



WALDEMAR ST. SZAJNA¹⁾

PAULINA LECHOCKA²⁾

EVALUATION OF THE TWO METHODS OF DETERMINING BULK DENSITY OF SAND: TAPPING FORK TEST AND VIBRATING TABLE TEST

OCENA METOD BADANIA GĘSTOŚCI OBJĘTOŚCIOWEJ SZKIELETU GRUNTOWEGO PIASKU WYKORZYSTUJĄCYCH WIDEŁKI WIBRACYJNE I STÓŁ WIBRACYJNY

STRESZCZENIE. Celem pracy jest porównanie i ocena metod wyznaczania maksymalnej gęstości objętościowej $\rho_{d \max}$ piasku. Rozpatrywano metodę widełek wibracyjnych i stołu wibracyjnego. Porównywano skuteczność zagęszczania i powtarzalność wyników uzyskanych każdą z metod. Badaniu poddany został piasek kwarcowy. Testy metodą widełek wykonane zostały niezależnie przez dwóch laborantów. Metoda widełek okazała się skuteczna (średnia gęstość $\rho_{d \max}=1,805 \text{ g/cm}^3$), jednak mało powtarzalna (względny błąd wynosił 3,35%) i zależna od czynnika ludzkiego. W drugiej metodzie wykorzystano stół wibracyjny o wymuszeniu bezwładnościowym. Tu najważniejszy był dobór częstotliwości drgań. Przy zbyt małych częstotliwościach metoda okazywała się nieskuteczna, przy nadmiernie dużych zaś następowało naprzemienne zagęszczanie i rozluźnianie gruntu. Jako optymalną uznano częstotliwość 39 Hz, przy której uzyskano średnią gęstość $\rho_{d \max}=1,795 \text{ g/cm}^3$ i błąd względny 1,56% po normatywnych 12 minutach wibrowania. Problem wyłonienia obiektywnej metody badania $\rho_{d \max}$ jest o tyle istotny, że pozornie niewielkie różnice błędów względnych w każdej z metod przekładają się na duże różnice w stopniu zagęszczenia badanego piasku.

SŁOWA KLUCZOWE: gęstość objętościowa, skuteczność i powtarzalność metody, stół wibracyjny, widełki wibracyjne.

ABSTRACT. The aim of this research is to compare and evaluate the methods used for determining the maximum bulk density of sand $\rho_{d \max}$. Two methods were considered: tapping fork test and vibrating table test. They were compared in terms of the efficiency of compaction and the repeatability of results. The tested material was quartz sand. The tapping fork test was carried out independently by two lab workers. While the tapping fork method proved to be satisfactory in terms of compaction efficiency (as demonstrated by the mean bulk density of $\rho_{d \max}=1.805 \text{ g/cm}^3$), it was not as good in terms of repeatability (3.35% of relative error) and showed sensitivity to human factor. The second test was performed using a vibrating table with inertial excitation. Selecting an appropriate frequency of vibrations proved to be a key factor. Too low frequency resulted in poor compaction and in case of too high frequency the density was increasing and decreasing alternately. The frequency of 39 Hz was found to be the optimum value, producing the average density of $\rho_{d \max}=1.795 \text{ g/cm}^3$ and 1.56% of relative error after vibrating for the standard time of 12 minutes. Even seemingly small variations of relative error between the analysed methods resulted in considerable variations in the degree of compaction of the tested sand. Therefore, the selection of the method is so important due to the criterion of test objectivity.

KEYWORDS: bulk density, tapping fork, test method efficiency and repeatability, vibrating table.

DOI: 10.7409/rabdim.016.001

¹⁾ Uniwersytet Zielonogórski, Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska, Instytut Budownictwa; w.szajna@ib.uz.zgora.pl (✉)

²⁾ Uniwersytet Zielonogórski, Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska, Instytut Budownictwa; paulina.lechocka@gmail.com

1. WSTĘP

Większość parametrów mechanicznych opisujących wytrzymałość i sztywność gruntu zależy nie tylko od natury (rodzaju) tego materiału, ale także od jego stanu. Powszechnie używanym parametrem stanu jest gęstość objętościowa szkieletu gruntowego, będąca stosunkiem masy szkieletu do całkowitej objętości badanej próbki ($\rho_d = m_s/V$). W wielu zagadnieniach geotechnicznych, związanych z oceną stanu gruntów, konieczne jest wyznaczanie w laboratorium maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu $\rho_{d \max}$, odpowiadającej maksymalnemu upakowaniu ziaren i cząstek. Badania takie są konieczne, na przykład przy wyznaczaniu względnej miary zagęszczenia gruntów sypkich, czyli tzw. stopnia zagęszczenia.

Gęstość $\rho_{d \max}$ nie odpowiada jakiemuś specyficznemu i jednoznaczному stanowi gruntu. Otrzymywana w badaniach wartość tej gęstości zależy od dwóch grup czynników:

- cech naturalnych zagęszczanego materiału: wielkości ziaren, uziemienia, mineralogii i morfologii ziaren,
- sposobu przygotowania próbki i prowadzenia badania: wilgotności, metody zagęszczania oraz energii użytej do tego celu.

Ze względu na drugą grupę czynników $\rho_{d \max}$ należy traktować jako wartość umowną, gdyż konkretny grunt można bardziej zagęścić używając większej energii lub innej, skuteczniejszej metody badawczej. Wobec powyższego, normy badań laboratoryjnych powinny precyzyjnie określać sposób prowadzenia badania tak, aby był on powtarzalny i tzw. czynnik ludzki został zminimalizowany, zaś metoda gwarantowała duże wartości zagęszczenia. Norma badań laboratoryjnych PN-88/B-04481 [1] specyfikuje do określania gęstości $\rho_{d \max}$ próbek gruntów niespoistych metodę widełek wibracyjnych. Wyszuszony grunt umieszcza się w cylindrze o znormalizowanych parametrach, a następnie uderza się widełkami o ścianki naczynia „początkowo lekko i wolno, a następnie silnie i szybko”. Istnieją obawy, czy tak sprecyzowany opis prowadzi do uzyskiwania powtarzalnych wyników, w szczególności jeżeli porówna się rezultaty badania tego samego materiału przez różne laboratoria lub chociażby różnych laborantów. Ze względu na powyższe wątpliwości w pracy porównano i oceniono wyniki badania gęstości objętościowej szkieletu $\rho_{d \max}$ piasku, wyznaczonej z wykorzystaniem dwóch metod: normowej metody widełek wibracyjnych (WW) i metody stołu wibracyjnego (SW). Drugą metodę wybrano, gdyż wibrowanie mechaniczne jest niezależne od operatora. Metoda stołu

1. INTRODUCTION

Most of the mechanical parameters defining the strength and stiffness of soil depend not only on the natural characteristics of the material itself but are also largely determined by its physical condition. The physical condition of soil is commonly represented by the bulk density of soil (a.k.a. dry density), calculated as the ratio between the weight of dry soil sample and its total volume ($\rho_d = m_s/V$). A critical part of various soil engineering analyses consists in laboratory determination of the maximum bulk density of soil $\rho_{d \max}$ at the densest packing of grains and particles. It is indispensable, for example, in defining the degree of compaction of non-cohesive soils – a relative measure of compaction.

Bulk density $\rho_{d \max}$ does not represent any specific and definite physical condition of soil. Instead, its value which is obtained through laboratory testing, depends on two groups of factors:

- natural properties of the compacted material: grain-size, grain-size distribution, mineralogy and morphology of grains,
- sample preparation and testing conditions: moisture, method of compaction and compactive effort applied in the test.

Taking account of the second group of factors, the bulk density of soil $\rho_{d \max}$ should be considered as dependent property whose value can be affected by the compactive effort and/or test procedure. As such, the procedures of laboratory tests should be described in detail in the reference documents to ensure repeatability in order to minimise the human factor and produce high density of the tested materials after compaction. The Polish standard PN-88/B-04481 [1] specifies the tapping fork test as the appropriate method for determining the bulk density $\rho_{d \max}$ of non-cohesive soils. According to the specified procedure, a sample of dry soil is placed in the test cylinder with specified parameters. Next the lab worker starts striking the cylinder side with a fork in such a way that the impacts are “in the beginning light and slow, then quick and vigorous”. This description, however, may not be sufficient to ensure repeatable results, what can be particularly evident when comparing the test results obtained for a given material at different laboratories or even at the same laboratory but performed by different lab workers. These concerns are addressed in this research through comparing and evaluating the dry densities $\rho_{d \max}$ of sand determined in two ways: with the tapping fork test – according to the procedure prescribed by the Polish standard,

wibracyjnego stanowi standardową metodę wyznaczania $\rho_{d \max}$ wykorzystywaną między innymi w USA. Parametry stołu oraz sposób badania opisane są w normie ASTM D 4253 [2].

W literaturze polskiej i zagranicznej sporo miejsca poświęcono laboratoryjnemu zagęszczaniu gruntu. Podsumowanie doświadczeń z prowadzonych na szeroką skalę badań zagęszczalności z wykorzystaniem różnych metod badawczych, w tym metody widełek wibracyjnych oraz stołu wibracyjnego, przedstawił Pisarczyk [3]. W głównej mierze badania nakierowane były na poszukiwanie alternatywnych metod wyznaczania maksymalnego zagęszczania przy optymalnej wilgotności w stosunku do metody Proctora, będącej standardową metodą badania zagęszczalności nasypów. Pisarczyk [4] przedstawił przegląd literatury dotyczący czynników wpływających na wibracyjne zagęszczanie gruntów niespoistych. W przeglądzie analizowane były takie czynniki jak: skład granulometryczny, wskaźnik różnoziarnistości, kształt i stopień obtoczenia ziaren, które można zaliczyć do pierwszej grupy czynników związanych z naturą gruntu. Rozważano ponadto wpływ wilgotności próbki, amplitudy, częstotliwości i przyspieszenia generowanych drgań. Analizowano również wartości statycznego obciążenia powierzchniowego, czasu wibracji i wartości siły wzbudzającej, czyli czynników związanych z metodą badawczą.

Przegląd literatury przedmiotu opisany przez Pisarczyka warto uzupełnić kilkoma istotnymi pracami poświęconymi skuteczności zagęszczania gruntu za pomocą stołu wibracyjnego. Whitman i Ortigosa [5] badając zagęszczanie piasków podczas pionowego wibrowania doszli do wniosku, że bardzo istotnym czynnikiem wpływającym na skuteczność zagęszczania są przyspieszenia, którym poddawany jest grunt. W przypadku przyspieszeń mniejszych niż przyspieszenie ziemskie (1 g) wibrowanie jest nieskuteczne. Dobry i Whitman [6], kontynuując poprzednie badania, wyznaczyli prędkość krytyczną zderzających się ziaren, powyżej której wibrowanie przy danej częstotliwości nie jest skuteczne. Brand [7] badał piaski drobne, średnie i grube, przy różnych przyspieszeniach i różnych wielkościach pojemników badawczych. Największe maksymalne gęstości objętościowe szkieletu gruntowego uzyskał przy przyspieszeniach rzędu 2 g. W cytowanych pracach powtarzalność wyników badań była pomijana lub traktowana marginalnie, koncentrowano się natomiast na uzyskiwaniu dużych gęstości materiału, czyli na skuteczności metody. W kontekście umowności parametru $\rho_{d \max}$, o której wspomniano na wstępie, przy ocenie metod badawczych powtarzalność rezultatów powinna być traktowana na równi ze skutecznością.

and with the vibrating table test. The second of the two compared methods was chosen because mechanical vibration eliminates the influence of human factor. The vibrating table test is widely used as a standard method of determining the value of $\rho_{d \max}$, for example in the U.S. The table parameters and the test procedure are described in ASTM D 4253 [2].

The issues related to compaction of soil at laboratory have been widely covered in both Polish and foreign literature. For example, a paper by Pisarczyk [3] provides a summary of a wide-scale experimental research on the compaction characteristics of soils using various test methods, including the tapping fork and vibrating table tests. With the Proctor test being the standard method of determining the compaction characteristics of man-made fills, the research projects mainly aimed to find alternative methods for determining the maximum dry density at the optimum moisture content. The paper of Pisarczyk [4] provides a review of literature dealing with various factors impacting compaction of non-cohesive soils by vibration. The factors under his analysis included the particle size distribution, uniformity coefficient, shape and degree of grain rounding - these are included in the first group of factors, associated with the natural characteristics of soil. Other factors in consideration were the influence of moisture content of the specimen and the vibration parameters: amplitude, frequency and acceleration. Moreover, the analysed factors were associated with the used test method, including the values of static load, vibration time and excitation force level. Furthermore, factors associated with the used test method, including the static surface pressure, vibration time and excitation force level were analysed.

It is worthwhile to extend the Pisarczyk's review with a few important papers dealing with the efficiency of soil compaction with the use of vibrating table. In their research on compaction of sand under vertical vibration Whitman and Ortigosa [5] arrive at the conclusion that the level of soil acceleration is a key factor influencing the efficiency of compaction effort. At accelerations below 1g vibration was found to be ineffective. The research was continued by Dobry and Whitman [6] who determined the maximum impact velocity of colliding grains above which vibration at a given frequency is no longer effective. Brand [7] tested fine, medium and coarse sand at different accelerations and test container sizes. He reported obtaining the greatest dry densities at accelerations of about 2 g. Repeatability of results was marginalised if not completely ignored, because the focus was on maximising the density of material after compaction, i.e. the

Zasadniczym celem niniejszej pracy jest zbadanie powtarzalności i skuteczności zagęszczania gruntu, uzyskiwanych za pomocą widełek wibracyjnych i stołu wibracyjnego. Jako miarę powtarzalności wyników przyjęto rozstęp próby, czyli różnicę pomiędzy maksymalną i minimalną otrzymaną wartością $\rho_{d \max}$. Jako miarę skuteczności metody przyjęto średnią wartość gęstości objętościowej szkieletu uzyskaną z serii pomiarów. W kolejnych punktach pracy opisano: mechanizm zagęszczania ośrodka ziarnistego, zastosowane metody badawcze, charakterystykę badanego piasku, uzyskane wyniki pomiarów i ich analizę oraz sformułowano wnioski dotyczące oceny zastosowanych metod zagęszczania.

2. CHARAKTERYSTYKA MECHANIZMU ZAGĘSZCZANIA GRUNTÓW NIESPOISTYCH

Skutecznym sposobem zagęszczania gruntów gruboziarnistych, czyli piasków i żwirów, jest wibrowanie. Zanim przedstawione zostaną metody badawcze, a otrzymane wyniki omówione, celowe wydaje się scharakteryzowanie mechanizmu zagęszczania gruntów. Literatura przedmiotu jest bardzo bogata i cytowane poniżej prace są jedynie wybranymi przykładami, korespondującymi z tematem niniejszej pracy. Wiedza o mechanizmach zagęszczania została znacznie pogłębiona w związku z postępowaniem w trzech następujących dziedzinach: badaniach zjawiska upłynnienia gruntu, które towarzyszy trzęsieniom ziemi [8], zastosowaniu modelowania dyskretnego do ośrodków ziarnistych [9] oraz rozwojem mikromechaniki [10].

Do zagęszczenia gruntu podczas wibrowania może dochodzić jedynie wtedy, gdy energia kinetyczna przekazywana na poszczególne ziarna jest wystarczająco duża, aby pokonać siły tarcia pomiędzy sąsiednimi ziarnami i spowodować ich wzajemne przemieszczanie się. Cały proces przekazywania energii i przemieszczania się ziaren, ze względu na skomplikowaną geometrię ośrodka ziarnistego, zachodzące interakcje ziaren i znaczącą rolę tarcia, jest procesem chaotycznym. Jest on wynikiem wzajemnego współzawodnictwa sił czynnych, dążących do wyprowadzenia układu z chwilowego stanu równowagi i sił biernych (sił tarcia pomiędzy ziarnami), które utrzymują układ w równowadze. Na siły czynne składają się oddziaływania grawitacyjne, siły bezwładności wynikające z przyspieszeń, których doznają ziarna, a niekiedy także siły wywołane obciążeniem powierzchniowym próbki.

efficiency of the used compaction technique. However, bearing in mind the dependent nature of $\rho_{d \max}$ mentioned in the introduction, the repeatability of results should be considered as important as the efficiency of compaction technique used in the test.

This research focuses on examining the repeatability and efficiency of soil compaction with the tapping fork and vibrating table techniques. The sample range (i.e. the difference between the maximum and minimum values of $\rho_{d \max}$ obtained in the tests) was the parameter used to quantify the repeatability of results. The measure of efficiency of the compaction technique was the mean value of dry density calculated from a series of measurement results. The following sections of the paper describe: the compaction mechanism of a granular assembly and the used test methods, the characteristics of the tested sand and the measurement results including their analysis. Conclusions from the evaluation of the test methods are formulated in the final section.

2. THE MECHANISM OF COMPACTION OF NON-COHESIVE SOIL

Compaction by vibration is an efficient technique to densify coarse-grain soil material, i.e. sand and gravel. Before proceeding to the presentation of test methods and analysing the obtained results, the mechanism of soil compaction will be described. The literature on this subject is rich and the works referred to below are chosen from a number of publications as the most relevant to the subject of this paper. The research developments in the following three areas have largely deepened the understanding of the compaction mechanisms: research on the liquefaction of soil associated with earthquakes [8], application of discrete modelling method to granular assemblies [9] and the development of micromechanics [10].

Compaction of soil by vibration occurs only if the kinetic energy imparted to individual grains is sufficient to overcome grain-to-grain friction, causing them to move in relation to each other. The process of imparting kinetic energy and movement of grains when viewed as a whole must be considered chaotic due to the complex geometry of granular assembly, grain interactions and the important role played by friction. In this process the active forces, which tend to change the condition of temporary equilibrium, are resisted by passive restraint forces (grain-to-grain friction), which hold the system in equilibrium. The active forces include gravitational interaction, forces of inertia due to acceleration of grains and

Siły tarcia w głównej mierze zależne są od stopnia obtoczenia powierzchni ziaren, który jest pochodną rodzaju minerału i sposobu jego transportu na miejsce sedymentacji w procesie geologicznym. Piaski o ziarnach dobrze obtoczonych zagęszczają się łatwiej niż piaski ostrokrawędziste, ze względu na niższą wartość krytycznego kąta tarcia wewnętrznego [11]. Siły tarcia są proporcjonalne do wartości oddziaływań normalnych pomiędzy ziarnami. W przypadku występowania obciążeń powierzchniowych siły te zmieniają wartości sił tarcia. Wpływ obciążenia powierzchniowego w trakcie wibrowania jest jednak niejednoznaczny. W początkowej fazie zagęszczania, gdy bardzo luźną strukturę piasku tworzą układy ziaren będące w równowadze chwiejnej, obciążenie powierzchniowe, nawet przy niewielkiej energii wibrowania, niszczy tę równowagę i przyczynia się do zagęszczania. Gdy materiał jest już częściowo zagęszczony, obciążenie powierzchniowe może ułatwiać bądź utrudniać zagęszczanie, zależnie od kierunku i wartości przyspieszeń, którym poddawane są ziarna. W wyniku przyspieszeń, których doznają ziarna, generowane są siły bezwładności. Ich wartości zależne są od masy poszczególnych ziaren, a więc od uziarnienia. Siły bezwładności mogą zwiększać, redukować bądź pokonywać siły tarcia. Jeżeli tarcie zostanie pokonane, ziarno przemieszcza się względem ziaren sąsiednich. Takie względne przemieszczanie się ziaren jest tym łatwiejsze, im liczba kontaktów z sąsiednimi ziarnami jest mniejsza.

Liczba kontaktów przypadająca na jedno ziarno nazywana jest w mikromechanice ośrodków ziarnistych liczbą koordynacyjną CN (ang. *coordination number*). Przykładowo, dla kubicznego układu ziaren kulistych o jednakowych średnicach (Rys. 1a) $CN = 6$, zaś w przypadku tetraedrycznego układu (Rys. 1b) liczba ta wynosi 12. Na rysunku podano także porowatości n odpowiadające każdemu z układów. Z porównania przedstawionych wartości wynika, że struktura tetraedryczna w stosunku do struktury kubicznej opisana jest dwukrotnie większą liczbą koordynacyjną, czemu odpowiada prawie dwukrotnie mniejsza porowatość. Układy tetraedryczne są bardziej stabilne niż układy kubiczne, stąd mniejszej energii należy użyć przy przejściu z układu kubicznego do tetraedrycznego niż odwrotnie. Jest to mechanizm, który sprzyja zagęszczaniu ośrodka ziarnistego wywołanego wibrowaniem. Jeżeli przyspieszenia ziaren są odpowiednio duże, wówczas układ tetraedryczny nie gwarantuje stateczności i dochodzi do naprzemiennego zagęszczania i rozluźniania ośrodka. Stabilność układów wzrasta także w przypadku ośrodków wielofrakcyjnych, w których mniejsze ziarna mogą szczelniej wypełnić przestrzenie pomiędzy ziarnami większymi.

sometimes also the forces resulting from the surface pressure applied on the sample.

Frictional force depend mainly on the degree of rounding of grains which in turn is related to the type of mineral and the method of transport to the place of deposition in the geological process. Round sand is easier to compact than sand built of angular grains due to a lower value of critical internal friction angle [11]. The forces of friction are proportional to the normal grain-to-grain interactions. When surface pressure is applied, the existing forces of friction are changed. However, the effect of the surface pressure during vibration is not explicit. The state of unstable equilibrium of the grains, typical of the initial phase of compaction, can be changed by the surface pressure even with a small compaction energy, thus enhancing the process of compaction. When the material becomes partly compacted, the surface pressure may either enhance or impair the process of compaction, depending on the direction and values of grain accelerations. The grain accelerations result in generating inertial forces. The values of these forces depend on the weights of individual grains and thus on the grain size distribution. The inertial forces may increase, reduce or overcome the frictional forces. When the frictional resistance is overcome, the grain becomes displaced in relation to the neighbouring particles. The smaller the number of contacts the grain has with the neighbouring particles, the easier it is to displace it.

In micromechanics of granular assemblies the number of contacts a grain has with the neighbouring particles is called coordination number (CN). For example, a cubic packing of spherical particles uniform in size (Fig. 1a) has coordination number of $CN = 6$ and a tetrahedral packing of such particles (Fig. 1b) has the coordination number of $CN = 12$. The figure gives also the values of porosity n of each packing. With two times greater coordination number, tetrahedral packing has almost two times lower porosity, as compared to the cubic packing. Tetrahedral packing is more stable than cubic packing and hence transition from cubic to tetrahedral packing requires less energy than transition in the opposite direction. This mechanism facilitates compaction of a granular assembly by vibration. At sufficiently high values of grain acceleration tetrahedral packing will no longer ensure stability and the packing density will increase and decrease alternately. Also non-uniform grading enhances packing stability, allowing smaller grains to fill the voids between larger ones. Excessive strains may result in spatial segregation of the soil material into groups of grains of similar size, density, shape or degree of rounding. The

Jeżeli badany ośrodek gruntowy poddany jest bardzo dużym odkształceniom, może dochodzić do przestrzennej segregacji materiału w grupy ziaren o zbliżonym wymiarze, gęstości, kształcie lub stopniu obtoczenia powierzchni. Grunt po segregacji ma większą porowatość niż pierwotny materiał będący homogeniczną mieszaniną ziaren.

3. OPIS METOD BADAWCZYCH ORAZ CHARAKTERYSTYKA BADANEGO PIASKU

Do oznaczenia maksymalnej gęstości objętościowej gruntów niespoistych, zgodnie z normą PN-88/B-04481, wykorzystuje się metalowy cylinder o pojemności około 500 cm^3 z tłoczkiem oraz widełki wibracyjne o masie około 550 g. Szczegóły dotyczące wymiarów naczynia i widełek podane są w powyższej normie. Naczynie wypełnia się za pomocą lejka gruntem wysuszonym do stałej masy w temperaturze $105 \div 110^\circ\text{C}$. Powierzchnię gruntu wyrównuje się, waży, nakrywa tłoczkiem i poddaje wibracjom przez 1 minutę za pomocą widełek. Następnie mierzy się za pomocą suwmiarki zagłębienie tłoczka w trzech punktach z dokładnością do 0,1 mm. Grunt uznaje się za zagęszczony, jeżeli trzy kolejne pomiary zagłębienia tłoczka, po każdych dodatkowych 30 s zagęszczania, nie wykazują zmian. Jak zasignalizowano we wstępie, wątpliwości autorów budzi opis sposobu prowadzenia zagęszczania, zgodnie z którym należy uderzać widełkami o ścianki naczynia „początkowo lekko i wolno, a następnie silnie i szybko”. Zgodnie z powyższą procedurą badania były prowadzone przez dwóch laborantów na tym samym gruncie z wykorzystaniem tej samej aparatury. Średnia minimalna gęstość objętościowa $\rho_{d \min}$ po zasypaniu cylindra wynosiła $1,565 \text{ g/cm}^3$. W celach kontrolnych, po zakończeniu każdego testu, grunt z cylindrem poddawano dodatkowemu ważeniu.

Jako alternatywną metodę badania gęstości objętościowej w stosunku do wyżej opisanej zastosowano mechaniczne zagęszczanie gruntu na stole wibracyjnym. Przygotowano procedurę, będącą modyfikacją normowej metody wykorzystywanej w USA do oznaczania gęstości $\rho_{d \max}$. Według amerykańskiej normy ASTM D 4253 do badań używa się stołu o amplitudzie przemieszczeń pionowych $w = 0,24 \text{ mm}$ i częstotliwości $f = 50 \text{ Hz}$. Testom poddaje się grunt wysuszony (wersja A) bądź grunt przy pełnej saturacji (wersja B). Próbkę gruntu wibruje się pod obciążeniem powierzchniowym wynoszącym 13,8 kPa w cylindrze o znormalizowanej średnicy i wysokości. Na cylinder nakłada się kołnierzyk podwyższający jego wysokość na czas wibrowania, podobnie jak przy standardowych testach Proctora. Po

soil after the segregation process is characterised by increased porosity in comparison to the initially homogeneous mixture.

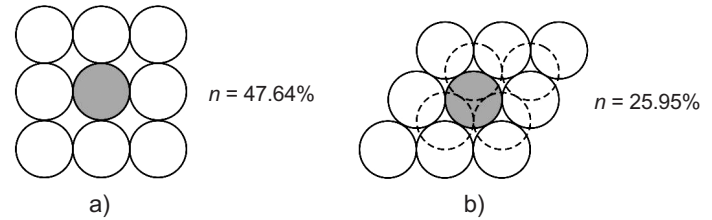


Fig. 1. Model of packing of spherical grains uniform in size:

a) cubic – representing loose structure,

b) tetrahedral – representing compacted structure

Rys. 1. Modelowe układy ziaren kulistych o jednakowej średnicy:

a) kubiczny, odpowiadający luźnej strukturze,

b) tetraedryczny, odpowiadający zagęszczonej strukturze

3. DESCRIPTION OF THE TEST METHODS AND THE TESTED SAND CHARACTERISTICS

The test method specified in the Polish Standard PN-88/B-04481 for determining the maximum dry density of non-cohesive soils uses a ca. 500 cm^3 metal cylinder with a top cap (plunger) and tapping fork of ca. 550 g in weight. The test vessel and the tapping fork must have the dimensions specified in the standard. A sample of soil dried to constant weight at $105\text{--}110^\circ\text{C}$ is introduced into the test vessel through the funnel. The surface is levelled out, weighted and with the plunger placed on the sample it is subjected to vibrations excited by the fork impacts during 1 min. The process is monitored by measuring the depth of penetration of the plunger into the cylinder at three points with 0.1 mm accuracy. The maximum density is achieved when three subsequent measurements, each carried out after additional 30 sec. of vibrations, give the same results. However, questions can be raised as to the reliability of the compaction procedure prescribed by the standard, according to which the fork impact should be “in the beginning light and slow and then quick and vigorous”. The test was carried out according to this procedure by two lab workers, using the same soil and the same test device. The mean minimum bulk density of soil $\rho_{d \min}$ measured right after filling the cylinder was 1.565 g/cm^3 . For control purposes, the soil, together with cylinder, were additionally weighed after each test.

Alternatively, dry density of soil can be determined with the vibrating table test. The actual test procedure applied in this research is a modified standard procedure used in

zagęszczaniu wibracyjnym trwającym 12 minut usuwa się kołnierz, wyrównuje górną powierzchnię próbki i poddaje się ją ważeniu. Wadą powyższej procedury pod względem badawczym jest niemożność kontroli postępu procesu zagęszczania w trakcie wibrowania.

Do przeprowadzenia niniejszych badań wykorzystano cylinder stosowany w metodzie widełek wibracyjnych z tłoczkiem, którego zagłębienie można mierzyć w trakcie badania. Cylinder uzupełniono podstawą umożliwiającą zamocowanie go do stołu wibracyjnego. W każdym teście cylinder zasypywano piaskiem z wykorzystaniem lejka, podobnie jak przy badaniu minimalnej gęstości objętościowej. Jednakże za każdym razem wsypywano jedynie 600 g piasku i górną powierzchnię wyrównywano, a następnie nakładano tłoczek. Ilość piasku dobrano tak, aby po wyrównaniu możliwe było stabilne ustawienie tłoczka (zazwyczaj była to głębokość 27 mm poniżej górnej krawędzi cylindra).

Pomimo normatywnego czasu badania ustalonego przez normę ASTM wynoszącego 12 minut, większość próbek wibrowano przez 15 minut, aby przekonać się jak przebiega proces zagęszczania gruntu w dłuższym czasie. W kilku przypadkach, w których intensywność zmian zagęszczenia po 15 minutach była nadal duża, kontynuowano wibrowanie, aż do stabilizacji wyników. Przykładowo, podczas wibrowania gruntu z częstotliwością 23,38 Hz czas badania wynosił aż 45 minut. Wibrowanie prowadzono z przerwami na pomiar postępu zagłębienia tłoczka. Pomiarów dokonano zazwyczaj co jedną minutę. Gdy intensywność zmian zagęszczenia była duża, zwiększano częstotliwość pomiaru zagłębienia. Do badań wykorzystano standardowy stół wibracyjny stosowany przy określaniu konsystencji mieszanek betonowych. Normatywna amplituda przemieszczeń pionowych stołu przy częstotliwości $f = 50$ Hz wynosiła $w = 0,5$ mm. Amplituda drgań nie spełnia wymagań normy ASTM D 4253, gdyż jest dwukrotnie za duża.

Z przeglądu literatury wynika, że jednym z najistotniejszych parametrów wpływających na skuteczność wibrowania są przyspieszenia, którym poddawany jest badany grunt niespoisty. Zakładając, że przemieszczenia pionowe stołu zmieniają się w czasie zgodnie z funkcją sinusoidalną, amplitudę przyspieszenia można otrzymać w wyniku dwukrotnego różniczkowania funkcji przemieszczeń względem czasu z zależności:

$$a = \frac{d^2 w(t)}{dt^2} = (2\pi f)^2 \cdot w(t) \quad (1)$$

gdzie:

the U.S. for determining the density $\rho_{d \max}$. The vibrating table specified in the American Standard ASTM D 4253 vibrates at the frequency of $f = 50$ Hz with the amplitude of vertical oscillation of $w = 0.24$ mm. The soil used in test can be either dried (version A) or completely saturated (version B). The sample is vibrated under surface pressure of 13.8 kPa in a test cylinder of specified diameter and height. Similarly to the standard Proctor test, an extension collar is placed atop the cylinder during vibration. After vibrating compaction for 12 minutes the collar is removed, the top surface is levelled out and the sample is weighed. A lack of progress control of compaction during vibrating is considered a disadvantage of this test procedure.

The test vessel was borrowed from the tapping fork test and similarly the plunger was placed atop the sample to facilitate measuring the settlement during the test. A base was attached to the cylinder in order to connect it to the vibrating table. In each test the sand was introduced into the cylinder through the funnel in the same way as in the minimum dry density determination. However, this time filling was discontinued after 600 g of sand introduced into the cylinder, after which the top surface was levelled out and the plunger was placed atop the sample. The amount of sand was limited to ensure stability of the plunger placed on the levelled surface of sand (usually the surface was 27 mm below the top edge of the test cylinder).

Although the vibration time prescribed by ASTM is 12 minutes, it was increased to 15 minutes in order to obtain information on the further course of the process. In a few cases, when changes were still significant after 15 minutes of vibration, the process was not discontinued until the results have become static. For example, during vibration at 23.38 Hz the test time had to be extended up to 45 minutes. Vibration was interrupted from time to time to monitor settlement. The vibration cycles were generally one minute long. The intervals were reduced when compaction was found to change rapidly. The test set-up included a standard vibrating table used for determining the consistency of concrete. The specified amplitude of vertical vibration was $w = 0.5$ mm at a frequency of $f = 50$ Hz. This amplitude is two times higher than the value required by ASTM D 4253.

According to the literature, particle acceleration is one of the key factors influencing the efficiency of vibration of non-cohesive soils. Assuming sinusoidal pattern of vertical oscillation, the amplitude of acceleration can be

- f – częstotliwość drgań,
 w – amplituda przemieszczenia pionowego blatu stołu.

Przyspieszenia zależą liniowo od amplitudy przemieszczeń i od kwadratu częstotliwości drgań. Podstawiając do wzoru (1) parametry stołu określone wymogami normy ASTM, otrzymuje się amplitudę przyspieszenia $a = 23,69 \text{ m/s}^2$, czyli $a = 2,41 \text{ g}$. Wstawiając natomiast parametry stołu wykorzystywanego w niniejszych badaniach, otrzymuje się $a = 5,03 \text{ g}$. Redukcję przyspieszenia można uzyskać zmniejszając częstotliwość wibrowania.

Na Rys. 2 pokazano schemat stołu wibracyjnego, na którym zamocowany jest cylinder badawczy z pokrywą. Układ uzupełniono przemiennikiem częstotliwości, pozwalającym na jej regulację w zakresie $0 \div 50 \text{ Hz}$, z gradacją $0,02 \text{ Hz}$. Jak wynika z Rys. 2 stół wibracyjny stanowi układ o wymuszeniu bezwładnościowym, co oznacza, że przy zmianie częstotliwości wzbudzania amplituda przemieszczeń nie będzie stałą wartością. W konsekwencji, po zmianie częstotliwości drgań, z równania (1) nie będzie można ocenić wartości przyspieszeń układu. Amplituda przemieszczeń zależna będzie również od masy drgającego układu, czyli także od masy testowanej próbki. Wstępne testy wykazały ponadto, że w poszczególnych narożnikach sztywnej płyty stołu amplitudy drgań mają różne wartości, należy więc zwrócić uwagę na centralne ustawienie próbki.

Badanym gruntem jest plejstoceniński, wodno-lodowcowy piasek kwarcowy z Droszkowa koło Zielonej Góry. Jest to typowy materiał występujący na obszarach sandrowych w tej części Polski Zachodniej. Pod względem geotechnicznym został zakwalifikowany jako piasek średni (MSa), słabo obtoczony, o następujących parametrach uziarnienia: zastępcza średnica ziaren $d_{50} = 0,36 \text{ mm}$, wskaźnik niejednorodności uziarnienia $C_u = 2,58$; wskaźnik krzywizny uziarnienia $C_c = 1,08$. Piasek zawiera około 1,2% frakcji pyłowej i około 1,6% frakcji zwirowej. Krzywą przesiewu piasku pokazano na Rys. 3.

obtained by differentiating two times the function of displacement vs. time as follows:

$$a = \frac{d^2 w(t)}{dt^2} = (2\pi f)^2 w, \quad (1)$$

where:

- f – frequency of vibration,
 w – amplitude of vertical oscillation of the table top.

Acceleration is a linear function of the amplitude of motion and squared frequency of vibration. Substituting the parameters of vibrating table as per ASTM into equation (1), the acceleration amplitude is $a = 23.69 \text{ m/s}^2$, that is $a = 2.41 \text{ g}$. However, with the parameters of the vibrating table actually used in the test the result is $a = 5.03 \text{ g}$. Acceleration may be reduced by decreasing the frequency of vibration.

The schematic view of the vibrating table including the test cylinder with the plunger is shown in Fig. 2. The control system contains a new element – a frequency converter allowing to change frequency within the range of $0\text{-}50 \text{ Hz}$ in 0.02 Hz increments. As it can be deduced from Fig. 2, a vibrating table constitutes a system with inertial excitation, which means that the amplitude of motion will not be insensitive to the frequency variation. Consequently, at a different frequency of vibration the equation (1) can no longer be used to calculate the system accelerations. The amplitude of oscillation will also depend on the mass of the vibrating system, which includes also the weight of the tested sample. Moreover, the preliminary results demonstrate that the vibration amplitude varies between the stiff table top corners, hence the sample must be placed centrally in relation to them.

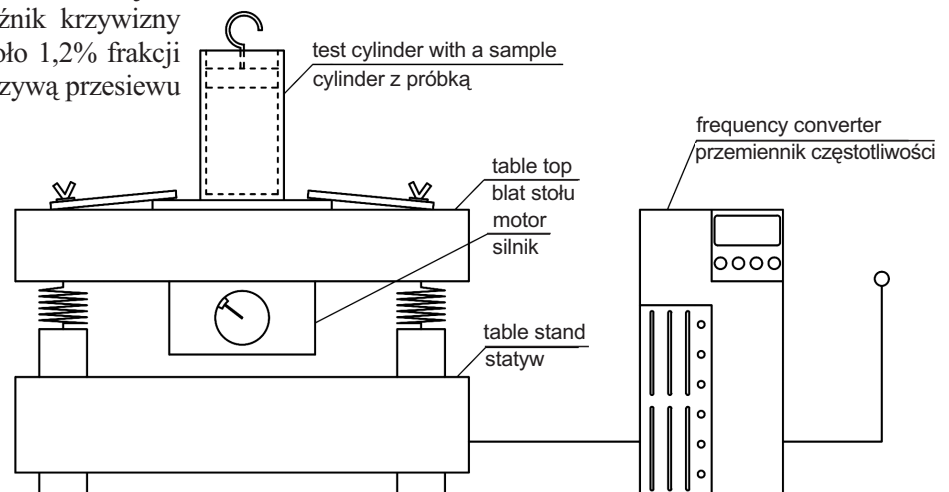


Fig. 2. Schematic view of the vibrating table with a sample and the frequency converter
 Rys. 2. Schemat stołu wibracyjnego z próbką i przemiennikiem częstotliwości

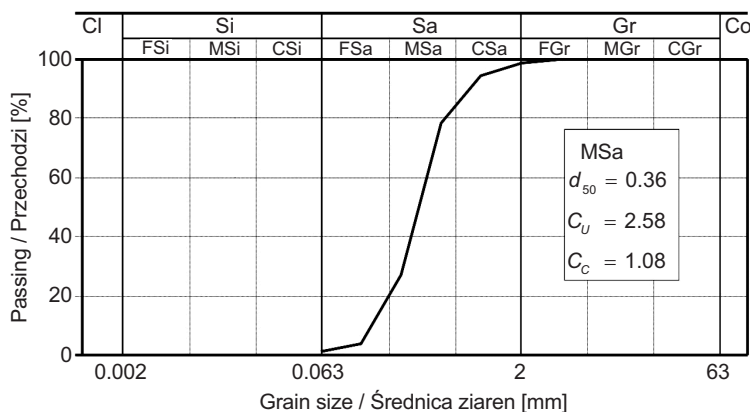


Fig. 3. Grain size analysis of medium sand ($^{fg}Q_p$) from Droszków
Rys. 3. Charakterystyka uziarnienia piasku średniego ($^{fg}Q_p$)
z Droszkowa

4. REZULTATY BADAŃ I DYSKUSJA WYNIKÓW

4.1. WYNIKI UZYSKANE METODĄ WIDELĘK WIBRACYJNYCH (WW)

Na Rys. 4 przedstawiono gęstości $\rho_{d \max}$ otrzymane w wyniku wibrowania piasku za pomocą widełek, zarejestrowane w poszczególnych odstępach czasu. Wyniki 5 testów wykonanych przez pierwszego laboranta zostały pokazane na Rys. 4a, zaś wyniki dodatkowych 5 testów wykonanych przez drugiego laboranta na Rys. 4b. Z porównania przebiegu wykresów pokazanych na Rys. 4 widać dużą rozbieżność wyników uzyskanych przez każdego z laborantów. Wyniki końcowe otrzymane przez pierwszego laboranta są poniżej wartości $1,8 \text{ g/cm}^3$ lub bardzo nieznacznie ją przekraczają. Jednocześnie wszystkie wyniki drugiego laboranta już po 6 minutach wibrowania przewyższają wartość $1,8 \text{ g/cm}^3$. Oznacza to, że na skuteczność procesu zagęszczenia za pomocą widełek silnie wpływa czynnik ludzki. Przyczyną rozbieżności jest prawdopodobnie mniejsza energia wibrowania zastosowana przez pierwszego laboranta w stosunku do energii użytej przez drugiego. Ostatecznie minimalna i maksymalna gęstości $\rho_{d \max}$ uzyskane przez pierwszego laboranta wynoszą odpowiednio $1,772$ i $1,803 \text{ g/cm}^3$, zaś średnia wartość gęstości objętościowej równa jest $1,792 \text{ g/cm}^3$. Analogiczne wyniki uzyskane przez drugiego laboranta wynoszą odpowiednio: $1,805$; $1,832$ i $1,818 \text{ g/cm}^3$. Średnia dla testów wykonanych przez obu laborantów wynosi $1,805 \text{ g/cm}^3$. Rys. 5 przedstawia porównanie średnich wartości gęstości uzyskanych przez pierwszego laboranta (linia ze znacznikami trójkątnymi),

The tested material was Pleistocene fluvioglacial quartz sand from Droszków near Zielona Góra, Poland. It is a typical material found in the glacial outwash plains of this part of western Poland. According to geotechnical criteria the material is classified as medium sand (MSa category), poorly rounded, with the following grading parameters: equivalent particle diameter $d_{50} = 0.36 \text{ mm}$, uniformity coefficient $C_u = 2.58$, coefficient of grain curvature $C_c = 1.08$. The tested sand contains ca. 1.2% of silt and ca. 1.6% of gravel. The grain size distribution curve of the tested sand is presented in Fig. 3.

4. TEST RESULTS AND DISCUSSION

4.1. RESULTS OF TAPPING FORK TEST

Fig. 4 presents the values of $\rho_{d \max}$ recorded at time intervals during vibrating the sand with the use of tapping fork. Graphs (a) and (b) show the results of five tests carried out by each of the two lab workers involved in the testing. Comparing the curves in Fig. 4a high degree of inconsistency between the results obtained by the two workers can be seen. The final results obtained by the first technician are generally below or exceed only very slightly the value 1.8 g/cm^3 . On the other hand, the second worker needed only six minutes to obtain values higher than 1.8 g/cm^3 . This demonstrates that the prescribed compaction technique is highly sensitive to the impact of human factor. The observed inconsistency of results can be attributed with high probability to a smaller energy input of the first worker. The minimum and maximum densities obtained by the first worker were 1.772 and 1.803 g/cm^3 with the mean bulk density of 1.792 g/cm^3 . The corresponding results obtained by the second worker were: 1.805 ; 1.832 and 1.818 g/cm^3 . Considering all the results obtained by both workers the overall mean value of 1.805 g/cm^3 is achieved. Fig. 5 compares the mean density values calculated from the results obtained by the first worker (line with triangles), by the second worker (line with squares) and the overall mean calculated from all the values obtained in the testing (solid line). If it is assumed that the solid line presents representative result of the tapping fork test, then the distance to which the two lines with markings depart from it will represent the systematic errors. The latest cannot be eliminated by having the test repeated by the same worker acting in the same manner of his own.

drugiego laboranta (linia ze znacznikami kwadratowymi) oraz średnich wartości obu badań (linia ciągła). Jeżeli wartości średnie przedstawione linią ciągłą można uznać za reprezentatywny wynik metody widełek wibracyjnych, to odległości pomiędzy tą linią i każdą z linii ze znacznikami prezentują błędy systematyczne, których nie można wyeliminować przez wielokrotne powtarzanie badań przez jednego laboranta w typowy dla niego sposób.

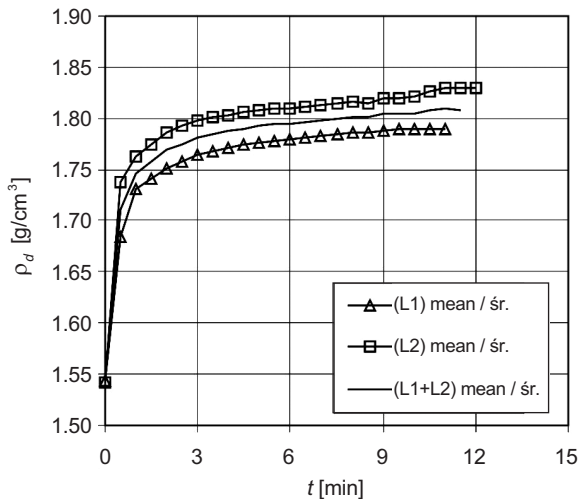


Fig. 5. Mean values of sand compaction obtained in the tapping fork test
Rys. 5. Średnie wartości zagęszczania piasku uzyskane metodą widełek wibracyjnych

4.2. WYNIKI UZYSKANE METODĄ STOŁU WIBRACYJNEGO (SW)

Poniżej zaprezentowano wyniki uzyskane metodą stołu wibracyjnego. Ze względu na powyżej opisaną procedurę badawczą, polegającą na częściowym zasypywaniu cylindra w celu stabilnego ustawienia tłoczka i przybliżonym wyrównywaniu powierzchni piasku, niegwarantującym pełnego przylegania do tłoczka w fazie początkowej, nie podano wartości gęstości próbki piasku w chwili $t = 0$. Jednak w celach poglądowych na kolejnych wykresach zaznaczono trójkątnym znacznikiem minimalną wartość gęstości $\rho_{d \min}$ uzyskaną po przygotowaniu próbki do badań metodą widełek wibracyjnych, gdyż w obu rodzajach testów (WW i SW) sposób zasypywania cylindra był identyczny.

Rezultaty badań ciągłego wibrowania przez 15 minut próbek piasku z wykorzystaniem stołu bez przemiennika częstotliwości nie były jednoznaczne. Otrzymywano duży rozrzut wyników. Zmiana procedury badawczej, polegająca na wielokrotnym pomiarze objętości gruntu w cylindrze (zwykle co 1 minutę), pomogła zrozumieć przyczyny rozrzutu

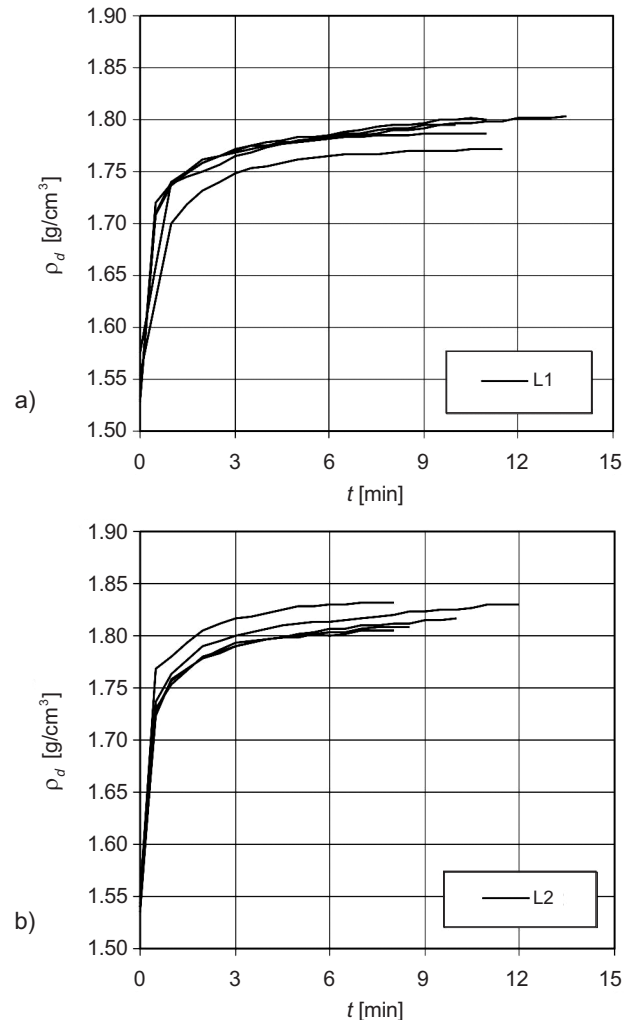


Fig. 4. Results of sand compaction with the tapping fork method by: a) the first lab worker (L1), b) the second lab worker (L2)

Rys. 4. Wyniki zagęszczania piasku metodą widełek wibracyjnych uzyskane przez: a) pierwszego laboranta (L1), b) drugiego laboranta (L2)

4.2. RESULTS OF THE VIBRATING TABLE TEST

The results obtained with the use of the vibrating table will be presented below. The initial density of sand at point $t = 0$ is ignored due the limitations associated with the above-described procedure in which the cylinder is filled only partly to improve plunger stability. Moreover, the full contact between the plunger and the sample surface is not ensured due to only roughly levelled top surface of sand. However, since the method of filling the cylinder was the same in both tests, the value of the minimum density $\rho_{d \min}$, measured on the sample prepared for

wyników. Na Rys. 6 pokazano przebieg zagęszczania gruntu w dwóch testach (a) i (b), przy nominalnej częstotliwości wibrowania 50 Hz i amplitudzie przemieszczeń 0,5 mm, co daje przyspieszenia próbki wynoszące 5,03 g. Proces jest niemonotoniczny, gdyż po fazach zagęszczenia następują fazy rozluźniania gruntu. Dodatkowo, duże przyspieszenia powodowały wypadanie tłoczka w trakcie badań, nawet pomimo jego kilkucentymetrowego zagłębienia (test (b) na Rys. 6, który przerwano po czasie 10,5 minuty).

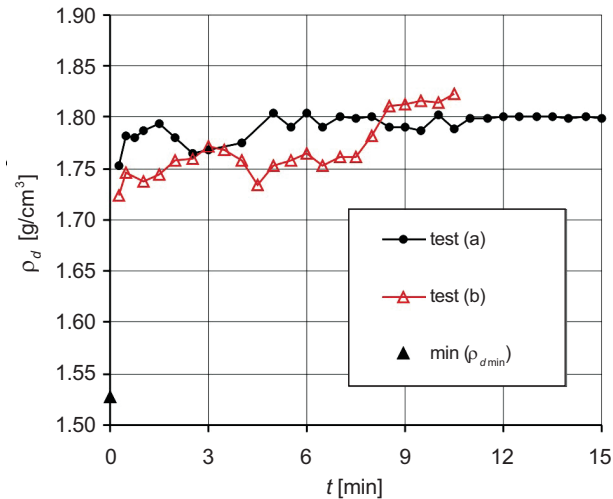


Fig. 6. Change of sand density ρ_d over time during vibration at 50 Hz

Rys. 6. Zmiany gęstości piasku ρ_d w czasie wibrowania o częstotliwości 50 Hz

Uzupełnienie stołu o przemiennik częstotliwości umożliwiło prowadzenie badań przy mniejszych przyspieszeniach, jednakże wartości tych przyspieszeń były nieznane ze względu na bezwładnościowy charakter wymuszenia. Na Rys. 7 pokazano wpływ czasu i częstotliwości wibrowania na gęstości ρ_d . Na wykresie można zaobserwować kilka prawidłowości. Po pierwsze gęstość wzrasta wraz z czasem wibrowania, a po drugie gęstość wzrasta także wraz ze wzrostem częstotliwości. Od tych ogólnych prawidłowości występują także odstępstwa. Przy niektórych częstotliwościach (np. 23,38 Hz; 31,24 Hz) skuteczność wibrowania po 15 minutach jest znacznie wyższa niż przy częstotliwościach sąsiednich. W pobliżu tych właśnie częstotliwości zaobserwowano rezonans układu. Drugie odstępstwo dotyczy czasu wibrowania. Przy częstotliwości rezonansowej 31,24 Hz oraz powyżej częstotliwości 39 Hz proces wibrowania był niestabilny w tym sensie, że wraz ze wzrostem czasu grunt ulegał naprzemiennie zagęszczaniu i rozluźnianiu.

Rys. 8 przedstawia zależność pomiędzy średnią gęstością objętościową ρ_{dmax} i częstotliwością drgań stołu uzyskaną po trzech wybranych czasach wibrowania: 10, 12 i 15 minutach. W celu poprawy czytelności rysunku i możliwości zaobserwowania pewnych prawidłowości punkty uzyskane z badań dla czasu 12 minut połączono linią przerywaną (nie ma

the tapping fork test, has been marked on the following charts (red triangles) for reference.

The results obtained after continuous 15 minutes of vibration on the vibrating table without the frequency converter were not conclusive. The variation of values was high. In order to find the cause behind this variation the test was repeated according to a modified procedure with repeated measurement of the volume of soil inside the cylinder (usually at one minute intervals). Fig. 6 presents the process of soil compaction in two tests (a) and (b), at nominal vibration frequency of 50 Hz and 0.5 mm oscillation amplitude, resulting in accelerations of 5.03 g. It is not a non-decreasing process, though, because the density of soil increases and decreases alternately. Moreover, due to high accelerations the plunger was at times forced out of the cylinder during the test, even though it was placed a few centimetres below the cylinder edge (as it happened in test (b) in Fig. 6 which was discontinued after 10.5 minutes).

With the frequency converter added to the test set-up it became possible to carry out the tests with reduced accelerations, the value of which remained unknown due to inertial character of excitation. Fig. 7 presents the influence of time and vibration frequency on the value of density ρ_d . There are a few patterns which can be figured out from the graph. The two main observations are that the density increases with the vibration time and with the increase of the vibration frequency. However, some exceptions from these general patterns can also be seen on the graph. It is worth noting, for example, that after 15 minutes of vibration some frequencies (such as 23.38 Hz, 31.24 Hz) produce a much higher vibration efficiency, as compared to the neighbouring frequencies. It is near these frequencies that resonance of the system was observed. The second exception concerns the vibration time. At the resonant frequency of 31.24 Hz and above the frequency of 39 Hz the process becomes unstable which means that vibration process results in alternately increasing and decreasing density of soil.

Fig. 8 presents the relationship between the mean dry density ρ_{dmax} and the vibration frequency after 10, 12 and 15 minutes of vibration. In order to facilitate the identification of existing patterns the points representing the test

jednak pewności, że dla pośrednich częstotliwości drgań uzyska się wyniki zgodne z przebiegiem tej linii). Pokazany wykres można nazwać charakterystyką skuteczności zagęszczania piasku na stole wibracyjnym. Generalny trend wykresu wskazuje, że gęstość $\rho_{d \max}$ wzrasta wraz ze wzrostem częstotliwości drgań. Dużą skuteczność wibrowania uzyskano przy częstotliwościach $f \geq 39$ Hz. Jednakże powyżej częstotliwości 40 Hz proces zagęszczania przebiegał w sposób niestabilny i fazy rozluźniania następowały po fazach zagęszczania. Taka sytuacja widoczna jest na wykresie przy częstotliwości 41,5 Hz, dla której gęstość po 10 minutach wibrowania jest wyższa niż w przypadku 12 i 15 minut. Stosunkowo wysokie gęstości otrzymane dla częstotliwości okołorezonansowych (23,38 i 31,24 Hz) świadczą, że częstotliwość drgań nie jest jedynym wyznacznikiem skuteczności wibrowania. Dużą rolę odgrywiają prawdopodobnie amplitudy drgań i towarzyszące im amplitudy przyspieszeń, których doznaje próbka.

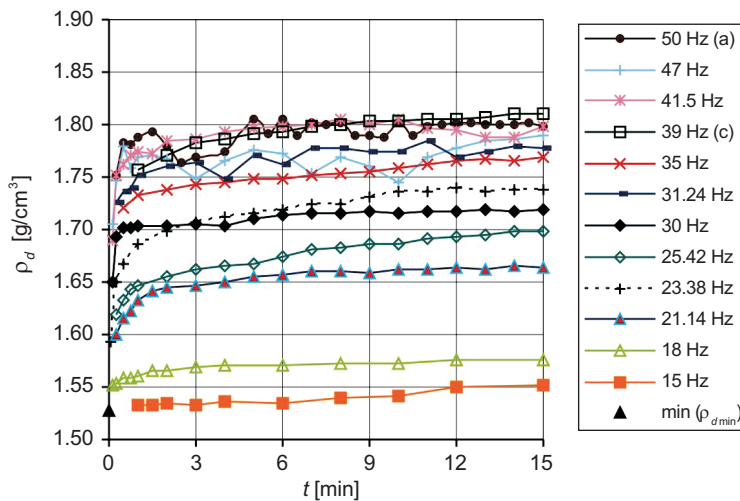


Fig. 7. Change of sand compaction over time depending on the table vibration frequency

Rys. 7. Proces zagęszczania piasku na stole wibracyjnym przy różnych częstotliwościach drgań

Biorąc pod uwagę powyższe obserwacje, jako optymalną do dalszych badań wybrano częstotliwość 39 Hz. Przy tej częstotliwości uzyskano duże gęstości, a jednocześnie proces przebiegał w sposób ściśle monotoniczny. Dla tej częstotliwości wykonano serię 10 testów, których wyniki pokazano na Rys. 9. Z przebiegu wykresów wynika, że rozrzut rezultatów przy tej częstotliwości jest niewielki i dodatkowo zmniejsza się wraz ze wzrostem czasu wibrowania. Średnia wartość gęstości $\rho_{d \max}$ po 12 minutach wibrowania wynosi $1,795 \text{ g/cm}^3$. Jednocześnie minimalna i maksymalna gęstość uzyskana po tym czasie wyniesie odpowiednio $1,778$ oraz $1,806 \text{ g/cm}^3$.

results for 12 minutes vibration were connected with a broken line (for the in-between frequencies the actual values may deviate from the curve). The resulting curve may be called compaction performance curve for sand subjected to the vibrating table test. It shows a general trend of increasing dry density $\rho_{d \max}$ with the increase of the vibration frequency. The efficiency of vibration was found to be high at the frequencies of $f \geq 39$ Hz. However, above 40 Hz the process became unstable with the density increasing and decreasing alternately. This situation can be seen on the 41.5 Hz curve where the density obtained after 10 minutes of vibration is higher than after 12 and 15 minutes. The relatively high densities obtained at the near-resonant frequencies (23.38 Hz and 31.24 Hz) show that the frequency of vibration is not the only factor relevant to the efficiency of compaction by vibration. Other important factors are most probably vibration amplitudes and the associated amplitudes of acceleration of the sample.

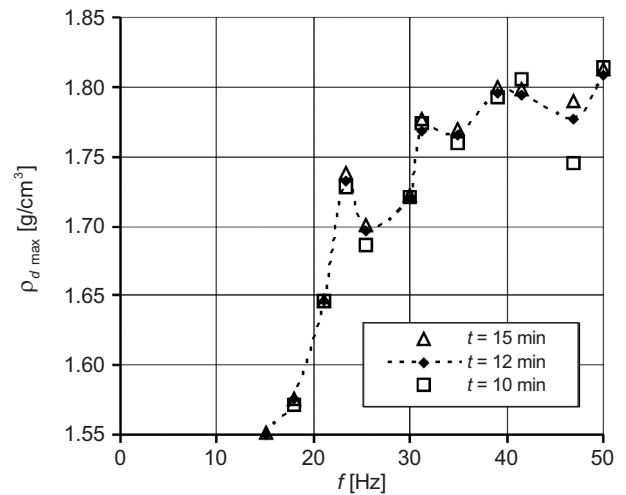


Fig. 8. The influence of the vibration frequency on the mean density $\rho_{d \max}$ at selected three vibration periods

Rys. 8. Wpływ częstotliwości drgań na średnie gęstości $\rho_{d \max}$ po trzech czasach wibrowania

Based on the above observations the vibration frequency of 39 Hz was chosen as optimum, and as such it was used in the subsequent tests. It produced high densities in a non-decreasing process of compaction. A series of 10 tests were carried out for that frequency and their results are shown in Fig. 9. As it can be seen from the graph, the variation of results at that frequency is small and it yet decreases with vibration time. The mean dry density $\rho_{d \max}$ after 12 minutes of vibration is 1.795 g/cm^3 . The minimum and maximum values obtained after that time were 1.778 and 1.806 g/cm^3 respectively.

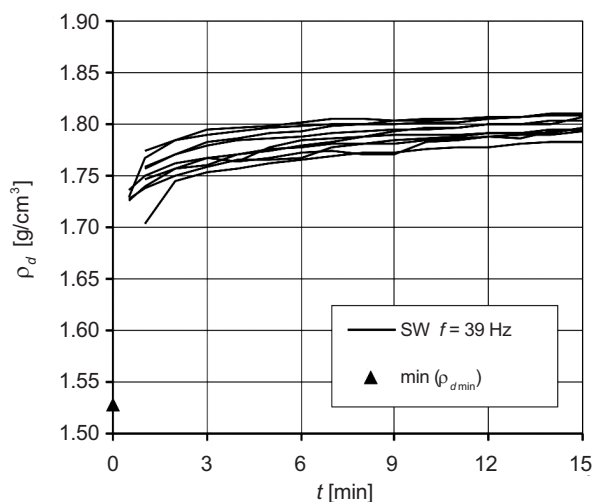


Fig. 9. Change of sand compaction over time on vibrating table at 39 Hz frequency; (SW – vibrating table test)

Rys. 9. Przebieg zagęszczania piasku metodą stołu wibracyjnego (SW) przy częstotliwości 39 Hz

5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Maksymalna gęstość objętościowa gruntu $\rho_{d \max}$ nie jest związana z jakimś specyficznym fizycznym stanem materiału. Stanowi ona wartość umowną, zależną od zastosowanej metody zagęszczania. Wobec powyższego, od metody zagęszczania wymaga się dużej skuteczności (jej miarą jest wysoka gęstość objętościowa uzyskiwana w teście) oraz dużej powtarzalności wyników. Wibrowanie gruntu na stole wibracyjnym, standardowo wykorzystywanym do badań konsystencji betonu, którego częstotliwości drgań wynosi 50 Hz, a nominalna amplituda przemieszczeń pionowych 0,5 mm, daje wyniki o małej powtarzalności. W pierwszych kilkunastu sekundach obserwuje się szybki przyrost gęstości objętościowej piasku. Następnie fazy zagęszczania i rozluźniania powtarzają się naprzemiennie i ostateczna gęstość próbki w chwili zakończenia badań zależna jest od tego, która z faz jest aktualnie dominująca (Rys. 6). Przyczyną takiego zachowania są prawdopodobnie zbyt duże przyspieszenia, którym poddana jest próbka i celowa jest redukcja częstotliwości drgań.

Metoda stołu wibracyjnego uzupełnionego o przemiennik częstotliwości wymaga na wstępie znalezienia częstotliwości drgań, przy której proces zagęszczania będzie skuteczny i przebiegnie w sposób monotoniczny, przez co uzyskuje się znaczną powtarzalność wyników. Dla stołów o wymuszeniu bezwładnościowym częstotliwość drgań, masa drgającego układu, amplitudy przemieszczeń i przyspieszeń są współzależne. W przypadku zastosowanego w badaniach

5. SUMMARY AND CONCLUSIONS

The maximum dry density of soil $\rho_{d \max}$ is not associated with any specific physical state of the material. It is a parameter whose value depends on the chosen method of compaction. For this reason, the compaction method is required to feature high efficiency (as indicated by a high value of bulk density obtained at laboratory) and a high level of repeatability of results. Such repeatability was not obtained in the vibrating table test, using the standard table applied for testing the consistency of concrete, generating 50 Hz vibrations with 0.5 mm amplitude of vertical oscillation. The bulk density increases rapidly in the first dozen or so seconds of the sand compaction process. This initial phase is followed by other in which the density increases and decreases in turns, and the finally obtained density depends on which phase prevailed at the time when vibration was discontinued (Fig. 6). This behaviour can be attributed to excessive acceleration levels to which a sample is subjected and reduction of the vibration frequency could be a solution.

The vibrating table test method supplemented with a frequency converter needs the establishing of the vibration frequency at the very beginning. The optimum frequency should guarantee that the compaction process will be efficient and could be performed in a monotonic way in order to obtain good repeatability of results. In systems with inertial excitation there is an interdependency between the vibration frequency, the vibrating system weight, oscillation amplitude and accelerations. The frequency of 39 Hz was found to be the optimum value for the vibrating table used in the test, taking into account the weight of the test cylinder including the sample.

The two analysed methods, i.e. the tapping fork test and the vibrating table test, were compared using for this purpose the obtained overall mean and the extreme values of dry densities $\rho_{d \max}$. The result of this analysis is presented in Fig. 10. The height of each vertical bar represents the mean density and provides a measure of the method efficiency. The sample range (the difference between the maximum and minimum measured value) presented in the figure as two connected horizontal sections defines the absolute error of the results obtained with a given method. The relative error of a series of tests carried out with a given method can be expressed as the ratio between the sample range and the mean value:

$$\varepsilon_{\rho_{d \max}} = \frac{\max(\rho_{d \max}) - \min(\rho_{d \max})}{\rho_{d \max \text{ mean}}} \cdot 100\% \quad (2)$$

stołu i użytej masy cylindra z próbką gruntu była to częstotliwość 39 Hz.

W celu porównania metod widełek wibracyjnych (WW) i stołu wibracyjnego (SW) zebrano średnie wartości gęstości $\rho_{d \max}$ uzyskane każdą z metod oraz wartości ekstremalne. Wyniki pokazano na Rys. 10. Wysokość każdego ze słupków przedstawia wartość średnią gęstości i stanowi obraz skuteczności metody. Rozstęp próby (różnica pomiędzy największą i najmniejszą pomierzoną wartością), pokazany na rysunku w postaci dwóch połączonych ze sobą poziomych odcinków, definiuje błąd bezwzględny wyników uzyskanych daną metodą. Błąd względny serii badań wykonanych określoną metodą można przedstawić jako stosunek rozstępu próby do wartości średniej:

$$\varepsilon_{\rho_{d \max}} = \frac{\max(\rho_{d \max}) - \min(\rho_{d \max})}{\rho_{d \max \text{ śr}}} \cdot 100\% \quad (2)$$

Duży rozstęp próby lub duża wartość błędu względnego $\varepsilon_{\rho_{d \max}}$ świadczą o małej powtarzalności wyników uzyskanych daną metodą.

Porównując skuteczność i powtarzalność wyników badań gęstości uzyskanych metodami WW i SW, przedstawioną w sposób syntetyczny na Rys. 10, można sformułować następujące wnioski:

- metoda WW jest obarczona błędem systematycznym, wynikającym z czynnika ludzkiego (Rys. 5), którego wartość w ogólnym przypadku jest nieznaną;
- rozstępy prób uzyskane w metodzie WW przez pierwszego i drugiego laboranta mają podobne wartości, a błędy względne $\varepsilon_{\rho_{d \max}}$ wynoszą odpowiednio 1,73% i 1,48%. Uwzględniając jednak błędy systematyczne metody WW i traktując wyniki uzyskane przez obu laborantów łącznie, sumaryczny rozstęp próby jest duży, a odpowiadający mu błąd względny metody wynosi $\varepsilon_{\rho_{d \max}} = 3,35\%$. Świadczy to o małej powtarzalności wyników;
- metoda WW jest skuteczna, na co wskazuje duża wartość średnia $\rho_{d \max} = 1,805 \text{ g/cm}^3$;
- metoda SW przy częstotliwości drgań $f = 39 \text{ Hz}$ jest mniej skuteczna niż metoda WW. Średnia wartość gęstości po 12 minutach wibrowania $\rho_{d \max} = 1,795 \text{ g/cm}^3$. Wynik ten jest niższy o 0,55% od średniej wartości uzyskanej metodą widełek wibracyjnych;
- powtarzalność otrzymywanych rezultatów dla metody SW jest duża, a względny błąd metody $\varepsilon_{\rho_{d \max}} = 1,56\%$. Dodatkowo, w miarę wzrostu czasu wibrowania błąd względny metody SW maleje, a skuteczność wzrasta (Rys. 9).

A wide sample range or a high value of relative error $\varepsilon_{\rho_{d \max}}$ indicate a small repeatability of the results obtained with a given method.

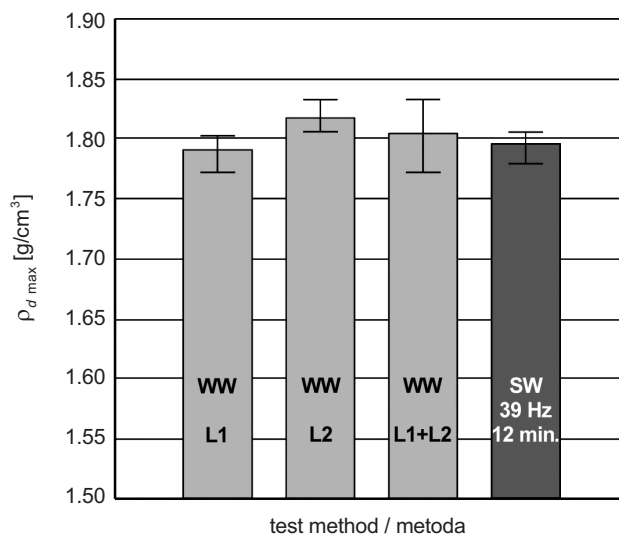


Fig. 10. Mean values and sample range of $\rho_{d \max}$ obtained in the tapping fork test and during vibration at 39 Hz for 12 minutes on the vibrating table; WW – tapping fork test, SW – vibrating table test, L1 – the first lab worker, L2 – the second lab worker
Rys. 10. Średnie wartości oraz rozstępy prób $\rho_{d \max}$ uzyskane metodami widełek wibracyjnych (WW) i stołu wibracyjnego (SW) przy częstotliwości 39 Hz i czasie wibrowania 12 minut; dodatkowe oznaczenia: L1 – laborant 1, L2 – laborant 2

The two test methods were compared in terms of efficiency and repeatability. Basing on the result of this comparison, as synthetically presented in Fig. 10, it can be concluded that:

- the tapping fork method is affected with systematic error resulting from human factor (Fig. 5) whose magnitude in the general case is unknown;
- comparing the results obtained in the tapping fork test by the two lab workers it can be concluded that similar sample ranges and the relative errors $\varepsilon_{\rho_{d \max}}$ are 1.73% and 1.48% respectively. However, considering the systematic errors related to this method, and putting the results obtained by the two workers altogether, a big sample range and the relative error is $\varepsilon_{\rho_{d \max}} = 3.35\%$. This indicates a small repeatability of results;
- the tapping fork method is efficient as indicated by the high mean compaction value of $\rho_{d \max} = 1.805 \text{ g/cm}^3$;
- at the vibration frequency of $f = 39 \text{ Hz}$ the vibrating table method is less efficient than the tapping fork method. The mean maximum dry density obtained after 12 minutes of vibration was $\rho_{d \max} = 1.795 \text{ g/cm}^3$.

Otrzymane różnice maksymalnej gęstości objętościowej piasku przy wykorzystaniu obu metod oraz przedstawione wartości błędów względnych nie wydają się duże, w szczególności w porównaniu do typowych wartości błędów występujących przy wyznaczaniu parametrów wytrzymałości, a tym bardziej sztywności gruntu. Jednakże należy pamiętać, że gęstości $\rho_{d \max}$ określa się zwykle w celu obliczenia stopnia zagęszczenia gruntu. Formuła definiująca ten parametr jest tak skonstruowana, że kilkuprocentowy błąd w wyznaczeniu gęstości może powodować kilkudziesięcioprocentowy błąd w ocenie stopnia zagęszczenia.

Duże wartości gęstości piasku uzyskane metodą SW przy częstotliwościach rezonansowych wskazują, że istotnym czynnikiem wpływającym na skuteczność zagęszczania jest przyspieszenie, któremu poddany jest grunt w trakcie badania. Celowe wydaje się wyznaczenie charakterystyk dynamicznych stołu wibracyjnego, takich jak amplitudy drgań i przemieszczeń, odpowiadające poszczególnym częstotliwościom wibrowania. Ponadto prowadząc badania gęstości gruntu z wykorzystaniem stołu wibracyjnego o wymuszeniu bezwładnościowym należy bezwzględnie pamiętać o centrycznym ustawianiu próbki na stole. Na podstawie wizualnej oceny amplitud przemieszczeń można stwierdzić, że nie są one jednakowe na całej powierzchni płyty stołu. Problem ten wymaga także szczegółowego zbadania.

W podsumowaniu należy podkreślić, że metoda widełek wibracyjnych (WW) jest skuteczną metodą zagęszczania gruntu, jednakże wiąże się z możliwością wystąpienia błędów systematycznych, zależnych od czynnika ludzkiego, trudnych do oceny. Metoda SW, wykorzystująca stół wibracyjny stosowany do badań konsystencji betonu, wymaga natomiast wyznaczenia częstotliwości, przy której proces zagęszczania przebiega w sposób monotoniczny i jednocześnie uzyskiwane gęstości gruntu są duże. Tak wykalibrowany stół wibracyjny może być narzędziem skutecznego badania gęstości objętościowej, dającym powtarzalne wyniki, niezależne od doświadczenia zawodowego i indywidualnych cech laborantów, a więc spełniającym kryterium obiektywizmu badań. Na zakończenie należy przypomnieć, że badania dotyczyły tylko jednego rodzaju gruntu – piasku średniego. Ostateczna ocena metod wymagałaby wykonania badań dla innych rodzajów gruntów niespoistych.

This result is by 0.55% lower than the mean value obtained with the tapping fork method.

- the repeatability of results obtained in the vibrating table method is high, with the relative error of $\varepsilon_{\rho_{d \max}} = 1.56\%$. Moreover, with the increasing vibration time the relative error decreases and the efficiency of compaction increases in this method (Fig. 9).

The calculated differences between the maximum dry densities of sand obtained with the two methods and the relative errors do not seem high, especially when compared to the magnitude of errors typically obtained in determination of soil strength parameters and, even more so, in determination of soil stiffness parameters. However, it is worth remembering that the dry density $\rho_{d \max}$ of soil is typically determined for calculating the degree of compaction. The formulation of the equation used to calculate this parameter is such that a few percent error in density determination may result in a few dozen percent error in the degree of compaction.

The high densities obtained in the vibrating table test at near-resonant frequencies point to the significance of sample acceleration for compacting efficiency. It seems advisable to determine the dynamic parameters of the vibrating table, including vibration amplitudes and oscillations for the vibration frequencies used in the test. Moreover, in the case of inertial excitation central positioning of the sample in relation to the table surface is of key importance. It is enough to examine the table visually to determine that the oscillation amplitude varies over the surface. This issue requires a closer examination as well.

In the other method (which uses a vibrating table as typically used for determination of fresh concrete consistency) it is necessary to first determine the frequency, ensuring non-decreasing compaction with a high density achieved at the end of the process. When calibrated in this way the vibrating table can be a useful tool for measuring the bulk density, giving repeatable results not affected by the experience or personal features of the laboratory workers involved in the testing, thus meeting the objectivity requirement. Finally, it must be noted that the test was limited in scope to only one type of soil, namely medium sand. For definite assessment the tests should be carried out also for other types of non-cohesive soil.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] ASTM Standards: D 4253 - 00 Standard test methods for maximum index density and unit weight of soils using a vibratory table
- [2] PN-88/B-04481: Grunty budowlane. Badania próbek gruntu
- [3] *Pisarczyk S.*: Grunty nasypowe. Właściwości geotechniczne i metody ich badania. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2004
- [4] *Pisarczyk S.*: Czynniki wpływające na wibracyjne zagęszczenie gruntów niespoistych. Inżynieria i Budownictwo, 8, 1996, 475-479
- [5] *Whitman R.V., Ortigosa P.*: Densification of sand by vertical vibration. 4th World Conference on Earthquake Engineering, Santiago, Chile, 1969, 29-37
- [6] *Dobry R., Whitman R.V.*: Compaction of sand on a vertically vibrating table. ASTM STP523-EB.7744-1, Baltimore, USA, 1973, 156-170
- [7] *Brand E.W.*: Some observations on the control of density by vibration. ASTM STP523-EB.7744-1, Baltimore, USA, 1973, 121-132
- [8] *Tokue T.*: Characteristics and mechanism of vibratory densification of sand and role of acceleration. Soils and Foundations, 16, 3, 1976, 1-18
- [9] *Rothenburg L., Bathurst R.J.*: Micromechanical features of granular assemblies with planar elliptical particles. Géotechnique, 42, 1, 1992, 79-95
- [10] *Santamarina J.C., Shin H.*: Friction in Granular Media, in: Meso-scale Shear Physics in Earthquake and Landslide Mechanics. CRC Press, London, 2009, 157-188
- [11] *Szajna W.St., Krainński A.*: The influence of roundness of sand particles on macroscopic critical strength of soil medium. International Conference on Continuous Media with Microstructure, Publishing House of Poznań University of Technology, 2015, 73-74