu) do jednakowej wartości napężenia efektywnego. Następnie nieobciążone i zabezpieczone przed zmianą wilgotności próbki zostały pozostawione w stałej, kilkustopniowej temperaturze, na różny okres, sięgający kilkunastu miesięcy (ryc. 3).

Na rycinie 4 zostało przedstawione ideowe podsumowanie powyższych rozważań, jedno-

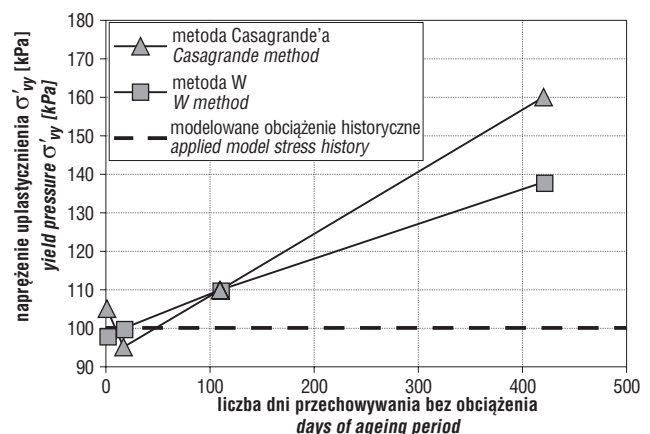
**Ryc. 1.** Czynniki składające się na zjawisko prekonsolidacji i ich związek z napężeniem uplastycznienia (Szczepański, 2005)

**Fig. 1.** Factors affecting preconsolidation phenomenon and their connection with the output parameter — yield stress (Szczepański, 2005)



**Ryc. 2.** Efekt zwiększania się wartości napężenia uplastycznienia w wyniku tworzenia się wzmocnienia strukturalnego pod obciążeniem w badaniach modelowych (Szczepański, 2005)

**Fig. 2.** Effect of increasing yield stress as a result of structural strengthening under constant load during model tests (Szczepański, 2005)



**Ryc. 3.** Efekt zwiększania się wartości napężenia uplastycznienia z upływem czasu w próbkach past o zmodyfikowanym chemizmie, wstępnie skonsolidowanych pod obciążeniem 100 kPa (Szczepański, 2005)

**Fig. 3.** Effect of increasing yield stress with passage of time, occurred in chemically modified samples, previously consolidated under 100 kPa stress (Szczepański, 2005)

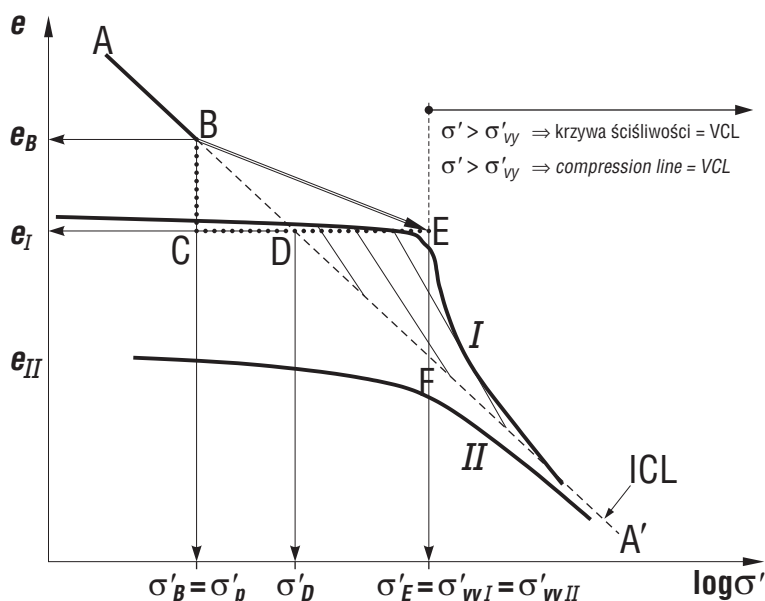
częście potwierdzone przez badania modelowe wykonane przez autora i opisane powyżej (oraz inne, nieprzytoczone tutaj). Badania past ilów plicieńskich autor przeprowadził w konsolidometrze Rowe'a i edometrach (opis metodyki i poszczególne wyniki — Szczepański, 2005). Na wykresie wskaźnika porowatości  $e$  względem pionowego naprężenia efektywnego  $\sigma'_v$  przedstawiono przykładowy, schematyczny przebieg kształtowania się w gruncie ilastym tzw. wzmocnienia strukturalnego. Linia przerywana A-A' to tzw. krzywa ICL (*intrinsic compression line*) — krzywa ścisłości wrodzonej — opisująca zależność  $e = f(\log \sigma')$  w gruncie pozbawionym wzmocnienia strukturalnego, czyli paście gruntowej (Burland, 1990). Na wykresie przedstawiono sytuację, gdy pastę gruntową poddajemy stopniowemu obciążaniu, aż do wartości  $\sigma'_B$ , gdzie wskaźnik porowatości osiąga wartość  $e_B$ . Jeśli w tym momencie zdejmujemy obciążenie i poddamy grunt badaniu ścisłości, otrzymamy naprężenie prekonsolidacji ( $\sigma'_p$ ), w przybliżeniu równe  $\sigma'_B$ . OCR obliczone w tym momencie ma wartość 1, czyli jest zgodne z przewidywaniem. Taką zgodność autor otrzymał w badaniach modelowych, ale w gruncie pozostającym w dalszym ciągu pod stałym obciążeniem zachodzą procesy wtórnej ścisłości (*secondary compression*) i pełzania (*creep*), powodujące redukcję porowatości. Po okresie pozostawiania gruntu pod obciążeniem i zmianie jego porowatości (np. do wartości  $e_I$ ), spodziewalibyśmy się otrzymać z krzywej ścisłości naprężenie prekonsolidacji o wartości około  $\sigma'_D$ , większej od rzeczywiście zadanego ( $\sigma'_B$ ). Za to zwiększenie naprężenia jest odpowiedzialne zmniejszenie porowatości z  $e_B$  do  $e_I$  w wyniku wzmiankowanego pełzania, czy wtórnej ścisłości, które to procesy wielu utożsamia z określeniem „starzenie gruntu”. Inni, jak Tatsuoka (2005), oddzielają efekt starzenia od zagadnienia właściwości plastycznych, takich jak pełzanie.

Wyniki eksperymentów prowadzonych przez wielu badaczy (Leonards & Ramiah, 1959; Burland, 1990; Leroueil & Vaughan, 1990; Liu & Carter, 1999, 2000; Szczepański, 2005) dowodzą jednak, że w przypadku wielu gruntów otrzymujemy raczej wynik w postaci krzywej I z ryciny 4. Tak też było w modelowych badaniach ilów plicieńskich (ryc. 2) przeprowadzonych przez autora. Widzimy, że naprężenie prekonsolidacji jest tu jeszcze powiększone do wartości  $\sigma'_E$ . Za tę dodatkową wartość wyraźnego wzmocnienia jest odpowiedzialne właśnie szeroko rozumiane wzmocnienie strukturalne gruntu. Graficznie odpowiada mu zakresowany obszar między krzywą ścisłości I a krzywą ICL (A-A'). Ten schemat jest właściwy dla gruntu wykazującego pełzanie oraz tego, w którym wykształca się wzmocnienie strukturalne. Widoczne jest więc, że określone naprężenie prekonsolidacji może mieć niewiele wspólnego z rzeczywistym obciążeniem, jakiemu grunt podlegał. Wpływ wzmocnienia strukturalnego, czy jak proponują inni prekonsolidacji pozornej, może być bardzo znaczący. Stąd wyżej omawiany i proponowany współczynnik *YSR* jako rozróżnienie od *OCR*. Nie jest to oczywiście jedynie rozróżnienie terminologiczne, ważne tylko z formalnego punktu widzenia. Istotne jest rozróżnienie zachowania się gruntu po przekroczeniu punktu uplastycznienia, gdy mamy do czynienia z silnie rozwiniętym wzmocnieniem strukturalnym lub jego brakiem. Krzywa ścisłości VCL (*virgin compression line*) — czyli część krzywej ścisłości po przekroczeniu punktu uplastycznienia — może mieć diametralnie różny charakter w zależności od tego, jak silnie grunt ma rozwinięte wzmocnienie strukturalne. Zwiększenie się prędkości odkształcenia może być łagodne lub w niektórych gruntach gwałtowne, co dla geologiczno-inżynierskiej strony zagadnienia ma fundamentalne znaczenie.

Spójrzmy na drugą, hipotetyczną krzywą ścisłości (ryc. 4, krzywa II) tego samego gruntu z głębokości, gdzie panują takie same naprężenia efektywne. Odczytane z niej naprężenie uplastycznienia (naprężenie prekonsolidacji według klasycznych koncepcji) byłoby bardzo zbliżone do naprężenia odczytanego z krzywej I. Czy w takim razie możemy stwierdzić, że obie próbki są tak samo prekonsolidowane i podlegały w przeszłości takim samym obciążeniom? Odpowiedź jest negatywna. Wykazują jedynie takie same naprężenia uplastycznienia  $\sigma'_{vy}$  oraz obliczony na ich podstawie współczynnik uplastycznienia *YSR*. Aby stwierdzić, czy i w jakim stopniu grunty te są prekonsolidowane, należy odnieść ich krzywe ścisłości do krzywej ICL pasty gruntowej, która została z nich wykonana (metodyka wykonywania past — Burland, 1990). Na rysunku widać, że krzywa I leży częściowo powyżej krzywej ICL — w strefie nadwyżki porowatości, która jest wynikiem wzmocnienia strukturalnego. Krzywa II leży poniżej krzywej referencyjnej ICL w strefie gruntów prekonsolidowanych. Takie samo naprężenie uplastycznienia zatem, a inna geneza i inne zachowanie gruntu po jego przekroczeniu.

## Podsumowanie

1. Obecny w literaturze wczesny pogląd Casagrande'a wiąże załamanie krzywej ścisłości z przekroczeniem maksymalnych obciążeń, jakim grunt był poddany w przeszłości. Zaprzeczeniem tej tezy są wyniki licznych



Ryc. 4. Wpływ różnych czynników na różnicę między zadaniem naprężeniem a wynikowym naprężeniem uplastycznienia gruntu (szczegółowy opis w tekście)

Fig. 4. Influence of different factors on difference between applied stress and yield stress obtained (detailed description in article)

doświadczeń niezależnych badaczy. Niestety, te wyniki jeszcze się nie przekładają w większej skali na zmiany w praktycznym rozumieniu zagadnienia prekonsolidacji. Nowe podejście do wyjaśnienia zmian ścisłości gruntów spoistych w funkcji naprężenia przypisuje znacznie większą rolę czynnikiem strukturalnym, niż pierwotnie przypuszczano.

2. Zaproponowany przez Burlanda współczynnik uplastycznienia *YSR*, jako pojęcie szersze niż *OCR*, uwzględnia wykazaną doświadczalnie niezgodność rzeczywistego obciążenia, jakiemu poddano grunt, z odczytanym później naprężeniem uplastycznienia. Z polskich autorów tę terminologię konsekwentnie stosują Barański (2004a, b), Izbicki i Strużyk (2002, 2005). Naprężenie uplastycznienia jest niejako wartością graniczną, rozdzielającą krzywą ścisłości na dwie części. Do tej wartości naprężenia mówimy o znaczącym udziale odkształceń sprężystych, w dużej mierze odwracalnych. Po przekroczeniu wartości naprężenia uplastycznienia, mamy do czynienia głównie z odkształceniami plastycznymi, trwałymi.

3. Dwie próbki gruntu mogą wykazać takie samo naprężenie uplastycznienia, ten sam *YSR* (czy według konserwatywnego podejścia do nazewnictwa *OCR*, który jednak w tym kontekście zupełnie nie odzwierciedla rzeczywistości), a jednocześnie jedna z nich może być gruntem prekonsolidowanym (obciążonym wcześniej ponad obecne naprężenie), a druga tylko wykazywać wysokie naprężenie uplastycznienia w wyniku wzmocnienia strukturalnego.

4. Aby zidentyfikować tę różnicę, można odnieść krzywe ścisłości do krzywej referencyjnej ICL. Krzywa ścisłości wykraczająca na prawo od ICL wskazuje na silny wpływ wzmocnienia strukturalnego. Krzywa ścisłości znajdująca się pod krzywą ICL (czy inaczej — po lewej stronie) sugeruje dominujący wpływ prekonsolidacji mechanicznej, ale nie wyklucza działania składowej strukturalnej na późniejszym etapie historii gruntu.

5. Aby umożliwić pełniejszą charakterystykę liczbową stanu prekonsolidowania gruntu, która dopełni wskaźnik *YSR*, podejmuje się próby parametryzacji przestrzeni poniżej krzywej referencyjnej ICL. Autor niniejszego artykułu podjął taką próbę w pracy doktorskiej, a opis metodyki uzyskiwania nowego parametru planuje przedstawić na łamach kolejnego artykułu, co anonsuje zainteresowanym tematyczną czytelnikom.

## Literatura

BARAŃSKI M. 2004a — The mechanical behaviour of normally consolidated tills with reference to their structure. [In:] Jardine R.J., Potts D.M. & Higgins K.G. (eds) *Advances in geotechnical engineering: The Skempton conference*, Thomas Telford, London, 1: 357–368.

BARAŃSKI M. 2004b — The interplay between geological history and the geotechnical properties of overconsolidated Mio-Pliocene clays. [In:] Jardine R.J., Potts D.M. & Higgins K.G. (eds) *Advances in geotechnical engineering: The Skempton conference*, Thomas Telford, London, 2: 1219–1230.

BECKER D.E., CROOKS J.H.A., BEEN K. & JEFFERIES M.G. 1987 — Work as a criterion for determining in situ and yield stresses in clays. *Can. Geotech. J.*, 24: 549–564.

BJERRUM L. & LO K.Y. 1963 — Effect of ageing on the shear-strength properties of a normally consolidated clay. *Géotechnique*, 13, 2: 147–156.

BOONE S.J. & LUTENEGGER A.J. 1997 — Carbonates and cementation of glacially derived cohesive soils in New York State and southern Ontario. *Can. Geotech. J.*, 34: 534–550.

BURLAND J.B. 1990 — On the compressibility and shear strength of natural clays. *Géotechnique*, 40, 3: 329–378.

CASAGRANDE A. 1936 — The determination of the pre-consolidation load and its practical significance. *Proc., First International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Cambridge, 3: 60–64.

CHANDLER R.J. 2000 — Clay sediments in depositional basins: the geotechnical cycle. *Quart. J. Engineer. Geol. Hydrogeol.*, 33: 7–39.

COTECCHIA F. & CHANDLER R.J. 1997 — The influence of structure on the pre-failure behaviour of a natural clay. *Géotechnique*, 47, 3: 523–544.

DADEY K.A., LEINEN M. & SILVA A.J. 1991 — Anomalous stress history of sediments of the northwest Pacific: The role of microstructure. [In:] Bennett R.H., Bryant W.R. & Hulbert M.H. (eds) *Microstructure of fine grained sediments: From mud to shale*. Springer-Verlag: 229–236.

DIAS JUNIOR M.S., PIERCE F.J. 1995 — A simple procedure for estimating preconsolidation pressure from soil compression curves. *Soil Technology*, 8: 139–151.

GRABOWSKA-OLSZEWSKA B. (red.) 1990 — *Metody badań gruntów spoistych*. Wyd. Geol. Warszawa.

GRABOWSKA-OLSZEWSKA B. (red.) 1998 — *Geologia stosowana, Właściwości gruntów nienasyconych*. Wyd. Nauk. PWN, Warszawa.

GRIFFITHS F.J. & JOSHI R.C. 1988. Identification of cementation in overconsolidated clays. *Géotechnique*, 38, 3: 451–452.

HANSBO S., JAMIOŁKOWSKI M. & KOK L. 1981 — Consolidation by vertical drains. *Géotechnique*, 31, 3: 45–66.

IZBICKI R.J. & STRÓŻYK J. 2002 — Problemy badania prekonsolidacji gruntów spoistych. [W:] Flisiak D. (red.) 25. Zimowa Szkoła Mechaniki Górniczej: Zakopane, 18–22.03.2002 r. Wyd. KGBiG AGH, Kraków: 235–241.

IZBICKI R.J. & STRÓŻYK J. 2005 — Prekonsolidacja iłów formacji poznańskiej. [W:] *Geotechnika w budownictwie i górnictwie*. 28. Zimowa Szkoła Mechaniki Górniczej i Geoinżynierii. Szklarska Poręba, 13–18.03.2005 r. Oficyna Wyd. PWR, Wrocław: 213–218.

LAMBE T.W. & WHITMAN R.V. 1969 — *Soil mechanics*. Wiley, New York.

LEONARDS G. A. 1972 — General discussion of Session III [In:] *Proc. ASCE Performance of Earth and Earth-Supported Structures*, Purdue Univ., Lafayette, Indiana, 3: 169–173.

LEONARDS G.A. & RAMIAH B.K. 1959 — Time effects in the consolidation of clay. *ASTM Special Technical Publication*, 252: 116–130.

LEROUEIL S. & VAUGHAN P.R. 1990 — The general and congruent effects of structure in natural soils and weak rocks. *Géotechnique*, 40, 3: 467–488.

LIU M.D. & CARTER J.P. 1999 — Virgin compression of structured soils. *Géotechnique*, 49, 1: 43–57.

LIU M.D. & CARTER J.P. 2000 — Modeling the destructuring of soils during virgin compression. *Géotechnique*, 50, 4: 479–483.

MITCHELL J.K. 1976 — *Fundamentals of soil behaviour*. Wiley, New York.

MITCHELL J.K. 1993 — *Fundamentals of soil behaviour*. Second edition. Wiley, New York.

PASZYC-STĘPKOWSKA E. 1966a — Próba fizyko-chemicznej interpretacji procesu ścinania nasyconych gruntów ilowych. *Arch. Hydrot.*, 13, 3-4: 479–567.

PASZYC-STĘPKOWSKA E. 1966b — Przypuszczalny mechanizm procesu ścinania nasyconych pęczniejących iłów. *Arch. Hydrot.*, 13, 3-4: 569–588.

SCHMERTMANN J. H. 1991 — The mechanical aging of soils. *J. Geotech. Engineer.*, 117, 9:1288–1330.

SENOI A. & SAGLAMER A. 2000 — Determination of pre-consolidation pressure with a new, “strain energy-log stress” method. *Electronic J. Geotech. Engineer. Paper 0015*.

SUCHNICKA H.B. 2005 — O potrzebie i możliwościach określania prekonsolidowania gruntu. [W:] *Geotechnika w budownictwie i górnictwie*. 28. Zimowa Szkoła Mechaniki Górniczej i Geoinżynierii. Szklarska Poręba, 13–18.03.2005 r. Oficyna Wyd. PWR, Wrocław: 491–498.

SZCZEPAŃSKI T. 2005 — Ocena stanu skonsolidowania wybranych iłów na podstawie analizy parametrów ścisłości. *Arch. Wyd. Geol. UW*, nr arch. D/359.

TATSUOKA F. 2005 — Effects of viscous properties and ageing on the stress-strain behaviour of geomaterial. [In:] *Geomechanics: testing, modeling and simulation. Proceedings of the first Japan-US workshop on testing, modeling and simulation*, June 27–29, 2003. Boston, Massachusetts, Reston, VA, Amer. Soc. Civil Engineers: 1–60.

ZAWRZYKRAJ P 2005 — Stan skonsolidowania iłów warwowych okolic Sochaczewa i Plecewicy. *Arch. Wyd. Geol. UW*, nr arch.D/355-1/2.

Praca wpłynęła do redakcji 28.11.2006 r.  
Akceptacja do druku 15.1.2007 r.