

## PRAKTYCZNE WYKORZYSTANIE BADAŃ DYLATOMETRYCZNYCH

### PRACTICAL USING OF DILATOMETER TESTS

TOMASZ GODLEWSKI<sup>1</sup>

**Abstrakt.** W artykule przedstawiono zagadnienia dotyczące określania i prognozy osiadań na podstawie badań polowych. Przykład wykorzystania dylatometru Marchettiego (DMT) w obiektach, w których wystąpiły nadmierne przemieszczenia konstrukcji, oraz inne zebrane przykłady potwierdzają wykalibrowanie użytej metody.

**Słowa kluczowe:** badania dylatometrem, zależności, próbne obciążenia, osiadania.

**Abstract.** The article presents the issues concerning the forecasts and evaluation of settlement based on field tests. The example of the Marchetti Dilatometer (DMT) application for settlements for different objects in which excessive displacement of the construction occurs, and other collected examples confirm gauging the used method.

**Key words:** dilatometer test, correlations, load test, settlements.

### WSTĘP

W artykule omówiono tematykę dotyczącą wykorzystywania w praktyce wyników uzyskanych z badań polowych, wykonywanych głównie dylatometrem płaskim typu Marchettiego (DMT). Bogaty zbiór danych zgromadzonych w ramach działalności naukowo-badawczej w Instytucie Techniki Budowlanej (ITB) i zdobyte w jej trakcie doświadczenia dotyczą tak cennych z aplikacyjnego punktu widzenia zagadnień, jak poszukiwanie związków korelacyjnych w badaniach na poligonach badawczych czy wyniki obserwacji zachowań różnych obiektów (osiadania). Pozwoliło to m.in. na opracowanie projektu badawczo-rozwojowego (nr 4 T07E 047 30) związanego z ustalaniem zależności regionalnych w metodach *in situ*. Niektóre dane były już częściowo przedstawiane w publikacjach, m.in. w materiałach z XV Krajowej Konferencji Mechaniki Gruntów i Inżynierii Geotechnicznej w Bydgoszczy (Wysokiński i in., 2009) czy na

XXV Konferencji Naukowo-Technicznej z cyklu Awarie Budowlane (Godlewski, 2011). Zróżnicowana tematyka oraz możliwość przedstawienia jej na forum geologii inżynierskiej i środowiskowej skłoniły autora do napisania artykułu podsumowującego zdobyte doświadczenia, w którym omówiono m.in. wykorzystanie w praktyce wyników uzyskiwanych dylatometrem. W użyciu, jak również w środowisku projektantów metoda ta jest ciągle mało znana, stąd potrzeba jej dalszego referowania.

Przykłady różnorodnych praktycznych zastosowań wyników badań DMT przytoczono w celu zwiększenia popularności badań dylatometrycznych, a tym samym stworzenia naukowego forum wymiany doświadczeń. Pozwoli to, zdaniem autora, na dalszy rozwój metody, tak jak w przypadku sondowań statycznych, które są obecnie powszechnie używane i akceptowane przez projektantów.

<sup>1</sup> Instytut Techniki Budowlanej, Zakład Geotechniki i Fundamentowania, ul. Ksawerów 21, 02-656 Warszawa; t.godlewski@itb.pl

Dylatometr płaski typu Marchettiego jest urządzeniem dedykowanym do wyznaczania parametrów odkształceniowych gruntów. Przemawia za tym specyfika przeprowadzania samego pomiaru (Totani i in., 2001). Pompowanie stalowej membrany w gruncie jest testem z kontrolowanym przemieszczeniem, tj. pomiarem ciśnienia przy żądanym przemieszczeniu. Pozwala to na oszacowanie modułu odkształcenia bezpośrednio w gruncie (*in situ*), co jest podstawą wyznaczania przemieszczeń projektowanej konstrukcji. Ustalenie wielkości osiadań oraz ich prognoza są elementami decydującymi o sposobie posadowienia każdej budowli, zwłaszcza projektowanej w trudnych warunkach geologiczno-inżynierskich. W zależności od typu i rangi obiektu granica pomiędzy posadowieniem bezpośrednim a koniecznością wykonania wzmocnienia podłoża lub „ominięcia” problemu przez posadowienie pośrednie jest niewielka. Dla typowych budynków (do 11 kondygnacji) wartość dopuszczalnych osiadań wynosi 5 cm (wg Eurokodu 7, norma PN-B-03020:1981 dopuszczała 7 cm). Bezpośrednia ocena parametrów (w tym modułów) podłoża jest możliwa jedynie na podstawie próbnych obciążeń oraz metod *in situ*.

Wymagania nowych europejskich norm – PN-EN 1997-1:2008 i PN-EN 1997-2:2009 (Eurokod 7) – powodują konieczność wykonywania badań ilościowych (głównie sondowań) podczas dokumentowania warunków podłoża. Stosowane w praktyce korelacje między wynikami sondowania a informacjami o warunkach w podłożu posadawianej budowli wymagają regionalnych ustaleń lub adaptacji do warunków lokalnych. Praktyczne zastosowanie rozwiązań teoretycznych nadal napotyka trudności, ponieważ zarówno na wyniki sondowań, jak i na zachowanie podłoża współpracującego z budowlą wpływa wiele różnych czynników, których pomiar nie jest jeszcze możliwy lub dostatecznie wiarygodny (Wysokiński i in., 2009). Nowe typy sond statycznie wciskanych (takie jak CPTU z piezostóżkiem czy dylatometr) nie mają jeszcze dość dobrych (regionalnych) polskich korelacji do interpretacji wyników lub korelacje te są w zbyt małym stopniu zweryfikowane. Dane z literatury (w tym podane w załącznikach do Eurokodu 7) uzyskane za granicą, na innych gruntach, często nie są zadowalające w warunkach polskich i niekiedy prowadzą do błędnych wniosków – patrz przykład 4.

## WYNIKI PRAC BADAWCZYCH

Dotychczas sondowania stosowano głównie do ustalania profilu podłoża i stanu gruntów, a następnie wyznaczano parametry geotechniczne do obliczeń posadowienia z podanych w normie korelacji, np. z zależności  $q_{c(t)} \rightarrow I_D, I_L^2$ . Ten pośredni sposób zakłada, że dobrze znamy zależność między stanem a modułem, a nie jest to prawdą. Obecnie w wielu ośrodkach prowadzone są intensywne badania nad metodami interpretacji wyników z CPTU i DMT w celu wykorzystania ich do bezpośredniego wyznaczenia parametrów geotechnicznych (np.  $\phi'$ ,  $c_u$ ,  $M$ ).

Przykładem takich działań może być projekt badawczy zrealizowany w ITB (Wysokiński i in., 2009), dotyczący ustalenia zależności regionalnych parametrów z sondowań CPTU i DMT dla różnych typów litogenetycznych gruntów. Na podstawie badań z poligonów badawczych (kilka metod w węzle) oraz obserwacji na obiektach (osiadania) w projekcie przyjęto uzyskane wartości modułu dylatometrycznego jako wartości odniesienia do kalibracji wyników sondowań CPT/CPTU ( $q_c$  i  $R_f$ ) na wartości modułów. Opierając się na wykonanych zestawieniach, na tle wykresu klasyfikacyjnego Schmertmanna nałożono wyinterpolowane przebiegi modułu odkształcenia uzyskane z badań DMT (fig. 1). Jest to propozycja do załącznika krajowego do Eurokodu 7. Ponieważ moduły dylatometryczne dobrze korelują się z wynikami osiadań, uznano, że można przysłać wartości normowe tych modułów podać – zgodnie z Eurokodem 7 – jako

ostrożne oszacowanie wartości obliczeniowych modułów do projektowania. Na podstawie nomogramu można poprzez identyfikację rodzaju gruntu z badań CPTU określić wartość obliczeniową modułu.

Porównanie modułów dylatometrycznych wyznaczonych z badań ze stosowanymi dotychczas wartościami modułów z normy PN-B-03020:1981 dla wydzielonych typów gruntów pokazuje, że jest to wartość odpowiadająca modułom uzyskiwanym z badań edometrycznych (ma to potwierdzenie w literaturze światowej dla innych typów gruntów – np. Totani i in., 2001). Przebiegi linii modułów przedstawione na nomogramie (fig. 1) mają dużą moc statystyczną, zważywszy na ilość wyników uzyskanych z DMT (ok. 2300 oznaczeń).

Doświadczenia światowe (Totani i in., 2001; Monaco i in., 2006) wskazują na dużą przydatność DMT do wyznaczania modułów odkształcenia podłoża. Metoda ta będzie poprawna, jeśli zostanie wykalibrowana i zwalidowana innymi metodami. Najlepszą metodą jest w tym przypadku odniesienie osiadań pomierzonych na obiektach do wartości osiadań uzyskanych z DMT lub wykonanie próbnych obciążeń. Porównanie wartości pomierzonych osiadań na obiektach i uzyskanych z dylatometru z danymi z literatury (26 obiektów) (Monaco i in., 2006) oraz z obserwacji własnych (23 obiekty) przedstawiono na figurze 2. Dla blisko 50 obiektów wyróżniono typ posadowienia (stopa, ława, płyta) oraz grunty w poziomie posadowienia (grunty piaszczyste: Sa, spoiste: Sasi,

<sup>2</sup> Wszystkie symbole w artykule podano zgodnie z odpowiednimi normami (parametry geotechniczne wg PN-EN 1997-2:2009, oznaczenia gruntów wg PN-EN ISO 14688-1:2006, PN-EN ISO 14688-2:2006 i PN-B-02480:1986)

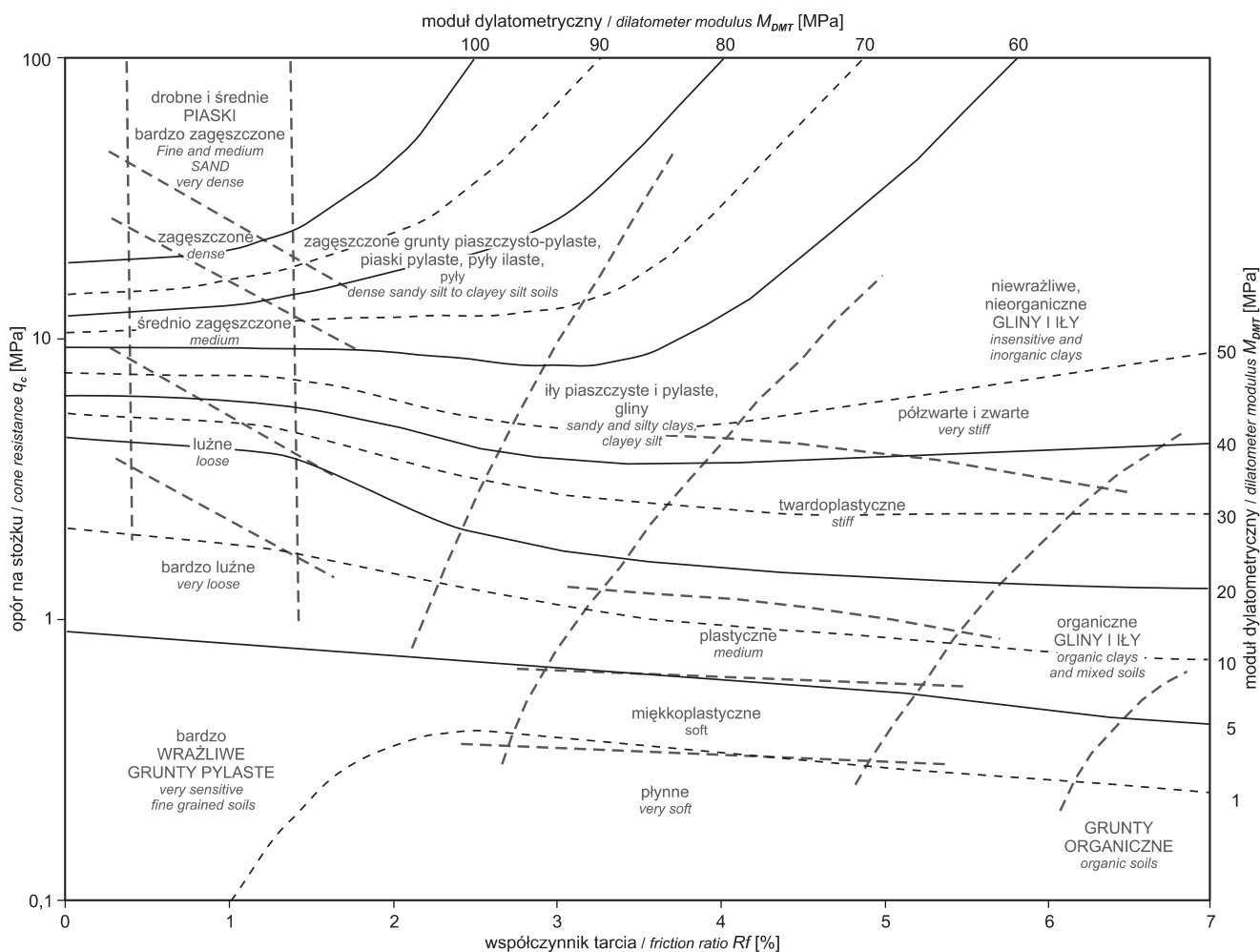


Fig. 1. Nomogram do ustalania wartości modułów ustalone na podstawie sondowań statycznych wg Wysokiński i in., 2009

A nomogram for determination of constrained modulus based on static sounding according to Wysokiński *et al.*, 2009

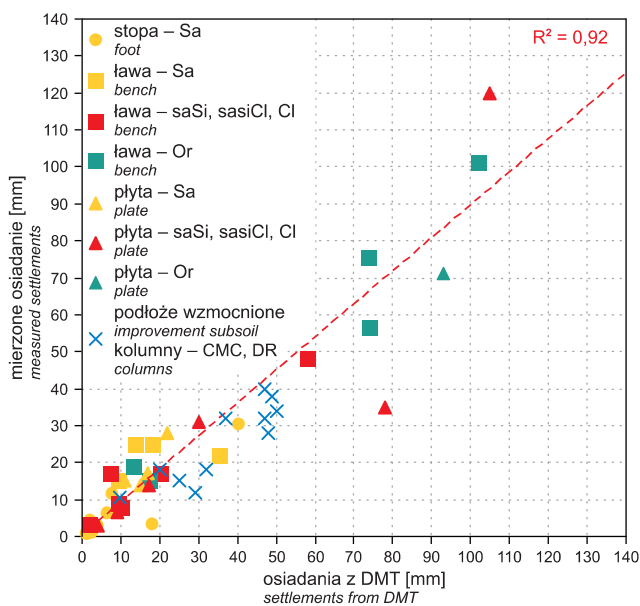


Fig. 2. Krzywa kalibracyjna uzyskana w warunkach polskich na tle pomiarów z literatury (Monaco i in., 2006)

Calibration curve obtained for conditions in Poland relating to measurements from literature (Monaco *et al.*, 2006)

sasiCl, Cl i organiczne: Or). Są to głównie typowe budynki mieszkalne i przemysłowe nieprzekraczające 11 kondygnacji, wyjątek stanowią 2 obiekty drogowe (przyczółek i nasyp). Do zestawienia dodano również zbiór pomiarów podłoża wzmocnionego, gdzie dylatometr wykorzystano do wyznaczenia modułu odkształcenia „kompozytu” gruntu i elementów wzmocnienia (kolumny DR »Dynamic Replacement« – piaszczysto-żwirowe i kolumny CMC »Controlled Modulus Column« – betonowe) – patrz przykład 2 i 3.

Opisany zbiór budynków odznacza się nadzwyczaj wysoką korelacją ( $R^2 = 0,92$ ). Należy dodać, że ten został on ograniczony do obiektów posadowionych bezpośrednio (w tym na podłożu wzmocnionym). W ocenie wielkości i prognozie osiadań dla typowych obiektów dylatometr jest, zdaniem autora, narzędziem dobrze wykalibrowanym. W przypadkach posadowień na gruntach plastycznych i organicznych, gdzie jakość wierceń (wiercenie świdrem spiralnym ciągłym bez rur osłonowych to niestety ciągłe powszechna praktyka) i pobieranych prób nie jest wysoka, jedynie sondowania *in situ* pozwalają na uzyskanie wiarygodnych parametrów do obliczeń projektowych. W dalszej części artykułu przedstawiono kilka przykładów praktycznych zastosowań i możliwości wykorzystania badań dylatometrem.

### PRZYKŁAD 1 – OCENA I PROGNOZA OSIADAŃ

Przykład dotyczy realizacji budynku szkoły, w przypadku której nieprawidłowa ocena podłoża doprowadziła do błędnych decyzji związanych z posadowieniem, czego skutkiem są obserwowane do dziś nadmierne osiadania. Grunty problemowe w podłożu analizowanego obiektu to warstwa osadów zastoiskowych (mad i namulów) w postaci glin pylastych i pyłów o zróżnicowanym stanie: w stropie oceniono go na plastyczny (warstwa IIa), w części spągowej na miękkoplastyczny (warstwa IIb). Całkowita miąższość tej warstwy wynosi 2–3 m. Na etapie rozpoznania podstawowego (dokumentacja 1) ustalono stan gruntów spoistych, a następnie pozostałe parametry na podstawie analizy makroskopowej i badań sondą dającą ocenę jakościową. Dodatkowe rozpoznanie warunków gruntowych wykonano w kolejnej dokumentacji (2), dotyczyło ono głównie właściwości mad występujących w podłożu.

Jak wynika z tabeli 1, w ocenie właściwości mad obie dokumentacje różniły się znacznie. W konsekwencji ustalone

na ich podstawie parametry wytrzymałościowe i odkształceniowe gruntów są także zasadniczo różne. Na potrzeby dalszych analiz wykonano sondowania dylatometryczne, a otrzymane w ten sposób wyniki (wartości modułów) przedstawiono w tabeli 1 oraz – w układzie warstw podłoża na przekroju – na figurze 3.

Uzyskane z dylatometru wartości są 2–3-krotnie niższe od podanych w dokumentacji 1 oraz 3–9 razy niższe od podanych w dokumentacji 2.

W projekcie przewidziano wykonanie budynku o dwóch kondygnacjach, którego podstawowy układ nośny stanowią żelbetowe stropy oraz słupy i ściany. Początkowe rozwiązanie posadowienia zakładało wykonanie na podłożu rodzimym nasypu budowlanego o wysokości 2 m (naciski pod fundamentami ustalono na poziomie ok. 200 kPa). Przyjęta ostatecznie do realizacji koncepcja oparta była na projekcie, który zakładał wzmocnienie kolumnami DSM (*Deep Soil Mixing*) jedynie podłoża fundamentów posadowionych na gruncie rodzimym (w części podpiwniczonej). Wzmocnienie podłoża pod pozostałymi fundamentami uznano za zbędne,

Tabela 1

#### Zestawienie parametrów gruntów wg dokumentacji archiwalnych i badań ITB (wg Godlewski, 2011)

Comparison of ground parameters according to archival documentation and ITB tests (after Godlewski, 2011)

Nr warstwy	Rodzaj gruntu wg PN-B-02480:1986	Stopień zagęszczenia $I_D$		Stopień plastyczności $I_L$		Kąt tarcia wewnętrznego $\varphi_u^{(n)}$ [°]		Spójność $c_u^{(n)}$ [kPa]		Edometryczny moduł ściśliwości pierwotnej $M_0^{(n)}$ [MPa]		Moduł dylatometryczny $M_{DMT}$ [MPa]
		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	
Wg dokumentacji												
0	N	–	–	–	–	–	29	–	–	–	–	80
I	Pd/Ps/Pg	0,40	0,40			31	31			50	45	40
IIa	Gπ/Π			0,45	0,20	10	16	9	15	17	28	9,5
IIb	Π/Gπ			0,75	0,30	5	12	5	10	9	25	2,8
III	Ps/Pd+ż	0,45	0,45			32	32			80	80	60

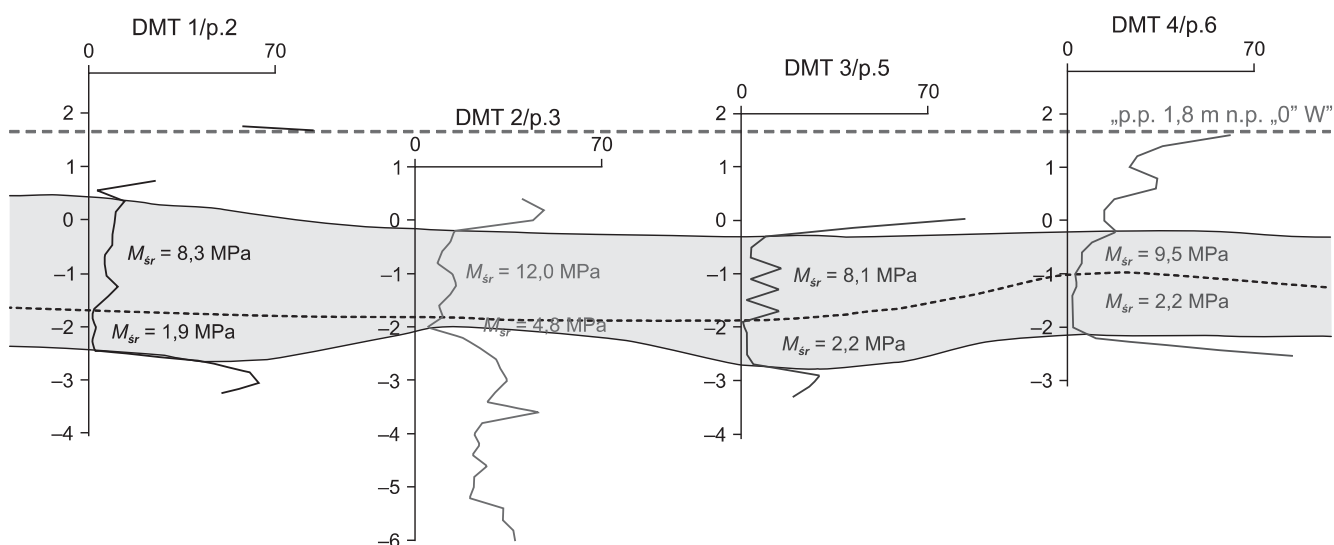


Fig. 3. Przekrój geotechniczny przez podłoże budynku szkoły, wskazano poziom posadowienia i przebieg mad

Geotechnical cross-section through the subsoil of a schoolhouse, a level of bedding and a course of fluvisol are indicated

ponieważ rozwiązania w projekcie wzmocnienia bazowały na dokumentacji 2, w której stan gruntów zastoiskowych uznano za znacznie korzystniejszy niż w dokumentacji 1, oraz na obserwacji 3–4-kondygnacyjnych budynków, posadowionych bezpośrednio na tego typu gruntach (madach), które nie doznały istotnych osiadań. Zgodnie z zaleceniami projektu podczas budowy i w czasie użytkowania budynku szkoły prowadzono pomiary osiadań jego konstrukcji. Analiza całkowitych osiadań wskazuje, że osiadania fragmentu konstrukcji posadowionego na fundamentach podbitych kolumnami DSM (ściana wschodnia, klatka schodowa) są małe (2–4 mm), co dowodzi dużej skuteczności wykonanego wzmocnienia podłoża. Osiadania pozostałych fragmentów konstrukcji, posadowionych na podłożu niewzmocnionym, są znacznie większe – obecne wynoszą ok. 40–100 mm.

Wyniki pomierzonych osiadań wskazują, że przyczyny wystąpienia znacznych osiadań podłoża należy szukać przede wszystkim w odkształcalności występujących w nim mad. Świadczą o tym zarówno długi czas stabilizacji osiadań, jak i znaczne ich przyrosty, jakie wystąpiły po zakończeniu budowy. Aby potwierdzić ten wniosek, przeprowadzono obliczenia osiadań podłoża z modułami odkształceń mad wynikającymi z badań dylatometrycznych. Osiadania wyznaczono jako sumę osiadań spowodowanych wykonaniem nasypu i obciążeniem podłoża konstrukcją. Do obliczeń przyjęto stopę o wymiarach  $2,5 \times 2,5$  m i naciskach na grunt 200 kPa. Wyniki obliczeń (tab. 2) porównano z prognozą osiadań ustaloną na podstawie aproksymacji pomierzonych osiadań.

Wartości obliczeń osiadań końcowych otrzymane na podstawie modułów z DMT są zbieżne z wynikami uzyskanymi z przebiegu funkcji prognozowanych osiadań konstrukcji (przy założeniu okresu stabilizacji osiadań na ok. 10–15 lat).

#### PRZYKŁAD 2 – OCENA SKUTECZNOŚCI WZMOCNIENIA METODĄ KOMPAKCJI DYNAMICZNEJ

Problematykę wykonywania badań odbiorczych podłoża wzmocnionego w technologii wymiany dynamicznej opisano szczegółowo w publikacji Godlewskiego (2007). Podstawowym problemem jest ocena jakości wykonanego wzmoc-

**Tabela 2**

#### Zestawienie maksymalnych osiadań pomierzonych ( $s_p$ ), prognozowanych przyrostów osiadań ( $\Delta s$ ) i osiadań całkowitych ( $s_c$ ) oraz z pomiarów DMT

Comparison of maximum measured settlements ( $s_p$ ), forecast increases in settlements ( $\Delta s$ ) and total settlements ( $s_c$ ) and from DMT measurements

Lokalizacja	$s_p$ [mm]	$\Delta s$ [mm]	$s_c$ [mm]	Pomiary DMT
Sala gimnastyczna	-76,5	-32,5	-109	-102
Aula	-61,7	-23,2	-84,9	-78,9
Część klasowa	-47,7	-12,3	-60,0	-73,7

nienia w kontekście założeń projektowych w trakcie jego realizacji. Najczęściej prowadzone są badania jakościowe: wiercenia i odkrywki – w celu ustalenia geometrii kolumn, sondowania dynamiczne – pomocne głównie w ocenie zakresu wymiany gruntu, natomiast z uwagi na charakter użytego materiału (mieszanki piaszczysto-żwirowe) uzyskana ocena zagęszczenia ( $I_D$ ) ma często charakter jakościowy. Miarodajną ocenę jakości wykonania uzyskuje się poprzez próbne obciążenia i pomiar osiadań. Badania te są jednak prowadzone sporadycznie i w sposób ograniczony z uwagi na czasochłonność i koszty. Z dylatometru w sposób bezpośredni otrzymujemy wartości modułów odkształcenia. Jest to znakomita metoda pozwalająca zarówno na dokładne ustalenie zasięgu kolumn, jak i uzyskanie w sposób ciągły informacji o jakości kolumny w sposób ilościowy – w wartościach modułu odkształcenia (fig. 4), który w założeniach projektowych jest jednym z głównych kryteriów odbiorczych. Technika przeprowadzania pomiaru i odporność łopatkki na uszkodzenia pozwalają na stosowanie tej metody nawet w kolumnach wykonanych z materiałów ze znaczną ilością kruszywa.

#### PRZYKŁAD 3 – PROJEKTOWANIE POSADOWIEŃ NA PODŁOŻU WZMOCNIONYM

Przykładem wykorzystania wyników badań DMT w projektowaniu posadowień na podłożu wzmocnionym jest budynek mieszkalny usytuowany w obrębie tzw. rynny żoliborskiej wypełnionej utworami jeziornymi – namułami i gytiami. Miąższość tych osadów (warstwa III) pod obiektem wynosi ok. 8–10m (fig. 5).

Planowany obiekt to wielokondygnacyjny (od 6 do 12 kondygnacji z dwoma poziomami garaży) zespół budynków (A i B), który wywiera realne obciążenie zastępcze na grunt w wysokości do 220 kPa, lokalnie – pod klatkami schodowymi – do 400kPa.

W celu zastąpienia posadowienia pośredniego tańszym posadowieniem na wzmocnionym podłożu przedstawiono program badań geotechnicznych i próbnych obciążeń, aby określić wielkości osiadań gruntu nieulepszonoego i gruntu wzmocnionego. Badania te miały wykazać przydatność metody CMC do posadowienia projektowanego budynku. Na terenie budowy wykonano próbne obciążenia podłoża bez wzmocnienia i po wykonaniu wzmocnienia dla grupy kolumn CMC. Badanie podłoża wzmocnionego obejmowało obciążenie i odciążenie 9 kolumn w rozstawie  $2 \times 2$  m i płycie  $5 \times 5$  m (fig. 6). Obserwacje prowadzono w okresie ok. 1–1,5 miesiąca. Balast był układany etapami, z pomiarami wykonywanymi na bieżąco. Maksymalnie ułożono ok. 300 T, uzyskując naprężenie na grunt w granicach 120–150 kPa.

Wartość osiadań płyty opartej na kolumnach w stosunku do płyty posadowionej bezpośrednio zmniejszyła się ponad 5 razy. Osiadania płyty na kolumnach wyniosły średnio ok. 4 mm (3–6,2 mm).

Wykonane na tej podstawie obliczenia wykazały, że wartość modułu odkształcenia z badań DMT, przyjęta dla namu-



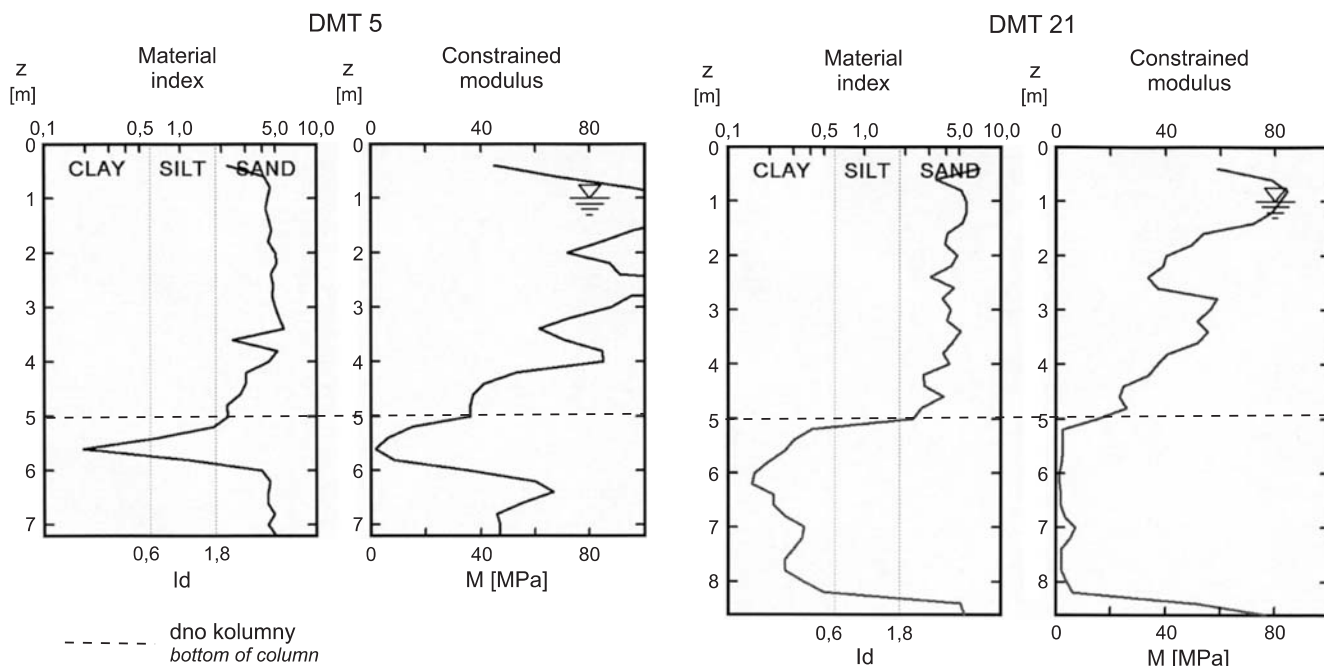


Fig. 4. Wyniki badań dylatometrycznych wykonanych w kolumnach. Z lewej kolumna oparta na podłożu nośnym, z prawej kolumna wisząca (wg Godlewski, 2007)

Results of DMT tests executed in columns. On the left: column on the bearing soil, from the right: hanging column (after Godlewski, 2007)

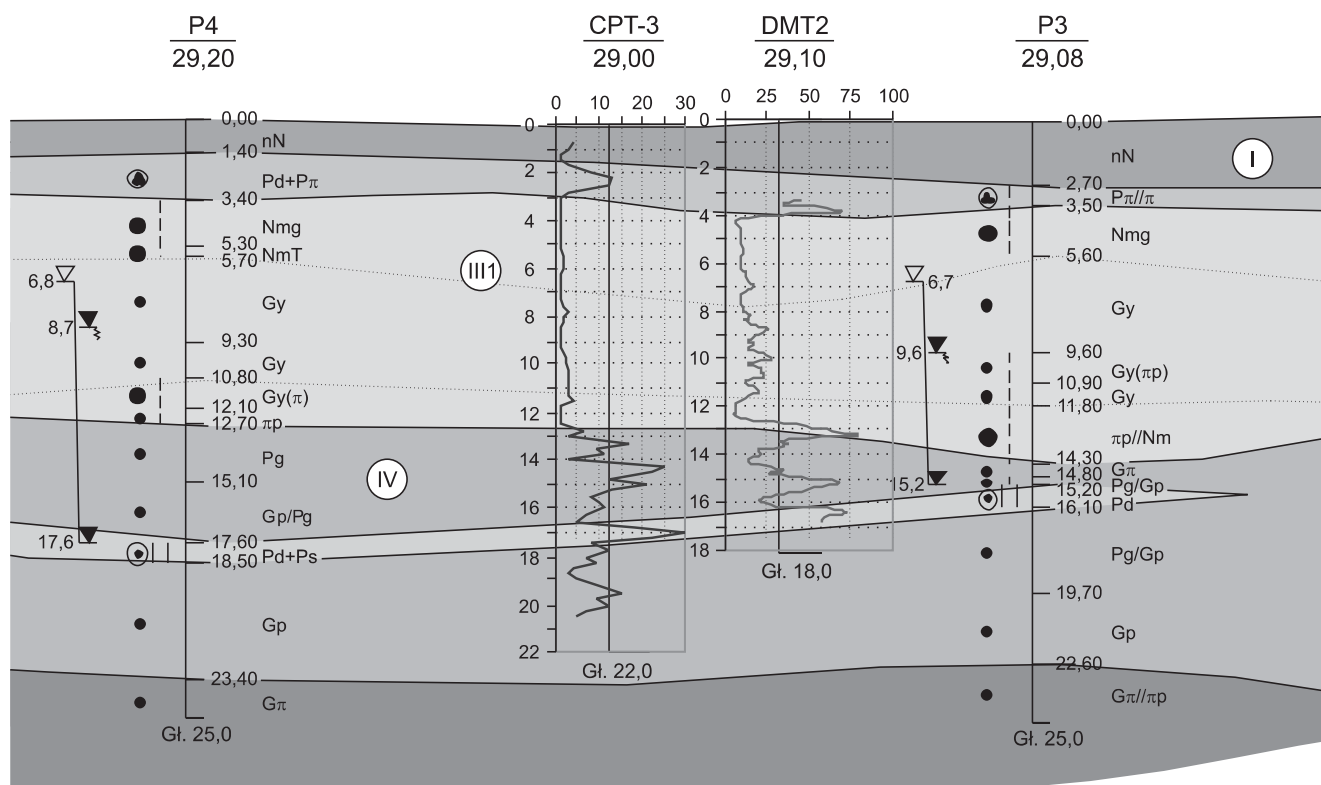


Fig. 5. Przekrój geotechniczny pod projektowanym budynkiem (wg Godlewski i in., 2007). I, III1, IV – numery warstw

Geotechnical cross-section below the designed building (after Godlewski *et al.*, 2007). I, III1, IV – numbers of layers

łów i gytii na poziomie 15 MPa, poprawnie odwzorowuje odkształcalność analizowanego podłoża. Opierając się na uzyskanych danych oraz po przeprowadzeniu dodatkowych

próbnych obciążeń pojedynczych kolumn przeprowadzono obliczenia MES (Metoda Elementów Skończonych), modelując zachowanie „kompozytu” gruntu i kolumn. Następnie

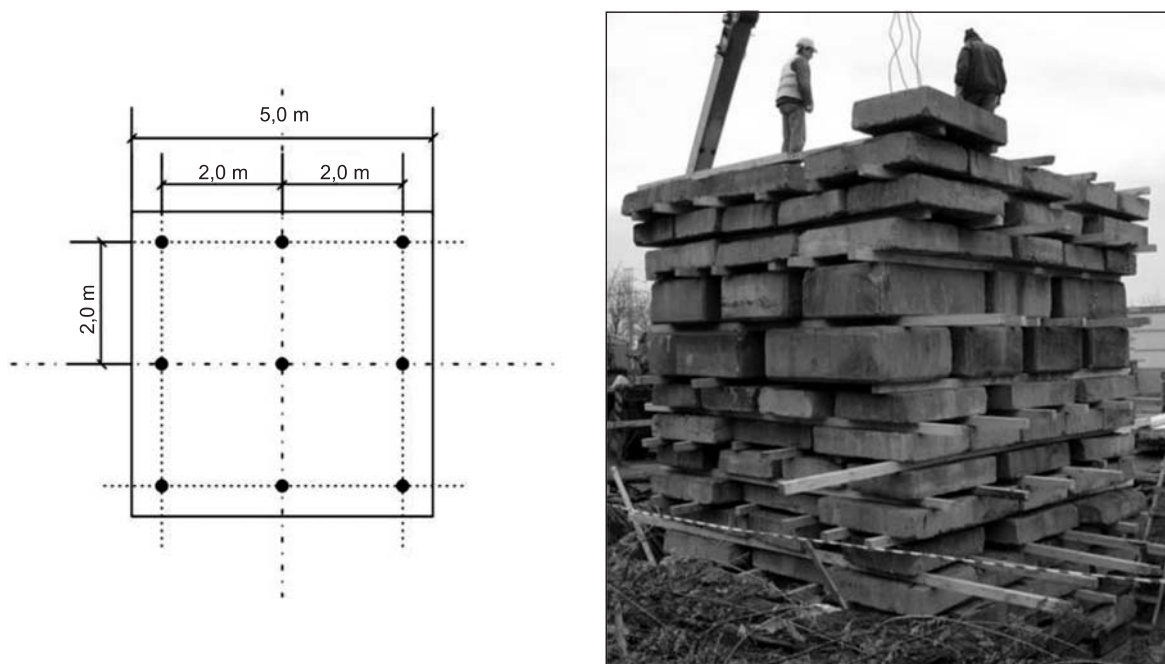


Fig. 6. Rozstaw kolumn (z lewej) oraz rozmiary i widok stanowiska do próbnych obciążeń (z prawej)

A set of columns (from left) and the sizes and view of the position for load tests (from right)

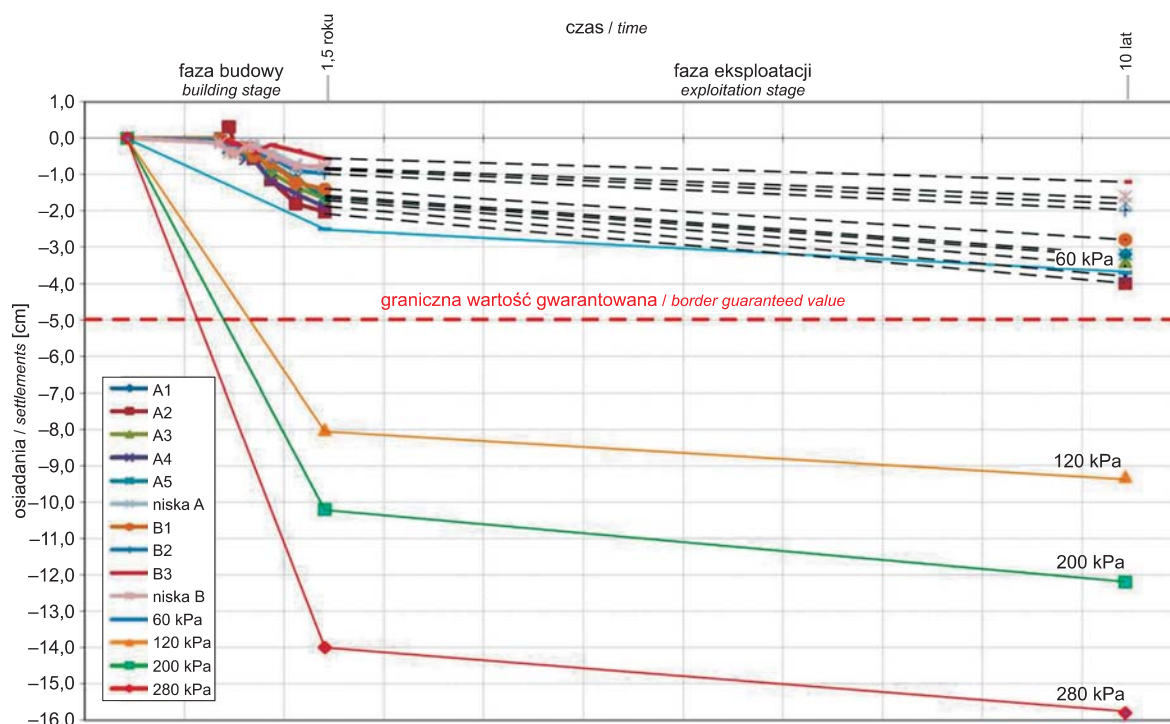


Fig. 7. Efektywność zastosowanej metody wzmocnienia na podstawie wyników osiadań w odniesieniu do osiadań podłoża bez wzmocnienia dla obciążeń 60–280 kPa

Effectiveness of the applied ground improvement method with reference to the results of settlements of subsoil without improvement for loads 60–280 kPa

przystąpiono do realizacji wzmocnienia. W projekcie przewidziano posadowienie budynku na płycie żelbetowej w wyodrębnionych strefach dylatacyjnych. Podział na strefy dylatacyjne ustalono, opierając się na różnicach w wysoko-

ściach budynku i dostosowując rozstaw kolumn w zależności od wielkości naprężeń. Analiza rzeczywistych osiadań tak zrealizowanego budynku (fig. 7) wykazała dużą zgodność przyjętych założeń (moduły z DMT do obliczeń numerycz-

nych) oraz skuteczność zastosowanej metody wzmocnienia podłoża (kolumny CMC). Maksymalne średnie osiadania zanotowano dla obszaru A2 (20 mm), minimalne w obszarze B3 (6 mm). Jednocześnie stwierdzono wyraźną stabilizację przebiegu osiadań pomierzonych w obszarach A i B. Świadczy to o zakończeniu procesu konsolidacji związanym z fazą budowy.

#### PRZYKŁAD 4

##### – WERYFIKACJA WARUNKÓW GRUNTOWYCH

Przykład dotyczy oceny odkształcalności gruntów występujących w podłożu obiektów oczyszczalni ścieków (bio-reaktory i osadniki) oraz wyznaczenia wielkości osiadań ich konstrukcji posadowionych na gruntach aluwialnych (piaski rzeczne). Istotne było określenie osiadań zbiorników w trakcie próby szczelności oraz podczas eksploatacji i ustalenie na tej podstawie, czy w przyjętym sposobie posadowienia podłoże wymagać będzie wzmocnienia. Wykonanie dodatkowych badań DMT i próbnych obciążeń uznano za celowe ze względu na rozbieżności stwierdzone na etapie dokumentowania warunków gruntowych (fig. 8).

Wykres przedstawiony na figurze 8 dotyczy wartości modułu odkształcenia ( $E$ ) wyinterpretowanego różnymi metodami (DP i CPT) i korelacji (DIN, Eurokod 7, PN, własne) dla tych samych wyników uzyskanych z jednego punktu badawczego w aluwialach rzecznych. Dla projektowanego obiektu rozrzut wielkości osiadań ustalonych z wyinterpretowanych modułów wyniósł od 4 do 11 cm! W celu weryfikacji rzeczywistych warunków w podłożu wykonano próbne obciążenie (fig. 9), a uzyskane wyniki osiadań wykorzystano do obliczeń osiadań projektowanej konstrukcji.

Osiadania konstrukcji obciążającej obliczono zgodnie z zaleceniami normy PN-B-03020:1981. W obliczeniach przyjęto, że głębokość wykopu pod konstrukcją obciążającą wynosi 1,0 m, maksymalny nacisk na podłoże jest równy 130 kPa, a konstrukcja obciążająca stanowi fundament wiotki. Moduły odkształcenia gruntu ustalono na podstawie wyni-

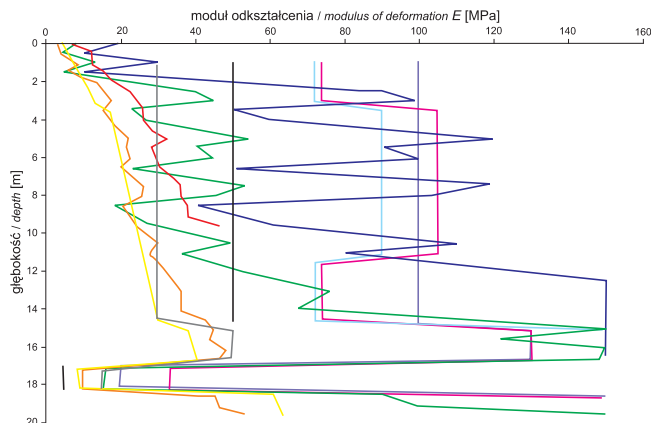


Fig. 8. Rysunek poglądowy obrazujący skalę rozrzutu wartości modułu odkształcenia wyinterpretowanego dla jednego punktu badawczego wg różnych dostępnych metod (wg Godlewski, 2011)

A demonstrative drawing depicting the scale of the dispersion of the deformation module value interpreted according to available different methods for one research point (after Godlewski, 2011)

ków badań dylatometrem wykonanych w sąsiedztwie konstrukcji obciążającej. Uzyskano w ten sposób średnią wartość modułu dylatometrycznego (ok. 45 MPa). Ustalona na podstawie obliczeń wartość całkowitych osiadań konstrukcji obciążającej wynosi  $s_o = 17$  mm. Otrzymane wyniki odniesiono do rzeczywistych wyników osiadań konstrukcji obciążającej (fig. 10).

Zgodnie z wykresem jako ostateczne osiadania do dalszych analiz przyjęto następujące wartości:  $s_p = 17$  mm (wartość maksymalna średnich osiadań konstrukcji obciążającej) oraz  $s_{p,t} = 13$  mm (wartość osiadania trwałego). Porównanie wartości obliczonych z pomierzonymi ( $s_o/s_p$ ) wskazuje, że moduły odkształcenia gruntu ustalone na podstawie badań dylatometrem można uznać za miarodajne do prognozy osiadań. Uzyskana pełna zgodność  $s_o$  i  $s_p$  jest oczywiście przypadkowa.

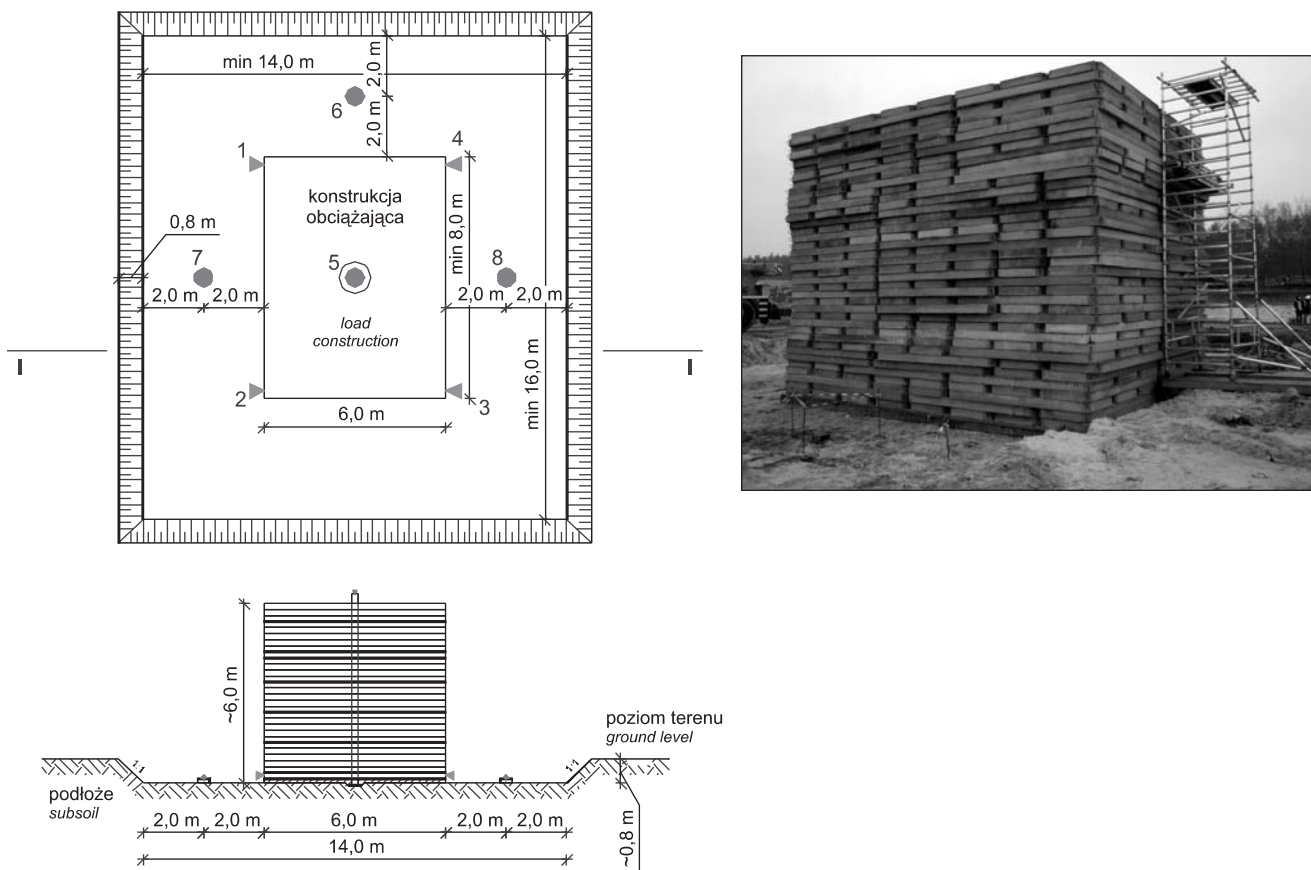
## ROZSZERZENIE METODY DMT

Obecnie oprócz standardowego badania DMT coraz częściej wykonuje się testy wykorzystujące pomiary geofizyczne, przeprowadzane za pomocą dylatometru z końcówką sejsmiczną (SDMT). Badania te pozwalają na wyznaczenie profilu sztywności gruntu w funkcji modułu ścinania ( $G_o$ ) przez pomiar prędkości propagacji fali poprzecznej ( $V_s$ ). Pionierskie prace z tego zakresu są wykonywane we współpracy z zespołem Instytutem Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej Wydziału Geologii Uniwersytetu Warszawskiego. Metoda SDMT jest walidowana za pomocą metod geofizyki powierzchniowej (CSWS – *Continuous Surface Wave System* i SASW – *Spectral Analysis of Surface Waves*). Dla typo-

wych gruntów występujących w Polsce badane są nowe związki korelacyjne, w których poszukuje się możliwości szacowania parametru sprężystości  $G_o$  na podstawie standardowych wyników z DMT opisanych przez Barańskiego i in. (2010). Autorów tych zainspirowały bardzo ciekawe rezultaty uzyskane dla różnych gruntów zamieszczone w pracy Monaco i in. (2009). W publikacji Barańskiego i in. (2010) w analogiczny sposób wykorzystano wyniki z SDMT do wykreślenia związków korelacyjnych dla badanych typów gruntów (fig. 11).

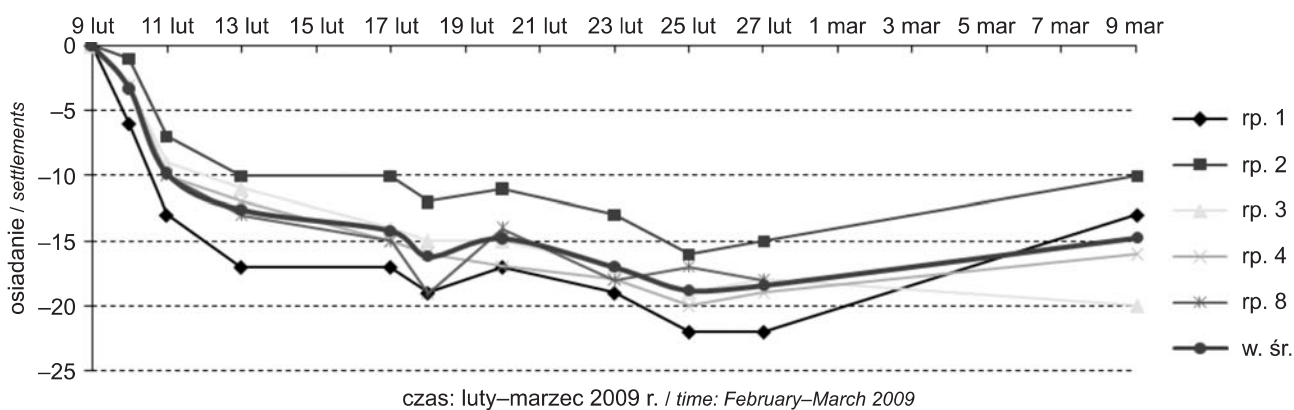
Ilość zebranych danych nie pozwala jeszcze na podanie końcowych wzorów krzywych korelacyjnych. Z kolei otrzy-





**Fig. 9. Schemat konstrukcji obciążającej (widok z góry i przekrój) – z lewej, z prawej widok konstrukcji obciążającej po ułożeniu na płycie (10 × 10m), wysokość ok. 6m**

A scheme of the load structure (the view from above and the cross-section) – from left; from right a view of the load structure after laying on the plate (10 × 10m), the height is ca 6 m



**Fig. 10. Wykres osiadań konstrukcji obciążającej – repery 1–4 i 8, osiadańia średnie**

A graph of settlements of the load structure – benchmarks 1–4, 8, average settlements

mane rozkłady wyraźnie potwierdzają podany w publikacji Monaco i in. (2009) fakt, że dla gruntów przekonsolidowanych (OC) rozrzut wartości wskaźnika  $G_o/M_{DMT}$  (moduł ściskania/moduł dylatometryczny) na osi  $K_D$  jest znaczny i waha się w granicach 0,5–20 dla glin zwałowych, 0,5–5 dla iłów płoceńskich, a w przypadku nieprzekonsolidowanych (NC)

piasków rzecznych wartości te są niskie (nie więcej niż 2). Opisane zagadnienia wymagają dalszych badań i zebrania większej ilości danych. Konieczność określania miarodajnych wartości modułu  $G_o$  wykorzystywanych do obliczeń numerycznych (MES) w celu poprawnego opisu współpracy konstrukcji z podłożem wyznacza kierunek dalszych prac.

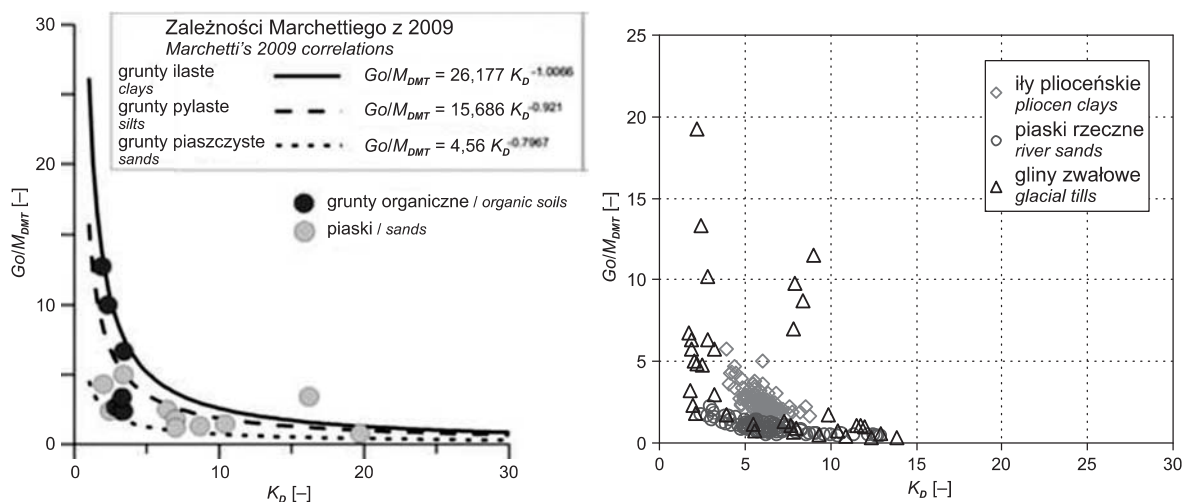


Fig. 11. Wykres wskaźnika  $G_o/M_{DMT}$  vs.  $K_D$  wg Monaco i in. (2009) i dla wybranych typów gruntów (Barański i in., 2010)

A graph of the  $G_o/M_{DMT}$  indicator vs  $K_D$  according to Monaco *et al.* (2009) and for selected soil types (Barański *et al.*, 2010)

## PODSUMOWANIE

Praktyczne wykorzystanie badań z dylatometru potwierdza przydatność tej metody w szacowaniu wielkości i prognozie osiadań. Otrzymywane wartości modułów dylatometrycznych w typowych zadaniach posadowień bezpośrednich odpowiadają modułom obliczonym metodą wstecz (*back analysis*) – podobnie jak moduły ściśliwości uzyskane w normie PN-B-03020:1981. Określone na tej podstawie wielkości osiadań są zbliżone do rzeczywistych przemieszczeń rejestrowanych na obiektach, co jest szczególnie ważne w przypadku gruntów silnie odkształcalnych, dla których moduły uzyskane z badań laboratoryjnych są często znacznie zaniżone z uwagi na trudność w pozyskaniu próbek wysokiej jakości.

Poprawne stosowanie metody i nowych korelacji wymaga weryfikacji i potwierdzania innymi badaniami lub odniesienia do pomiarów rzeczywistych przed implementacją do warunków polskich.

Analiza przykładów wykazała, że wykorzystanie wyników z badań DMT pozwala na poprawną weryfikację warunków podłoża, wybór efektywnej metody wzmocnienia podłoża, ocenę skuteczności jej wykonania i posadowienie bezpośredniego obiektu w złożonych warunkach gruntowych.

W każdym z wymienionych przypadków punktem wyjścia analizy projektowej powinno być określenie wymagań dotyczących osiadań konstrukcji poparte starannym rozpoznaniem gruntowym, przede wszystkim bazującym na badaniach *in situ*. Podczas wykonywania badań DMT, dzięki odpowiedniemu podejściu projektantów i inwestora, można znacznie obniżyć koszty posadowienia. W tym celu konieczne jest dalsze rozpowszechnianie metody i zwiększanie zakresu jej stosowania oraz poszerzanie bazy danych, w tym o wyniki badań dylatometrem z końcówką sejsmiczną (SDMT).

## LITERATURA

- BARAŃSKI M., GODLEWSKI T., SZCZEPAŃSKI T., 2010 — Determination of soil stiffness parameters on chosen test sites, using in situ seismic methods. *W*: Soil parameters from in situ and laboratory tests. Sci. Conf. Natural and Technical Problems of Environmental Engineering, 4th Int. workshop. Poznań, 27–29 September 2010: 149–157. Wydaw. Uniw. Przyrod. w Poznaniu.
- GODLEWSKI T., 2007 — Metody badań odbiorczych podłoża gruntowego wzmocnionego kolumnami wymiany dynamicznej. *Geologos*, **11**: 173–183.
- GODLEWSKI T., 2011 — Badania dylatometrem jako metoda prognozy osiadań na przykładzie awarii geotechnicznej budynku szkoły. *W*: Mat. XXV Konf. Nauk. Tech. Awarie Budowlane.

- Szczecin–Międzyzdroje, 24–27 maja 2011: 663–670. Wydaw. Zachodniopomor. Uniw. Techn. w Szczecinie.
- GODLEWSKI T., FUDALI J., SALONI J., 2007 — Wzmocnienie podłoża budynku metodą kolumn betonowych (CMC). *Inżynieria i Budownictwo*, **63**, 12: 661–663.
- MONACO P., TOTANI G., CALABRESE M., 2006 — DMT – predicted vs. observed settlements: a review of the available experience. *Proc. Sec. Int. Flat Dilatometer Conf.*: 275–280. Washington, USA.
- MONACO P., MARCHETTI S., TOTANI G., MARCHETTI D. 2009 — Interrelationship between small strain modulus  $G_0$  and operative modulus. *Int. Conf. on Performance-Based Design in Earthquake Geotechnical Engineering*. Tokyo, Japan [<http://www.marchetti-dmt.it/pdf/monaco%20IS-Tokyo%202009%20Interrelationship%20Go-operative%20modulus.pdf>].
- PN-B-02480:1986 — Grunty budowlane. Określenia, symbole, podział i opis gruntów.
- PN-B-03020:1981 — Grunty budowlane. Posadowienie bezpośrednio budowli. Obliczenia statyczne i projektowanie.
- PN-EN 1997-1:2008 — Eurokod 7. Projektowanie geotechniczne. Część 1. Zasady ogólne.
- PN-EN 1997-2:2009 — Eurokod 7. Projektowanie geotechniczne. Część 2. Rozpoznanie i badanie podłoża gruntowego.
- PN-EN ISO 14688-1:2006 — Badania geotechniczne. Oznaczenie i klasyfikowanie gruntów. Część 1. Oznaczenie i opis.
- PN-EN ISO 14688-2:2006 — Badania geotechniczne. Oznaczenie i klasyfikowanie gruntów. Część 2. Zasady klasyfikowania.
- TOTANI G., MARCHETTI S., MONACO P., CALABRESE M., 2001 — Use of the Flat Dilatometer Test (DMT) in geotechnical design. *Int. Conf. on In-Situ Measurement of Soil Properties & Case Histories*. Bali, Indonesia [[http://www.marchetti-dmt.it/pdf/totani\\_bali2001.pdf](http://www.marchetti-dmt.it/pdf/totani_bali2001.pdf)].
- WYSOKIŃSKI L., GODLEWSKI T., WSZĘDYRÓWNY-NAST M., 2009 — Zależności regionalne parametrów geotechnicznych podłoża na podstawie sondowań CPTU i DMT. *W: Problemy geotechniczne i środowiskowe z uwzględnieniem podłoża ekspansywnych*: 235–242. Wydaw. Uczelniane UTB, Bydgoszcz.

## SUMMARY

The article presents the experience collected from dilatometer tests (DMT) application in soil-structure interaction issues. The use of this method in practice was preceded by the research and development project (No. 4 T07E 047 30), in which this method was tested. The results are proposals of new relations and a graph. The presented test method is useful mainly for settlements evaluation. It also allows

correct verification of geological-engineering subsoil conditions what has been confirmed by practical examples presented in this paper. The DMT effectiveness caused the further development of this method. Now it also provides the stiffness profile of the ground (Go modulus) due to the seismic measurements.

