

# Numeryczna a standardowa analiza pracy fundamentu obiektu zabytkowego

Prof. dr hab. inż. Jarosław Przewłócki – Politechnika Gdańska, Wydział Architektury

Mgr inż. Monika Zielińska – Politechnika Gdańska, Wydział Architektury, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska

Właściwa analiza pracy fundamentów obiektów zabytkowych jest bardzo trudna, a nieraz i niemożliwa. Wpływa na to wiele czynników. Z jednej strony nie zawsze jest możliwe dokładne rozpoznanie podłoża gruntowego lub precyzyjne wyznaczenie parametrów fizycznych i mechanicznych materiału fundamentu. Najczęściej nieznaną jest historia obciążenia albo szeregu różnych zjawisk, wpływających w przeszłości na aktualny stan i zachowanie się fundamentu. W wielu starych fundamentach występują kamienie łamane lub polne, a także cegły, które tracą zwartość pod wpływem różnych czynników. Niezmiernie istotne jest również określenie stanu zaprawy wiążącej poszczególne elementy. W przypadku fundamentów drewnianych podstawowe znaczenie ma określenie stopnia zbutwienia pali lub rusztu. Z drugiej strony brak jest dotychczas ścisłych metod matematycznej analizy współpracy podłoża – konstrukcja z uwzględnieniem historycznej natury i stanu fundamentu. Można zatem jedynie w mniej lub bardziej dokładny sposób oszacować zachowanie się starych fundamentów.

W światowej i krajowej literaturze jest niewiele zwartych opracowań poświęconych fundamentom obiektów zabytkowych [4, 5]. Jeszcze mniej publikacji dotyczy analizy ich zachowania się [1, 3]. W niniejszej pracy, na przykładzie konkretnego obiektu zabytkowego, przeprowadzono analizę pracy jego fundamentu na podstawie obowiązujących norm [8], a także w oparciu o obliczenia numeryczne programem Abaqus.

## OPIS OBIEKTU

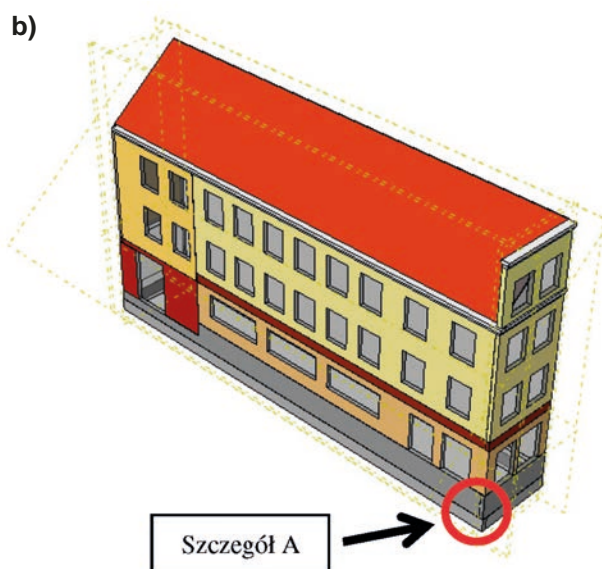
Analizę statyczną fundamentu przeprowadzono na przykładzie budynku zlokalizowanego w śródmieściu Olsztyna, przy

zbiegu ulic Staromiejskiej, Lelewela i Piastowskiej (rys. 1a). Jest to obiekt zabytkowy (wpisany do rejestru zabytków), a dodatkowo znajduje się on w obrębie układu urbanistycznego starożytnego miasta, objętego ochroną konserwatorską. Budynek pełni funkcję podpiwniczonej kamienicy, mającej trzy kondygnacje i poddasze przykryte dachem jednospadowym. Oparty jest on na rzucie wydłużonego prostokąta, długim bokiem przylegającym do ulicy Lelewela. Jego wysokość wynosi 15,65 m. W latach 2011-2012 przeprowadzono generalny remont budynku mający na celu zapobieżenie dalszej dewastacji obiektu, zapewnienie stateczności, odtworzenie dawnych walorów zabytkowych oraz dostosowanie do nowej funkcji. Rewitalizacja obejmowała, między innymi, zamianę konstrukcji stropów z drewnianych na stalowo – betonowe oraz konstrukcji dachu z drewnianej na stalową. Wzrost obciążeń spowodował konieczność wzmocnienia kamiennych fundamentów metodą obustronnego „podbicia”. Zabieg ten pozwolił na zwiększenie wysokości pomieszczeń piwnicznych, dzięki czemu mogą one służyć jako pomieszczenia użytkowe.

Fundamenty omawianego budynku są przykładem typowych fundamentów kamiennych z XVI w (rys. 2). Na długości budynku wymiary fundamentu oraz głębokość posadowienia zmieniają się nieznacznie. Do analizy przyjęto fundament o szerokości 0,57 m, wysokości 0,87 m oraz głębokości posadowienia 2,20 m. Fundament jest posadowiony na podłożu spoistym.

## WARUNKI GEOTECHNICZNE

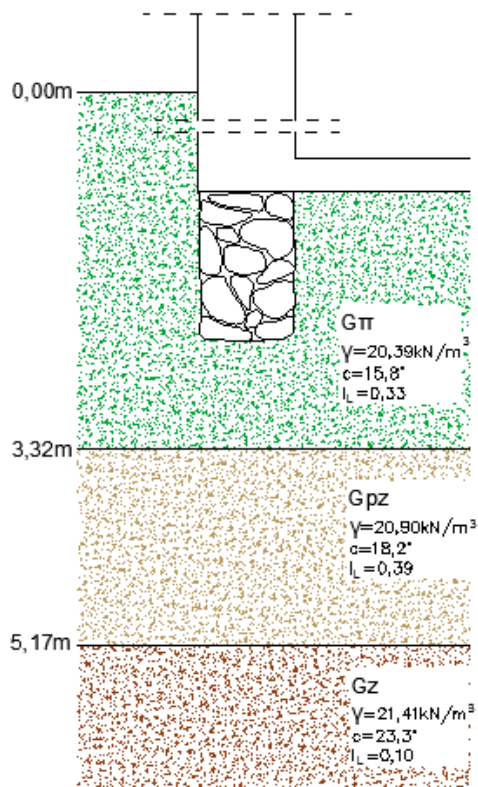
Podłoże gruntowe, na którym jest posadowiony fundament, składa się z 3 warstw (rys. 3).



Rys. 1. Zabytkowa kamienica przy ulicy Staromiejskiej w Olsztynie: a) fotografia, b) model



Rys. 2. Widok kamiennej ściany fundamentowej: a) przed i b) po renowacji



Rys. 3. Przekrój geotechniczny przyjęty do analizy (szczegóły A)

Na podstawie zbadanych warunków gruntowych określono parametry geotechniczne poszczególnych warstw, korzystając z wartości charakterystycznych danych gruntów zamieszczonych w normie oraz podstawowych zależności między właściwościami gruntu. Pierwszą warstwę stanowi glina pylasta o wskaźniku plastyczności  $I_L = 0,33$  i ciężarze objętościowym  $\gamma = 20,39 \text{ kN/m}^3$ . Drugą warstwą jest zbudowana z gliny piaszczystej o wskaźniku plastyczności  $I_L = 0,39$  i  $\gamma = 20,90 \text{ kN/m}^3$ , natomiast trzecią warstwę stanowi glina zwięzła o  $I_L = 0,10$  i  $\gamma = 21,41 \text{ kN/m}^3$ . Pozostałe parametry potrzebne do analizy zestawiono w tabl.1. Miąższość poszczególnych warstw jest zróżnicowana i sięga od głębokości 0,5 m do 2,50 m. Ze względu na drugi stan graniczny do analizy wybrano najbardziej niekorzystny fragment przekroju geotechnicznego (rys. 3).

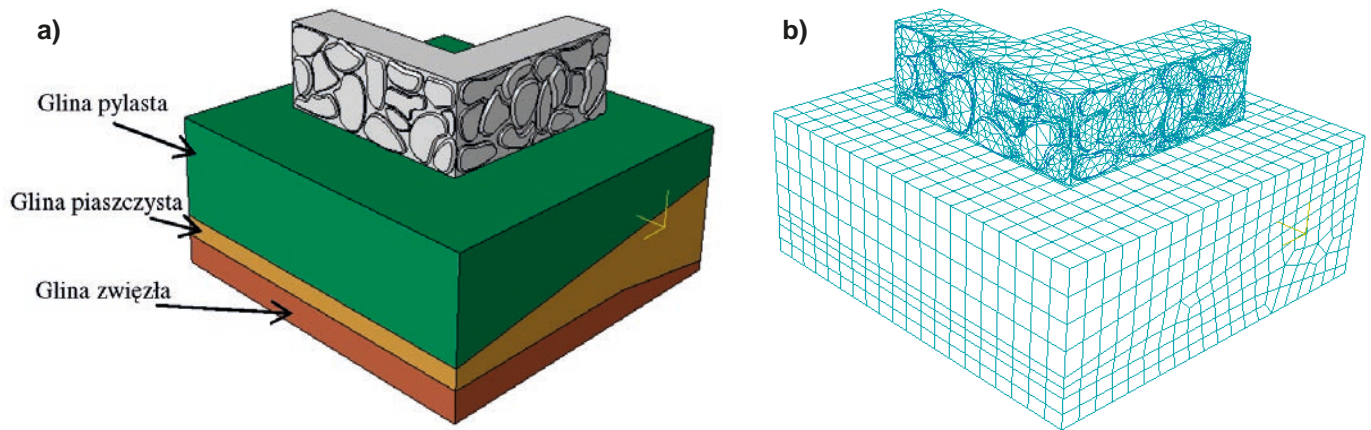
## ANALIZA NUMERYCZNA

Analizując każdy fundament, a zatem i posadowienie obiektu zabytkowego, powinno sprawdzić się dwa podstawowe warunki normowe, czyli stan graniczny nośności oraz stan graniczny użyteczności. W tym celu jest niezbędne wyznaczenie maksymalnych naprężeń pod podstawą fundamentu i w podłożu.

Analizę numeryczną rozpoczęto od wykonania całego modelu obiektu kamienicy w programie Abaqus, łącznie z niezbędnymi do jej przeprowadzenia szczegółami. Siatkę MES fun-

Tabl. 1. Zestawienie parametrów geotechnicznych

Lp.	Rodzaj	Symbol konsolidacji	$I_L$	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	Kąt tarcia wewnętrzny [°]	Spójność [kPa]	Współczynnik tarcia	$\nu$	Współczynnik konsolidacji	$M_o$ [MPa]	$M$ [MPa]
1.	Glina pylasta	B	0,33	20,39	15,8	28,00	0,26	0,29	0,75	27,02	36,03
2.	Glina piaszczysta zwięzła	A	0,39	20,90	18,2	32,00	0,30	0,25	0,90	30,09	33,44
3.	Glina zwięzła	A	0,10	21,41	23,3	39,00	0,39	0,25	0,90	60,01	66,68



Rys. 4. Podłoże wraz z fundamentem kamiennym: a) widok, b) model MES

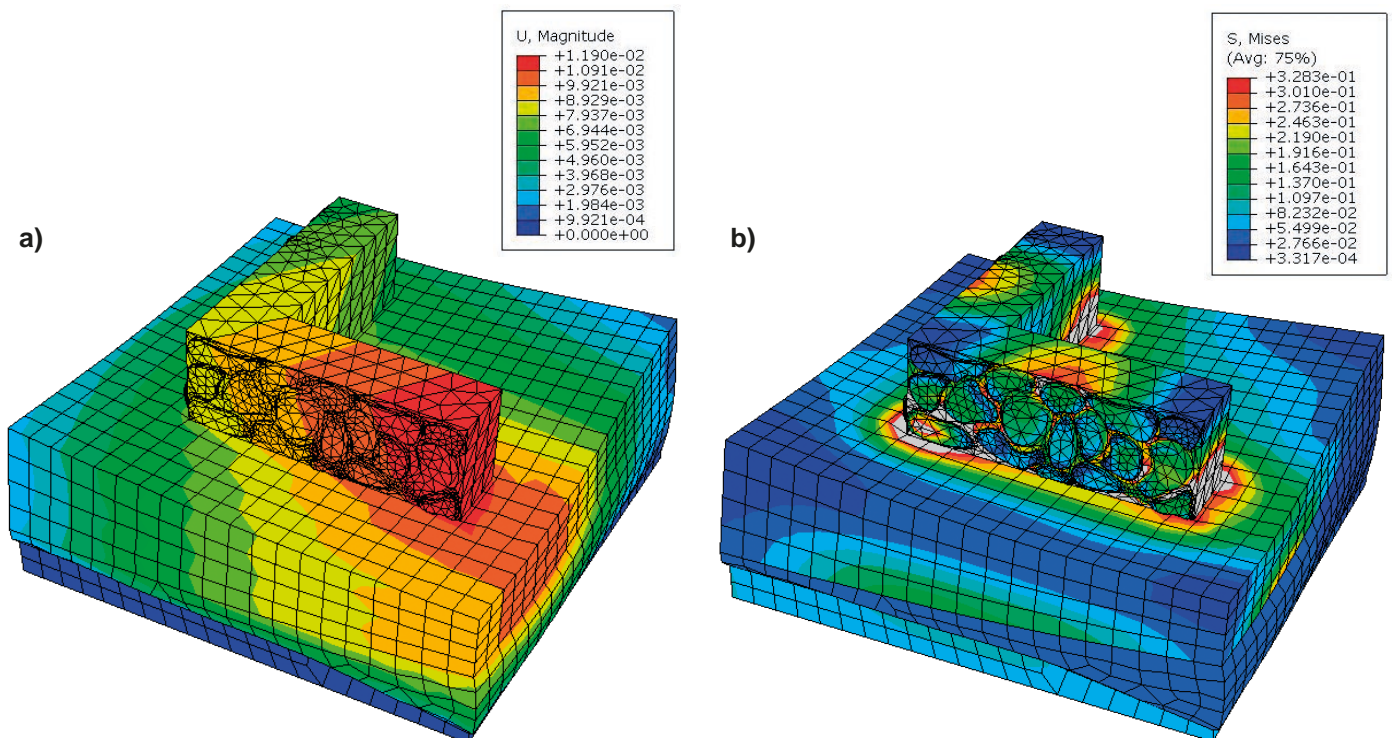
damentu stworzono z graniastosłupów o podstawie trójkątów i czworokątów. Liczba wygenerowanych węzłów w programie Abaqus wynosi 3567, natomiast samych elementów fundamentu około 1804. Na tej podstawie określono pracę całej konstrukcji oraz wybrano miejsce w poziomie fundamentów stanowiące najbardziej niekorzystną kombinację (rys. 1b). Fundament obciążono ciężarem własnym oraz obciążeniem pochodzącym od konstrukcji budynku (stałym i zmiennym). Całkowite obciążenie, jakie przyłożono do fundamentu, wyniosło 171,40 [kN/m]. Ciężar fundamentu kamiennego przyjęto jako 19,5 [kN/m<sup>3</sup>].

Model MES (Metody Elementów Skończonych) fundamentu zabytkowego wykonano w programie Abaqus na bazie dokumentacji projektowej obiektu [5]. Elementy, które posłużyły do wykonania modelu fundamentu oraz profilu geotechnicznego stanowią rodzaj elementów bryłowych (solid), gdzie w każdym

Tabl. 2. Zestawienie wyników – SGU oraz SGN

Obiekt	Osiadanie $U_z$ [cm]	Składowe pionowe naprężenia [kPa]
Fundament kamienny	1,19	328,0

wierzchołku występuje 6 stopni swobody (3 przesunięcia oraz 3 obroty). Widok oraz model MES podłoża wraz z fundamentem pokazano na rys. 4. Siatkę MES profilu geotechnicznego, podobnie jak fundamentu, wykonano z graniastosłupów o podstawie trójkątów i czworokątów. Liczba wygenerowanych węzłów w programie Abaqus wynosi około 5827, a liczba elementów jest równa 3928. Połączenia między warstwami zamodelowano jako sprężyste, umożliwiające przesunięcia warstw gruntu względem siebie.



Rys. 5. Wizualizacja wyników obliczeń numerycznych: a) osiadanie fundamentu, b) składowe pionowe naprężenia w podłożu gruntowym

Na rys. 5 przedstawiono graficznie wyniki osiadań i składowych pionowych naprężenia w podłożu i w fundamencie.

Ostateczne wyniki analizy numerycznej uzyskane programem Abaqus, tj. maksymalne osiadanie oraz maksymalne składowe pionowe naprężenia pod fundamentem zestawiono w tabl.2.

### STANY GRANICZNE

Przy obliczeniach według stanu granicznego nośności według EC7 powinien być spełniony następujący warunek [7]:

$$V_d \leq R_d$$

gdzie:

$V_d$  – wartość obliczeniowa działającego obciążenia,

$R_d$  – nośność obliczeniowa podłoża gruntowego.

Przyjmując do obliczeń następujące parametry geotechniczne gliny pylastej:  $c' = 28$  kPa,  $\phi = 15,8^\circ$ ,  $\gamma = 20,39$  kN/m<sup>3</sup>, pionowe obciążenie obliczeniowe  $V_d = 201,07$  kN/m oraz pozostałe wielkości według EC 7:  $\alpha = 0$ ,  $B' = 0,57$  m,  $L' = 5,00$  m, otrzymano kolejno:

- współczynniki nośności

$$N_q = e^{\pi \cdot \tan \phi} \cdot \tan \left( 45 + \frac{\phi}{2} \right) = 4,17$$

$$N_c = (N_q - 1) \cdot \tan \phi = 11,36$$

$$N_\gamma = 2 \cdot (N_q - 1) \cdot \tan \phi = 1,77$$

- współczynniki nachylenia podstawy  $b_q = b_c = 1,0$  oraz współczynnik nachylenia obciążenia  $i_c = i_q = i_g = 1,0$

- współczynniki kształtu podstawy

$$s_q = 1 + \frac{B'}{L'} \cdot \sin \phi' = 1,15$$

$$s_\gamma = 1 - 0,3 \cdot \frac{B'}{L'} = 0,83$$

$$s_c = \frac{s_q \cdot N_q - 1}{N_q - 1} = 1,20$$

Biorąc powyższe pod uwagę, nośność graniczną podłoża gruntowego wyznaczono z wzoru:

$$R = A' \cdot q_f = A' \left[ c' \cdot N_c \cdot b_c \cdot s_c \cdot i_c + q' \cdot N_q \cdot b_q \cdot s_q \cdot i_q + 0,5 \cdot \gamma' \cdot B' \cdot N_\gamma \cdot b_\gamma \cdot s_\gamma \cdot i_\gamma \right] = 317,78 \text{ kN/m}$$

Z kolei, przyjmując częściowy współczynnik bezpieczeństwa  $\gamma_R = 1,4$ , nośność obliczeniowa podłoża gruntowego wynosi:

$$R_d = \frac{R}{\gamma_R} = \frac{317,78}{1,4} = 226,98 \text{ kN/m}$$

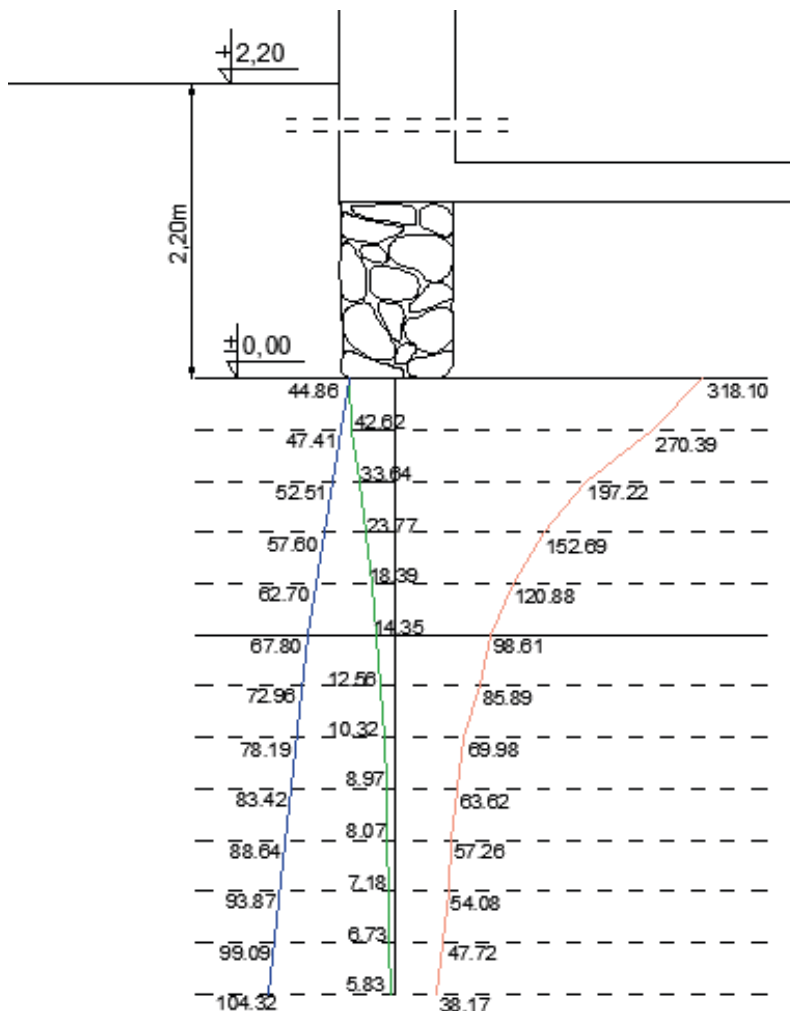
Porównując nośność obliczeniową z działającym obciążeniem, można stwierdzić, że nośność podłoża pod fundamentem jest wystarczająca:

$$R_d = 226,98 \text{ kN/m} > V_d = 201,07 \text{ kN/m}$$

Niezmiernie istotnym zagadnieniem przy ocenie zachowania się starych fundamentów są odkształcenia gruntu, przede wszystkim osiadania. Co prawda obowiązujące normy ściśle precyzują, kiedy ma być sprawdzany stan graniczny użyteczności, jednak w przypadku analizy fundamentów obiektów zabytkowych należy podchodzić do zagadnienia niestandardo-

Tabl. 3. Obliczenie osiadania fundamentu

Nr	Grunt	Rzędna środka warstwy	Grubość warstwy	$\gamma = \rho g$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\sigma_h^y$ [kPa]	$M_0$ [MPa]	$M$ [MPa]	$z/B$	$n_s$	$z/Bw$	$n_m$	$\sigma_z^s$ [kPa]	$\sigma_z^q$ [kPa]	$\sigma_z^d$ [kPa]	$s'$ [mm]	$s''$ [mm]
1	głina pylasta	0		20,39	44,86							44,86	318,10	273,24		
		0,125	0,25	20,39	47,41	27,02	36,03	0,22	0,85	0,21	0,95	42,62	270,39	227,77	2,11	0,30
		0,375	0,25	20,39	52,51	27,02	36,03	0,66	0,62	0,63	0,75	33,64	197,22	163,58	1,51	0,23
		0,625	0,25	20,39	57,60	27,02	36,03	1,10	0,48	1,04	0,53	23,77	152,69	128,91	1,19	0,16
		0,875	0,25	20,39	62,70	27,02	36,03	1,54	0,38	1,46	0,41	18,39	120,88	102,49	0,95	0,13
		1,125	0,25	20,39	67,80	27,02	36,03	1,97	0,31	1,88	0,32	14,35	98,61	84,26	0,78	0,10
2	głina piaszczysta zwięzła	1,375	0,25	20,90	72,96	30,09	33,44	2,41	0,27	2,29	0,28	12,56	85,89	73,33	0,61	0,09
		1,625	0,25	20,90	78,19	30,09	33,44	2,85	0,22	2,71	0,23	10,32	69,98	59,68	0,50	0,08
		1,875	0,25	20,90	83,42	30,09	33,44	3,29	0,2	3,13	0,20	8,97	63,62	54,65	0,45	0,07
		2,125	0,25	20,90	88,64	30,09	33,44	3,73	0,18	3,54	0,18	8,07	57,26	49,18	0,41	0,06
		2,375	0,25	20,90	93,87	30,09	33,44	4,17	0,17	3,96	0,16	7,18	54,08	46,90	0,39	0,05
		2,625	0,25	20,90	99,09	30,09	33,44	4,61	0,15	4,38	0,15	6,73	47,72	40,99	0,34	0,05
		2,875	0,25	20,90	104,32	30,09	33,44	5,04	0,12	4,79	0,13	5,83	38,17	32,34	0,27	0,04
															S = 12,63 mm	



– napężenie pierwotne

$$\sigma_h^y = \sum_{i=1}^n \rho q h_i$$

– napężenia wtórne

$$\sigma_{z=0}^s = \sigma_D^y$$

$$\sigma_z^s = \sigma_{z=0}^s \cdot \eta_0$$

– napężenia minimalne

$$\sigma_z^m = \sigma_h^y - \sigma_z^s$$

– napężenia dodatkowe

$$\sigma_{z=0}^d = q - \sigma_z^s \sigma_z^d = \sigma_{z=0}^d \cdot \eta_0$$

– napężenia całkowite

$$\sigma_z^t = \sigma_h^m + \sigma_z^s + \sigma_z^d$$

– osiadanie

$$s_i = s_i' + s_i'' \quad s_i' = \frac{\sigma_{zdi} h_i}{M_{oi}} \quad s_i'' = \lambda \frac{\sigma_{zsi} h_i}{M_i}$$

Rys. 6. Napężenia w podłożu gruntowym

wo. Tutaj wpływ na dodatkowe deformacje podłoża ma wiele czynników nieznanymi albo nie do końca zbadanych (różne oddziaływania w przeszłości, reologia, butwienie drewna, itd.). W dalszym ciągu, do pełnej, a jednocześnie porównawczej analizy, obliczono również osiadania rozpatrywanego fundamentu, wykorzystując najczęściej stosowaną obecnie tzw. metodę odkształceń jednoosiowych. Wyniki obliczeń tą metodą zestawiono w tabl. 3, natomiast wykresy rozkładu naprężenia wraz ze schematem fundamentu pokazano na rys. 6. Całkowite osiadanie fundamentu wyniosło 12,63 mm.

## WNIOSKI

Ocena pracy fundamentów obiektów zabytkowych jest zadaniem złożonym, wymagającym wielu specjalistycznych badań i analiz. Ilościową ocenę można przeprowadzić mniej lub bardziej rozbudowanymi metodami obliczeniowymi. W rozpatrywanym przypadku wyniki otrzymane metodą numeryczną (przy wykorzystaniu programu Abaqus), bazującą na dyskretyzacji ośrodka gruntowego i fundamentu siatką elementów skończonych, okazały się zgodne z uzyskanymi metodą normową (stanów granicznych).

## LITERATURA

1. Dardzińska I.: Analiza wybranych zagadnień fundamentowania obiektów zabytkowych. Praca doktorska, Politechnika Gdańska, 2005.
2. Gadomski W., Gadomski P.: Projekt wielobranżowy - Remont, przebudowa i zmiana sposobu użytkowania poddasza kamienicy zlokalizowanej w Olsztynie przy ul. Staromiejskiej 6 (dz. nr 59 obr 64) oraz budowa przyłącza kanalizacji deszczowej, Olsztyn, 2010.
3. Kerisel J.: Old structure in relation to soil conditions. Geotechnique, 25, No. 8, 433–483, 1975.
4. Przewłocki J., Dardzińska I., Świniański J.: Review of historical buildings' foundations. Geotechnique, Vol. 55, No. 5, s. 363-372, 2005.
5. Verbrugge J. C., Rammer Y.: Regards d'aujourd'hui sur les fondations u passé. Reprise en sous-œuvre et patrimoine culturel immobilier, Auditorium des Moulins de Beez (Namur), 15-22, 2011.
6. Wiłun Z.: Zarys Geotechniki, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa, 1982.
7. PN-EN 1997-1 i 2, Eurokod 7, Projektowanie geotechniczne, 2007.