

Dr inż. Jerzy Świniański,
Keller Polska Sp. z o.o., Specjalistyczne Techniki Fundamentowania, o/Gdynia

Ocena podatności podłoża przy wymiarowaniu płyt fundamentowych

Streszczenie Przedstawiono metody oceny podatności podłoża stosowane przez konstruktorów do wymiarowania fundamentów płytowych na sprężystym podłożu. Porównano wartości współczynników podatności zalecane przez różnych autorów i określone na podstawie prognozy osiadania projektowanych obiektów. Przedstawiono przykłady przeszacowania podatności podłoża prowadzące do zbyt ryzykownego wymiarowania płyt fundamentowych. W nawiązaniu do zrealizowanych projektów pokazano sposoby wzmocnienia podłoża prowadzące do zmniejszenia i wyrównania podatności gruntu pod fundamentami.

Assessment of subgrade reaction at the designing of slab foundations

Summary Inżynieria Morska i Geotechnika. Vol. 24 :2003, No 5, p. 314. Methods of the assessment of subgrade reaction used by designers for calculation of slab foundations resting on elastic subsoil. Comparison of the subgrade reaction coefficients recommended by various authors, determined by the prediction of settlements. Some examples showing the overestimation of the subgrade reaction causing to risky designing of slab foundations. Description of soil improvement methods enabling reduction and leveling the subgrade under foundations.

1. WPROWADZENIE

W celu poprawnego określenia sił wewnętrznych oraz ugięć odkształcalnych fundamentów budowli niezbędne jest uwzględnienie przy ich projektowaniu podatności podłoża gruntowego. Wiarygodne modelowanie współpracy układu *budowla-fundament-podłoże* jest trudnym, w większości przypadków trójwymiarowym zagadnieniem inżynierskim i naukowym, wymagającym odpowiedniej wiedzy i narzędzi do jednoczesnego uwzględnienia budowli i podłoża gruntowego, które są często niedostępne w przeciętnej praktyce projektowej.

W projektowaniu i wymiarowaniu odkształcalnych fundamentów, szczególnie fundamentów płytowych, konstruktorzy powszechnie stosują różne programy (np. ABC Płyta, PLATO, RM-WIN, ROBOT i inne) oparte na uproszczonym, z reguły jednoparametrowym modelu podłoża typu Winklera lub modelu półprzestrzeni sprężystej.

Te uproszczone modele, jakkolwiek odległe od osiągnięć dzisiejszej mechaniki gruntów, pozwalają na w miarę poprawne zaprojektowanie układu „*fundament-podłoże*”. Pomimo ich prostoty, konstruktorzy przyjmują często niewłaściwe parametry do obliczeń, co prowadzi do niebezpiecznych bądź nieekonomicznych rozwiązań projektowych [1], [3].

Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie na projektowych przykładach z praktykami obliczeń i oceny współczynnika podatności podłoża oraz możliwości jego modyfikacji dla potrzeb ekonomicznego i bezpiecznego projektowania płyt fundamentowych.

2. DEFINICJA I WARTOŚCI WSPÓŁCZYNNIKA PODATNOŚCI PODŁOŻA

W klasycznym modelu Winklera właściwości podłoża opisuje „stała” nazywana współczynnikiem podatności podłoża C [kN/m^3] (niem.: *Bettungszahl*, ang.: *coefficient of subgrade reaction*). W literaturze spotykane są również inne określenia np.: *znamię gruntu* [1], *współczynnik podłoża* [4], *współczynnik reakcji podłoża* [6], *współczynnik sztywności* [9] czy *współczynnik sprężystości podłoża*.

Analogią dla modelu Winklera jest układ niepowiązanych ze sobą sprężyn, których ugięcie jest proporcjonalne do nacisku w danym punkcie i niezależne od obciążeń innych punktów. W analizie zakłada się jednakowy przebieg linii ugięcia fundamentu wraz z budowlą o określonej sztywności i odkształcenie układu sprężyn podpierających fundament.

Często przyjmowane przez konstruktorów założenie, że współczynnik podatności podłoża jest parametrem zależnym jedynie od stanu i rodzaju gruntu prowadzi do jednakowych odkształceń i przemieszczeń fundamentów niezależnie od ich wymiarów, co jest sprzeczne z podstawowymi zasadami mechaniki gruntów. Niekiedy wręcz oczekuje się od geologów podawania wprost tego parametru w dokumentacji geologicznej [9]. Przykłady wartości współczynników podatności podawanych w literaturze dla różnych gruntów zamieszczono w tabelicy 1. W zamieszczonym zestawieniu zwraca uwagę znaczna rozbieżność wartości współczynnika podatności, proponowanych przez różnych autorów.

Tablica 1. Orientacyjne wartości współczynnika podatności wg źródeł literaturowych:

| Autor/źródło | Kalisz wg [9] | Sawinow [4],[6] | Kuczyński [5] |
|--|-----------------------|--|-------------------------|
| Współczynnik podatności: | C[MN/m ³] | wsp. podatn. dyn. C _o [MN/m ³] | C[MN/m ³] |
| Grunty niespoiste | | | |
| Piaski pylaste | 5,7-7,0 | 8-10 | 40-60(piasek miałki) |
| Piaski drobne | 7,0-8,5 | 10-12 | |
| Piaski średnie, grube i żwiry | 8,5-11,5 | 12-16 | 50-150 |
| Grunty spoiste: ropy, gliny, pyły | | | |
| miękkoplastyczne | 3,5 -7,0 | 5-10 | 40-90 (grunt gliniasty) |
| plastyczne i twaroplastyczne | 7,0 -14,0 twpl | 10-20 | 50-200 (zleżała glina) |
| półzwarte | -- | 20-30 | 100-200 (zwarta glina) |

Jak wiadomo osiadania i odkształcenia fundamentów budowli zależą oprócz warunków gruntowych, również od: poziomu i charakteru obciążeń, wymiarów i sztywności fundamentów i budowli, głębokości posadowienia oraz zasięgu strefy aktywnej pod fundamentami.

Powyższe czynniki wpływają na wartość i rozkład podatności podłoża pod fundamentami, co prowadzi do wniosku, że współczynnik podatności nie powinien być traktowany jako parametr lub gruntowy, a raczej jako parametr całego modelu „budowla-fundament-podłoże”, który wymaga kalibracji na drodze empirycznej lub teoretycznej [2], [7].

Empiryczna weryfikacja współczynników podatności podłoża dokonywana jest najczęściej za pomocą próbnych obciążeń gruntu sztywną płytą lub rzadziej fundamentem o większej powierzchni. Empiryczne korelacje oraz ekstrapolacja wyników badań podłoża płytą o średnicy 30-60 cm budzą poważne wątpliwości ze względu na znaczny efekt skali, wpływ głębokości aktywnej, szczególnie w przypadku gruntów niejednorodnych i uwarstwionych [2].

Dlatego też często stosowaną metodą określania i weryfikacji parametrów podatności podłoża jest warunek zgodności osiadania określonego w oparciu o przyjęte podatności oraz osiadania prognozowanego za pomocą innego modelu teoretycznego, najczęściej metodą odkształceń jednoosiowych lub trójosiowych dla podłoża opisanego modelem półprzestrzeni sprężystej Boussinesq [1], [2], [3].

Dla konstruktora dokonującego wyboru wartości i rozkładu podatności podłoża pod fundamentem oznacza to konieczność wykonania, samodzielnie lub we współpracy z geotechnikiem, wcześniejszej analizy stanu granicznego użytkowania obiektu, w tym osiadania średniego, całkowitego oraz nierównomiernego projektowanego obiektu.

Na kryterium zgodności osiadania opierają się wzory do obliczania podatności proponowane przez wielu autorów, między innymi Fłorina, Köglera [1], Gorbunow-Posadowa [5] oraz Wiłuna [6]:

$$\text{wg Fłorina [1]:} \quad C = \frac{q_{sr}}{s_{sr}} \quad (1)$$

gdzie q_{sr} jest średnim naciskiem przekazywanym przez fundament na podłoże
 s_{sr} jest średnim osiadaniami fundamentów budynku obliczonym z uwzględnieniem rzeczywistej budowy i ściśliwości M_o warstw podłoża gruntowego,

wg Köglera, [1]:
$$C = \frac{m \times M_o}{b} \quad (2)$$

gdzie m jest współczynnikiem zależnym od kształtu fundamentu i stosunku wymiarów fundamentu ($b \times l$ lub D) do miąższości h gruntu ściśliwego pod fundamentem [1],

wg Gorbunow-Posadowa [5]:
$$C = \frac{E_o}{(1 - \nu_o^2) h_o} \quad (3)$$

gdzie E_o jest modułem odkształcenia warstwy ściśliwej,
 ν_o jest współczynnikiem Poissona gruntu ściśliwego,
 h_o jest miąższością warstwy ściśliwej pod fundamentem,
 B jest szerokością lub średnicą obciążonego obszaru/fundamentu,

wg Wiłuna [6]:
$$C = \frac{E_o}{(1 - \nu_o^2) \omega B} \quad (4)$$

gdzie E_o jest modułem odkształcenia warstwy ściśliwej,
 ν_o jest współczynnikiem Poissona gruntu ściśliwego,
 B jest szerokością lub średnicą obciążonego obszaru/fundamentu,
 ω jest współczynnikiem wpływu zależnym od kształtu i sztywności fundamentu.

3. PORÓWNAWCZA ANALIZA WPÓŁCZYNNIKA PODATNOŚCI PODŁOŻA

Dla porównania wartości podatności otrzymywanych za pomocą powyższych wzorów i zaleceń wykonano obliczenia dla następującego przykładowego fundamentu płytowego (rys.1):

| | |
|--|---|
| wymiary płyty $B \times L \times h$: 10,0×20,0×0,5 [m], | średni nacisk pod płytą $q_{sr}^n = 117$ kPa, |
| 8 słupów × 2150 kN/słup, wsp. obc. $\gamma_f = 1,2$ | obciążenie ścian zewn. 100kN/m×37mb |
| głębokość posadowienia: $D = 2$ m | poziom ZWG 2,5 m p.p.p.t. |
| 0-5 m p.p.t. luźny nasyp piaszczysty NN(P_d/P_s) | $M_o = 20$ Mpa, $\gamma = 17$ kN/m ³ , $\nu = 0,3$ |
| 5-7 m p.p.t. glina pylasta próchn., mpl. $G_{\pi+H}$ | $M_o = 10$ Mpa, $\gamma = 20$ kN/m ³ , $\gamma' = 10$ kN/m ³ , $\nu = 0,35$ |
| 7-20 m p.p.t. zag. piasek gruby i żwir P_r/\dot{Z} | $M_o = 160$ Mpa, $\gamma' = 10$ kN/m ³ , $\nu = 0,2$ |

Osiadanie średnie fundamentu s_{sr} określono dla charakterystycznych naprężeń dodatkowych powiększonych o 50 % ($\alpha = 0,5$) naprężeń pierwotnych w poziomie posadowienia $\sigma'_{zd} = q_{sr}^n (1 - \alpha) \cdot \gamma \cdot D = 117 - (1 - 0,5) \cdot 17 \cdot 2 = 100$ kPa,

Stosunek naprężeń dodatkowych σ'_{zd} do wartości osiadania s_{sr} pozwala na obliczenie najniższego, „charakterystycznego” oszacowania współczynnika podatności $C'_n = \sigma'_{zd} / s_{sr}$.

Wychodząc jednak z założenia Fłorina, że przy osiadaniu s_{sr} średni nacisk pod fundamentem wynosi q_{sr}^n otrzymamy maksymalną, „charakterystyczną” wartość współczynnika podatności $C_n = q_{sr}^n / s_{sr}$. Tak zdefiniowany współczynnik mógłby być podstawą do analizy układu budowlano-fundament-podłoże w stanach granicznych użytkowania (np. osiadanie, ugięcia czy rozwarście rys).

Nasuwa się również pytanie czy w analizie stanów granicznych nośności, w tym sił wewnętrznych działających w układzie konstrukcyjnym w budowlu i w fundamentach, które wykonuje się dla obciążeń obliczeniowych, należy stosować charakterystyczną wartość podatności C_n ? Takie przyjęcie prowadziłoby do większych osiadań i odkształceń układu niż w analizie stanów granicznych użytkowania. Założenie, że osiadania i deformacje układu powinny być porównywalne w obu rodzajach analiz prowadzi z kolei do konieczności podwyższenia, „obliczeniowej” wartości współczynnika podatności C_r , tj.

$$s_{sr} = \frac{q_{sr}^n}{C_n} = \frac{q_{sr}^r}{C_r} = \frac{\gamma_f \cdot q_{sr}^n}{C_r}, \quad \text{skąd} \quad C_r = \gamma_f \cdot C_n \quad (5)$$

Wyniki obliczeń porównawczych współczynnika podatności dla analizowanego przykładu zamieszczono w tabelicy 1.

Tablica 2. Wyniki porównawczych obliczeń współczynnika podatności [kN/m³].

| Autor | Florin [1] | Kögler [2] | Gorbunow - Posadow [5], [7] | Sawinow [4],[6],[9] | Wiłun [6] | wg autora artykułu | |
|-------------------|------------|------------|-----------------------------|---------------------|-----------|--------------------|-----------------|
| | | | | | | bez wzmocnienia | ze wzmocnieniem |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| C' _n = | 3880 | 4740 | 2600 | 19880 | 4280 | 3970 | 6620 |
| C _n = | 4540 | 5550 | 3040 | 23260 | 5010 | 4640 | 7750 |
| C _r = | 5450 | 6660 | 3650 | 27910 | 6010- | 5570 | 9300 |

Obliczenia autora artykułu oparto na założeniu Florina i osiadaniach obliczonych metodą odkształceń jednoosiowych programem GRETA [11] dla wariantu bez wzmocnienia oraz ze wzmocnieniem podłoża pod płytą za pomocą 50 kolumn żwirowych o średnicy 70 cm i długości 5,5m.

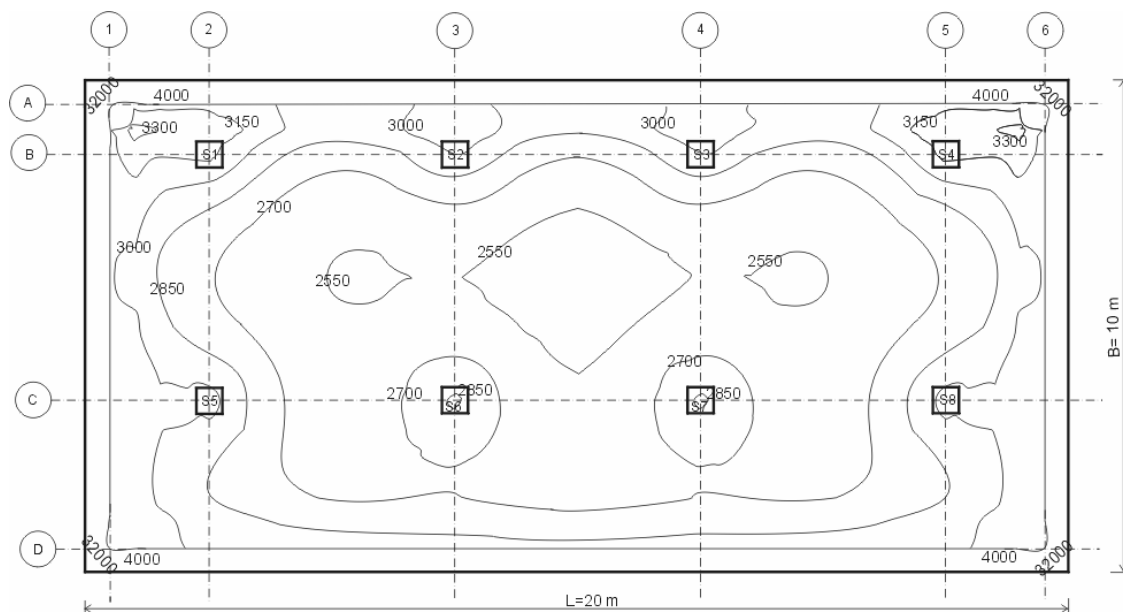
Współczynniki podatności obliczone w oparciu o wartości osiadania (tablica 1, kol. nr 1, 7) lub na podstawie wzorów stosowanych do ich obliczania (tablica 1, kol. nr 2, 3, 6) prowadzą do zbliżonych wartości. Nieco niższe wartości otrzymano jedynie ze wzoru Gorbunowa-Posadowa. Natomiast współczynnik podatności dynamicznej określony wg empirycznego wzoru Sawinowa prowadzi do około pięciokrotnie wyższej wartości podatności. Należy jednak zauważyć, że w przypadku wzmocnienia podłoża kolumnami żwirowymi wartość współczynnika podatności dla analizowanego przykładu wzrasta o ok. 70%, ale nie przekracza poziomu 10000 kN/m³.

Na rysunku 1 przedstawiono dla porównania mapę podatności podłoża pod tym samym fundamentem wyznaczoną na podstawie iteracyjnych obliczeń płyty metodą elementów skończonych programem SLAB-GGU [10]. Płyta o zadanej sztywności spoczywa na uwarstwionym podłożu opisanym za pomocą edometrycznych modułów odkształcenia zdefiniowanych w siatce zadanych otworów geologicznych. Na podstawie całkowania równania Boussinesqa dla każdego węzła podłoża określana jest w każdym kroku obliczeń lokalna podatność zdefiniowana jako stosunek naprężenia do osiadania węzła. Dla tak określonego rozkładu podatności obliczana jest płyta oraz jej ugięcia. Obliczenia prowadzone są iteracyjnie, aż do uzyskania zakładanej zgodności odkształceń płyty i osiadania podłoża pod płytą. W celu uniknięcia koncentracji naprężeń pod krawędziami fundamentu program daje możliwość ograniczenia maksymalnego naprężenia przenoszonego przez podłoże pod płytą.

Wynikowy rozkład podatności podłoża pod płytą (patrz rys. 1), w tym wzrost współczynnika C'_n pod krawędziami i narożami fundamentu (do max. C'_n≥32.000 kN/m³) jest charakterystyczny dla fundamentu o skończonej sztywności spoczywającego na sprężystej półprzestrzeni Boussinesqa. W wewnętrznej strefie płyty pomiędzy ścianami w osiach nr 1, 6 i D wartości współczynnika podatności C'_n kształtują się w zakresie od 2550 do 4000 kN/m³, tj na poziomie zbliżonym do wartości zamieszczonych w tabelicy 2.

Motak [3] zaproponował inżynierską procedurę określania rozkładu podatności podłoża pod fundamentami opartą na podobnej zasadzie podziału dużego fundamentu na szereg

oddziaływujących na siebie „podfundamentów”. Wykorzystanie programów typu SLAB-GGU znacznie ułatwia wykonanie analizy układu fundament-podłoże w porównaniu do dosyć pracochłonnej procedury zaproponowanej przez Motaka.



Rysunek 1. Mapa podatności podłoża obliczona dla sprężystej półprzestrzeni Boussinsega za pomocą programu SLAB-GGU [10]

Możliwe jest również określenie mapy podatności podłoża programem SLAB-GGU i wykorzystanie jej do analizy układu „budowla-fundament-podłoże” za pomocą stosowanych powszechnie programów typu Robot, ABC –Płyta oraz inne.

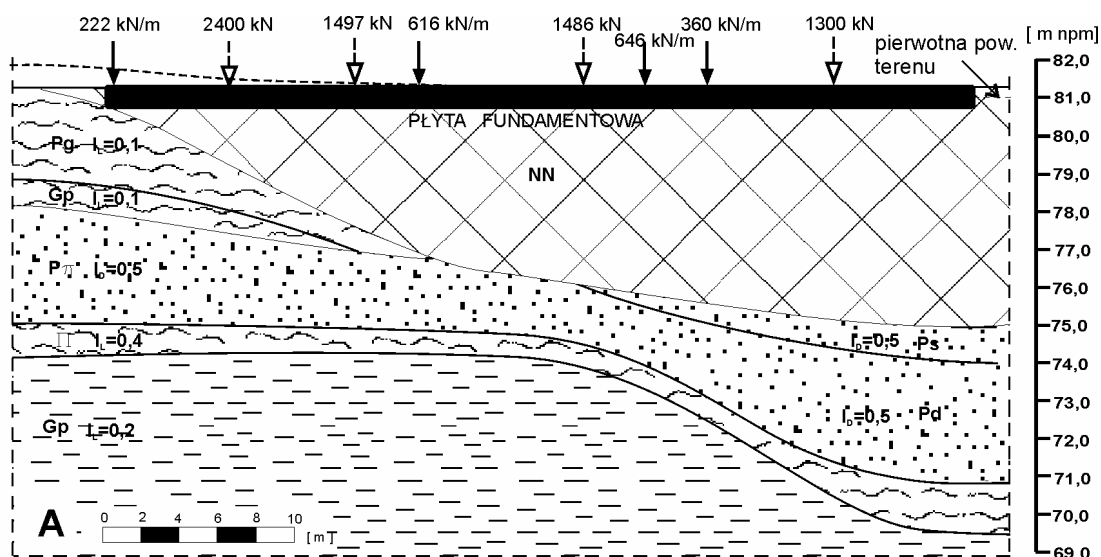
3. PRZYKŁADY FUNDAMENTÓW PŁYTOWYCH NA WZMOCNIONYM PODŁOŻU

Analiza posadowienia fundamentów, w tym szczególnie płytowych komplikuje się znacznie w przypadku silnie niejednorodnego podłoża oraz występowania gruntów antropogenicznych. W takich przypadkach niezbędna jest analiza nierównomiernego osiadania obiektu oraz często konieczne są dodatkowe zabiegi w celu wzmocnienia gruntów nasypowch i wyrównania jego parametrów. W tabelicy 3 zamieszczono siedem rzeczywistych przykładów posadowienia obiektów na płytach fundamentowych wraz z charakterystyką fundamentów, obciążeń, gruntów oraz zakresem zrealizowanego bądź projektowanego wzmocnienia podłoża. W przypadku gruntów antropogenicznych i spoistych zastosowano wzmocnienie metodą wibrowymiany za pomocą kolumn żwirowych. W przypadku luźnych gruntów piaszczystych zastosowano metodę klasycznej wibroflotacji.

| Przykład | Charakterystyka płyty | | | Poziom obciążenie | | | Warunki gruntowe | | Wstępna podatność podłoża | Średnie osiadanie fundamentu | Skorygowana podatność podłoża | Zakres wzmocnienia |
|----------|-------------------------------------|------------|---------------------------------------|---------------------------------------|------------------|------------------|---|---|---------------------------|------------------------------|-------------------------------|---|
| | Głębokość posadowienia [m p. 0"] | BxL [m] | Grubość: ostateczna, (wstępna) [m] | Średni obl. nacisk pod płytą [kPa] | Skupione [kN] | Ciągłe [kN/m] | Przelot [m] | Symbol gruntu [-] | | | | |
| A | 0,5 | 16x45 | 0,5(0,4) | 105,5 (86÷156) | 360÷2400 | 180÷784 | wg rys. nr 2 | | 30000 | 16,0 | 6600 | 275 szt. Kolumn żwirowych KSS |
| B1 | 4,46 | 33x82 | 0,4+0,90 | 82(30÷150) | 1050÷3752 | 40÷411 | wg rys. nr 3 | | -- | 2÷9 | 9500÷19000 | 828 szt. Kolumn żwirowych KSS |
| B2 | 7,53 | 33x94 | 0,4+0,90 | 95(20÷190) | 1600÷4700 | 65÷530 | wg rys. nr 4 | | -- | 3÷5 | 19000÷33000 | 340 szt. Kolumn żwirowych KSS pod częścią płyty |
| C | 3,3+4,9 | 33x30 | 0,4+0,8 | 95 (75÷111,5) | 460÷3060 | 100÷440 | 0,0-6,8 6,8-7,8 7,8-10,0 | NN(Pg//Pd+H) Ps/Pd, $i_0=0,45\div0,6$ Po, $i_0=0,45$ | 30000 | 6÷14 | 8000÷13500 | 464 szt. Kolumn żwirowych KSS |
| D | 4,0 | 36,5x110 | 0,7÷1,4(1,2) | 74(20÷275) | 1024÷12800 | 50÷100 | 0,0-2,0 2,0-3,0 3,0-5,5 5,5-7,5 | NN Gp/P, $i_0=0,2$ Pd/Ps, $i_0=0,1\div0,3$ Ps/P, $i_0=0,1\div0,35$ | 3000 | 4,3(0÷16) | 17000 | 913 punktów wibrofotacji |
| E | 2,85 | 43x54 | 0,7 | 100 (50÷185) | 415÷3310 | -- | 0,0-1,7 1,7-3,3 3,3-3,6 3,6-6,1 6,1-7,5 | NN(G) Kreda, $i_0=0,1-0,4$ Torf G/Gp, $i_0=0,2-0,4$ Pg, $i_0=0,1$ | 20000 | 11÷14 | 7000÷9000 | 423 szt. kolumn żwirowych KSS |
| F | 3,2÷4,3 | 40x73 | 1,2 | 106 | 1100÷6900 | 95÷1000 | wg rys. nr 5 | | -- | 14÷17,5 | 7000 | układ kolumn żwirowych wg rys. 6 |

Tablica 3. Przykłady rzeczywistych fundamentów płytowych na wzmocnionym podłożu

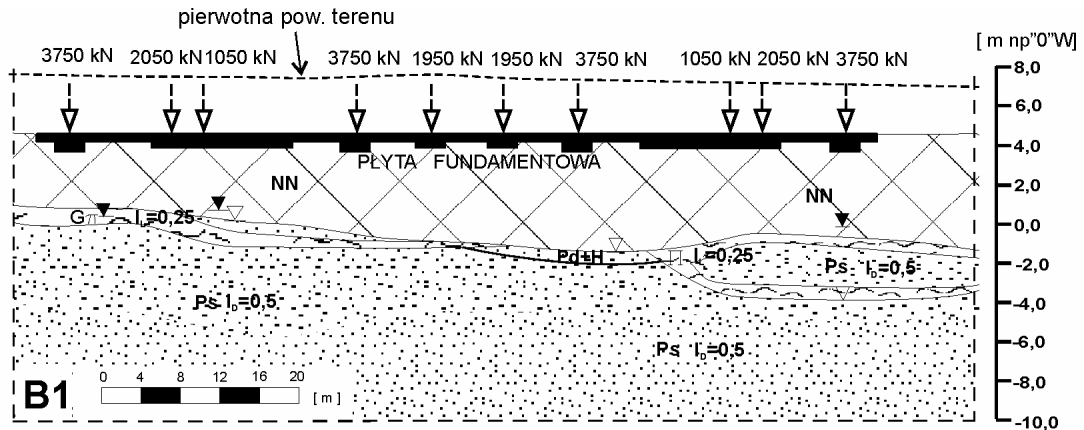
Przykład A ilustruje posadowienie budynku hotelowego bez podpiwniczenia. Ze względu na niejednorodne, niekontrolowane nasypy o zmiennej miąższości przewidziano wzmocnienie podłoża kolumnami żwirowymi w układzie dostosowanym do obciążeń i miąższości nasypów (patrz rys. 2). Pod naciskiem Inwestora konstruktor przyjął wstępnie płytę o grubości 40 cm na podłożu o podatności 30.000 kN/m³. W wyniku dokładniejszej analizy sił wewnętrznych i odkształceń płyty oraz podłoża zaprojektowano płytę o grubości 50 cm na wzmocnionym podłożu o podatności 6600 kN/m³.



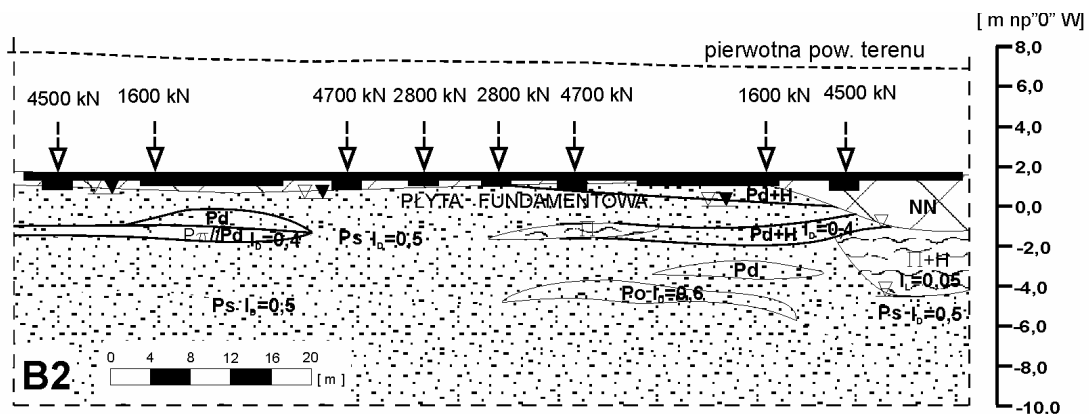
Rysunek 2. Warunki posadowienia płyty obiektu hotelowego dla przykładu A.

Przykład B1 i B2 zawiera schemat posadowienia dwóch sąsiadujących obiektów użyteczności publicznej posadowionych na różnej głębokości. W efekcie wzmocnienia podłoża pod budynkiem B1 przyjęto 40 cm płytę pogrubioną pod słupami do maks. 90 cm ze względu na warunek przebicia. W strefach większych obciążeń dogęszczono siatkę kolumn żwirowych, co pozwoliło na przyjęcie

zwiększonego współczynnika podatności do 19000 kN/m^3 . Pod budynkiem B2 jedynie w strefie głębszych nasypów i gruntów organicznych wykonano lokalnie wzmocnienie podłoża kolumnami żwirowymi. Ze względu na większe zagłębienie budynku B2 w porównaniu do B1 otrzymano znacznie wyższe wartości współczynnika podatności niż pod płytą budynku B1.



Rysunek 3. Warunki posadowienia płyty fundamentowej budynku użyteczności publicznej B1



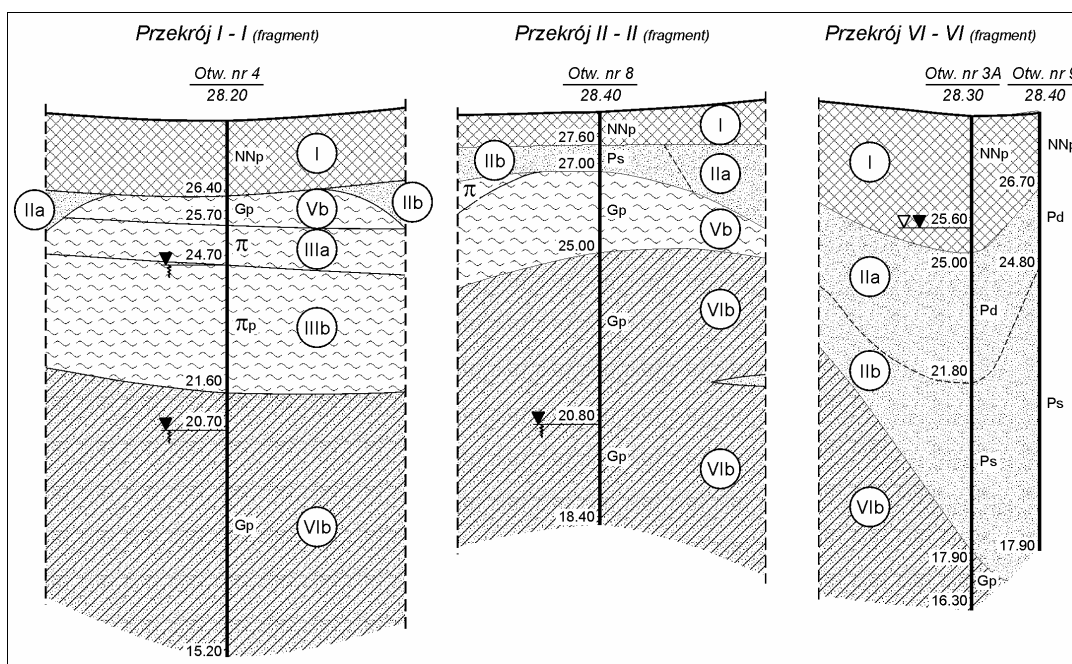
Rysunek 4. Warunki posadowienia płyty fundamentowej budynku użyteczności publicznej B2

Przykład C ilustruje posadowienie budynku usługowo-mieszkalnego na słabych nasypach niekontrolowanych o znacznej i zmiennej miąższości. Również w tym przypadku konstruktor przyjął cieką płytę o grubości 40 cm na podłożu o podatności 30.000 kN/m^3 . Analiza geotechniczna osiadania przy założonym zakresie wzmocnienia pozwoliła na przyjęcie podatności pod płytą na poziomie $8000-13500 \text{ kN/m}^3$. Zmniejszona podatność oraz dodatkowo znaczne rozbieżności w ocenie warunków geologicznych podłoża spowodowały konieczność zarówno weryfikacji projektu płyty, jak również wyników badań geotechnicznych.

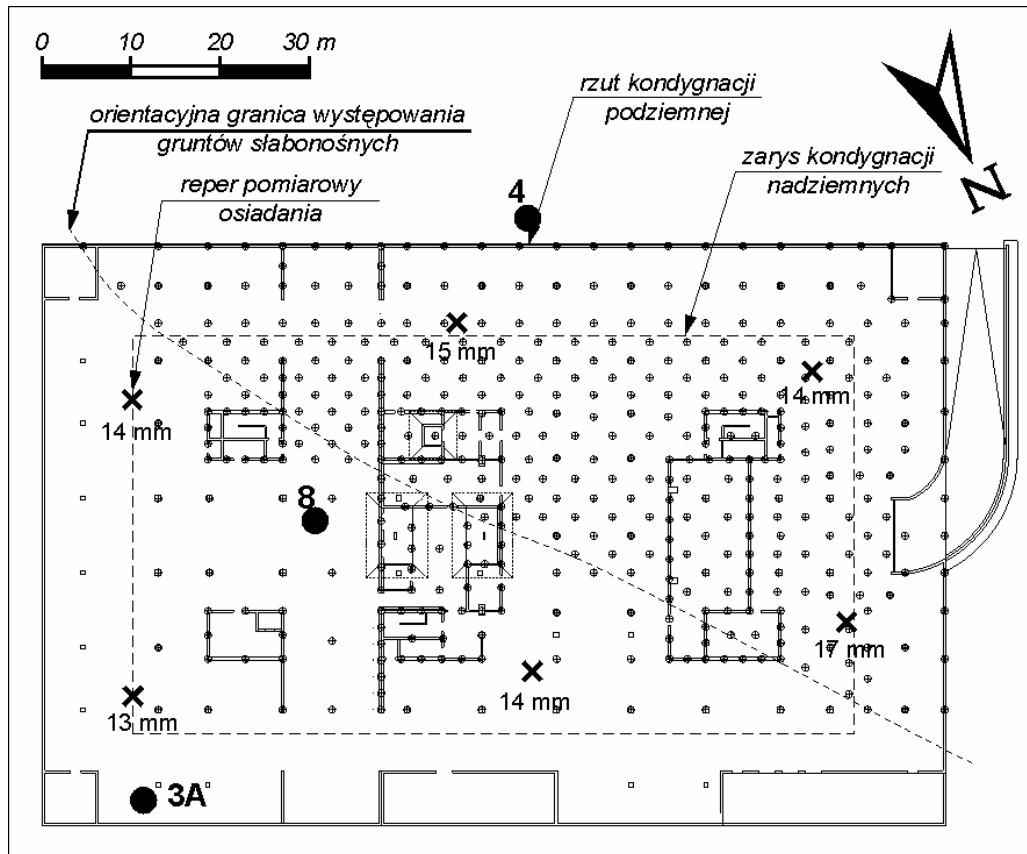
Inne warunki posadowienia obiektu użyteczności publicznej ilustruje przykład D. Poniżej poziomu posadowienia stwierdzono bardzo niejednorodne grunty piaszczyste o różnej granulacji w stanie luźnym i bardzo luźnym. Z tego względu konstruktor przyjął wstępnie stosunkowo niską wartość współczynnika podatności podłoża na poziomie 3000 kN/m^3 i płytę o grubości 120 cm na całą długość budynku. Dokładniejsza analiza posadowienia z założeniem wzmocnienia podłoża metodą wibroflotacji pozwoliła na przyjęcie podatności na poziomie 17000 kN/m^3 i zmniejszenie grubości płyty do 70 cm, pogrubionej lokalnie w rejonie silnie obciążonych słupów.

Przedostatni przykład (E) ilustruje skomplikowane warunki posadowienia kilkukondygnacyjnego budynku garażu. Poniżej poziomu posadowienia stwierdzono występowanie kredy jeziornej, lokalnie torfów podścielonych glinami w stanie plastycznym i twardoplastycznym. Projekt wzmocnienia podłoża kolumnami żwirowymi zakładał stosunkowo wysokie parametry słabych gruntów i osiągnięcie współczynnika podatności rzędu 20000 kN/m^3 . Dokładniejsza analiza posadowienia wykonana przed realizacją obiektu wykazała jednak, że przy gorszych gruntach nie jest możliwe osiągnięcie planowanego stopnia wzmocnienia. Pomimo zweryfikowania podatności do poziomu $7000\text{-}9000 \text{ kN/m}^3$ nie trzeba było jednak zmieniać konstrukcji płyty.

Przykład (F) dotyczy posadowienia budynku PPL LOT w Warszawie, opisanego przez Tejchmana i Brzozowskiego [2]. Zamiast posadowienia obiektu na palach zaproponowano i zrealizowano posadowienie bezpośrednie na częściowo wzmocnionym podłożu. Ze względu na występowanie pod częścią obiektu ściśliwych gruntów spoistych (patrz rysunek 5) zaproponowano wzmocnienie podłoża kolumnami żwirowymi pod częścią obiektu pokazaną na rysunku 6.



Rysunek 5. Warunki gruntowe pod budynkiem PPL LOT w Warszawie (wg Tejchmana i Brzozowskiego [9]).



Rysunek 6. Plan rozmieszczenia kolumn żwirowych, wybranych otworów geologicznych oraz reperów pomiarowych osiadania pod budynkiem PPL LOT w Warszawie (wg Tejchmana i Brzozowskiego [9]).

Prognoza przewidywała osiadanie płyty w zakresie od 7 mm pod krawędzią płyty do ok. 34 mm pod jej środkiem. Pomiar osiadania budynku prowadzone od momentu wykonania płyty fundamentowej do zakończenia stanu surowego obiektu, tj. w okresie ok. 300 dni wykazały równomierne osiadanie płyty budynku w obrysie części wysokiej w zakresie od min. 13 do maks. 17 mm (średnio ok. 15 mm). Wartości osiadania po 300 dniach obserwacji oraz lokalizację reperów pomiarowych przedstawiono za zgodą autorów artykułu [8] na rysunku 6. Średni współczynnik podatności podłoża obliczony na podstawie pomiarów osiadania i obliczony dla całej płyty budynku PPL LOT wynosi ok. 7000 kN/m^3 .

7. ZAKOŃCZENIE

Przedstawiona uproszczona metodyka obliczeń i przykłady praktycznych zadań projektowych pozwalają na dokonanie inżynierskiej oceny wartości współczynnika podatności podłoża z zachowaniem zasad mechaniki gruntów.

Odrębnym problemem, nie dyskutowanym w niniejszym artykule, jest metodyka obliczeń osiadania i przyjęcie głębokości aktywnej pod płytami fundamentowymi, w ocenie których niezbędna jest również współpraca konstruktora z geotechnikiem.

Przy każdej analizie układu "budowla-fundament-podłoże" dodatkowej oceny konstruktora wymaga również wpływ zmiany wartości i ewentualnej niejednorodności współczynnika podatności podłoża na zmiany sił wewnętrznych w budowlu i w fundamencie świadczących

o wrażliwości budowli na zmienną sztywność podłoża. Znajomość tego wpływu pozwala również na ograniczenie ryzyka związanego z błędnym lub niedokładnym określeniem wartości i rozkładu współczynnika podatności podłoża pod projektowanym obiektem.

LITERATURA

- [1] Modliński H.,: Poradnik projektanta przemysłowego, Temat 128, Mechanika gruntów w praktyce inżynierskiej, część III, Własności mechaniczne gruntów, COBPBP „BISTYP” 1979,
- [2] Gryczmański M., Jurczyk P., Modele podłoża gruntowego i ich ocena, Inżynieria i Budownictwo, nr 2/1995,
- [3] Motak E., Inżynierskie modele obliczeniowe układu fundament – podłoże gruntowe, Inżynieria i Budownictwo, nr 2/1995.
- [4] Kobiak J., Stachurski W., Konstrukcje żelbetowe, tom 2, Arkady, Warszawa 1987.
- [5] Kuczyński J., Miejskie budowle sanitarne i podziemne, PWN, Warszawa, Wrocław, 1980.
- [6] Wiłun Z., Zarys geotechniki, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, wydanie 4, Warszawa, 2000,
- [7] Biernatowski K., Fundamentowanie, PWN, Warszawa, 1984.
- [8] Tejchman A., Brzozowski T., Analiza posadowienia budynków PLL LOT i PPPL w Warszawie, Inżynieria i Budownictwo, nr 8/2002,
- [9] Instrukcja do programu ABC Płyta, pkt. 6.2 Opcja podłoże,
- [10] Program SLAB-GGU do obliczania osiadań, mapy podatności podłoża oraz sił wewnętrznych w fundamentach.
- [11] Program GRETA do obliczeń osiadania fundamentów na wzmocnionym podłożu wg metody Priebego, opracowany w firmie Keller Grundbau.