XXV Konferencja Naukowo-Techniczna, Międzyzdroje 24-27 maja 2011
awarie budowlane 2011

TOMASZ GODLEWSKI, *t.godlewski@itb.pl*
Instytut Techniki Budowlanej, Zakład Geotechniki i Fundamentowania

BADANIA DYLATOMETREM JAKO METODA PROGNOZY OSIADAŃ NA PRZYKŁADZIE AWARII GEOTECHNICZNEJ BUDYNKU SZKOŁY

DILATOMETER TESTS AS THE METHOD OF THE FORECAST OF SETTLEMENTS ON THE EXAMPLE OF THE SCHOOLHOUSE AS THE GEOTECHNICAL FAILURES

Streszczenie Artykuł przedstawia zagadnienia dotyczące oceny i prognozy osiadań na podstawie badań polowych. Przykład wykorzystania DMT dla budynku szkoły, w którym wystąpiły nadmierne przemieszczenia konstrukcji oraz inne zebrane przykłady potwierdzają wykalibrowanie użytej metody. Potwierdzeniem prognozy jest ekstrapolacja obserwacji wieloletnich w zbliżonych warunkach.

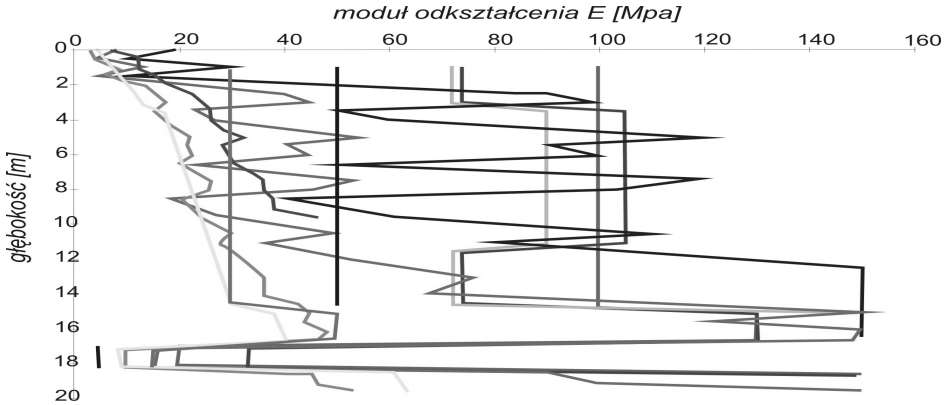
Abstract The article presents the issues concerning the forecasts and evaluation of settlement based on field tests. The example of the DMT application for settlements for the schoolhouse in which excessived displacement of the construction appear, and other collected examples confirm gauging the used method. An extrapolation of long-term observation is confirm the forecast in similar conditions.

1. Wstęp

Ustalenie wielkości osiadań oraz ich prognoza jest dla każdej budowli projektowanej na gruntach „słabonośnych” [1] jest elementem decydującym o sposobie posadowienia. W zależności od typu i rangi obiektu granica pomiędzy posadowieniem bezpośrednim, a koniecznością wykonania wzmocnienia podłoża lub „ominięcia” problemu posadowieniem pośrednim, jest niewielka. Dla typowych budynków (do 11 kondygnacji) wartość dopuszczalnych osiadań wynosi 5 cm (wg Eurokodu [7], norma PN-81/B-03020 [6] dopuszczała 7 cm). Bezpośrednia ocena parametrów (w tym modułów) podłoża jest możliwa na podstawie próbnych obciążeń oraz za pomocą metod in situ. Wymagania nowych europejskich norm PN-EN-1997-1 i -2 [7] powodują konieczność wykonywania badań ilościowych do dokumentacji geotechnicznych. Badania te to głównie sondowania in situ. Główne zalety badań polowych są powszechnie znane [2], [3], [9]: stały zapis profilu podłoża, bezpośrednia ocena parametrów (pomiary w warunkach naprężeń in situ), ograniczenie ilości badań laboratoryjnych oraz wierceń i tym samym zmniejszenie ogólnego kosztu oraz czasu badań.

Stosowane w praktyce korelacje między wynikami sondowania, a informacjami o warunkach geotechnicznych posadowienia budowli wymagają regionalnych ustaleń lub adaptacji do warunków lokalnych. Praktyczne zastosowanie rozwiązań teoretycznych napotyka jeszcze na 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 [9]. Nowe typy sond statycznie wciskanych z piezostożkiem (CPTU) oraz dylatometr płaski typu Marchettiego (DMT) nie mają jeszcze

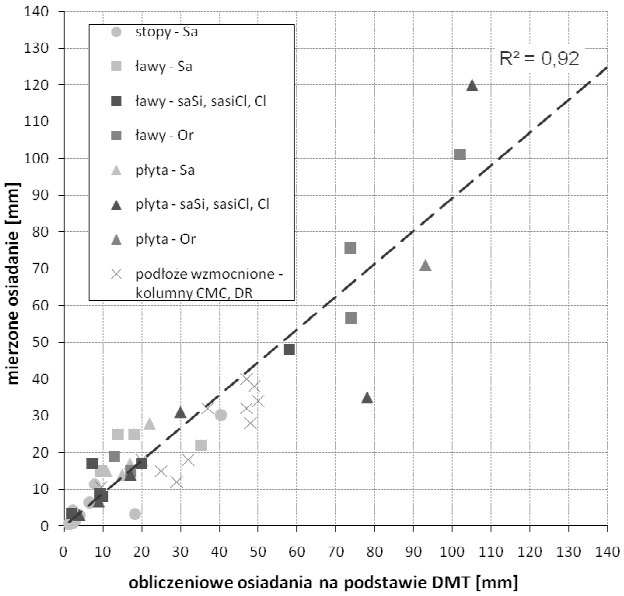
dość dobrych (regionalnych) polskich korelacji do interpretacji wyników lub są one w zbyt małym stopniu zweryfikowane. Dane z literatury (w tym podane w załącznikach EC7) uzyskane za granicą na innych gruntach, często nie są zadawalające w warunkach polskich i niekiedy prowadzą do błędnych wniosków – rys. 1.



Rys. 1. Rysunek poglądowy obrazujący skalę rozrzutu wartości modułu odkształcenia wyinterpretowanego wg różnych dostępnych metod dla jednego punktu badawczego [9]

Wykres dotyczy wartości modułu ściśliwości wyinterpretowany z różnych metod (DP i CPT) i korelacji (DIN, EC7, PN, własne) dla tych samych wyników uzyskanych z jednego punktu badawczego w aluwiach rzecznych. Rozrzut wielkość osiadań ustalonych z wyinterpretowanych modułów dla projektowanego obiektu wyniosła od 4 cm do 11 cm.

Dotychczas sondowania stosowano głównie do ustalania profilu podłoża i stanu gruntów. Parametry geotechniczne do obliczeń posadowienia ustala się z podanych w normie korelacji np. z zależność $q_{c(t)} \rightarrow I_D, I_L$. Ta pośrednia droga zakłada, że dobrze znamy zależność między stanem, a modułem, a nie jest to prawdą. Obecnie prowadzone są intensywne badania przez wiele ośrodków nad metodami interpretacji wyników z CPTU i DMT w celu wykorzystania ich do bezpośredniego wyznaczenia parametrów geotechnicznych (np. φ, c_u, E). Przykładem takich działań może być projekt badawczy zrealizowany w ITB [9]. Doświadczenia światowe [3], [4] wskazują na dużą przydatność DMT do wyznaczania modułów odkształcenia podłoża. Metoda jest poprawna o ile jest wykalibrowana i zwalidowana (innymi metodami). Najlepszą metodą jest odniesienie osiadań pomierzonych na obiektach do wartości osiadań obliczonych w oparciu o wyniki z DMT – przykład takiego porównania przedstawia rys. 2. Dla zebranych blisko 50 obiektów (26 obiektów z literatury, pozostałe to obserwacje własne) na wykresie wyróżniono ich sposób posadowienia (stopy, ławy, płyta) oraz rodzaj gruntów w poziomie posadowienia (grunty piaszczyste: Sa, spoiste: Sasi, sasiCl, Cl i organiczne: Or). Zbiór stanowią typowe budynki mieszkalne i przemysłowe nieprzekraczające 11 kondygnacji, wyjątek to 2 obiekty drogowe (przyczółek i nasyp). Dodano również zbiór pomiarów dla podłoża wzmocnionego, gdzie dylatometr wykorzystano do wyznaczenia modułu odkształcenia „kompozytu" – gruntu i elementów wzmocnienia (kolumny CMC – betonowe i DR – piaszczysto-żwirowe). Opisany zbiór obiektów wykazuje nadzwyczaj wysoką korelację $y = 0{,}92\,x$. Należy dodać, że podany zbiór został ograniczony do obiektów posadowionych bezpośrednio (w tym na podłożu wzmocnionym). Dane światowe obejmują wiele obiektów drogowych i budowli ziemnych gdzie osiadania przekraczają 20÷30 cm. W takim przypadku korelacja mieści się w przedziale $0{,}5\,x \div 2\,x$ [4].



Rys. 2. Krzywa kalibracyjna dla warunków polskich na tle pomiarów z literatury [4] i zebranych danych własnych

W ocenie wartości prognozowanych osiadań dylatometr dla typowych obiektów jest narzędziem dobrze wykalibrowanym. W przypadkach posadowień na gruntach spoistych plastycznych i organicznych, gdzie, jakość wierceń i pobieranych prób nie jest wysoka, jedynie sondowania in situ pozwalają na uzyskanie wiarygodnych parametrów do obliczeń projektowych. W dalszej części przedstawiono przykład realizacji obiektu, gdzie nieprawidłowa ocena podłoża doprowadziła do błędnych decyzji związanych z posadowieniem, czego skutkiem są obserwowane do dziś nadmierne osiadania.

2. Charakterystyka problemu

Problem ustalenia wielkości osiadań i ich prognozy dotyczył obiektu szkoły, który jest budynkiem o dwóch kondygnacjach nadziemnych, dużej powierzchni, nieregularnym rzucie i oryginalnym falującym kształcie ściany frontowej (północnej) – rys. 3. Niewielkie podpiwniczenie wykonano jedynie przy ścianie wschodniej. Maksymalna wartość pomierzonych osiadań od momentu rozpoczęcia budowy do chwili obecnej wynosi około 10 cm i znacznie przekracza wartości dopuszczalne (3÷5 cm) dla tego typu obiektów. Wyniki kolejnych pomiarów wskazują, że osiadania nie są jeszcze w pełni ustabilizowane (5 lat pomiarów). Należało wskazać przyczynę nadmiernych osiadań oraz przeprowadzić prognozę końcowych osiadań.

3. Warunki gruntowo-wodne

Obiekt zlokalizowano w Warszawie na terenie wyższego tarasu zalewowego Wisły w odległości ok. 200 m od rzeki. Na podstawie wykonanych dokumentacji i badań stwierdzono, że w podłożu pod powierzchniową warstwy gleby występują (od góry):

– piaski drobne i średnie w stanie średniozagęszczonym, o miąższość około 1,0 m,
– warstwa gruntów zastoiskowych (mad i namułów) w postaci glin pylastych, pyłów, o zróżnicowanym stanie: w stropie oceniono go na plastyczny (warstwa IIa), w war-

stwie spągowej na miękkoplastyczny (warstwa IIb). Całkowita miąższość tej warstwy wynosi 2÷3 m,
– pod madami występuje warstwa, czwartorzędowych piasków średnich, drobnych + żwir w stanie średniozagęszczonym (warstwa III),
– w dwóch otworach pod piaskami stwierdzono strop trzeciorzędowych iłów „plioceńskich" (warstwa IV).

Wodę gruntową nawiercono w piaskach pod madami na głębokości około 3,5 m ppt., o nieznacznym napięciu. Na podstawie analiz hydrologicznych stwierdzono, że przy wysokich stanach wody w Wiśle teren wokół szkoły może być podtapiany, a przy wysokim stanie i przerwaniu wałów zalany.

Opisane warunki gruntowo-wodne zostały ustalone na podstawie dwóch dokumentacji. Dokumentacja 1 opierała się wyłącznie o wiercenia (10 otworów) i 2 sondowania (zarzuconą w latach 80-tych do stosowania z uwagi niemiarodajne korelacje) sondą ITB-ZW, zatem stan gruntów spoistych, a następnie pozostałe parametry ustalono na podstawie analizy makroskopowej i sondy dającej ocenę jakościową. Dodatkowe rozpoznanie warunków gruntowych wykonano w Dokumentacji 2, koncentrując się na ustaleniem geotechnicznych warunków posadowienia i dotyczyło głównie właściwości mad występujących w podłożu. Rozpoznanie oparte było na wykonaniu dodatkowych 10 otworów rurowanych i ocenie stanu gruntu na podstawie badań makroskopowych i sondą rowkową typu Kunzla? Stan występujących w podłożu gruntów przyjęto w obu dokumentacjach na podstawie badań, a wartości parametrów wytrzymałościowych i odkształceniowych ustalono metodą B wg PN-81/B-03020 [6] – tab. 1.

Tablica 1 Zestawienie parametrów gruntów wg dokumentacji archiwalnych i badań ITB [5].

Nr warstwy	**Rodzaj gruntu**	I_D		I_L		$\varphi_u^{(n)}$ [°]		$c_u^{(n)}$ [kPa]		$Mo^{(n)}$ [MPa]		M_{DMT} [MPa]
wg dokumentacji		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	ITB
0	N	–	–	–	–	–	29	–	–	–	–	100
I	Pd/Ps/Pg	0,40	0,40			31	31			50	45	45
IIa	G π/Π			0,45	0,20	10	16	9	15	**17**	**28**	**9,5**
IIb	Π / G π			0,75	0,30	5	12	5	10	**9**	**25**	**2,8**
III	Ps/Pd+ż	0,45	0,45			32	32			80	80	90
IV	Gπz/Iπ	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	30

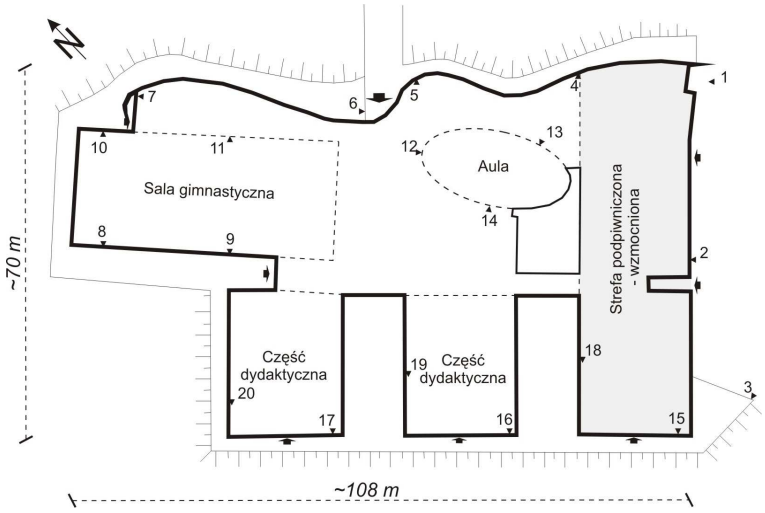
Jak wynika z tab. 1 w ocenie właściwości mad obie dokumentacje różniły się znacznie. W dokumentacji 1 stopień plastyczności I_L oceniono na 0,45÷0,75, w dokumentacji 2 na 0,20÷0,30. W konsekwencji ustalone na tej podstawie parametry wytrzymałościowe i odkształceniowe gruntów są zasadniczo różne. Jako badania sprawdzające wykonane zostały sondowania dylatometryczne. Wyniki (wartości modułów) ustalone na ich podstawie pokazano w tab. 1. Miąższość warstwy mad w badanych profilach wynosiła 2,0÷3,0 m. Uzyskane z dylatometru wartości są 2÷3 krotnie niższe od podanych w dokumentacji 1 i 3÷9 razy niższe od podanych w dokumentacji 2.

4. Wielkość i prognoza osiadań

Projekt przewidywał realizację budynku o dwóch kondygnacjach, gdzie podstawowy układ nośny budynku stanowią żelbetowe stropy oraz słupy i ściany. Konstrukcję sali gimnastycznej stanowią ramy stalowe o rozpiętości ~20 m i rozstawie co 3 m. Strop nad salą to stalowa konstrukcja cięgnowa dachu. Konstrukcję auli, stanowią żelbetowe ściany i żelbetowy stropodach płytowo-żebrowy. Konstrukcja budynku rozdzielona jest dylatacjami.

Dylatacje występują między częścią dydaktyczną a ogólnie dostępną oraz między salą gimnastyczną i zapleczem. Ściany samonośne i działowe są z cegły lub bloczków z betonu komórkowego.

Początkowa koncepcja posadowienia budynku zakładała wykonanie na podłożu rodzimym nasypu budowlanego o wysokości 2 m. Możliwość podtopienia terenu przy wysokim stanie wody w Wiśle wymagała wyniesienia budynku. Konstrukcja miała być posadowiona na ławach i stopach (naciski pod fundamentami ustalono na poziomie ok. 200 kPa) na wzmocnionym podłożu pod wszystkimi fundamentami kolumnami DSM o długości około 5,5 m. Przyjęta koncepcja posadowienia na wzmocnionym podłożu wynikała z danych zawartych w dokumentacji 1, gdzie stwierdzone w podłożu mady uznano za grunty nienośne. Przyjęta ostatecznie do realizacji koncepcja oparta była na projekcie, który zakładał wzmocnienie podłoża kolumnami DSM jedynie fundamentów posadowionych na gruncie rodzimym (w części podpiwniczonej).

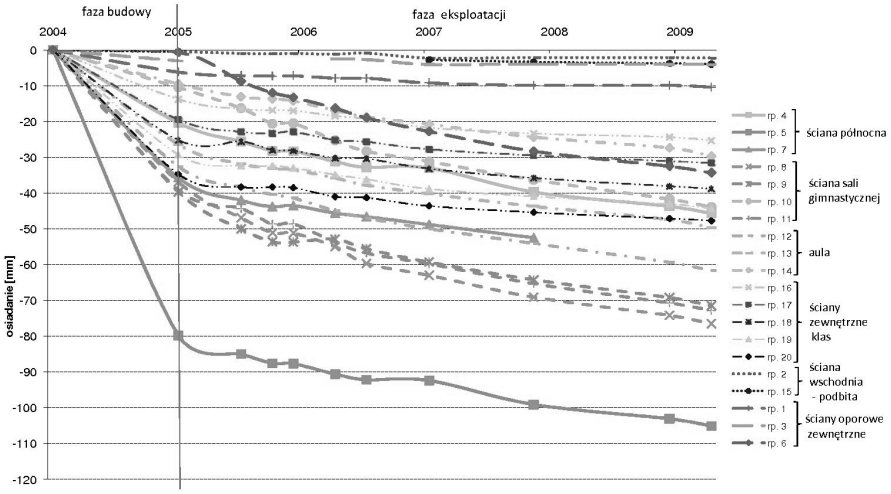


Rys. 3. Rzut budynku szkoły – wskazano lokalizację reperów i strefę wzmocnienia podłoża

Wzmocnienie podłoża pod pozostałymi fundamentami uznano za zbędne, 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 na Saskiej Kępie, posadowionych bezpośrednio na tego typu gruntach – madach, które nie doznały istotnych osiadań, powodujących powstanie uszkodzeń w konstrukcji.

Projekt zakładał wystąpienie nieznacznych osiadań konstrukcji oraz zalecał prowadzenie w czasie budowy i po jej zakończeniu pomiarów kontrolnych osiadań. Realizowany monitoring obejmował bazę pomiarową, którą stanowiło 20 reperów, osadzonych w konstrukcji budynku – rys. 3. Na wykresie (rys. 4) zestawiono wartości pomierzonych w czasie budowy i w czasie eksploatacji. Analiza całkowitych osiadań wskazuje, że osiadania fragmentu konstrukcji posadowionego na fundamentach podbitych kolumnami DSM (ściana wschodnia, klatka schodowa) są małe (2÷4 mm). Wskazuje to na dużą skuteczność wykonanego wzmocnienia podłoża. Osiadania pozostałych fragmentów konstrukcji, posadowionych na podłożu „niewzmocnionym" są znacznie większe. Największe osiadania wystąpiły w części kulturalno-oświatowej budynku i sali gimnastycznej. Wartości osiadań w tej części wynoszą

40÷80 mm. Maksymalne, nietypowo duże osiadanie (100 mm) występuje w jednym punkcie ściany zewnętrznej północnej (reper nr 5). Osiadania podłoża pod częścią południową, mieszczącą segmenty dydaktyczne są mniejsze, wynoszą 30÷50 mm.



Rys. 4. Zestawienie osiadań budynku pomierzonych na reperach

Przyczyn wystąpienia znacznych osiadań podłoża należy szukać przede wszystkim w odkształcalności mad występujących w podłożu. Wskazuje na to długi czas stabilizacji osiadań jak i znaczne przyrosty osiadań, jakie wystąpiły po zakończeniu budowy. Gdyby osiadania spowodowane były niewłaściwym wykonaniem nasypu, byłyby znacznie mniejsze i wystąpiłyby głównie w fazie budowy. Wartości osiadań wskazują też, że odkształcalność mad występujących w podłożu jest z pewnością znacznie większa niż to założono w projekcie na podstawie dokumentacji 2. Dla potwierdzenia tego wniosku przeprowadzono obliczenia osiadań przy modułach uzyskanych z badań DMT. Osiadania wyznaczono, jako sumę osiadań spowodowanych wykonaniem nasypu i obciążeniem podłoża konstrukcją. Wyniki obliczeń osiadań całkowitych potwierdzają, że w występujących warunkach gruntowych osiadania konstrukcji będą znaczne, a w zależności od odkształcalności mad w poszczególnych miejscach, osiadania te mogą być znacznie zróżnicowane (tab. 2).

Przeszacowanie odkształcalności mad w analizowanym przypadku to efekt nieuwzględnienia specyfiki tych gruntów. Najczęściej ich odkształcalność pozwala na bezpośrednie posadowienie 2÷4 kondygnacyjnych budynków. Są jednak przypadki, gdy odkształcalność mad jest znacznie większa. Przykładem mogą być osiadania budynku usytuowanego na Saskiej Kępie w Warszawie, posadowionego bezpośrednio na madach o miąższości 2÷3 m, występujących w stanie plastycznym i miękkoplastycznym. Maksymalna wartość osiadań konstrukcji tego budynku wynosi około 120 mm, przy czym okres stabilizacji osiadań wynosił około 20 lat (Pogorzelska, 1990).

Prognozę dalszych przyrostów osiadań konstrukcji analizowanego budynku oparto na ekstrapolacji wyników pomiarów osiadań. Przyjęta metoda polega na założeniu postaci funkcji opisującej osiadania konstrukcji i ustaleniu jej parametrów tak, aby osiadania obliczone jak najdokładniej opisywały osiadania pomierzone. Do oceny dokładności przyjętej metody wykorzystano wyniki pomiarów osiadań, wspomnianego budynku z Saskiej Kępy –

rys. 5a. Założono przebieg osiadań wg funkcji logarytmicznej. Z literatury [8] i praktyki wiadomo, że ten rodzaj krzywej pozwala na stosunkowo najdokładniejsze opisanie osiadań obiektów budowlanych. Przyjęto funkcję w postaci (1):

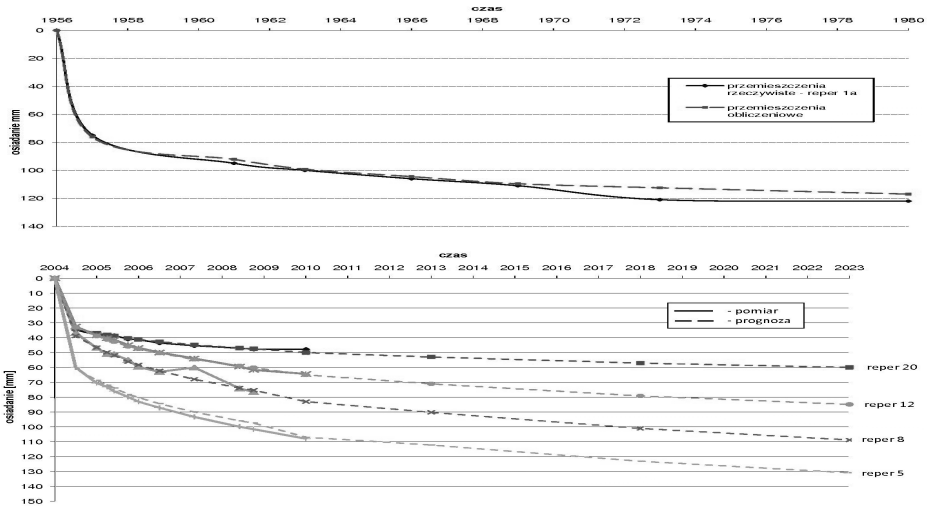
$$s = a \cdot \ln(t) + b \tag{1}$$

gdzie: s – osiadanie; t – czas wyrażony w latach; a, b – współczynniki.

Na tej podstawie ustalono wielkość przyrostów maksymalnych osiadań konstrukcji w poszczególnych częściach budynku szkoły oraz przewidywanych osiadań ostatecznych, ustalonych na podstawie ekstrapolacji wyników z pomiarów – rys. 5b, tab. 2.

a)

b)



Rys. 5. Ekstrapolacja osiadań w czasie: a) Berezyńska, b) dla budynku szkoły

Tablica 2. Zestawienie maksymalnych osiadań pomierzonych – s_p oraz prognozowanych przyrostów osiadań Δs i osiadań całkowitych s_c

Lokalizacja / (nr reperu)	**Funkcja osiadań**	s_p **[mm]**	Δs **[mm]**	s_c **[mm]**	s_{DMT} **[mm]**	**prognoza osiadań na kolejne lata [mm]**		
						1÷5 lat	**6÷10 lat**	**11÷15 lat**
Sala gimnastyczna (rp. 8)	27·ln(*t*)+28	-76,5	-32,5	-109	-102	6	4	3,5
Aula (rp. 12)	20·ln(*t*)+25	-61,7	-23,2	-84,9	-73,9	5	3,5	3
Część dydaktyczna (rp. 20)	10·ln(*t*)+30	-47,7	-12,3	-60,0	-73,7	3,5	3	2,5
Ściana zewnętrzna (rp. 5)	29·ln(*t*)+50	-105,1	-36	-141,1	121,1	6	4,5	3,5

Przyrosty maksymalnych osiadań w poszczególnych częściach szkoły mogą wynosić ok. 30÷40% osiadań dotychczasowych. Maksymalne wartości osiadań mogą osiągnąć wartość ok. 60÷70 mm w części dydaktycznej, do ok. 120÷140 mm na ścianie zewnętrznej przy wejściu głównym. Z funkcji prognozowanych osiadań konstrukcji wynika, że czas stabilizacji osiadań podłoża będzie długi, może wynosić 10÷15 lat. Należy przy tym dodać, że w rozpatrywanym przypadku pełna stabilizacja osiadań konstrukcji prawdopodobnie nigdy nie nastąpi. Wynika to z występowania wody gruntowej w poziomie gruntów zasto-

iskowych. Wahania tego poziomu będą powodować nieznaczne przemieszczenia gruntu, które nie powinny jednak przekraczać ±2 mm. Spodziewane przyrosty osiadań z pewnością nie spowodują w konstrukcji uszkodzeń, które zagrażałyby jej nośności. Wynika to z praktyki, która wskazuje, że osiadania przy których w budynku powstają pierwsze widoczne uszkodzenia w postaci rys, są co najmniej 2,5 razy mniejsze od osiadań powodujących uszkodzenia zagrażające awarią [5].

Dzięki specyficznej formie i charakterze konstrukcji (sztywna, żelbetowa) pomimo nadmiernych osiadań, w obiekcie nie stwierdzono widocznych uszkodzeń konstrukcji, a jedynie wyraźne objawy stanu przedawaryjnego – rozchodzenie się dylatacji, drobne rysy ścianek działowych po stronie wschodniej, wykonanych z bloczków (z uwagi na nieznaczne i ustabilizowane osiadania podbitej ściany wschodniej oraz znacznie większe osiadania sąsiednich słupów i ścian, posadowionych na podłożu niewzmocnionym). Obawy budzi również stan przyłączy (z uwagi na możliwość ścięcia), ponieważ główne media doprowadzone są w pobliżu reperu nr 5, gdzie obserwuje się max. osiadania, a prognoza przewiduje ich wzrost do 14 cm.

4. Podsumowanie

Na przykładzie budynku szkoły, gdzie na skutek błędnych decyzji projektowych wynikających z niedoszacowania ściśliwości mad osiadania przekroczyły znacznie wartości dopuszczalne wykazano, że DMT jest dobrym (skalibrowanym) narzędziem do oceny i prognozy osiadań dla typowych konstrukcji budowlanych. Przykład wskazuje również na konieczność potwierdzania warunków brzegowych przed zastosowaniem tzw. doświadczenia porównywalnego.

Dokumentowanie warunków podłoża wymaga ciągłego doskonalenia i aktualizacji wiedzy związanej ze standaryzacją metod i specyfiką wykonywania badań. Aktualnie jednym z zadań geotechniki w Polsce jest wdrożenie do praktycznego stosowania wymagań Eurokodu 7. Podane tam zależności i nowe korelacje powinny być potwierdzane innymi metodami lub weryfikowane pomiarami rzeczywistymi, przed implementacją do warunków polskich.

Literatura

1. Godlewski T., Wszędyrówny-Nast M.: Wybór metody posadowienia na przykładzie dużego budynku na słabym podłożu. Mat. X Konf. Nauk.-Tech.: Problemy rzeczoznawstwa budowlanego, ITB, Warszawa, s. 171÷182, 2008.
2. Marchetti S., Monaco P., Calabrese M. Totani G.: Use of the Flat Dilatometer Test – manual, 2001.
3. Młynarek Z.: Site investigation and mapping in urban area. Proc. XIV European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Eng. vol.1, Madryt, 2007.
4. Monaco P., Totani G., Calabrese M.: DMT – predicted vs observed settlements. Proc. from the 2nd Int. DMT Conference, Washington D.C., p. 275÷280, 2006.
5. Prace badawcze i ekspertyzy ITB: NG-03835, (Kotlicki W. i inni), 2009.
6. Polska Norma PN-81/B-03020: Grunty budowlane. Posadowienie bezpośrednie budowli.
7. PN-EN 1997-1:2008 Eurokod 7 – Projektowanie geotechniczne – Część 1: Zasady ogólne. i Część 2: Badania podłoża gruntowego.
8. Ravaska O.: A Simple method to predict settlement from previous meansurements, Proc. of Inter. Confer. on Soil Mech. and Geotech. Eng., s.1111÷1114, Osaka, 2005.
9. Wysokiński L., Godlewski T., Wszędyrówny-Nast M.: Zależności regionalne parametrów geotechnicznych podłoża na podstawie sondowań CPTU i DMT. Wyd. Uczel. UTB Bydgoszcz. Mat. Konf.: Problemy geotechniczne i środowiskowe z uwzględnieniem podłoży ekspansywnych, 235÷242, 2009.