

SZYMON WĘGLIŃSKI¹⁾

DETERMINATION OF LOAD ACTION RANGES IN STATIC AND DYNAMIC TESTS OF SUBGRADES BY APPLYING RIGID PLATES

OKREŚLENIE ZAKRESU ODDZIAŁYWANIA OBCIĄŻENIA W STATYCZNYCH I DYNAMICZNYCH BADANIACH PODŁOŻA PRZY ZASTOSOWANIU PŁYTY SZTYWNEJ

STRESZCZENIE. Badania nośności i zagęszczenia przy zastosowaniu płyty sztywnej są powszechnie stosowane na etapie rozpoznawania podłoża gruntowego oraz kontroli jakości robót w przypadku większości realizowanych obiektów kubaturowych i liniowych. Typową metodą jest stosowanie aparatu VSS (badania statyczne). W ostatnich kilku latach coraz częściej na budowach używa się płyty LFG (badania dynamiczne). W artykule przedstawiono podstawy teoretyczne dotyczące metody próbnego obciążenia przy zastosowaniu płyt sztywnych. W przypadku wybranych gruntów dokonano szeregu obliczeń numerycznych, prezentując rozkład obciążenia w podłożu odpowiadający zasięgowi ww. badań. Potwierdzono decydującą rolę rodzaju i stanu gruntu oraz wartości zadanego obciążenia na zakres oddziaływania. Wykazano, iż założenie stałego zakresu pomiarowego dla badań statycznych (około 2-3 średnic płyty badawczej) oraz dynamicznych (około 1-2 średnic) nie ma potwierdzenia w obliczeniach numerycznych wykorzystujących teorię fundamentów sztywnych.

SŁOWA KLUCZOWE: aparat VSS, metoda próbnego obciążania, płyta dynamiczna, płyta sztywna, teoria fundamentów.

ABSTRACT. Soil bearing capacity and compactness testing by rigid plates is commonly used during ground investigations and work quality control on most sites where enclosed and right-of-way structures are being built. Typically, the VSS (static plate bearing) test apparatus is used for this purpose. In recent years LFG falling weight deflectometers (dynamic plate load tests) have been increasingly used on building sites. This paper presents the theoretical bases relating to load testing by rigid plates. Several numerical calculations were made for selected soils, presenting the load distribution, corresponding to the range of the above tests in the subgrade. The type and state of soil as well as the applied load values have been confirmed to have a decisive bearing influence on the load action range. The assumption of the constant measuring range for static plate bearing tests (amounting to about 2-3 plate diameters) and for dynamic plate load tests has not been proved by the numerical calculations based on the theory of rigid foundations.

KEYWORDS: falling weight deflectometer, theory of foundations, plate bearing test, rigid plate, VSS apparatus.

DOI: 10.7409/rabdim.018.005

¹⁾ Labortest s.c. Brzezińscy, ul. Jedlicka 9, 61-315 Poznań; weglinski.szymon@gmail.com

1. WSTĘP

Konstrukcje nawierzchni drogowych a także posadzek przemysłowych, powinny być odpowiednio zaprojektowane, aby przenosić zadane obciążenia eksploatacyjne. Decydującą rolę odgrywa odporność na cykliczne obciążenia dynamiczne i statyczne. W projektowaniu należy przewidzieć rodzaj obciążeń (statyczne/dynamiczne, krótkotrwałe/długotrwałe, stałe/zmienne) oraz ich maksymalne wartości i powtarzalność. W gestii konstruktora leży dobór odpowiednich warstw, które zapewnią długotrwałą i bezawaryjną pracę obiektu liniowego lub kubaturowego.

Ważną rolę w procesie projektowania oraz wykonywania konstrukcji odgrywa właściwe rozpoznanie parametrów podłoża i kontrola jakości robót. Błędy popełnione na tych etapach realizacji mogą spowodować przedwczesne zużycie nawierzchni czy posadzki oraz skutkować zwiększonymi kosztami. Niestety, często nie poświęca się uwagi odpowiedniemu przygotowaniu podłoża. W praktyce budowlanej, pojawia się często błędne rozumowanie, iż koszty związane z badaniami gruntów czy kontrolą jakości prac są zbyt duże, w wyniku czego, w wielu przypadkach się z nich rezygnuje lub ogranicza je do minimum.

W celu określenia danych wejściowych do projektowania (m.in. rodzaju gruntu, jego stanu i nośności), należy zgodnie z obowiązującymi normami i przepisami wykonać odpowiednie badania gruntu. Proponowane głębokości rozpoznania dla fundamentów oraz konstrukcji drogowych (na podstawie [1, 2]), zestawiono w Tabl. 1. Podstawowymi badaniami w przypadku konstrukcji nawierzchni dróg i posadzek są odwierty geotechniczne, sondowania dynamiczne oraz badania nośności i zagęszczenia sztywną płytą. W artykule skoncentrowano się na ostatnim typie wspomnianych badań, które służą zarówno rozpoznaniu podłoża jak i kontroli wykonywanych warstw.

1. INTRODUCTION

The structures of road pavements and industrial floors should be properly designed to bear the imposed loads. Critical here is resistance to cyclic dynamic and static loading. When designing such structures one should take into account the type of loads (static/dynamic, short-term/long-term, permanent/variable), their maximum values and repetitiveness. The choice of proper layers, ensuring a long and failure-free service life for a right-of-way structure or an enclosed structure, lies in the designer's hands.

The proper identification of the subgrade parameters and workmanship verification play an important role in the design and construction of structures. Errors made at these stages can result in the premature wear out of the pavement or the industrial floor and in increased costs. Unfortunately, often no attention is paid to the proper preparation of the subgrade. The misconception that the costs of ground surveys and workmanship control are too excessive often occurs in building practice and so in many cases these tasks are abandoned or limited to the minimum.

According to the current standards and regulations, in order to determine the design input data (e.g. the type, consistency and bearing capacity of soil) one should carry out proper ground surveys. The proposed exploration depths for foundations and road structures (based on [1 and 2]) are presented in Table 1. In the case of road pavement and industrial floor structures the basic surveys consist in: geotechnical boreholes, dynamic probing and bearing compactness testing. This paper focuses on the latter type of test which is used for ground investigation and checking the layers being constructed.

Table 1. Subgrade exploration depths [1, 2]
Tablica 1. Głębokości rozpoznania podłoża [1, 2]

| Foundation intended use Przeznaczenie posadowienia | Soil testing depth Głębokość badania gruntu |
|--|--|
| Isolated column footings > 1.5-2.0 m wide Stopy fundamentowe pod oddzielne słupy, o szerokości > 1.5-2.0 m | 1.5 m wide / szerokości |
| Strip foundations for individual poles > 1.5-2.0 m wide Ławy fundamentowe o szerokości > 1.5-2.0 m | 3.0 m wide / szerokości |
| Rigid foundation slabs with considerable surface area, > 1.0 m thick Szttywne płyty fundamentowe o znacznej powierzchni, o grubości > 1.0 m | 1.0 - 1.5 m wide / szerokości |
| Flexible foundation slabs < 0.4 m thick for column grid Wiotkie płyty fundamentowe o grubości < 0.4 m pod siatkę słupów | 5.0 - 10.0 m |
| Thin slabs, industrial floors, road pavements Cienkie płyty, posadzki przemysłowe, nawierzchnie drogowe | 3.0 - 5.0 m |
| Road pavements Nawierzchnie drogowe | at least 2.0 m below structure bottom co najmniej 2.0 m poniżej spodu konstrukcji |

2. CHARAKTERYSTYKA BADAŃ PŁYTA SZTYWNA

Badania nośności i zagęszczenia przy zastosowaniu płyty sztywnej, wywodzące się z drogownictwa, stały się powszechnie stosowanymi na wielu placach budowy. Pierwotnie stosowano metodą opartą na obciążaniu statycznym tj. badaniu aparatem VSS (nazwa pochodzi od Szwajcarskiego Stowarzyszenia Drogowego, które jako pierwsze w 1959 r. wprowadziło metodę do badań polowych [3]). W ostatnich latach popularność zyskuje metoda dynamiczna tj. badanie płytą dynamiczną, zapoczątkowana w Niemczech [4]. Podstawą obu metod jest obciążanie zadaną siłą znanej powierzchni – płyty kołowej – o wymaganej sztywności. Typowa płyta badawcza ma średnicę równą 300 mm, co daje powierzchnię zbliżoną do śladu koła bliźniaczego samochodu ciężarowego [5]. Znane są także badania płytami o średnicy: 762 mm (wg metody Westergaarda [6, 7]), 600 mm [8] lub 163 mm [9, 10].

W teorii, badania płytą oparto na modelu wieloparametrowym podłoża, znanym jako model półprzestrzeni lub półpłaszczyzny sprężystej, o dwóch parametrach fizycznych i dwóch lub trzech parametrach geometrycznych [11]. Rozkład naprężeń pochodzących od siły skupionej w tak zdefiniowanym ośrodku gruntowym zdefiniowano jako zagadnienie Boussinesqa [12, 13]. Zależność między modułem odkształcenia gruntu a parametrami fizycznymi podłoża i parametrami geometrycznymi elementu obciążającego można określić wykorzystując wzór Gorbunowa-Posadowa: [1, 13]:

$$E = \frac{\omega \cdot B \cdot (1 - \nu^2) \cdot \Delta q}{\Delta s}, \quad (1)$$

gdzie:

E – moduł odkształcenia [MPa],

ω – współczynnik kształtu elementu obciążającego [-],

B – szerokość elementu obciążającego [m],

ν – współczynnik Poissona dla gruntu [-],

Δq – przyrost obciążenia [MPa],

Δs – przyrost osiadania dla danego przyrostu obciążenia [m].

Wyznaczenie współczynnika ω jest rezultatem złożonych obliczeń, których podjęli się Schleicher [14] i Cytowicz [15]. Zestawienie wartości ω występujących w literaturze [13-16] zawarto w Tabl. 2. Wymienieni autorzy zgodnie zauważają, że pomimo różnic w wartościach liczbowych ω jest zależna od kształtu i sztywności elementu oraz punktu pomiaru osiadania (środek lub krawędź).

2. DESCRIPTION OF RIGID PLATE LOAD TESTS

Soil plate bearing and compactness testing, deriving from road engineering, has become commonly used on building sites. Originally, a method based on static loading, namely through the VSS apparatus (the name derives from Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute i.e. the Swiss Road Association) which was the first to use that method in field tests in 1959), was used [3]. In recent years the dynamic plate load test, which originated in Germany, has been gaining popularity [4]. The two test methods consist in loading a circular plate (with a known surface area and the required rigidity) with a prescribed force. A typical bearing test plate with a diameter of 300 mm, which gives the surface area similar to the lorry dual wheel tyre imprint area [5]. Also load tests in which plates with diameters of 762 mm (the Westergaard method [6, 7]), 600 mm [8] or 163 mm [9, 10] were used, are known.

As regards theory, plate bearing tests are based on a multi-parameter subgrade model, known as the elastic half-space or half-plane model, with two physical parameters and two or three geometrical parameters [11]. The distribution of the stresses generated by a concentrated force in such a soil medium is defined as the Boussinesq problem [12, 13]. The relation between the soil deformation modulus and the physical parameters of the subgrade and the geometrical parameters of the loading element can be determined using the Gorbunov-Posadov formula [1, 13]:

$$E = \frac{\omega \cdot B \cdot (1 - \nu^2) \cdot \Delta q}{\Delta s}, \quad (1)$$

where:

E – the deformation modulus [MPa],

ω – the shape factor of the loading element [-],

B – the width of the loading element [m],

ν – Poisson's ratio for the soil [-],

Δq – the increase in load [MPa],

Δs – the increase in settlement for the given increase in load [m].

Factor ω was determined through complicated calculations performed by Schleicher [14] and Cytowicz [15]. The values of ω reported in the literature on the subject [13-16] are presented in Table 2. Despite the differences between the values, the above authors unanimously agree that ω depends on the element's shape and rigidity and the

Table 2. Values of shape index ω [13-16]
 Tablica 2. Wartości współczynnika ω [13-16]

| Shape of a loaded surface / Kształt obciążonej powierzchni | ω [-] | Author / Autor |
|--|-----------------------|----------------------|
| Square / Kwadrat | 0.88 | Cytowicz, Schleicher |
| Rectangle / Prostokąt $l/b = 1.5$ | 1.08 | Cytowicz, Schleicher |
| Rectangle / Prostokąt $l/b = 2.0$ | 1.22 | Cytowicz, Schleicher |
| Rectangle / Prostokąt $l/b = 3.0$ | 1.44 | Cytowicz, Schleicher |
| Rectangle / Prostokąt $l/b = 4.0$ | 1.61 | Cytowicz |
| Circle / Koło | $\pi/4 = 0.79$ | Cytowicz, Schleicher |
| Circle / Koło | $\sqrt{\pi}/2 = 0.89$ | Bender |

Zależność (1) wielokrotnie została przywołana w normach i wytycznych związanych z geotechniką i drogownictwem, w krajach europejskich takich jak Szwajcaria [17, 18], Niemcy [6], Wielka Brytania [19] czy Polska [20]. Występuje on w poniższej postaci (2) dla odpowiednich założeń:

$$E = 0,75 \cdot D \cdot \frac{\Delta q}{\Delta s}, \quad (2)$$

gdzie:

E – moduł odkształcenia [MPa],

D – średnica elementu obciążającego [m],

Δq – przyrost obciążenia [MPa],

Δs – przyrost osiadania dla danego przyrostu obciążenia [m].

Wartość stała wynosząca 0,75 jest rezultatem obliczeń dla założeń (Tabl. 3):

- współczynnik kształtu (sztywna płyta kołowa) $\omega = 0,79$;
- współczynnik Poissona przyjmowany dla gruntów sypkich $\nu = 0,20-0,25$.

Wartość współczynnika Poissona [15, 21, 22], które zestawiono w Tabl. 3, jest zależna od rodzaju i stanu gruntu. Podstawiając za średnicę płyty dwie długości promienia ($D = 2r$) uzyskuje się zależność (3) znaną z badań metodą dynamiczną [4]:

$$E_{vd} = 1,5 \cdot r \cdot \frac{q}{s}, \quad (3)$$

gdzie:

E_{vd} – moduł odkształcenia w metodzie dynamicznej [MPa],

r – promień elementu obciążającego [m],

q – obciążenie [MPa],

s – wartość osiadania dla danego obciążenia [m].

W metodzie statycznej Δq zdefiniowano jako przyrost obciążenia jednostkowego w przedziale obliczeniowym, który zależy od rodzaju badanej warstwy, przy czym [18, 20]:

point (the centre or the edge) in which settlement is measured.

Relation (1) has been repeatedly referred to in the geotechnical and road engineering standards and guidelines in European countries such as: Switzerland [17, 18], Germany [6], the UK [19] and Poland [20]. It is used in the form (2) under proper assumptions:

$$E = 0.75 \cdot D \cdot \frac{\Delta q}{\Delta s}, \quad (2)$$

where:

E – the deformation modulus [MPa],

D – the diameter of the loading element [m],

Δq – the increase in load [MPa],

Δs – the increase in settlement for the given increase in load [m].

The constant of 0.75 is the result of calculations for the assumptions (Table 3):

- shape factor (a rigid circular plate) $\omega = 0.79$,
- Poisson's ratio assumed for non-cohesion soils $\nu = 0.20-0.25$.

The values of Poisson's ratio [15, 21, 22], shown in Table 3, depend on the type and state of the soil. Substituting two radius lengths for the plate's diameter ($D = 2r$) one gets relation (3) known from dynamic plate load tests [4]:

$$E_{vd} = 1.5 \cdot r \cdot \frac{q}{s}, \quad (3)$$

where:

E_{vd} – the deformation modulus in the dynamic plate load method [MPa],

r – the radius of the loading element [m],

q – the load [MPa],

s – the settlement value for a given load [m].

In the static plate bearing method Δq is defined as an increase in unit load in a calculation interval which depends on the type of investigated layer, when [18, 20]:

- w przypadku podłoża gruntowego rodzimego, nieulepszono – w przedziale 0,05-0,15 MPa przy maksymalnym obciążeniu 0,25 MPa,
- w przypadku podłoża gruntowego ulepszonego – w przedziale 0,15-0,25 MPa, przy maksymalnym obciążeniu 0,35 MPa,
- w przypadku warstw konstrukcyjnych nawierzchni – w przedziale 0,25-0,35 MPa, przy maksymalnym obciążeniu 0,45 MPa.

- for a native subgrade – the interval is 0.05-0.15 MPa at the maximum load of 0.25 MPa,
- for a treated subgrade – the interval is 0.15-0.25 MPa at the maximum load of 0.35 MPa,
- for pavement courses – the interval is 0.25-0.35 MPa at the maximum load of 0.45 MPa.

Difference Δs is equal to the increase in settlement corresponding to the above load intervals.

Różnica Δs jest równa przyrostowi osiadania odpowiadającemu ww. zakresom obciążeń.

Table 3. Values of transverse expansion (Poisson's) ratios [15, 21-22]

Tablica 3. Wartości współczynników rozszerzalności bocznej (Poissona) [15, 21-22]

| Type of soil / Rodzaj gruntu | Values of Poisson's ratio ν [-] Wartość współczynnika Poissona | Source / Źródło |
|--|---|--------------------------------------|
| Consolidated cohesive glacial soils "A" Grunty morenowe spoiste skonsolidowane „A” | 0.25 | PN-B-03020:1981 |
| Other consolidated cohesive soils and unconsolidated cohesive glacial soils "B" Inne grunty spoiste skonsolidowane oraz grunty morenowe spoiste nieskonsolidowane „B” | 0.29 | |
| Other unconsolidated cohesive soils "C" Inne grunty spoiste nieskonsolidowane „C” | 0.32 | |
| Loams, regardless of geological origin "D" Iły, niezależnie od pochodzenia geologicznego „D” | 0.37 | |
| Gravels and sand-gravel mixtures / Żwiry i pospółki | 0.20 | |
| Coarse sands and medium sands / Piaski grube i piaski średnie | 0.25 | |
| Fine sands and silty sands / Piaski drobne i piaski pylaste | 0.30 | |
| Gravels and sands / Żwiry i piaski | 0.20 - 0.30 | Jurik |
| Loamy sands and fines / Piaski gliniaste i pyły | 0.15 - 0.30 | |
| Clays, firm clays and loams / Gliny, gliny zwięzłe i iły | 0.10 - 0.40 | |
| Gravels and pebbles / Żwiry i otoczaki | 0.12 - 0.17 | Cytowicz |
| Sands / Piaski | 0.17 - 0.24 | Cytowicz, Wilson |
| Sands / Piaski | 0.20 - 0.29 | Cytowicz, Terzaghi |
| Loamy sands and fines / Piaski gliniaste i pyły | 0.21 - 0.29 | Gumiński, Cytowicz |
| Clays / Gliny | 0.30 - 0.37 | Cytowicz, Pokrowski, Erlich, Łaletin |
| Loams / Iły | 0.36 - 0.39 | Cytowicz, Terzaghi |

W normach włoskiej [23], szwajcarskiej [17] i branżowej polskiej [9] zdefiniowano moduł odkształcenia M_E opisany (4):

$$M_E = \frac{\Delta q}{\Delta s} \cdot D, \quad (4)$$

Italian standard [23], Swiss standard [17] and Polish industry standard [9] define the deformation modulus M_E described by a relation (4):

$$M_E = \frac{\Delta q}{\Delta s} \cdot D, \quad (4)$$

gdzie:

M_E – moduł odkształcenia [MPa],

D – średnica elementu obciążającego [m],

Δq – przyrost obciążenia [MPa],

Δs – przyrost osiadania dla danego przyrostu obciążenia [m],

przy czym:

$$M_E \neq E. \quad (5)$$

W obliczeniu M_E zgodnie z przytoczonymi normami nie uwzględnia się współczynnika Poissona oraz kształtu elementu obciążającego.

W metodzie dynamicznej występuje stała wartość naprężenia, którą oblicza się wg wzorów (6) i (7) [5]:

$$q = \frac{F}{A}, \quad (6)$$

$$F = \sqrt{2 \cdot m \cdot g \cdot h \cdot c}, \quad (7)$$

gdzie:

q – naprężenie - obciążenie jednostkowe na powierzchnię płyty [MPa],

F – siła dynamiczna [N],

A – pole powierzchni płyty [m²],

m – masa obciążnika [kg],

g – przyspieszenie grawitacyjne [m/s²],

h – wysokość podnoszenia obciążnika [m],

c – sztywność amortyzatora (sprężyny) [N/m].

W metodzie dynamicznej, wartość s jest średnią arytmetyczną osiadań obliczonych po trzech uderzeniach pomiarowych. Odpowiedni dobór geometrii urządzenia pozwala na uzyskanie oczekiwanej wartości naprężenia pod płytą ($q = 0,1$ MPa), która jest wartością stałą, regulowaną przez wytyczne wprowadzające płytę dynamiczną do stosowania w Niemczech [4].

Należy mieć na uwadze, że oficjalnie w Polskich przepisach budowlanych obowiązują wyłącznie wymagania przygotowane dla badania statycznego. Normy podają wymagania nośności i zagęszczenia m.in. dla podłoża gruntowego, warstw wzmacniających i podbudów. Parametrami uzyskiwanymi w badaniu aparatem VSS są moduły odkształcenia pierwotnego E_1 i wtórnego E_2 oraz wskaźnik odkształcenia I_o , który może być korelowany z wskaźnikiem zagęszczenia I_s [20]. Rezultatem badania dynamicznym ugięciomierzem udarowym jest moduł odkształcenia dynamicznego E_{vd} , który

where:

M_E – the deformation modulus [MPa],

D – the diameter of the loading element [m],

Δq – the increase in load [MPa],

Δs – the increase in settlement for the given increase in load [m],

while:

$$M_E \neq E. \quad (5)$$

When calculating M_E according to the above standards neither Poisson's ratio nor the shape of the loading element are taken into account.

A constant stress value occurs in the dynamic plate load method. It is calculated from the formulas (6) and (7) [5]:

$$q = \frac{F}{A}, \quad (6)$$

$$F = \sqrt{2 \cdot m \cdot g \cdot h \cdot c}, \quad (7)$$

where:

q – the stress (the unit load per plate area) [MPa],

F – the dynamic force [N],

A – the surface area of the plate [m²],

m – the weight of the test weight [kg],

g – the gravitational acceleration [m/s²],

h – the weight lift height [m],

c – the stiffness of the shock spring [N/m].

In the dynamic plate load method the value of s is the arithmetic mean of the settlements calculated after three measuring impacts. By selecting a proper geometry for the device one can obtain the expected stress value ($q = 0.1$ MPa) under the plate. This is a constant value regulated by the guidelines introducing the dynamic plate load test into use in Germany [4].

One should note that in the Polish building code only the requirements prepared for the static plate bearing test are officially in effect. The standards specify the requirements concerning the bearing capacity and compactness of, among other things, the subgrade improvement layers and bases. The parameters measured using the VSS apparatus are: initial loading modulus E_1 , reloading modulus E_2 and modulus ratio I_o , which can be correlated with compaction index I_s [20]. The result of the falling weight deflectometer test is dynamic deformation modulus E_{vd} which should be interpreted as a parameter of subgrade

powinien być interpretowany jako parametr nośności podłoża. W literaturze związanej z opisem tzw. płyty dynamicznej, wykonując przeliczenia wyników z pomiarów dynamicznych na statyczne, często przywoływane są niemieckie przepisy dotyczące możliwości przeprowadzenia badań [4] oraz odbiorowe dokumenty techniczne [24, 25]. Powyższe postępowanie prowadzi do błędnej analizy, gdyż wymienione metody nie mogą być bezpośrednio porównywane. Podstawową różnicą jest wartość uzyskiwanego w pomiarach naprężenia, co skutkuje znacznie różnym zakresem oddziaływania zadanego obciążenia na podłoże gruntowe. W poniższym przykładzie wykazano podstawy teoretyczne oraz eksperyment obliczeniowy dla wyznaczenia zasięgu wpływu obciążenia w badaniu statycznym i dynamicznym.

3. METODYKA OBLICZEŃ

W celu właściwego zaprojektowania obiektów budowlanych należy dokonać obliczeń statycznych konstrukcji i przeniesienia obciążeń na podłoże. Obiekty budowlane powinny spełniać dopuszczalne stany graniczne: I – nośności podłoża gruntowego oraz II – użytkowania budowli [20, 26]. Przywołana w poprzednim rozdziale metoda badawcza próbnego obciążenia oparta jest na wyznaczeniu osiadania płyty sztywnej, które może być rozważane zgodnie z teorią obliczania fundamentów sztywnych. Zakłada się, że osiadanie fundamentów należy obliczyć do pewnej głębokości, określonej w literaturze jako strefa aktywna [20, 27]. Rozważany przez autora problem określenia zasięgu oddziaływania siły w pomiarze nośności płytą sztywną, jest równoznaczny z maksymalnym zasięgiem badania (możliwością określenia parametru podłoża do znanej głębokości). Powyższe zagadnienie można zdefiniować jako problem fundamentu kołowego obciążonego siłą osiową, przy następujących założeniach [10, 27]:

- podłoże gruntowe jest jednorodne,
- moduł ściśliwości (odkształcenia) jest stały i nie zależy od głębokości $E = \text{const}$,
- obowiązują wzory Boussinesqa dla półprzestrzeni sprężystej,
- zasięg strefy aktywnej określa się równaniem $0,3 \cdot \sigma_\gamma = \sigma_{zd}$, gdzie σ_γ oznacza naprężenia pierwotne $\sigma_\gamma = \gamma \cdot z$, przy czym γ [kN/m³] to ciężar objętościowy gruntu, zaś z [m] to jego głębokość,
- nacisk na podłoże pod płytą jest rozłożony równomiernie,
- warunki wodne w podłożu nie podlegają znacznym zmianom w czasie,
- poziom wód gruntowych znajduje się poniżej projektowanej podstawy fundamentu.

bearing capacity. When the conversion of dynamic plate load test results into static plate bearing test results is discussed in the literature on the dynamic plate load test often German regulations concerning testing feasibility [4] and technical approval documents [24, 25] are referred to. This approach leads to an incorrect analysis since the above methods cannot be directly compared. The basic difference is in the obtained stress value resulting in a different range of the action of the applied load on the subgrade. The theoretical basis for determining the load action range in static/dynamic plate bearing capacity tests and a relevant analytical experiment are presented below.

3. CALCULATION METHODOLOGY

In order to properly design a civil structure one should calculate the structure's static load and the load transfer to the subgrade. Civil structures should meet the allowable limit states: the subgrade strength limit state and the structure's service limit state [20, 26]. The plate load test method mentioned in the previous section is based on the determination of rigid plate settlement which can be considered in terms of rigid foundation calculation theory. It is assumed that the settlement of foundations should be calculated to a certain depth, defined as the active zone in the literature [20, 27]. The problem of determining the range of the action of the force for bearing capacity measurement in the rigid plate bearing test is equivalent to determining the maximum test range (the possibility of determining a subgrade parameter to the known depth). The above problem can be defined as the problem of a circular foundation loaded with an axial force under the following assumptions [10, 27]:

- the subgrade is homogenous,
- the compressibility (deformation) modulus is constant ($E = \text{const.}$) and does not depend on the depth,
- in case of the elastic half-space, Boussinesq formulas apply,
- the range of the active zone is expressed by the equation $0,3 \cdot \sigma_\gamma = \sigma_{zd}$, where σ_γ stands for initial stresses $\sigma_\gamma = \gamma \cdot z$, where γ [kN/m³] is the bulk density of the subgrade and z [m] is the latter's depth,
- the pressure exerted on the subgrade under the plate is uniformly distributed,
- the groundwater conditions do not change significantly over time,
- the groundwater table is below the design foundation footing.

Ponadto, w przypadku stopy w kształcie koła, istnieje ściśle rozwiązanie, opisane rozkładem naprężeń w osi pod fundamentem wg wzoru [27]:

$$\sigma_{zd} = \sigma_o \cdot \left[1 - \frac{z^3}{(z^2 + r^2)^{\frac{3}{2}}} \right], \quad (8)$$

gdzie:

σ_{zd} – naprężenie pionowe w gruncie na głębokości z [MPa],

σ_o – naprężenie przekazywane na płytę [MPa],

r – promień płyty kołowej [m],

z – rzędna obliczeniowa (rozpatrywana głębokość) [m].

Przy powyższych założeniach, korzystając z zależności (8), dokonano obliczeń zakresu oddziaływania płyty sztywnej dla naprężeń uzyskiwanych podczas badań nośności podłoża aparatem VSS oraz płytą dynamiczną.

4. PRZYKŁAD OBLICZENIOWY

Porównanie zakresu oddziaływania obciążenia w badaniach statycznych i dynamicznych płytą sztywną przeprowadzono na wybranych gruntach. Parametry gruntów określono wg normy [21] (Tabl. 4). Przykładowo, dla jednorodnego podłoża gruntowego złożonego z piasków próchnicznych, w stanie luźnym ($I_D = 0,30$; $\gamma = 15 \text{ kN/m}^3$), obciążonego płytą sztywną, wywołując naprężenie $\sigma_o = 100 \text{ kPa}$, wartość zredukowanego naprężenia pierwotnego $0,3 \cdot \sigma_\gamma$ w gruncie (wywołanego ciężarem własnym) będzie równa wartości obciążenia dodatkowego σ_{zd} na głębokości $z = 0,89 \text{ m}$. Powyższy warunek określa zasięg strefy aktywnej w gruncie, co w rozpatrywanym przypadku oznacza zasięg badania płytą sztywną.

Na Rys. 1-6 zilustrowano rozkład naprężeń pierwotnych σ_γ , pierwotnych zredukowanych $0,3 \cdot \sigma_\gamma$ oraz dodatkowych σ_{zd} występujących w przykładowym, badanym gruncie (piasek próchniczny w stanie luźnym) w zależności od maksymalnego zadanego obciążenia płytą σ_o . Obliczenia przeprowadzono dla 9 gruntów. Wartości naprężeń przekazywanych na płytę wynikają z maksymalnych obciążeń, które można uzyskać w badaniach podłoża gruntowego rodzimego i ulepszonego, przy zastosowaniu aparatu VSS oraz płyty dynamicznej:

- 0,10 MPa (100 kPa) – w przypadku maksymalnego obciążenia w badaniu płytą dynamiczną z zastosowaniem obciążnika 10 kg, zgodnie z [4],
- 0,15 MPa (150 kPa) – w przypadku maksymalnego obciążenia w badaniu płytą dynamiczną z zastosowaniem obciążnika 15 kg, zgodnie z [4],
- 0,25 MPa (250 kPa) – w przypadku maksymalnego obciążenia podłoża gruntowego rodzimego badanego aparatem VSS, zgodnie z [18, 20],

Moreover, in the case of a circular footing there exists an exact solution described by the distribution of stresses on the axis under the foundation according to the formula [27]:

$$\sigma_{zd} = \sigma_o \cdot \left[1 - \frac{z^3}{(z^2 + r^2)^{\frac{3}{2}}} \right], \quad (8)$$

where:

σ_{zd} – the vertical stress in the ground at depth z [MPa],

σ_o – the stress transmitted to the plate [MPa],

r – the radius of the circular plate [m],

z – the calculation level (the considered depth) [m].

Under the above assumptions, the rigid plate action range for the stresses obtained during static/dynamic plate bearing tests were calculated from relation (8).

4. CALCULATION EXAMPLE

The load action ranges determined by static/dynamic plate load tests carried out on selected soils were compared. The parameters of the soils were determined in accordance with standard [21] (Table 4). For example, for a homogeneous subgrade consisting of loose humic sands ($I_D = 0.30$, $\gamma = 15 \text{ kN/m}^3$), loaded with a rigid plate generating stress $\sigma_o = 100 \text{ kPa}$, the initial von Mises stress of $0.3 \cdot \sigma_\gamma$ in the soil under its own weight is equal to additional load σ_{zd} at depth $z = 0.89 \text{ m}$. The above condition defines the range of the active zone in soil, which in the considered case is the rigid plate load test range.

Figs. 1-6 show the distribution of initial stresses σ_γ , initial von Mises stresses $0.3 \cdot \sigma_\gamma$ and additional stresses σ_{zd} occurring in the exemplary soil (loose humic sand) depending on maximum applied plate load σ_o . Calculations were done for 9 soils. The values of the stresses transferred onto the plate result from the maximum loads produced in a natural and treated subgrade by means of the static plate bearing tester and the falling weight tester:

- 0.10 MPa (100 kPa) – for the maximum load produced in the dynamic plate load test by means of a 10 kg weight in accordance with [4],
- 0.15 MPa (150 kPa) – for the maximum load produced in the dynamic plate load test by means of a 15 kg weight in accordance with [4],
- 0.25 MPa (250 kPa) – for the maximum loading of a natural subgrade by means of the static plate bearing tester in accordance with [18, 20],
- 0.35 MPa (350 kPa) – for the maximum loading of a treated subgrade by means of the static plate bearing tester in accordance with [18, 20].

- 0,35 MPa (350 kPa) – w przypadku maksymalnego obciążenia ulepszanego podłoża gruntowego badanego aparatem VSS, zgodnie z [18, 20].

Table 4. Parameters of investigated soils [20]
Table 4. Parametry badanych gruntów [20]

| Soil symbol Symbol gruntu | Moisture content Wilgotność | Soil state Stan gruntu | Density index Stopień zagęszczenia I_D [-] | Plasticity index Stopień plastyczności I_L [-] | Consolidation group Grupa konsolidacji [-] | Soil weight Ciężar gruntu γ [kN/m ³] | Internal friction angle Kąt tarcia wewnętrzznego ϕ [°] | Damp Kohezja C [kPa] |
|------------------------------|--------------------------------|---------------------------|--|--|--|---|---|----------------------------|
| PH | wet wilgotny | loose ln | 0.30 | – | – | 15.0 | 28.0 | – |
| Pd | wet wilgotny | medium dense szg | 0.45 | – | – | 17.5 | 30.3 | – |
| Ps | wet wilgotny | medium dense szg | 0.50 | – | – | 18.5 | 33.0 | – |
| Po | wet wilgotny | medium dense szg | 0.55 | – | – | 19.0 | 38.9 | – |
| I | wet wilgotny | firm tpl | – | 0.10 | D | 20,0 | 11.7 | 54.2 |
| Gz | wet wilgotny | firm tpl | – | 0.15 | C | 21.0 | 15.6 | 20.2 |
| Pg | wet wilgotny | firm tpl | – | 0.20 | B | 21.5 | 18.3 | 32.0 |
| Gp | slightly wet mało wilgotny | firm tpl | – | 0.05 | A | 22.0 | 24.1 | 47.1 |
| Żg | slightly wet mało wilgotny | stiff zw | – | 0.00 | B | 22.5 | 22.0 | 40.0 |

PH - organic sand / piasek próchniczny; Pd - fine sand / piasek drobny; Ps - medium sand / piasek średni; Po - gravelly sand / pospółka; I - loams / ility; Gz - silty clay / glina zwięzła; Pg - clayey sand / piasek gliniasty; Gp - sandy clay / glina piaszczysta; Żg - clayey gravel / żwir gliniasty

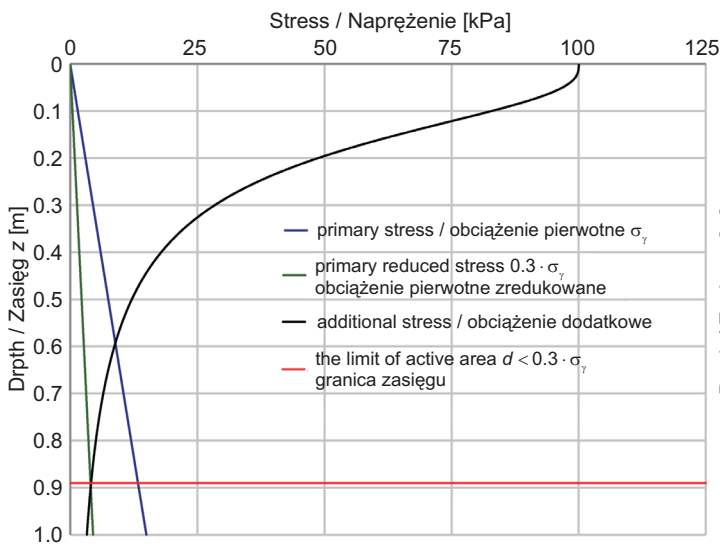


Fig. 1. Stress distribution for non-cohesive humic sands and range of active zone for 100 kPa load when testing with a plate with a diameter of 300 mm

Rys. 1. Rozkład naprężeń dla piasków próchnicznych w stanie luźnym oraz zasięg strefy aktywnej dla obciążenia 100 kPa przy badaniu płytą o średnicy 300 mm

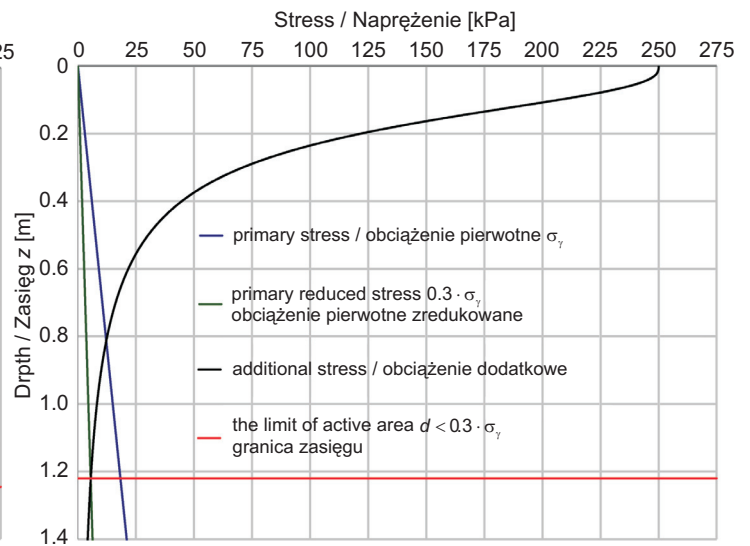


Fig. 2. Stress distribution for non-cohesive humic sands and range of active zone for 150 kPa load when testing with a plate with a diameter of 300 mm

Rys. 2. Rozkład naprężeń dla piasków próchnicznych w stanie luźnym oraz zasięg strefy aktywnej dla obciążenia 150 kPa przy badaniu płytą o średnicy 300 mm

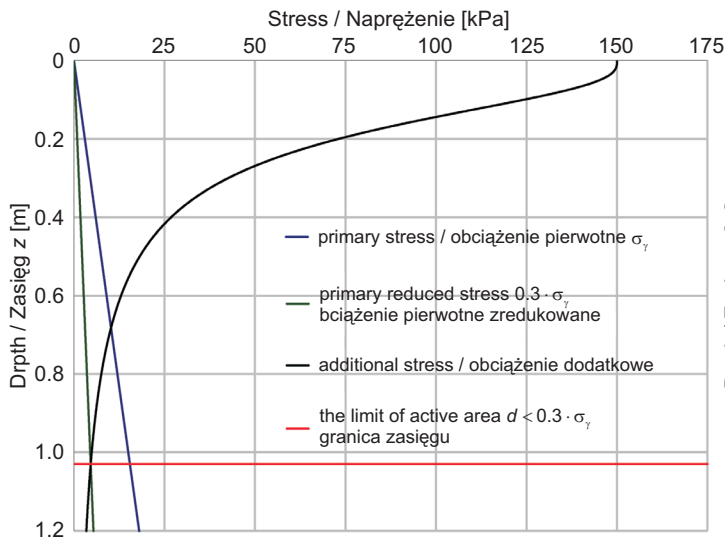


Fig. 3. Stress distribution for non-cohesive humic sands and range of active zone for 250 kPa load when testing with a plate with a diameter of 300 mm

Rys. 3. Rozkład naprężeń dla piasków próchnicznych w stanie luźnym oraz zasięg strefy aktywnej dla obciążenia 250 kPa przy badaniu płytą o średnicy 300 mm

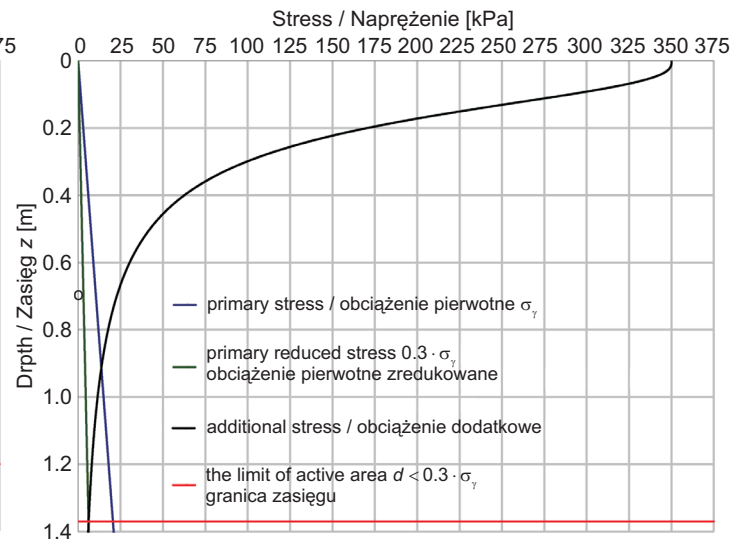


Fig. 4. Stress distribution for non-cohesive humic sands and range of active zone for 350 kPa load when testing with a plate with a diameter of 300 mm

Rys. 4. Rozkład naprężeń dla piasków próchnicznych w stanie luźnym oraz zasięg strefy aktywnej dla obciążenia 350 kPa przy badaniu płytą o średnicy 300 mm

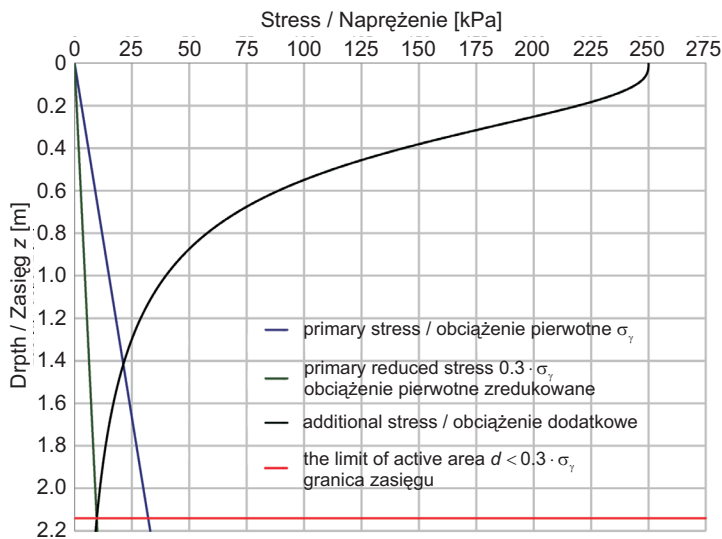


Fig. 5. Stress distribution for non-cohesive humic sands and range of active zone for 250 kPa load when testing with a plate with a diameter of 700 mm

Rys. 5. Rozkład naprężeń dla piasków próchnicznych w stanie luźnym oraz zasięg strefy aktywnej dla obciążenia 250 kPa przy badaniu płytą o średnicy 700 mm

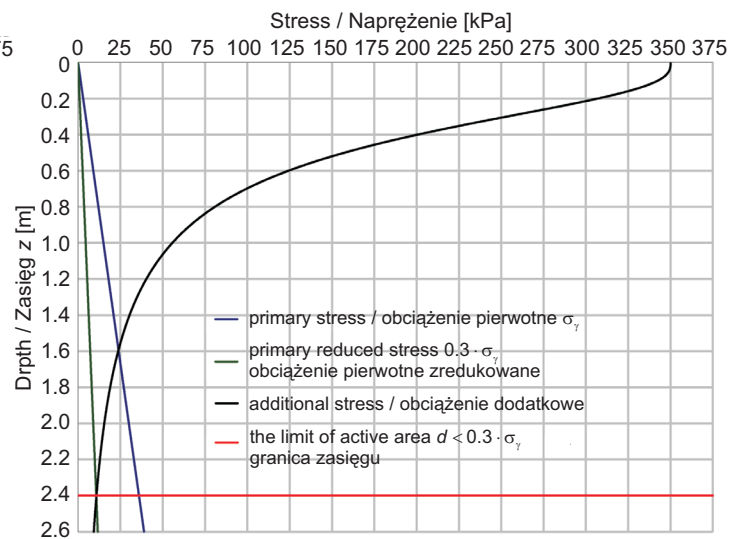


Fig. 6. Stress distribution for non-cohesive humic sands and range of active zone for 350 kPa load when testing with a plate with a diameter of 700 mm

Rys. 6. Rozkład naprężeń dla piasków próchnicznych w stanie luźnym oraz zasięg strefy aktywnej dla obciążenia 350 kPa przy badaniu płytą o średnicy 700 mm

Powyższe wartości naprężeń wynikają z rzeczywistych obciążeń stosowanych w budownictwie. W praktyce budowlanej zakłada się, że naprężenia przenoszone na podłoże wynoszą: około 0,10-0,15 MPa (pod konstrukcją nawierzchni

The above stress values result from the loads actually used in construction. In construction practice it is assumed that the stresses transmitted to the subgrade amount to about 0.10-0.15 MPa (under road pavement structures and under

drogowych lub pod fundamentami niewielkich obiektów, np. budynków jednorodzinnych) czy około 0,2-0,3 MPa (pod fundamentami obiektów przemysłowych). W Tabl. 5 zestawiono bezpośredni zasięg strefy oddziaływania naprężeń z zaś w Tabl. 6 jako stosunek zasięgu oddziaływania z i średnicy płyty D .

the foundations of small construction entities, e.g. one-family houses), and about 0.2-0.3 MPa (under the foundations of industrial buildings). Table 5 shows the direct stress action zone range z while the ratio of action range z to plate diameter D is shown in Table 6.

Table 5. Range of load action on subgrade
Tablica 5. Zasięg oddziaływania obciążenia na podłoże

| Type of tests Rodzaj badania | Stress Naprężenie | Range of action / Zasięg oddziaływania z [cm] | | | | | | | | | Statistics Statystyka | | |
|---|----------------------|---|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------------|-----|-----------------|
| | [kPa] | PH loose ln | Pd medium dense szg | Ps medium dense szg | Po medium dense szg | I firm tpl | Gz firm tpl | Pg firm tpl | Gp firm tpl | Żg stiff zw | min | max | mean średnia |
| Dynamic plate load test Płyta dynamiczną $D = 300$ mm | 100 | 89 | 85 | 84 | 82 | 81 | 80 | 79 | 78 | 78 | 78 | 89 | 82 |
| | 150 | 103 | 98 | 96 | 95 | 93 | 92 | 91 | 90 | 90 | 90 | 103 | 94 |
| Static plate bearing test Płyta statyczną $D = 300$ mm | 250 | 122 | 116 | 114 | 113 | 111 | 109 | 108 | 107 | 106 | 106 | 122 | 112 |
| | 350 | 137 | 130 | 128 | 127 | 124 | 122 | 121 | 120 | 120 | 120 | 137 | 125 |
| Static plate bearing test Płyta statyczną $D = 700$ mm | 250 | 214 | 203 | 199 | 198 | 194 | 191 | 190 | 188 | 186 | 186 | 214 | 196 |
| | 350 | 240 | 228 | 224 | 222 | 218 | 214 | 213 | 211 | 209 | 209 | 240 | 220 |

PH - organic sand / piasek próchniczny; Pd - fine sand / piasek drobny; Ps - medium sand / piasek średni; Po - gravelly sand / pospółka; I - loams / ility; Gz - silty clay / glina zwięzła; Pg - clayey sand / piasek gliniasty; Gp - sandy clay / glina piaszczysta; Żg - clayey gravel / żwir gliniasty

Table 6. Range of load action on subgrade relative to test plate width
Tablica 6. Zestawienie zasięgu oddziaływania obciążenia na podłoże w odniesieniu do szerokości płyty badawczej

| Type of tests Rodzaj badania | Stress Naprężenie | Range of action / Zasięg oddziaływania z/D [-] | | | | | | | | | | Statistics Statystyka | | |
|---|----------------------|--|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------|--------------------------|-----------------|--|
| | [kPa] | PH loose ln | Pd medium dense szg | Ps medium dense szg | Po medium dense szg | I firm tpl | Gz firm tpl | Pg firm tpl | Gp firm tpl | Żg stiff zw | min | max | mean średnia | |
| Dynamic plate load test Płyta dynamiczną $D = 300$ mm | 100 | 2.97 | 2.83 | 2.80 | 2.73 | 2.70 | 2.67 | 2.63 | 2.60 | 2.60 | 2.60 | 2.97 | 2.73 | |
| | 150 | 3.43 | 3.27 | 3.20 | 3.17 | 3.10 | 3.07 | 3.03 | 3.00 | 3.00 | 3.00 | 3.43 | 3.14 | |
| Static plate bearing test Płyta statyczną $D = 300$ mm | 250 | 4.07 | 3.87 | 3.80 | 3.77 | 3.70 | 3.63 | 3.60 | 3.57 | 3.53 | 3.53 | 4.07 | 3.73 | |
| | 350 | 4.57 | 4.33 | 4.27 | 4.23 | 4.13 | 4.07 | 4.03 | 4.00 | 4.00 | 4.00 | 4.57 | 4.18 | |
| Static plate bearing test Płyta statyczną $D = 700$ mm | 250 | 3.06 | 2.90 | 2.84 | 2.83 | 2.77 | 2.73 | 2.71 | 2.69 | 2.66 | 2.66 | 3.06 | 2.80 | |
| | 350 | 3.43 | 3.26 | 3.20 | 3.17 | 3.11 | 3.06 | 3.04 | 3.01 | 2.99 | 2.99 | 3.43 | 3.14 | |

Soil state / Stan gruntu: ln - loose / luźny; szg - medium dense / średnio zagęszczony; tpl - firm / twar-do-plastyczny; zw - stiff / zwarty

Podsumowując, należy zauważyć, że zasięg oddziaływania siły dla stałej wartości obciążenia maleje wraz z ciężarem gruntu i lepszym jego stanem – gdy grunty są bardziej zagęszczone (niespoiste) lub posiadają niższą plastyczność (spoiste)

Summing up, one should note that the force action range at a constant load value decreases with the soil weight and with the better state of the soil – when soils are more compacted (non-cohesive) or are characterized by lower

strefa oddziaływania maleje (por. ciężary gruntów z Tabl. 4 wraz z zasięgiem oddziaływania z Tabl. 5 – wartości z zmniejszają się w prawą stronę – odpowiednio do wzrastającego ciężaru gruntu). W przypadku badań typową płytą dynamiczną maksymalny zasięg oddziaływania tj. zasięg pomiarowy urządzenia wynosi od 0,78 do 0,89 m, czyli od 2,6 do 3,0 średnic płyty pomiarowej. Badania aparatem VSS pozwalają na pomiar warstw do głębokości 1,06-1,22 m (3,5-4,1 średnic płyty) dla podłoża gruntowego rodzimego oraz do głębokości 1,20-1,37 m (4,0-4,6 średnic płyty) w przypadku podłoża ulepszanego. Porównawczo, dla badań statycznych przy zastosowaniu płyty o średnicy 700 mm zasięg pomiarowy wynosi 1,86-2,14 m (2,66-3,06 średnic płyty) dla gruntów rodzimych oraz 2,09-2,40 m (2,99-3,43 średnic płyty) dla podłożu ulepszanych. Na podstawie przedstawionego eksperymentu obliczeniowego można stwierdzić, że pojawiające się w literaturze wartości pomiarowe określone na 2-3 średnic płyty w przypadku aparatu VSS [28] oraz 1-2 średnic dla płyty dynamicznej [5, 28] są dyskusyjne.

Uzyskane zakresy oddziaływania pomiarowego w jednoznaczny sposób potwierdzają brak możliwości bezpośrednio porównywania wyników uzyskanych w badaniach statycznych i dynamicznych. Biorąc pod uwagę ograniczenia metody dynamicznej, w której w typowych badaniach polowych (przy zastosowaniu obciążnika o masie 10 kg) uzyskuje się odpowiednio niższe maksymalne naprężenie niż w badaniach statycznych, tj. 2,5 krotnie mniejsze w przypadku podłoża rodzimego i 3,5 krotnie mniejsze w przypadku podłoża ulepszanego. Porównywanie wyników E_{vd} i E_2 , poprzez przemnażanie przez dowolnie przyjmowane wartości liczbowe świadczyć może o braku podstaw teoretycznych wśród osób proponujących wspomniane rozwiązania. W Tabl. 7 przedstawiono procentową różnicę zasięgu pomiarowego dla badań dynamicznych i statycznych.

5. PODSUMOWANIE

Konieczność rozpoznania parametrów podłoża na etapie przygotowania inwestycji a także realizacji i kontroli jakości robót ma wpływ na wzrost konkurencji w branży geologicznej i geotechnicznej. Wiele laboratoriów oferuje badania statyczną i/lub dynamiczną płytą sztywną. Niestety, powszechnie jest stwierdzenie, iż nie ma znaczenia, którą metodą zostaną wykonane badania; wyniki porównuje się wzajemnie przeliczając je według własnych reguł lub zagranicznych norm i wytycznych. Często osoby wykonujące badania nie mają odpowiednich kwalifikacji ani wiedzy do poprawnej interpretacji wyników. W praktyce budowlanej ważny jest czas, który przekłada się na koszty, umiejętnie przedstawienie

plasticity (cohesive) the action zone z decreases (comparing the weight of the soils in Table 4 with the action range in Table 5 one can see that the z values decrease to the right, commensurately with the increasing soil weight). If a typical dynamic plate is used, the maximum action range, i.e. the measuring range of the tester amounts to 0.78-0.89 m, which corresponds to 2.6-3.0 m diameters of the plate. The falling weight tester is capable of measuring soil layers to the depth of 1.06-1.22 m (3.5-4.1 plate diameters) for a natural subgrade and to the depth of 1.20-1.37 m (4.0-4.6 plate diameters) in the case of a treated subgrade. For comparison, in the case of static plate bearing tests with a plate with a diameter of 700 mm the measuring range is 1.86-2.14 m (plate diameters of 2.66-3.06 m) for native subgrades and 2.09-2.40 m (plate diameters of 2.99-3.43 m) for treated subgrades. The calculation experiment shows that the literature values measured at the depth equal to 2-3 plate diameters by means of the VSS apparatus [28] and at the depth equal to 1-2 plate diameters by means of the falling weight tester [5, 28] are questionable.

The determined test load action ranges clearly indicate that static plate bearing test results cannot be directly compared with dynamic plate load test results. Moreover, the dynamic plate load test method has its limitations: in typical field tests the maximum stress produced by the falling weight tester is considerably smaller than the one produced by the VSS apparatus, i.e. 2.5 times smaller for a native subgrade and 3.5 times lower for a treated subgrade. The fact that the E_{vd} and E_2 results are multiplied by arbitrarily assumed numerical values is indicative of the lack of knowledge of the relevant theoretical basis among the persons proposing such solutions. Table 7 shows the percentage difference in measuring range between the dynamic plate load test and the static plate bearing test.

5. SUMMARY

The fact that it is necessary to investigate subgrade parameters at the pre-construction, construction and workmanship verification stages has contributed to increased competition in the geological and geotechnical business. Many laboratories offer static and/or dynamic rigid plate load tests. Unfortunately, it is commonly believed that it does not matter which method of testing is used and the respective results are mutually converted using arbitrary rules or foreign standards and guidelines. People carrying out such tests have often neither proper qualifications nor knowledge to correctly interpret the results. Since time translates into costs it is an important consideration in

wątpliwych korzyści z metody dynamicznej, takich jak szybkość, brak konieczności przeciwwagi, elektroniczny pomiar osiadania, możliwość uzyskania wyników zaraz po badaniu, czy własne, niepotwierdzone korelacje zagęszczenia [29-31], które zdaniem autora są promowane i rozpowszechniane przez producentów urządzeń oraz laboratoria kierujące się zasadą „ilość a nie jakość”, często prowadzą do rezygnacji z normowych badań aparatem VSS na rzecz badań płytą dynamiczną. Zauważając zalety metody dynamicznej zapomina się o jej wadach, takich jak brak możliwości sprawdzenia poprawności mierzonych wartości (zasada czarnej skrzynki - urządzenie podaje wyniki bez wiedzy o sposobie ich uzyskania) czy ewentualne zaburzenia pomiarów z uwagi na występujące pole magnetyczne lub elektryczne [32].

construction practice. However, due to the advertising of the dynamic plate load test's dubious benefits, such as speed, no need for a counterweight, settlement measured electronically and the results available immediately after the test, and to unverified manufacturer soil density correlations [29-31] (in the author's opinion, propagated by equipment manufacturers and laboratories interested more in quantity than quality), the standard tests by means of the VSS apparatus are often abandoned for dynamic plate load tests. While the advantages of the dynamic test method are advertised, its drawbacks, such as no possibility of verifying the measured values (the black box principle – a device displays results without any information about the way in which they were acquired) and the possible disturbance of the measurement by a magnetic or electric field [32], are overlooked.

Table 7. Comparison of dynamic and static plate load test results
Tablica 7. Porównanie wyników badań dla metody dynamicznej i statycznej

| Method Metoda | Stress Naprężenie | Reference value Wartość odniesienia | Range of action on subgrade z [-] Zasięg oddziaływania na podłoże | | | | | | | | | Mean Średnia |
|--|----------------------|--|--|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------|
| | [kPa] | | PH loose ln | Pd medium dense szg | Ps medium dense szg | Po medium dense szg | I firm tpl | Gz firm tpl | Pg firm tpl | Gp firm tpl | Żg stift zw | |
| Dynamic plate load test Dynamiczna | 100 | 1.0 | 89 | 85 | 84 | 82 | 81 | 80 | 79 | 78 | 78 | – |
| Static plate load test Stacyjna | 250 | 2.5 | 122 | 116 | 114 | 113 | 111 | 109 | 108 | 107 | 106 | – |
| Ratio of static/dynamic plate load test results [%] Stosunek wyników w metodzie stacyjnej/dynamicznej [%] | | | 137.1 | 136.5 | 135.7 | 137.8 | 137.0 | 136.3 | 136.7 | 137.2 | 135.9 | 136.7 |
| Static plate load test Stacyjna | 350 | 3.5 | 137 | 130 | 128 | 127 | 124 | 122 | 121 | 120 | 120 | – |
| Ratio of static/dynamic plate load test results [%] Stosunek wyników w metodzie stacyjnej/dynamicznej [%] | | | 153.9 | 152.9 | 152.4 | 154.9 | 153.1 | 152.5 | 153.2 | 153.8 | 153.8 | 153.4 |
| Static plate load test Stacyjna | 450 | 4.5 | 149 | 141 | 139 | 138 | 135 | 133 | 132 | 131 | 130 | – |
| Ratio of static/dynamic plate load test results [%] Stosunek wyników w metodzie stacyjnej/dynamicznej [%] | | | 167.4 | 165.9 | 165.5 | 168.3 | 166.7 | 166.3 | 167.1 | 167.9 | 166.7 | 166.9 |

PH - organic sand / piasek próchniczny; Pd - fine sand / piasek drobny; Ps - medium sand / piasek średni; Po - sand-gravel mix / pospółka; I - loams / ility; Gz - silty clay / glina zwięzła; Pg - clayey sand / piasek gliniasty; Gp - sandy clay / glina piaszczysta; Żg - clayey gravel / żwir gliniasty

Tematyka związana z porównaniem wyników uzyskanych z badań VSS i LFG jest bardzo aktualna. Pracownicy naukowci

The problems connected with comparing static plate bearing test results with dynamic plate load test results are of

z Instytutu Badawczego Dróg i Mostów dokonali w latach 2004-2005 szczegółowych badań mających na celu opracowanie korelacji pomiędzy rezultatami uzyskanymi z badań statycznych i dynamicznych [33]. Problematyką tą zajmują się także naukowcy Politechniki Wrocławskiej, którzy zwracają szczególną uwagę na rodzaj badanego podłoża [34], czas wykonywania pomiarów i rodzaj przeciwwagi w badaniach statycznych [35, 36] czy cykliczność obciążeń w pomiarach dynamicznych [37]. Autor przedstawiając powyższe wyniki obliczeń numerycznych wpisuje się w argumentację innych badaczy, że nie można w uniwersalny sposób porównywać ze sobą wyników uzyskanych w badaniach dynamicznych i statycznych płytą sztywną. Wyniki badań dynamicznych mogą wyłącznie służyć własnej, bieżącej kontroli przy wykonywaniu poszczególnych warstw konstrukcji nawierzchni lub posadzki lecz na ich podstawie nie można dokonać odbiorów prowadzonych robót. Poglądowo, można wykonać kilka badań statycznych, które zgodnie z krajowymi przepisami wykonuje się najczęściej w rozstawie 1 badanie na 500 m² powierzchni i wiele odpowiednio skorelowanych (dla ściśle określonych warunków gruntowych in situ danej budowy) badań dynamicznych – w mniejszym rozstawie, które pozwolą na wyznaczenie mniejszych, szczegółowych obszarów, np. o zaniżonej nośności.

6. WNIOSKI

1. Określono maksymalny zasięg oddziaływania obciążenia w metodzie statycznej i dynamicznej, który odpowiada zasięgowi badawczemu aparatu VSS oraz płyty dynamicznej. Zasięg badania w metodzie statycznej jest znacznie większy niż w metodzie dynamicznej (36,7% więcej w przypadku podłoża nieulepszanego – badania w zakresie 0,00-0,25 MPa, 53,4% więcej w przypadku podłoża ulepszanego – badania w zakresie 0,00-0,35 MPa oraz 66,9% więcej w przypadku podbudów – badania w zakresie 0,00-0,45 MPa).
2. Wykazano, że w metodzie dynamicznej uzyskuje się stałą wartość naprężenia (równą 0,1 MPa), której nie można – w przeciwieństwie do badań statycznych – zwiększać, w zależności od rodzaju badanej warstwy. Od podłoża ulepszanego wymaga się aby przenosiło większe obciążenia niż podłoża nieulepszone. Z uwagi na stałą wartość naprężenia pod płytą, która jest 2,5 lub 3,5 krotnie mniejsza niż w badaniach aparatem VSS, nie można wzajemnie porównywać wyników uzyskanych w badaniach statycznych i dynamicznych.
3. Dla zadanego obciążenia, wynoszącego 0,25 MPa lub 0,35 MPa, zasięg badania jest większy dla gruntów wykazujących mniejszy ciężar oraz niższe zagęszczenie (grunty niespoiste) lub wyższą plastyczność (grunty spoiste).

topical interest. In the years 2004-2005 the researchers associated with the Road and Bridge Research Institute carried out detailed studies aimed at developing correlations between static and dynamic plate load test results [33]. Researchers investigating these problems at the Wrocław University of Science and Technology draw special attention to the type of investigated subgrade [34], the measurement performance time and the type of counterweight in static plate bearing tests [35, 36] and to load cyclical nature of dynamic plate load tests [37]. By presenting the above results of numerical calculations the author supports the arguments put forward by other researchers, suggesting that the results of dynamic plate load tests and those of static plate bearing tests cannot be universally compared. Dynamic plate load test results can be used solely to check whether the particular pavement or floor layer has been correctly made, but they cannot be the basis for signing off the works. One can carry out a few static plate bearing tests, which according to the domestic regulations are done at a spacing of 1 test on a surface of 500 sqm, and many properly correlated (for the specific in situ soil conditions on the given construction site) dynamic plate load tests spaced more densely, whereby smaller areas, e.g. of a lower bearing capacity can be precisely identified.

6. CONCLUSIONS

1. The maximum range of load action, corresponding to the measuring range of the VSS apparatus and the falling weight tester, has been determined for the static bearing load test and the dynamic plate load test. The measuring range in the static bearing load test is considerably larger than in the dynamic plate load test (36.7% larger in case of a natural subgrade tested under 0.00-0.25 MPa, 53.4% larger in case of a treated subgrade tested under 0.00-0.35 MPa and 66.9% larger in case of a base tested under 0.00-0.45 MPa).
2. It has been shown that the falling weight tester produces a constant stress value (equal to 0.1 MPa) which, unlike in the static plate bearing test, cannot be increased depending on the type of investigated layer. Because of the constant stress value under the plate, which is 2.5 or 3.5 times lower than the one produced by the VSS apparatus, a treated subgrade is expected to bear heavier loads than untreated subgrade. Therefore the results yielded by static and dynamic plate load tests cannot be mutually compared.
3. When the applied load amounts to 0.25 MPa or 0.35 MPa, the measuring range is larger for soils characterized by lower weight and lower compactness (non-cohesive soils) or by higher plasticity (cohesive soils).

4. Jednoznacznie wykazano, iż błędnym jest stwierdzenie jakoby w badaniu płytą dynamiczną ocenie podlegało zagęszczenie podłoża.
5. Nie można odpowiedzieć w prosty i jednoznaczny sposób na pytanie o zasięg badań płytą sztywną, gdyż zależy on od rodzaju i stanu gruntu, a także od przyłożonego obciążenia.
6. Z obliczeniowego punktu widzenia przy zastosowaniu płyty sztywnej nie można porównywać względem siebie wyników uzyskanych w badaniach statycznych i dynamicznych.
7. Kierunkiem dalszych prac winno być przeprowadzenie badań polowych, które potwierdzą zaprezentowane rozważania numeryczne.

PODZĘKOWANIE

Autor pragnie podziękować Panu mgr. Marcinowi Gumkowskiemu za pomoc w doborze i pozyskaniu literatury na potrzeby niniejszej publikacji.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] *Gorbunow-Posadow M.I.*: Obliczanie konstrukcji na podłożu sprężystym. Budownictwo i Architektura, Warszawa, 1956
- [2] Katalog Typowych Konstrukcji Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych. IBDiM, Warszawa, 1997
- [3] SN 670317:1959 Essai de charge avec plaques
- [4] TP BF-StB Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau. Teil B 8.3 Dynamischer Plattendruckversuch mit Leichtem Fallgewichtsgesetz, Forschungsgesellschaft für Straßen - und Verkehrswesen e.V., Köln, 2012
- [5] *Sulewska M.*: Lekki ugięciomierz dynamiczny do określania modułu odkształcenia gruntu. Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej, Seria Budownictwo, nr 11, Białystok, 1993, 85-106
- [6] DIN 18134:2012-04 Baugrund - Versuche und Versuchsgeräte - Plattendruckversuch
- [7] PN-EN 1990:2004 Eurokod. Podstawy projektowania konstrukcji.
- [8] NF P94-117-1 (2000) Sols: Reconnaissance et essais. Portance des plates-formes. Partie 1: Module sois chargement statique a la plaque (EV2)
- [9] BN-64/8931-02 Drogi samochodowe. Oznaczenie modułu odkształcenia nawierzchni podatnych i podłoża przez obciążenie płytą
- [10] *Tompai Z.*: Conversion between static and dynamic load bearing capacity moduli and introduction of dynamic target values, Period. Polytech. Civil Eng., **52**, 2, 2008, 97-102
- [11] *Glinicki S.*: Geotechnika budowlana. Część I, Wydawnictwa Politechniki Białostockiej, Białystok, 1990
- [12] *Boussinesq J.*: Application des potentiels a l'etude de l'équilibre et du mouvement des solides elastiques. Imprimerie L. Daniel, Lille, 1885
- [13] *Gradkowski K.*: Nośność podłoża nawierzchni dróg samochodowych wzmacnianych geosyntetykami. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Budownictwo, z. 151, Warszawa, 2008, 3-85
- [14] *Schleicher F.*: Zur Theorie des Baugrundes. Bauingenieur, **48**, 1926, 931-949
- [15] *Cytowicz N.A.*: Mechanika gruntów. Wydawnictwa geologiczne, Warszawa, 1958
- [16] *Drescher J.*: Bodenmechanische Methoden, w: Bender F.: Angewandte Geowissenschaften. Band III.: Geologie der Kohlenwasserstoffe, Hydrogeologie, Ingenieurgeologie, angewandte Geowissenschaften in Raumplanung und Umweltschutz, Enke, Stuttgart, 1984
- [17] SN 670317b:1998-01 Böden - Plattendruckversuch Ev und Me
- [18] SN 670312b:1998-04 VSS-Gerät für den Plattendruckversuch Ev und Me
- [19] BS 5930:1981 Code of practice for site investigations
- [20] PN-S-02205:1998 Drogi samochodowe. Roboty ziemne. Wymagania i Badania.
- [21] PN-B-03020:1981 Grunty budowlane. Posadowienie bezpośrednie budowli. Obliczenia statyczne i projektowanie
- [22] *Jurik J.W.*: Podstawowe cechy fizyczne i mechaniczne gruntów. Wydawnictwo Budivielnik, Kijów, 1976

ACKNOWLEDGEMENT

The author thanks Mr. Marcin Gumkowski, MSc. for his help in selecting and acquiring literature relating to the subject of this paper.

- [23] CNR BU 146:1992 Determinazione dei moduli di deformazione M_d e M_d' mediante prova di carico a doppio ciclo con piastra circolare
- [25] RIL 836 (NGT39) Guideline for the use of the Light Weight Deflectometer in railway construction, Deutsche Bahn AG, 1997
- [26] *Westergaard H.M.*: New formulas for stresses in concrete pavements of airfields. American Society of Civil Engineers Transactions, **113**, 2340, 1948, 425-444
- [27] *Meyer Z.*: Określenie współczynnika podatności podłoża przy projektowaniu płyt fundamentowych w złożonych warunkach geotechnicznych. XXVIII Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji, tom I, Wisła, 2013, 343-392
- [28] *Łupieżowiec M., Syma S.*: Wykorzystanie płyty dynamicznej w badaniach odbiorczych podłoża i warstw nawierzchni konstrukcji drogowej. Magazyn Autostrady, **5**, 2014, 125-129
- [29] *Kumor M.K., Farmas J., Kumor Ł.A.*: Wybrane związki korelacyjne parametrów zagęszczenia określone metodami VSS i LFG. Budownictwo i Inżynieria Środowiska, **4**, 2013, 271-279
- [30] *Łupieżowiec M., Syma S.*: Błędy popełniane przy realizacji badań VSS i interpretacji wyników. Magazyn Autostrady, **5**, 2015, 61-65
- [31] *Sulewska M.*: Doświadczenia ze stosowania lekkiego ugięciomierza dynamicznego. Drogownictwo, **LVIII**, 11, 2003, 365-367
- [32] *Traczyński K.*: Lekka płyta dynamiczna - badania dla Ikea Targówek. Geotekst Internetowy magazyn geotechniczny, 2008
<http://www.geotekst.pl/artykuly/technologie/lekka-plyta-dynamiczna-badania-dla-ikea-targowek> 01.10.2016
- [33] *Szpikowski M.* i in.: Badanie i ustalenie zależności korelacyjnych dla oceny stanu zagęszczenia i nośności gruntów niespoistych płytą dynamiczną. IBDiM, Warszawa, 2005
https://www.gddkia.gov.pl/userfiles/articles/p/prace-naukowo-badawcze-zrealizow_3435/documents/TG%20152%20BADANIE%20I%20USTALENIE%20ZAL%20KOREL%20DLA%20OCENY.pdf 15.07.2017
- [34] *Krawczyk B., Mackiewicz P.*: Wpływ rodzaju i grubości warstw wzmocnionego podłoża na wartości przemieszczeń rejestrowanych w statycznych i dynamicznych badaniach płytą. Roads and Bridges - Drogi i Mosty, **15**, 2, 2016, 87-102
- [35] *Mackiewicz P., Krawczyk B.*: Wpływ czasu oddziaływania obciążenia w badaniu VSS na identyfikowane parametry podłoża. Roads and Bridges - Drogi i Mosty, **14**, 1, 2015, 19-29
- [36] *Krawczyk B., Mackiewicz P., Szydło A.*: Analiza wpływu rodzaju przeciwwagi na identyfikowalne parametry warstw konstrukcji nawierzchni oraz podłoża w badaniu VSS. Roads and Bridges - Drogi i Mosty, **14**, 2, 2015, 143-157
- [37] *Krawczyk B., Mackiewicz P.*: Wpływ cyklicznych obciążeń w badaniu lekką płytą dynamiczną na identyfikowane parametry podłoża. Roads and Bridges - Drogi i Mosty, **14**, 1, 2015, 5-17