



WOJCIECH SAS<sup>1)</sup>  
ANDRZEJ GŁUCHOWSKI<sup>2)</sup>

## RUTTING PREDICTION FOR STABILIZED SOILS BASED ON THE CYCLIC CBR TEST

### PRZEWIDYWANIE GŁĘBOKOŚCI KOLEIN GRUNTÓW STABILIZOWANYCH NA PODSTAWIE BADAŃ OBCIĄŻEŃ CYKLICZNYCH W APARACIE CBR

**STRESZCZENIE.** Mechanizm powstawania kolein jest złożony i nadal do końca nie wyjaśniony. Aby go zrozumieć i właściwie przewidzieć wielkość kolein zostały opracowane odpowiednie metody badawcze, m.in. "Accelerate Pavement Testing" (APT). W celu właściwego przewidywania głębokości kolein powstają również złożone modele matematyczne. Ponadto należy mieć na uwadze, że na głębokość kolein również ma wpływ stan gruntu. W artykule zaprezentowano wyniki badań CBR w warunkach cyklicznego obciążenia (cCBR) przeprowadzone na naturalnej i stabilizowanej chemicznie glinie piaszczystej z 8% dodatkiem wapna hydratyzowanego. Grunt naturalny oraz po stabilizacji został zagęszczony w cylindrze CBR zgodnie z metodą Proctora. Materiał został poddany badaniu cCBR przed stabilizacją, po 1 godzinie, 14 i 30 dniach od stabilizacji. Celem badania cCBR było wyznaczenie na jego podstawie parametrów służących do obliczenia głębokości kolein za pomocą modelu Plastic Displacement (P-D). Zaproponowano również modyfikację parametru modelu w celu otrzymania dokładniejszych wyników. Dodatkowo przeprowadzono analizę statystyczną korelacji pomiędzy wynikami badania oraz wynikami otrzymanymi za pomocą modelu P-D.

**SŁOWA KLUCZOWE:** cCBR, cykliczny moduł sprężystości, cykliczne obciążenie, grunty stabilizowane, koleinowanie, odkształcenia plastyczne.

**ABSTRACT.** Rutting mechanism is complex and still being clarified. In order to predict rut depth on the basis of empirical tests and to establish the mechanism of its creation, sophisticated experiments, such as accelerate pavement testing (APT), are being carried out. To find the proper way of predicting rut depth, mathematic models are also created. It should also be noted, in order to obtain results in line with reality, that the nature of the soil affects the depth of rutting. This paper present results of the cyclic CBR test carried out on chemically stabilized sandy clay with the addition of the 8% hydrated lime prepared in CBR mold with respect to Proctor compaction rules. Sandy clay was subjected to cCBR test after either non-stabilized, 1 hour, 14 or 30 days from stabilization with lime. The aim of the cCBR test was to predict rutting depth, calculated with Plastic Displacement (P-D) model. Thus obtained data were compared with test results and some modification was proposed in order to obtain more accurate prediction of rut depth. Also, statistical analysis of correlation between the modeled permanent displacement and the one obtained during the test was made.

**KEYWORDS:** cCBR, cyclic loading, permanent deformation, resilient modulus, rutting, stabilized soil.

DOI: 10.7409/rabdim.013.026

<sup>1)</sup> Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, SGGW w Warszawie; wojciech\_sas@sggw.pl (✉)

<sup>2)</sup> Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, SGGW w Warszawie; agluchowski@gmail.com

## 1. WSTĘP

„Accelerated pavement testing” (APT) jest nową metodą opracowaną do określania właściwości materiałów używanych do budowy dróg. Metoda ta jest kosztowna lecz właściwa dla dróg o dużym obciążeniu ruchem. Głównym celem artykułu było znalezienie właściwego modelu, który opisywałby właściwie wielkość głębokości kolein na podstawie wyników badań z cCBR dla gruntów stabilizowanych. Odkształcenia plastyczne bądź koleiny są największym problemem podczas budowy dróg. Mechanizm ten jest złożony i zależy od właściwości mechanicznych każdej warstwy podczas obciążenia cyklicznego. Koleiny są wynikiem powstawania odkształceń plastycznych, które kumulują się podczas obciążania przez koła pojazdów siłą większą od zaprojektowanej. Badania odpowiedzi gruntu pod obciążeniem cyklicznym prowadzone są od lat 50 ubiegłego wieku. Jednym z wniosków prowadzonych badań jest stwierdzenie, że dla wszystkich gruntów nie posiadających właściwości tiksotropowych [1], przemieszczenie wynikające z powtarzalnego obciążenia nie jest zależne od częstotliwości jego występowania [2]. Jest to dowodem, że zadane naprężenie jest na tyle małe, aby nie zmienić struktury gruntu oraz jego gęstości. Dowiedziono również statystycznie, że częstotliwość obciążenia jezdni ruchem kołowym wynosi od 3 do 20 obciążeń na minutę [1]. Głębokość kolein jest ściśle powiązana z obciążeniem na oś pojazdu i konfiguracją osi a także w mniejszym stopniu zależy od masy pojazdu.

Koleiny są sumą wszystkich odkształceń plastycznych skumulowanych w czasie przez każdą warstwę konstrukcyjną drogi. Kłopotliwe jest zwłaszcza przewidywanie zachowania gruntu w wyniku obciążenia cyklicznego, co wymaga stosowania różnego rodzaju modeli plastycznego odkształcenia. Głównym celem modelowania jest osiągnięcie nieliniowej sprężystości odkształcenia. Co więcej, z powodu różnych właściwości betonu asfaltowego i gruntu tj. lepko-sprężystości i lepko-plastyczności, które są zależne od czasu i temperatury, problem wyznaczenia właściwej wielkości kolein staje się jeszcze bardziej skomplikowany [3].

Przemieszczenie gruntu w wyniku obciążeń cyklicznych następuje w wyniku konsolidacji i ścinania. W większości przypadków te dwa zjawiska zachodzą oddzielnie. Jako pierwsza występuje konsolidacja, która zależna jest od stopnia zagęszczenia każdej warstwy. Po zakończeniu budowy wpływ konsolidacji jest minimalny, jeśli konstrukcja drogi została wykonana prawidłowo. Z etapem budowy związane jest także ścinanie, które jednak dotyczy tylko warstw podbudowy niezwiązanej [3, 4].

## 1. INTRODUCTION

Accelerated pavement testing (APT) is a new test method, designed in order to estimate the properties of pavement materials. This new method is expensive and it seems to be useful in pavements which are subjected to large traffic flow. The main aim of this paper was to find a proper way to obtain a soil model, which will make it possible to estimate the right size of rutting phenomenon on the basis of the cyclic CBR test. Permanent deformation or rutting during pavement construction is a major problem. This mechanism is very complex and depends on each layer, working under cyclic loading. Rutting results in an accumulation of displacements occurring in connection with the road being loaded by a force greater than the designed load of wheels. Behavior of soils under cyclic loading and permanent deformation caused by it have been studied since 1950s. One of the conclusions obtained was that for soils without thixotropic properties [1], deformation from repeated load was recognized as independent from load frequency [2]. This proved that applied stress is small enough not to change the soil structure and density. It was also proved that the average loading rate from traffic load amounts to 3 - 20 applications per minute [1]. In road building, prediction of ruts is strongly associated with axle loads and axle configuration rather than gross vehicle weight.

Ruts are treated as a sum of plastic displacement at each layer of pavement system. Predicting the behavior of soil under cyclic loading requires different plasticity models. The main difficulty during the simulation of this phenomenon is acquiring nonlinear elastic strain of material. What is more, because of different properties of asphalt concrete and soil i.e. its viscoelasticity and viscoplasticity that are time dependent the proper determination of rut depth appears more difficult [3].

Deformation of soils under cyclic loading consists of two components, consolidation and shear. Mainly, these two components occur separately. Firstly appears consolidation, dependent on degree of compaction of each layer during the construction. After construction works are finished, the impact of consolidation on pavement is minimal, if the road structure is well constructed. Shear component is also connected with design procedure, but concerns only subgrade layer [3, 4].

Wyznaczanie przemieszczeń wynikających z odkształceń plastycznych jest problemem złożonym a modelowanie odpowiedzi materiałów w wyniku obciążenia cyklicznego jest czasochłonne. Z tego powodu przewidywanie głębokości kolein składa się z obliczeń dla materiału poddanego od 10 do 20 cyklom obciążenia-odciążenia, a dalsze przemieszczenia są wyznaczane empirycznie [3].

Przemieszczenie plastyczne jako kryterium odkształcenia jest często zaniebywane przy projektowaniu konstrukcji drogi, z tego powodu problem ten wydaje się być przyczyną powstawania kolein. Mechanistyczno-empiryczne podejście do projektowania dróg omija ten element i zastępuje go obliczeniami modelu mechanicznego [3].

Artykuł przedstawia możliwość zastosowaniu badań CBR w warunkach cyklicznego obciążenia do wyznaczenia wielkości koleinowania podłoża gruntowego zbudowanego z chemicznie stabilizowanej gliny piaszczystej i porównaniu wyników obliczonych za pomocą modelu z otrzymanymi wynikami. Została także zaproponowana modyfikacja przyjętego modelu wraz ze statystyczną analizą otrzymanych wyników.

## 2. PRZEGLĄD LITERATURY

Zjawisko koleinowania jest złożone, a jego przyczyny nie są dotychczas wyjaśnione [1, 3, 5]. Z tego powodu tworzone są coraz bardziej skomplikowane metody wykorzystujące nowoczesne aparaty badawcze jak np. *accelerated pavement test* (APT), które polegają na badaniu zachowania się drogi w warunkach obciążenia ruchem drogowym. Główną przyczyną takiego stanu rzeczy jest różnorodność czynników wpływających na warstwy, z których składa się droga. W przypadku gruntów są to m.in. wilgotność, mrozoodporność, a także liczba kół i rozstaw osi pojazdu oraz liczba powtarzanych cykli obciążeń. Z drugiej strony, wielu badaczy nie zgadza się z podstawowymi założeniami, jak choćby wpływu podbudowy na stan odkształcenia nawierzchni [3, 5, 6].

Stworzone modele, które były dotychczas wykorzystywane dają możliwość przewidywania odkształceń plastycznych w wyniku obciążenia cyklicznego. Takimi modelami są: zaproponowany przez Chazallona – Shakedown model [7, 8] oraz mechaniczno-taśmowy – model Yandella [8, 9].

W literaturze nie można obecnie spotkać opisu modelu odkształceń plastycznych dla gruntów stabilizowanych chemicznie. Obciążenia cykliczne gruntów chemicznie stabilizowanych również powodują odkształcenia plastyczne, wynikające z nieliniowych odkształceń. Odkształcenia te

Determination of the plastic displacement is complex problem as well as modeling the behavior of materials under cyclic loading is time consuming procedure. Because of that, models of rutting predict the displacement during first 10 to 20 cycles and the rest of displacement resulting from cyclic loading is estimated empirically [3].

Permanent deformation as strain criterion is often neglected for pavement structure design, although it seems to be a major cause of the surface rutting. The mechanistic-empirical methods of pavement design omit this approach and substitute it with mechanistic computation [3].

The paper concentrates on applying cyclic CBR test in order to approximate the size of rutting in case of subgrade of thick pavement built from chemically stabilized sandy clay and on comparing obtained results with scored data. Also, modification of assumed model was presented along with statistical analysis.

## 2. LITERATURE BACKGROUND

Rutting phenomenon is complex and still unqualified [1, 3, 5]. The proof of this state of matters is the creation of equipment for laboratory tests such as accelerated pavement test (APT), which is a sophisticated method to evaluate the performance of pavement structure under traffic. The main reason behind this is the variety of components impacting the structure of pavement – from moisture content and frost to the number of wheels and load repetitions. On the other hand, many researches disagree with basic concepts such as impact of subgrade structure on pavement deformations' [3, 5, 6].

Created models, which have been studied recently, make it possible to predict permanent deformation under repeated loading. One of such models is the Shakedown model by Chazallon [7, 8] and the mechano-lattice model by Yandell [8, 9].

However no permanent deformation model has been observed for chemically-stabilized material. Cyclic loading of chemically-stabilized soils also causes permanent deformation, but its nonlinear behavior is various in time from stabilization, because of chemical reactions between soil particles and stabilization material [8, 10].

To test permanent deformation of soils under cyclic loading, repeated triaxial test is needed. From this test researches are able to obtain various data about displacement of soil samples. Other tests can also simulate cyclic

zmieniają swoją naturę w określonym czasie procesu z powodu zachodzących reakcji chemicznych pomiędzy cząstkami gruntu w stabilizowanym materiale [8, 10].

Aby określić odkształcenia plastyczne powstające w gruncie podczas obciążenia cyklicznego wykonywane są badania cykliczne trójosiowego ściskania. Za pomocą tego badania można otrzymać dane dotyczące przemieszczeń gruntu. Znane są również inne badania, które mogą symulować warunki cyklicznego obciążania obserwowane w badaniu trójosiowym. Taką metodą jest badanie cCBR, za pomocą którego można otrzymać wartości cyklicznego modułu sprężystości  $M_R$ , a także charakterystykę odkształceniową gruntu. Na Rys. 1 przedstawiono zależność naprężenie-przemieszczenie na podstawie badań próbek gliny piaszczystej, stabilizowanej oraz niestabilizowanej.

conditions from of the triaxial test. For example, cyclic CBR (cCBR) test can be a useful tool to record such parameters as resilient modulus  $M_R$  or soil strains characteristic. Fig. 1 presents cCBR test data for stabilized and non-stabilized sandy clay in function of stress-displacement.

Stress-strain path is usually steeper than the loading path in the same load cycle [8]. This observation led to the development of plastic displacement model (P-D). Furthermore, the stress-strain behavior during the first cycle is different, than during the rest of the cycles. P-D model treats soil as linear elasto-plastic material during first load cycle and linear elastic during the following cycles of load-unload [8, 11, 12]. Fig. 2 presents the above-mentioned P-D model for sandy clay in stress-strain function for model P-D and cCBR test results.

Fig. 1. Test results of the cyclic CBR test for sandy clay (non-stabilized and 30 days after the stabilization)  
Rys. 1. Wyniki badań cCBR dla gliny piaszczystej (próbki niestabilizowane i stabilizowane po 30 dniach od stabilizacji)

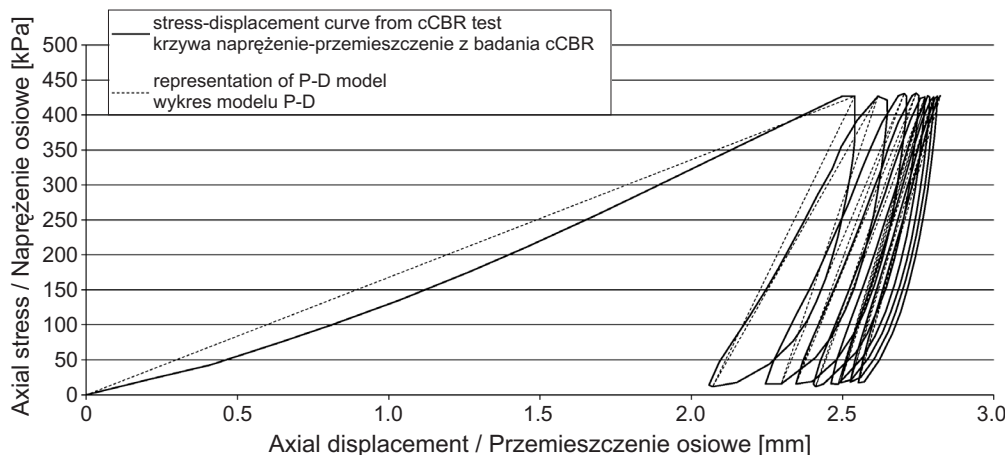
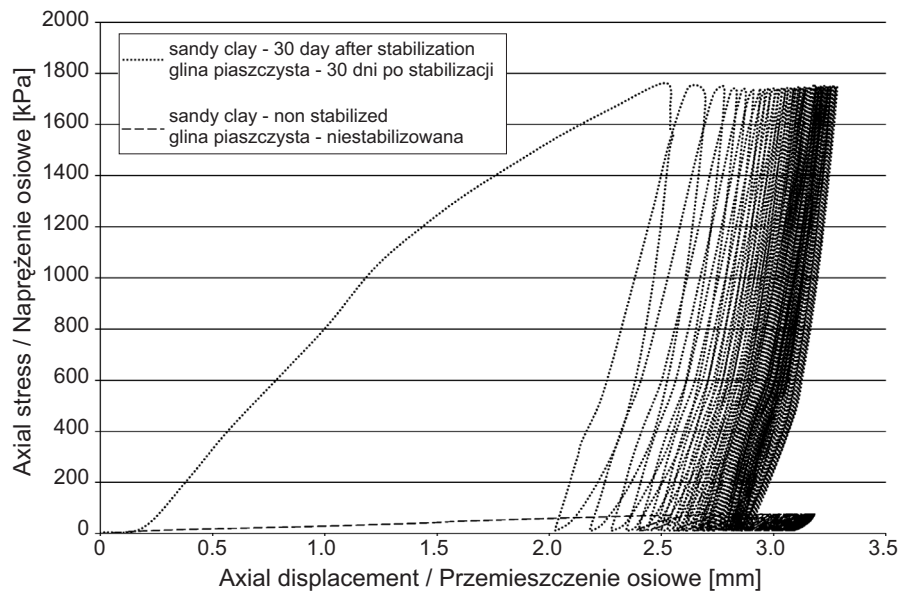


Fig. 2. Presentation of P-D model assumed on the basis of data acquired during the cCBR test  
Rys. 2. Widok modelu P-D przyjętego do obliczenia głębokości koleinowania w badaniu cCBR



Ścieżka naprężenie-odkształcenie jest zwykle bardziej stroma niż ścieżka obciążenia w tym samym cyklu [8]. Ta obserwacja prowadzi do wyznaczenia modelu plastycznego przemieszczenia (P-D). Zachowanie się gruntu w układzie naprężenie-odkształcenie podczas pierwszego cyklu jest inne niż zachodzące podczas kolejnych cykli. Model P-D traktuje grunt jako liniowy, sprężysto-plastyczny materiał podczas pierwszego cyklu obciążenia-odciążenia [8, 11, 12]. Rys. 2 odwzorowuje zależność naprężenie-odkształcenie w przypadku przyjętego modelu P-D oraz badania cCBR.

Wzór przyjęty do wyznaczenia głębokości kolein z testu cCBR składa się z dwóch części. Całkowite plastyczne odkształcenie w określonym cyklu oblicza się z następującego wzoru:

$$\varepsilon_p(n) = \frac{\sigma - \sigma_y}{h_c} + \sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{1}{d_i}\right) \frac{\sigma}{E_L(i)}, \quad (1)$$

gdzie:

$$\frac{\sigma - \sigma_y}{h_c} \text{ – funkcja liniowego wzmocnienia,}$$

$$\sigma \text{ – naprężenie osiowe,}$$

$$\sigma_y \text{ – naprężenie przy przegięciu,}$$

$$h_c \text{ – stała wzmocnienia.}$$

Graficzną interpretację liniowego wzmocnienia przedstawiono na Rys. 3.

Pierwszy człon wzoru opisuje początkowe obciążenie próbki. Drugi człon odpowiada dalszym etapom cyklicznego obciążania, gdzie zjawisko wzmocnienia nie występuje. Parametr  $d_i$  jest modulem wskaźnika funkcji (2), przy czym może on być zdefiniowany jako iloraz energii przy odciążaniu  $E_{UL}$  do energii przy obciążaniu  $E_L$  albo jako energia całkowita  $TE$  do energii rozproszonej  $DE$  po odciążeniu próbki [8]:

$$d_i = \frac{E_{UL}}{E_L} = \frac{TE}{DE}. \quad (2)$$

Parametr  $d_i$  może być także opisany jako wariacja liczby powtórzeń  $n$ . Tę zależność opisuje wzór:

$$d_i = \frac{a}{n^b} + 1, \quad (3)$$

gdzie  $a$  i  $b$  są parametrami plastycznej deformacji.

Po przekształceniach wzorów (1), (2) i (3) permanentna deformacja w jednym cyklu może być opisana jako:

$$\varepsilon_p(n) \approx \varepsilon_v \cdot a \cdot \left[ \frac{(n+1)^{1-b} - 1}{1-b} \right], \quad (4)$$

The equation used to predict rutting depth from cCBR test for soils consists of two parts. The formula for calculating the total permanent strain can be written as follows:

$$\varepsilon_p(n) = \frac{\sigma - \sigma_y}{h_c} + \sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{1}{d_i}\right) \frac{\sigma}{E_L(i)}, \quad (1)$$

where:

$$\frac{\sigma - \sigma_y}{h_c} \text{ – the linear hardening function,}$$

$$\sigma \text{ – axial stress,}$$

$$\sigma_y \text{ – initial yield stress,}$$

$$h_c \text{ – hardening constant.}$$

Graphical interpretation of linear hardening function is shown on Fig. 3.

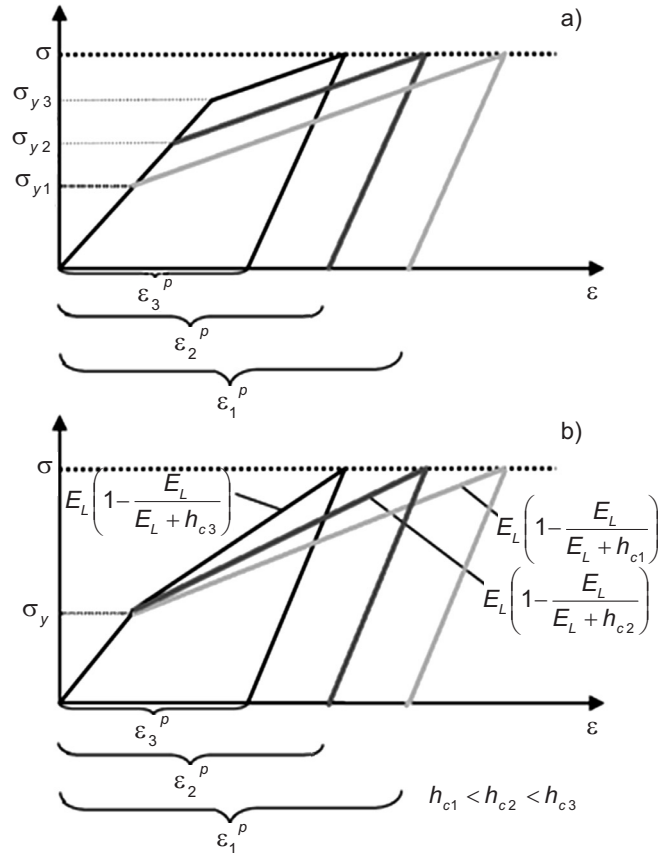


Fig. 3. Graphical interpretation of the linear hardening function [8] a) impact of yield stress level on stress-strain path, b) impact of hardening constant on stress-strain path

Rys. 3. Graficzna interpretacja liniowego wzmocnienia gruntu [8] a) wpływ poziomu naprężenia przegięcia na ścieżkę naprężenia-odkształcenia, b) wpływ stałej wzmocnienia na ścieżkę naprężenia-odkształcenia

gdzie  $\varepsilon_v$  jest przemieszczeniem sprężystym w jednym cyklu. Parametry  $a$  i  $b$  są określane za pomocą wartości  $d_i$  i  $n$ .

### 3. MATERIAŁY I METODY BADAWCZE

Do badań użyto gruntu, który rozpoznano jako glinę piaszczystą (PN-EN ISO 14688-2) [13]. Została ona następnie stabilizowana poprzez dodanie 8% wapna hydratyzowanego po upływie 30 dni. Krzywą uziarnienia przedstawiono na Rys. 4. Wilgotność optymalną oznaczono za pomocą metody Proctora. Wyniki przedstawiono na Rys. 5. Próbkę zostały przygotowane i zagęszczone w cylindrze CBR zgodnie z metodą Proctora przy wilgotności optymalnej ustalonej według PN-88/B-04481 [14]. Energia zagęszczania wynosiła  $0,59 \text{ J/cm}^2$ . Wynikowa gęstość była równa gęstości otrzymanej z badania Proctora przy wilgotności optymalnej. Badanie zostało wykonane poprzez zaadoptowanie aparatury trójosiowej z kontrolą obciążania-odciążania próbki. Trzpień posiadał wymiary takie same jak standardowy trzpień używany do badań CBR. Na Rys. 6 zamieszczono widok sprzętu badawczego z próbką.

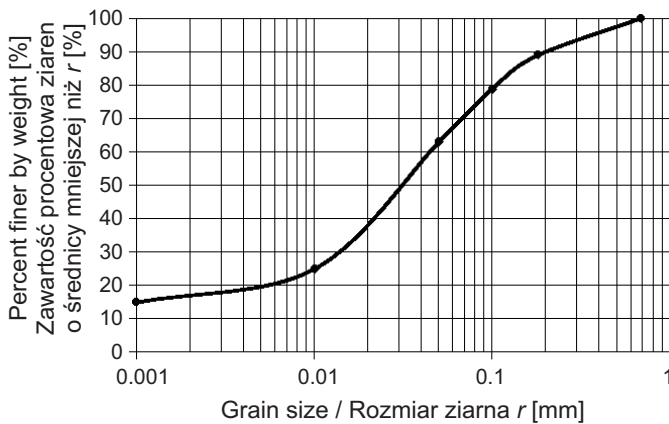


Fig. 4. Sieve analysis of soil used in tests  
Rys. 4. Krzywa uziarnienia gruntu użytego do badań

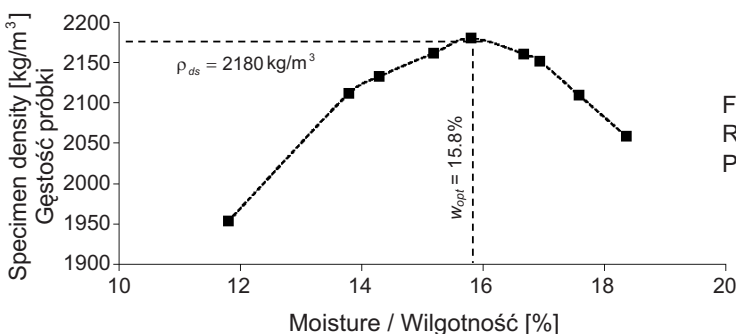


Fig. 5. Results of the Proctor test for stabilized sandy clay  
Rys. 5. Wyniki badania wilgotności optymalnej metodą Proctora dla stabilizowanej gliny piaszczystej

This term of equation describes the first load of the sample. Second term of the equation (1) shows further cycles where hardening is not present. The  $d_i$  parameter is a modulus ratio function (2), and can be defined as a quotient of unloaded energy  $E_{UL}$  to energy of loading  $E_L$  or as total energy  $TE$  given to sample in load to dissipated energy  $DE$  after unloading the sample [8]:

$$d_i = \frac{E_{UL}}{E_L} = \frac{TE}{DE}. \quad (2)$$

Parameter  $d_i$  can be also described as a variation of the number of repetitions  $n$ . This variation was showed in the equation:

$$d_i = \frac{a}{n^b} + 1, \quad (3)$$

where  $a$  and  $b$  are the permanent deformation parameters.

By simplifying equations (1), (2) and (3) permanent deformation in one cycle can be described as follows:

$$\varepsilon_p(n) \approx \varepsilon_v \cdot a \cdot \left[ \frac{(n+1)^{1-b} - 1}{1-b} \right], \quad (4)$$

where  $\varepsilon_v$  is an elastic displacement in one cycle. The parameters  $a$  and  $b$  are calculated from  $d_i$  and  $n$  values plotted in function.

### 3. MATERIALS AND METHODS

Material used for research was sandy clay (in accordance with PN-EN ISO 14688-2) [13], which was stabilized by the addition of hydrated lime in the amount of 8%, 30 days after stabilization. The gradation curve is presented on Fig. 4. The optimal moisture content obtained from Proctor test is shown on Fig. 5. Specimens were prepared in optimal moisture conditions, and compacted in CBR mold by Proctor equipment in accordance with PN-88/B-04481 [14]. Energy of compaction was  $0.59 \text{ J/cm}^2$ . The obtained density of specimen was the same as during the Proctor test.

Procedura badania cCBR w pierwszej fazie była taka sama jak dla standardowego testu CBR. Próbki zostały obciążone siłą, która spowodowała penetrację trzpienia na głębokość 2,54 mm. Następnie zanotowano wartość siły odpowiadającej temu zagłębieniu. Kolejne etapy obciążania były przeprowadzane do otrzymanej wartości siły. Po pierwszym etapie obciążania, przeprowadzono etap odciążania do naprężenia o wartości 10 kPa. Te dwa etapy stanowią jeden cykl badania. Cykliczne badanie próbki przeprowadzono do momentu uzyskania cyklicznie sprężystej odpowiedzi próbki [15].

Na Rys. 7 oraz 8 przedstawiono szczegóły przeprowadzonego badania. Cykliczną falę w funkcji czasu oraz naprężenia osiowego zilustrowano na Rys. 7. Tą samą falę w funkcji czasu i przemieszczenia osiowego przedstawiono na Rys. 8.



Fig. 6. Picture of cCBR test equipment  
Rys. 6. Widok aparatury do badania cCBR

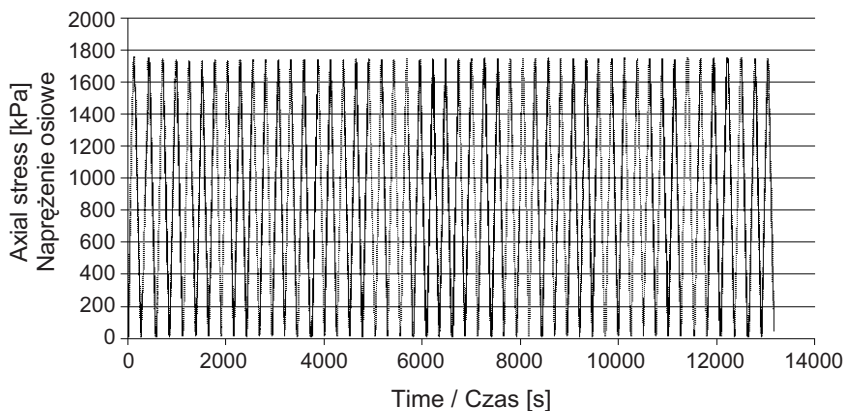


Fig. 7. Cyclic wave from cCBR test in function of axial stress and time  
Rys. 7. Cykliczna fala z badania cCBR w funkcji naprężenia osiowego i czasu

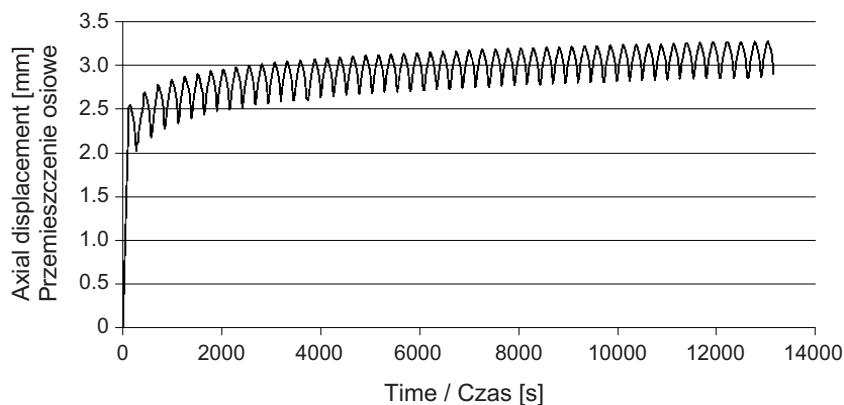


Fig. 8. Cyclic wave from cCBR test in function of axial displacement and time  
Rys. 8. Cykliczna fala z badania cCBR w funkcji przemieszczenia osiowego i czasu

Procedure of test was in first step the same as during the standard CBR test. Specimen was loaded by force, which penetrated to the depth of 2.54 mm. The obtained load force was used to the next steps of the test. Second stage consisted of unloading the specimen to constant stress, which in this case was 10 kPa. These two stages constitute the first cycle of the test. After that, loading-unloading procedure was repeated 50 times until resilient response of sample was achieved [15].

Figure 7 and 8 present details of conducted tests. Cyclic wave in function of time and axial stress is presented in Fig. 7. The same wave in function of time and axial displacement is plotted in Fig. 8.

## 4. WYNIKI BADAŃ

Wykorzystując badanie cCBR głębokość koleinowania została obliczona dla gliny piaszczystej: stabilizowanej po 1 godzinie, 30 dniach od stabilizacji i dla gliny niestabilizowanej. Otrzymane wyniki zilustrowano na Rys. 1, 7, 8. Na podstawie badań wyznaczono wartość parametru  $d_i$ . Na Rys. 9 przedstawiono aproksymację liniową wyników w celu wyznaczenia parametrów  $a$  i  $b$ .

Wartość parametru  $d_i$  jest ilorzem odkształcenia sprężystego do odkształcenia całkowitego w danym cyklu. Wzór (5) przedstawia szczegóły na tym etapie ustalania głębokości kolein:

$$d_i = \frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_t} = \frac{a}{n^b} + 1, \quad (5)$$

gdzie:  $\varepsilon_r$  i  $\varepsilon_t$  to kolejno odkształcenia sprężyste (z kolejnych cykli) i całkowite. Algorytm ustalania wartości  $a$  i  $b$  polegał na wyznaczeniu parametru  $d_i$  jako ilorazu odkształceń sprężystych i całkowitych obliczonych za pomocą wzoru (5). Kolejnym krokiem było obliczenie logarytmu naturalnego z wartości  $d_i - 1$  (Rys. 9). Ze wzoru funkcji linii trendu ustalonego na podstawie wykresu otrzymano wartości stałych  $p = -0,8694$  oraz  $q = -0,1223$ . Te dane posłużyły do wyznaczenia wartości  $a$  i  $b$  zgodnie z zależnością:

$$a = \exp(q), \quad b = -p. \quad (6)$$

Fig. 9. Estimation of  $a$  and  $b$  parameters  
Rys. 9. Wyznaczanie parametrów  $a$  i  $b$

Wzmocnienie gruntu podczas pierwszej fazy obciążania zilustrowano graficznie na Rys. 10. Maksymalne naprężenie normalne (osiowe) wynosiło 1762,06 kPa, natomiast maksymalne odkształcenie 0,0168. Wzmocnienie to zaobserwowano przy wartościach naprężenia i odkształcenia odpowiednio 1043,87 kPa i 0,0071. Na podstawie wzoru (7) wyznaczono stałą wzmocnienia  $h_c$ :

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = E_L \left( 1 - \frac{E_L}{E_L + h_c} \right), \quad (7)$$

gdzie:

$E_L$  – energia podczas obciążania w czasie pierwszego cyklu,

## 4. RESULTS

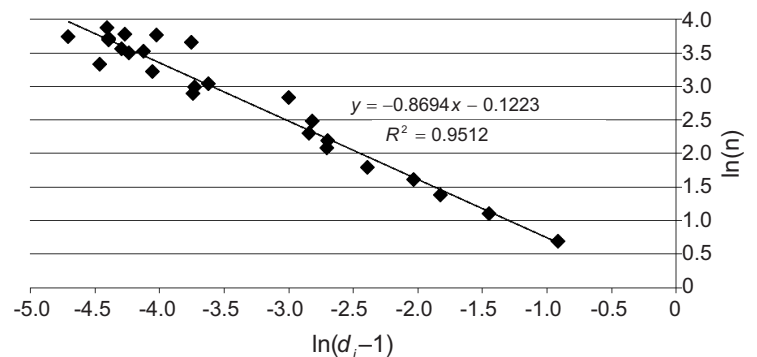
Rutting depth prediction was made for sandy clay tested in cCBR apparatus, one hour, 30 days after the end of stabilization as well as for non-stabilized soil. Obtained results were shown on Figs 1, 7, 8. Based on data from test approximation the  $d_i$  value was established. Fig. 9 presents the results of estimation for  $a$  and  $b$  parameters.

The value of  $d_i$  is a ratio of resilient strain to total strain. The equation (5) presents details of this step of rutting depth prediction procedure:

$$d_i = \frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_t} = \frac{a}{n^b} + 1, \quad (5)$$

where:  $\varepsilon_r$  and  $\varepsilon_t$  are resilient and total strain respectively. The algorithm of estimation of  $a$  and  $b$  values was used to determine the value of  $d_i$  parameter as a quotient of resilient and total strain shown in equation (5). Next step was to calculate the natural logarithm of  $d_i - 1$ . Values have been plotted in Fig. 9. The trend line equation gives the value of  $p = -0.8694$  and the value of  $q = -0.1223$ . This data was taken to estimate  $a$  and  $b$  values according to equation:

$$a = \exp(q), \quad b = -p. \quad (6)$$



Hardening of the soil during the first step of loading, is shown on Fig. 10. The peak stress was 1762.06 kPa, peak strain was 0.0168. Hardening of sandy clay was observed at 1043.87 kPa and 0.0071. On the basis of the equation (7), the hardening constant  $h_c$  was estimated:

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = E_L \left( 1 - \frac{E_L}{E_L + h_c} \right), \quad (7)$$

where:

$E_L$  – stands for the energy of loading in first cycle,



$d\sigma$  – różnica pomiędzy naprężeniem maksymalnym a naprężeniem, w którym wystąpiło wzmocnienie gruntu,

$d\varepsilon$  – różnica pomiędzy odkształceniem maksymalnym a odkształceniem, w którym odnotowano wzmocnienie gruntu.

Po ustaleniu wartości stałej wzmocnienia  $h_c$  oraz naprężeń  $\sigma$  i  $\sigma_y$  zostały one wykorzystane w równaniu (4), a następnie dokonano obliczenia wielkości kolein. Na Rys. 11 przedstawiono wyniki badania cCBR i wyniki obliczeń głębokości kolein za pomocą modelu P-D.

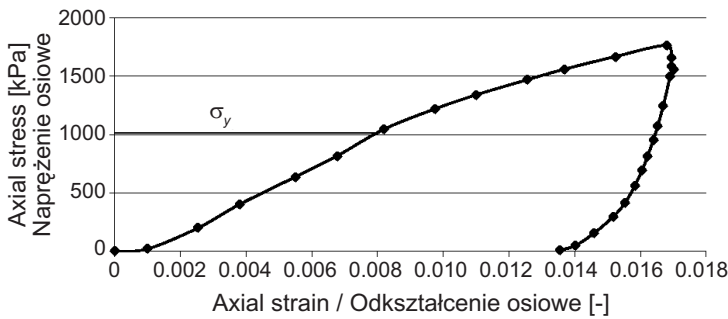
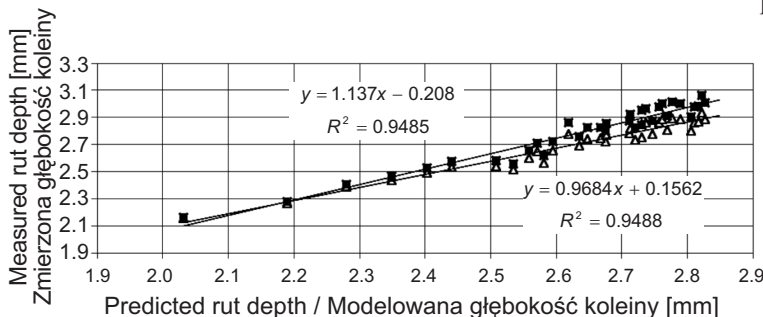


Fig. 10. The first cycle tests of stabilized sandy clay  
Rys. 10. Pierwszy cykl badania cCBR gliny stabilizowanej po 30 dniach

Zaproponowano także modyfikację modelu P-D polegającą na zmianie sposobu obliczania parametru  $b$ :

$$b = -p^{0.3}, \quad (8)$$

która daje bardziej wiarygodne wyniki. Otrzymane wartości z modelu porównano z wynikami badań cCBR (Rys. 12).

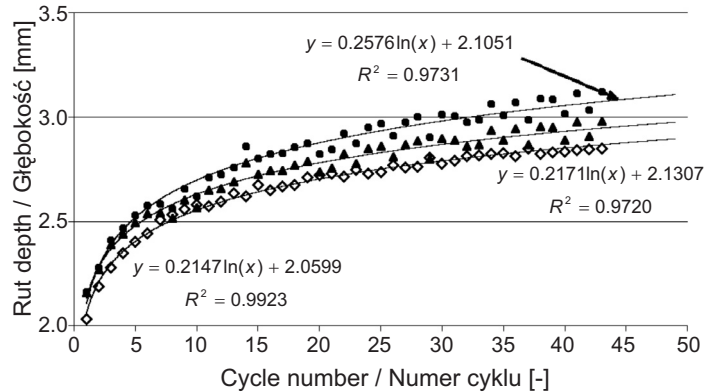


▲ modified P-D model of rut prediction / zmodyfikowany model P-D przewidywania głębokości koleinowania  
■ model P-D of rut prediction / model P-D przewidywania głębokości koleinowania

$d\sigma$  – the difference between peak stress and stress of hardening,

$d\varepsilon$  – the difference between peak strain and strain of hardening.

Estimated hardening constant  $h_c$  as well as stresses  $\sigma$  and  $\sigma_y$  were used in equation (4) and then rutting prediction model was calculated. Fig. 11 plots the results of the cCBR test and calculated results of rutting based on the P-D model, as well as the results of the P-D model modified for this type of soil, namely stabilized sandy clay.



◆ rutting of sandy clay obtained from cCBR test / koleinowanie gliny piaszczystej otrzymane z badania cCBR  
● P-D model of rutting prediction / model P-D głębokości koleinowania  
▲ modified P-D model of rutting prediction / zmodyfikowany model P-D

Fig. 11. Results of the rutting prediction calculated on the basis of the P-D model, and rutting obtained during cCBR test  
Rys. 11. Wyniki obliczeń głębokości kolein wyznaczone za pomocą modelu P-D i wyniki badania cCBR

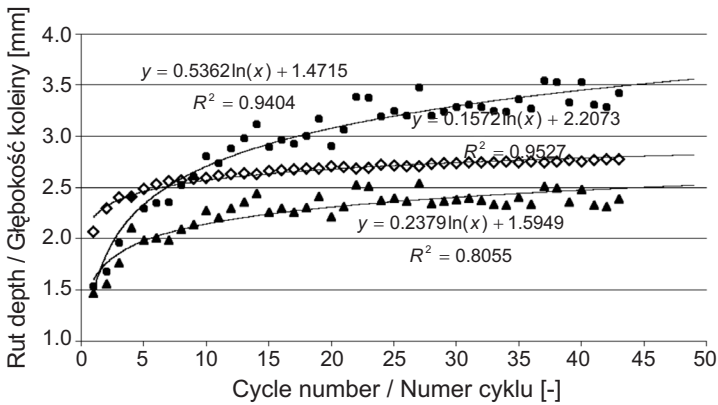
Modification of P-D model include changing the method of calculating the parameter  $b$ . According to (6), this parameter provides less suitable data. Proposed change is presented:

$$b = -p^{0.3}. \quad (8)$$

Plotted model functions were compared with the data registered during the cCBR test. The results are shown in Fig. 12.

Fig. 12. Correlation between modeled and stored data to be used for rutting prediction, obtained during the cCBR test  
Rys. 12. Korelacja między wynikami obliczonymi za pomocą modelu oraz uzyskanymi z badań cCBR

Taką procedurę przeprowadzono dla gliny piaszczystej stabilizowanej dodatkiem 8% wapna hydratyzowanego po 1 godzinie oraz dla tego samego gruntu – niestabilizowanego. Wyniki przedstawiono na Rys. 13 oraz 14.



- ◇ rutting of sandy clay obtained from cCBR test / koleinowanie gliny piaszczystej otrzymane z badania cCBR
- P-D model of rutting prediction / model P-D głębokości koleinowania
- ▲ modified P-D model of rutting prediction / zmodyfikowany model P-D

Fig. 13. Results of rutting prediction calculated on the basis of the P-D model, and rutting obtained during cCBR test for sandy clay stabilized for 1 hour

Rys. 13. Wyniki kalkulacji głębokości kolein obliczone za pomocą modelu P-D i wyniki badania cCBR dla gliny piaszczystej po 1 godzinie od stabilizacji

Przy określaniu głębokości kolein dla gliny piaszczystej po 30 dniach od stabilizacji otrzymano różne wartości współczynników korelacji Pearsona  $r$  (odpowiednio 0,974 i 0,973) pomiędzy wynikami badań nawierzchni a obliczonymi według zmodyfikowanego i niezmodyfikowanego modelu P-D. W przypadku tej samej gliny, lecz badanej po 1 godzinie od stabilizacji, wartości współczynników korelacji Pearsona  $r$  pomiędzy wynikami badań nawierzchni a zmodyfikowanym oraz niezmodyfikowanym modelem P-D wyniosły odpowiednio 0,911 i 0,936.

Wyniki przewidywania głębokości kolein otrzymane w oparciu o zmodyfikowany model P-D są bliższe wynikom badań cCBR. Aby potwierdzić tę hipotezę należy wykonać dodatkowe badania. Badania te powinny obejmować 100, 1000 i 10000 cykli obciążenia-odciążenia. Wykorzystując równania funkcji linii trendu przedstawionych na Rys. 11, 13 i 14 dla modelu zmodyfikowanego oraz wyniki badań nawierzchni przeprowadzono próbę przewidzenia głębokości kolein po 100000 cyklach. Rezultaty obliczeń zestawiono na Rys. 15. Analizując rysunek widać, że zmodyfikowany model P-D dał najlepsze wyniki w przypadku gliny piaszczystej stabilizowanej po 30 dniach od stabilizacji.

This procedure was used for sandy clay stabilized with the addition of 8% of hydrated lime after 1 hour of stabilization and for non-stabilized sandy clay. Results are presented in Figs. 13 and 14 respectively.

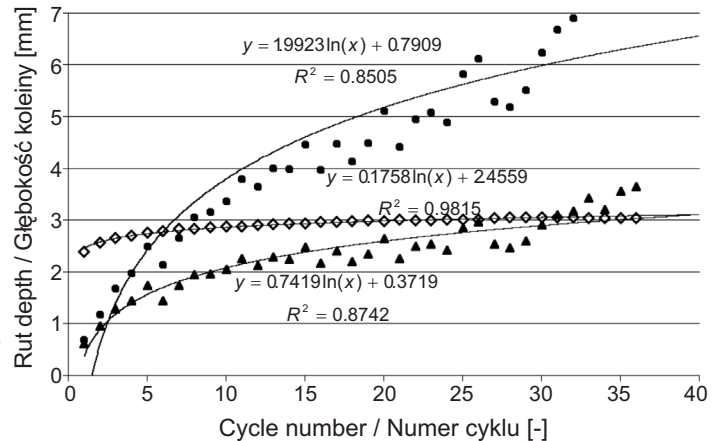


Fig. 14. Results of rutting prediction calculated on the basis P-D model, and rutting obtained from cCBR test for non-stabilized sandy clay (legend in Fig. 13)

Rys. 14. Wyniki obliczeń głębokości kolein wyznaczone za pomocą modelu P-D i wyniki badania cCBR dla gliny piaszczystej niestabilizowanej (legenda na Rys. 13)

Prediction model for rutting of sandy clay after 30 days after stabilization give Pearson product-moment correlation coefficient  $r$  of 0.974 and 0.973 between tested soil and modified and non-modified P-D model respectively. For sandy clay tested 1 hour after stabilization, correlation coefficient  $r$  amounts to 0.911 and 0.936 between tested soil and modified and non-modified P-D model respectively.

Since the modified P-D model gives values lesser or equal to obtained data than not modified model, it seems that after numerous of repetitions modified model will provide more suitable data. For this hypothesis to be confirmed, more tests are needed. These tests should predict the depth of rutting after 100, 1000 and 10000 load-unload cycle repetitions. By applying equations for trend line showed on Figs. 11, 13, 14 to test data in combination with the modified P-D model rut depth was predicted to 100000 of cycles. Results are present on Fig. 15. By analysis of Fig. 15 we can assume that this model is the most appropriate for sandy clay, which was stabilized for 30 days.

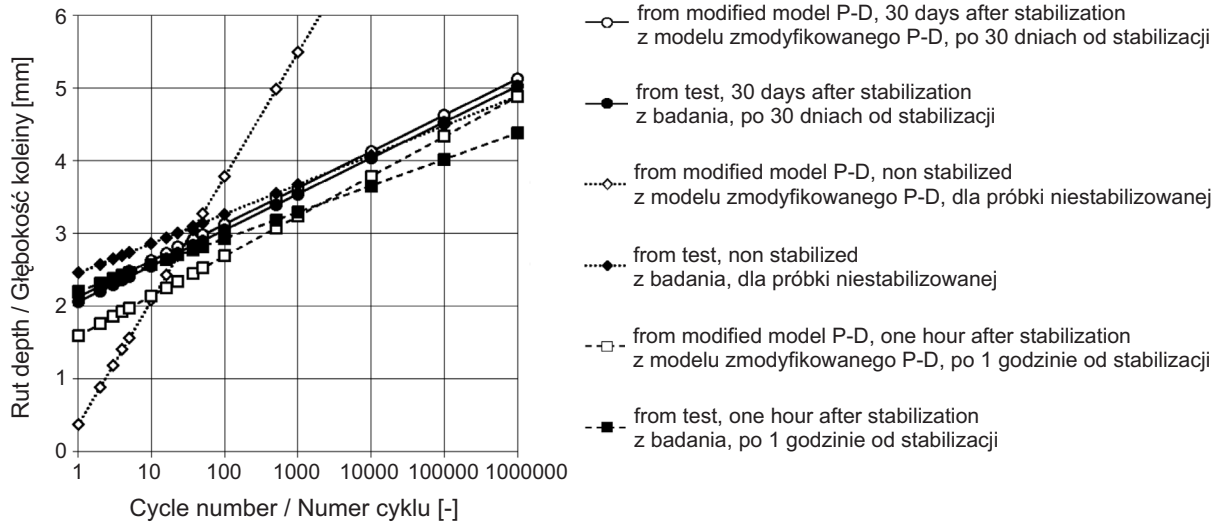


Fig. 15. Predicted rut depth for sandy clay in various stages of stabilization process for test results and modified model  
 Rys. 15. Przewidywana głębokość kolein w różnych etapach stabilizacji gliny piaszczystej uzyskana z wyników badań cCBR i zmodyfikowanego modelu P-D

Przewidywana głębokość kolein określona za pomocą modelu P-D daje wyniki zbliżone do głębokości kolein otrzymanych z wyników testu cCBR. Współczynniki korelacji dla wyników tych badań wykazują silną dodatnią liniową zależność.

Odształcenie plastyczne będące przyczyną koleinowania zależy od cyklicznego modułu sprężystości  $M_R$ . Współczynnik korelacji  $r$  w przypadku tej zależności wynosi 0,860.

W celu porównania wyników badania cCBR z głębokością kolein uzyskaną za pomocą zmodyfikowanego modelu P-D zastosowano kalkulację wsteczną, używając znanego już odształcenia plastycznego z modelu P-D, odształcenia sprężystego i całkowitego obliczonego wstecz ze wzoru (4). Na Rys. 16 przedstawiono wykres zależności odształcenia osiowego do naprężenia osiowego działającego na próbkę dla wyników badania cCBR oraz zmodyfikowanego modelu P-D.

Rutting prediction P-D model gives suitable results in accordance with the data acquired from the cCBR test. Correlation coefficients show that there is a strong positive linear relationship between test data and rutting P-D model.

Plastic displacement, which is the cause of rutting, is dependent on resilient modulus value  $M_R$ . Correlation factor  $r$  for permanent displacement and the resilient modulus values give 0.860, which constitutes a positive linear relationship.

To compare the results of the cCBR test with the rutting achieved by applying the P-D model, back-calculation was made. Using known plastic strain developed from the P-D model, resilient strain and total strain were back-calculated from equation (4). Fig. 16 presents a graph of axial strain and axial stress affecting the sample in case of the cCBR test and the modified model P-D.

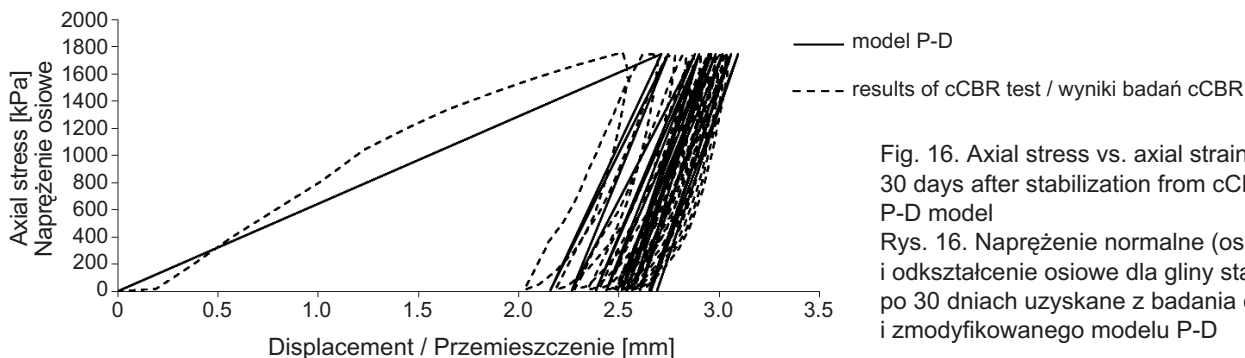


Fig. 16. Axial stress vs. axial strain for sandy clay 30 days after stabilization from cCBR test and from P-D model  
 Rys. 16. Naprężenie normalne (osiowe) i odształcenie osiowe dla gliny stabilizowanej po 30 dniach uzyskane z badania cCBR i zmodyfikowanego modelu P-D

## 5. WNIOSKI

Przedstawiono analizę modelu oraz wyniki przewidywania głębokości kolein na powierzchni gruntu. Badania dotyczyły gliny piaszczystej stabilizowanej 8% dodatkiem wapna hydratyzowanego po godzinie i 30 dniach od stabilizacji oraz gliny niestabilizowanej. W celu obliczenia przewidywanej głębokości kolein zastosowano model plastycznego przemieszczenia P-D. Zaproponowano również modyfikację tego modelu. Badania polowe nawierzchni wykonano w aparacie cyklicznym cCBR. Sformułowano następujące wnioski:

1. Badanie cCBR może być z powodzeniem używane jako narzędzie do określania plastycznych przemieszczeń nawierzchni.
2. Różnice pomiędzy danymi otrzymanymi z badania a obliczonymi za pomocą modelu nie były większe niż 9%.
3. Wpływ stabilizacji na zachowanie się gruntu nadal wymaga badań uzupełniających.
4. Model P-D jest właściwy do przewidywania głębokości kolein podczas pierwszych cykli cyklicznego obciążania.
5. Powtarzalne obciążenia stabilizowanego gruntu tworzą plastyczne przemieszczenia, które są powiązane z cykliczną sprężystością gruntu.
6. Wykorzystanie metody cCBR w praktyce inżynierskiej wymaga przeprowadzenia kolejnych badań, które będą obejmować głębsze przemieszczenie i więcej powtórzeń cykli.
7. Model powstawania kolein opierający się o plastyczne przemieszczenie gruntu daje porównywalne wyniki, co świadczyć może o istotnym wpływie plastycznego odkształcenia gruntu na powstawanie kolein.

## BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] Collop A.C., Cebon D., Hardy M.S.A.: Viscoelastic approach to rutting in flexible pavements. *Journal of Transportation Engineering*, **121**, 1, 1995, 82-93
- [2] Gajewska B., Gajewski M., Kraszewski C., Rafalski L.: Investigation of resilient moduli of selected hydraulically bound mixtures (HBM) under cyclic loading. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **11**, 1, 2012, 269-280
- [3] Uzan J.: Permanent deformation in flexible pavements. *Journal of Transportation Engineering*, **130**, 1, 2004, 6-13

## 5. CONCLUSIONS

This paper presented the predictions for the rutting of pavement surface, based on the tests conducted on sandy clay stabilized with the addition of lime in the amount of 8%, either after one hour or 30 days after the stabilization as well as non-stabilized soil. To predict rut depth, plastic displacement P-D model was used. Also, modification of P-D model was proposed. Tests were performed on the cCBR equipment. This study has:

1. cCBR equipment provides test data which can be successfully applied to measure plastic displacement of pavements.
2. Difference between data obtained on the basis of the tests and predicted model values were no more significant than 9%.
3. The impact, which the stabilization of soils has on the rut depth is still not entirely clear.
4. P-D rutting prediction model is suitable for predicting rut depth after the first series of cyclic load application.
5. Repeated loadings of stabilized soil create plastic displacement which is related to resilient modulus.
6. For engineering application, more cCBR tests must be conducted from cCBR, with deeper displacement and more repetitions.
7. Rutting model based on permanent displacement data gives accurate results. These can prove that permanent deformation is the leading cause of rutting mechanism.

- [4] Khan M.A., Usmani A., Shah S.S., Abbas H.: A study of multilayer soil-fly ash layered system under cyclic loading. *International Journal of Civil Engineering*, **6**, 2, 2008, 73-89
- [5] Wang R., Zhou F., Chen D., Zheng G., Scullon T., Walubita L.F.: Characterization of rutting (permanent strain) development of A-2-4 and A-4 subgrade soils under the HVS loading. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, **24**, 4, 2010, 382-389
- [6] Park S.W.: Load limits based on rutting in pavement foundations. *KSCE Journal of Civil Engineering*, **8**, 1, 2004, 23-28



- [7] *Chazallon C., Koval G., Hornych P., Allou F., Mouhoubi S.*: Modeling of rutting of two flexible pavements with the shakedown theory and the finite element method. *Computers and Geotechnics*, **36**, 5, 2009, 798-809
- [8] *Wu Z., Chen X.*: Prediction of permanent deformation of pavement base and subgrade materials under accelerated loading. *International Journal of Pavement Research and Technology*, **4**, 4, 2011, 231-237
- [9] *Yandell W.O.*: New method of simulating layered systems of unbound granular material. *Transportation Research Record*, **1022**, 1985, 91-98
- [10] *Sas W., Głuchowski A., Szymański A.*: Determination of the resilient modulus MR for lime stabilized clay obtained from repeated loading CBR tests. *Annals of Warsaw University of Life Sciences-Land Reclamation*, **44**, 2, 2012, 143-153
- [11] *Wu Z., Chen X.*: Finite element sensitivity analysis of permanent deformation under accelerated loading. *Proceedings of GeoFlorida-Advances in Analysis, Modeling & Design*, West Palm Beach, Florida, USA, 2010
- [12] *Wu Z., Chen X., Zhang Z.*: A simplified numerical model proposed for simulation of permanent deformation of pavement base and subgrade materials. *Transportation Research Board of the National Academies*, CD-ROM, Washington, USA, 2009
- [13] PN-EN ISO 14688-2:2006 Eurokod 7: Projektowanie geotechniczne – Część 2: Rozpoznanie i badanie podłoża gruntowego
- [14] PN-88/B-04481:1988 Grunty budowlane. Badania próbek gruntu
- [15] *Sas W., Głuchowski A.*: Metodyka wyznaczania modułów sprężystości (E i Mr) na podstawie badania CBR pod obciążeniem cyklicznym. *Scientific Review – Engineering and Environmental Sciences*, **57**, 3, 2012, 171-181

