

# Wyznaczanie wysokości obliczeniowej w konstrukcjach gruntowo-powłokowych

Mgr inż. Marcin Mumot

Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego

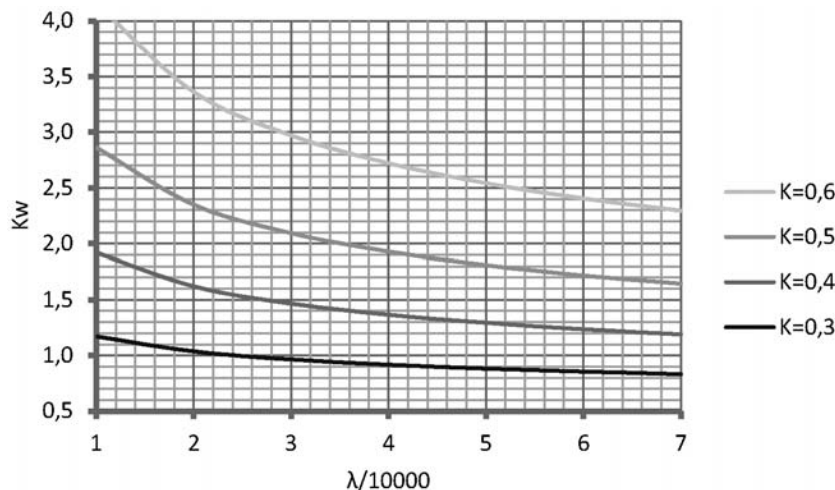
Mimo wielu lat projektowania i budowania konstrukcji podatnych, wciąż istnieje wiele nierozwiązanych problemów z nimi związanych. Jednym z tych problemów jest trudność w dokładnym oszacowaniu wypiętrzenia konstrukcji. Wypiętrzenie powłoki w jej kluczu jest głównym parametrem określającym poprawność zaprojektowania i wykonania konstrukcji gruntowo-powłokowej. Algorytmy wykorzystywane do określenia wypiętrzenia konstrukcji z blach falistych opierają się na założeniach nie popartych badaniami. W artykule przedstawiono metodykę oraz wyniki badań, które mają za zadanie dokładne określenie wysokości obliczeniowej konstrukcji gruntowo-powłokowej. Analizę doboru wysokości obliczeniowej konstrukcji przeprowadzono na 21 przestrzennych modelach obiektów wykonanych w programie PLAXIS. Wyniki badań porównano z obec-

nymi założeniami projektowymi oraz sformułowano wnioski. Wyniki badań nie obejmują konstrukcji gruntowo-powłokowych o ramowym kształcie powłoki.

## ALGORYTM SZACOWANIA WYPIĘTRZENIA POWŁOKI

Algorytm jest oparty na badaniach przeprowadzonych przez Duncana [1]. W badaniach wykorzystano wzór do szacowania wypiętrzenia w kluczu powłoki, który przyjmuje następującą postać:

$$w = \frac{K_w}{10^5} \cdot \frac{\gamma_g \cdot a}{EI} \cdot L^5 \quad (1)$$



Rys. 1. Wykres zmiany  $K_w$  w zależności od  $\lambda$  i  $\kappa$  [3]

gdzie:

$K_w$  – wartość odczytana z wykresu zależna od  $\kappa$  oraz  $\lambda$ ,

$\gamma_g$  – ciężar objętościowy gruntu,

$a$  – długość fali,

$EI$  – sztywność powłoki,

$L$  – rozpiętość konstrukcji.

W celu odczytania wartości parametru  $K_w$  należy wyznaczyć wcześniej parametr  $\lambda$  oraz  $\kappa$ . Pierwszy z nich uwzględnia stosunek edometrycznego modułu ścisłości gruntu i sztywności powłoki oraz długość fali i rozpiętość konstrukcji.

$$\lambda = \frac{E_g}{EI} \cdot a \cdot L^3 \quad (2)$$

gdzie:

$E_g$  – edometryczny moduł ścisłości gruntu,

$EI$  – sztywność powłoki,

$a$  – długość fali,

$L$  – rozpiętość konstrukcji.

Natomiast parametr  $\kappa$  uwzględnia geometrię konstrukcji.

$$\kappa = \frac{h_k}{L} \quad (3)$$

gdzie:

$h_k$  – wysokość obliczeniowa konstrukcji,

$L$  – rozpiętość konstrukcji.

Jako  $h_k$  przyjmuje się obliczeniową wysokość konstrukcji według [2]: „odległość od linii wyznaczającej maksymalną rozpiętość konstrukcji a najwyższym jej punktem (kluczem)”. Według [3, 4], w przypadku obliczania konstrukcji o przekrojach zamkniętych wartość  $h_k$  powinna być przyjmowana w następujący sposób:

- $h_k = D/2$  lub  $h_k = D_v/2$  przy powłoce kołowej lub elipsoidalnej,
- $h_k = 2h/3$  przy powłokach kroplastych,
- $h_k = 2h/5$  przy powłokach gruszkowych.

W powłokach otwartych należy przyjąć:

- $h_k = h$  przy powłokach łukowych o niskim profilu lub łukowych,
- $h_k = 3h/4$  przy powłokach łukowych o wysokim profilu.

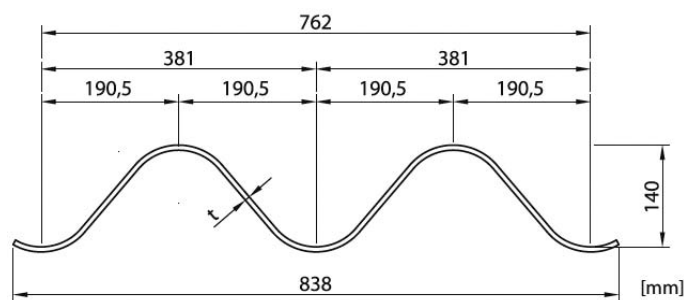
Mając oba parametry  $\lambda$  oraz  $\kappa$ , możemy odczytać wartość  $K_w$  z wykresu przedstawionego na rys. 1.

## MODELE OBLICZENIOWE

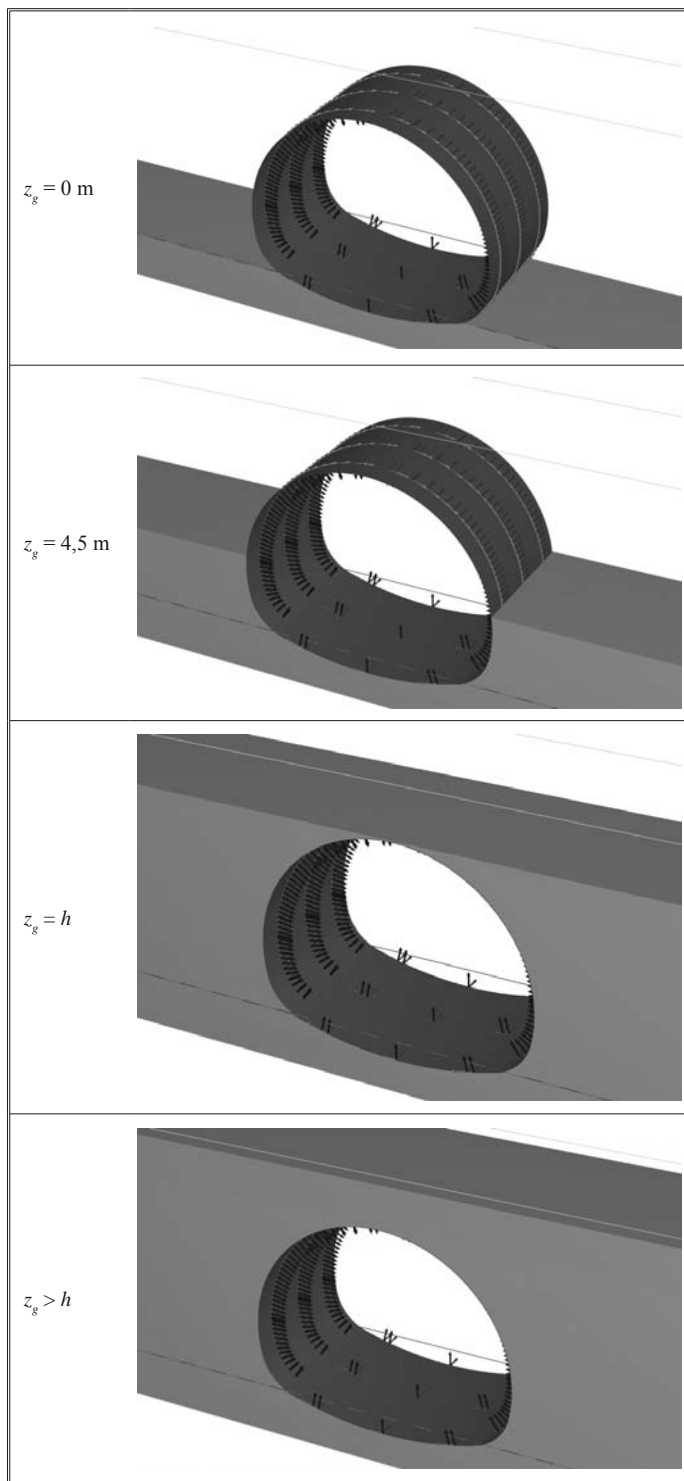
Modele obliczeniowe wykorzystane do analizy wykonano w programie obliczeniowym PLAXIS. Model wykonano jako przestrzenny o długości obiektu 8 m, z uwzględnieniem etapowego wykonania zasypki gruntowej. Konstrukcję z blachy falistej zamodelowano jako płaski element o sztywności odpowiadającej kolejno trzem różnym rodzajom blach, których momenty bezwładności są podane w literaturze: MP200 × 55 × 7 mm; MP200 × 55 × 6,25 mm oraz SC381 × 140 × 7 mm (rys. 2). Przyjęto następujące parametry konstrukcji stalowej:  $E = 210$  GPa,  $\nu = 0,3$ . W celu porównania modeli obliczeniowych przyjęto taki sam grunt zasypkowy we wszystkich konstrukcjach w grupie o parametrach:  $E_g = 40$  MPa,  $\nu_g = 0,3$ ,  $\gamma_g = 20$  kN/m<sup>2</sup> lub  $\gamma_g = 18$  kN/m<sup>2</sup>.

Podczas obliczeń nie ingerowano w działanie programu obliczeniowego, wcześniej był on sprawdzony na zrealizowanych obiektach. Ograniczono się do elementów skończonych o rozmiarze siatki 0,50 m zagęszczonej w okolicy powłoki do 0,05 m. Zastosowano proponowane w programie modele materiałów zarówno do powłok, jak i do gruntu niespoistego. Podstawa badanego modelu powłoki jest sztywna, niepodatna, natomiast boki modelu mogą bez oporów przemieszczać się w kierunku pionowym.

Zasypkę gruntową zrealizowano poprzez dodawanie zasypki gruntowej o grubości pojedynczej warstwy 0,3 m. W modelach wykorzystano od 20 do 45 warstw zasypki. Na rys. 3 pokazano poszczególne etapy zasypywania wybranej konstrukcji.



Rys. 2. Przekrój poprzeczny przez blachę falistą Super Cor

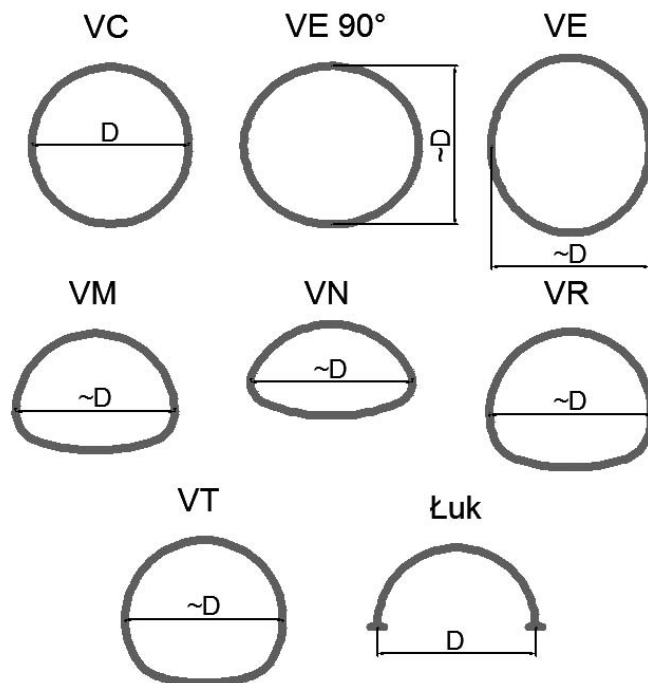


Rys. 3. Etapowanie wykonania konstrukcji gruntowo-powłokowej

Obliczenia wykonano na trzech grupach powłok o podobnej geometrii. Grupy te utworzono ze względu na rozpiętość teoretyczną konstrukcji 9 m, 10 m oraz 15 m. Kształty powłok, do których wykonywano obliczenia, przedstawiono na rys. 4.

### WYNIKI ANALIZY

Analizę parametryczną przeprowadzono dla powłok o zaprezentowanych kształtach w trzech grupach. Zmiennym parametrem w tych zbiorach była rozpiętość konstrukcyjna powłok.



Rys. 4. Przyjęte do obliczeń kształty powłok

Badano powłoki o rozpiętościach 9 m, 10 m oraz 15 m. Jako pierwszą grupę modeli do obliczeń (tabl. 1) przyjęto powłoki o rozpiętości 9 m. Stalową konstrukcję powłoki zamodelowano jako powłokę z blachy falistej o długości fali 200 mm, wysokości 55 mm i grubości blachy 6,25 mm. Maksymalne wypiętrzenie konstrukcji „w” (rys. 5) odczytano w momencie, gdy zasypka gruntowa osiągnęła poziom klucza powłoki. W celu uzyskania wysokości obliczeniowej z badań własnych wprowadzono parametr  $\Omega$ , który służył do optymalizacji wyników w celu otrzymania jak najlepszej zbieżności wykresu.

Parametr  $\Omega$  zmieniano tak, aby otrzymać współczynnik determinacji zbliżony do jedności. W tym przypadku współczynnik determinacji po analizie parametrycznej wynosi 0,9805. Wartość  $\Omega$  przyjęto jako 1 dla konstrukcji łukowej, natomiast zmieniano go osobno dla konstrukcji kołowej oraz o innych kształtach tak, aby otrzymać jak najlepszą zbieżność wyników.

W drugiej grupie obliczeniowej (tabl. 2) zastosowano powłokę o podobnych parametrach, jak w pierwszej, lecz wykonaną z blachy o grubości 7 mm. Rozpiętość teoretyczna tych konstrukcji wynosiła 10 m. Po analizie parametru  $\Omega$  uzyskano współczynnik zbieżności 0,985, a wykres wypiętrzenia powłoki przedstawiono na rys. 6.

Trzecia grupa badanych obiektów gruntowo-powłokowych (tabl. 3) charakteryzowała się tym, że były to konstrukcje wykonane z blach o wysokim profilu SuperCore o parametrach  $381 \times 140 \times 7$  mm. Rozpiętość teoretyczna w tych obiektach wynosiła 15 metrów. Zmieniono ciężar objętościowy gruntu z  $20 \text{ kN/m}^3$  na  $18 \text{ kN/m}^3$ . Po analizie parametru  $\Omega$  uzyskano współczynnik zbieżności 0,9777, a wykres wypiętrzenia powłoki przedstawiono na rys. 7.

Z przeprowadzonych obliczeń komputerowych oraz analizy otrzymanych rezultatów wynika, że prawidłowo wyznaczono parametr  $\Omega$ . Parametr  $\Omega$  można zastosować jako współczynnik, przez który należy przemnożyć rzeczywistą wysokość konstruk-

Tabl. 1. Parametry charakterystyczne pierwszej grupy konstrukcji

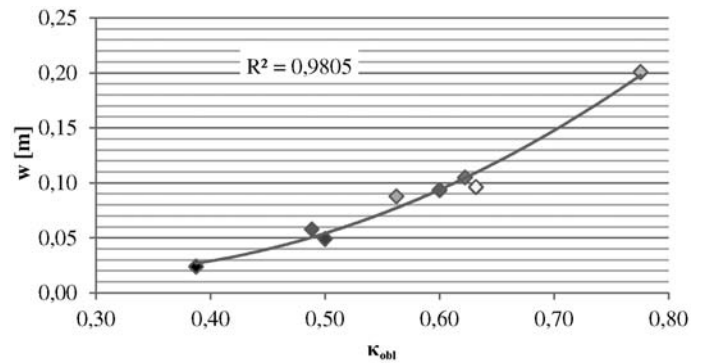
MP200 × 55 × 6,25 mm							
	$h$	$D$	$\Omega$	$h_{obl}$	$\kappa_{obl}$	$h/D$	$W$
VC90	9,00	9,00	0,6	5,4	0,60	1,00	0,094
VE38	10,05	9,07	0,7	7,035	0,78	1,11	0,201
VE38 90°	9,07	10,05	0,7	6,349	0,63	0,90	0,096
VM37	6,28	9,00	0,7	4,396	0,49	0,70	0,058
VN29	4,98	9,00	0,7	3,486	0,39	0,55	0,024
VR27	7,23	9,00	0,7	5,061	0,56	0,80	0,088
VT37	8,00	9,00	0,7	5,6	0,62	0,89	0,105
łuk $D = 10$ m	4,50	9,00	1,0	4,5	0,50	0,50	0,049

Tabl. 2. Parametry charakterystyczne drugiej grupy konstrukcji

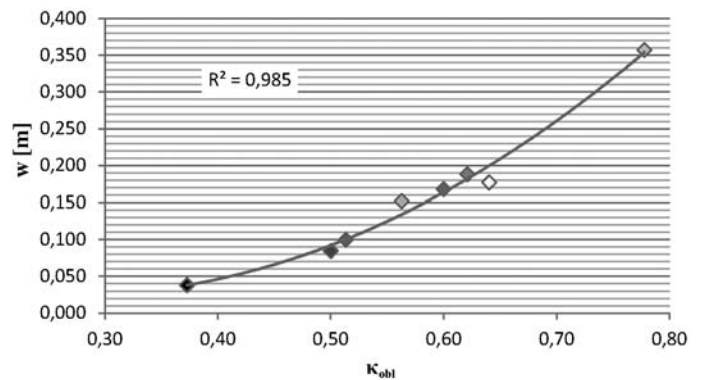
MP200 × 55 × 7 mm							
	$h$	$D$	$\Omega$	$h_{obl}$	$\kappa_{obl}$	$h/D$	$W$
VC100	10	10	0,6	6	0,60	1,00	0,168
VE40	11,2	10,08	0,7	7,84	0,78	1,11	0,357
VE40 90°	10,08	11,02	0,7	7,056	0,64	0,91	0,177
VM41	7,38	10,06	0,7	5,166	0,51	0,73	0,099
VN33	5,36	10,07	0,7	3,752	0,37	0,53	0,038
VR40	8,04	10	0,7	5,628	0,56	0,80	0,152
VT37	8,87	10	0,7	6,209	0,62	0,89	0,188
łuk $D = 10$ m	5	10	1	5	0,50	0,50	0,085

Tabl. 3. Parametry charakterystyczne trzeciej grupy konstrukcji

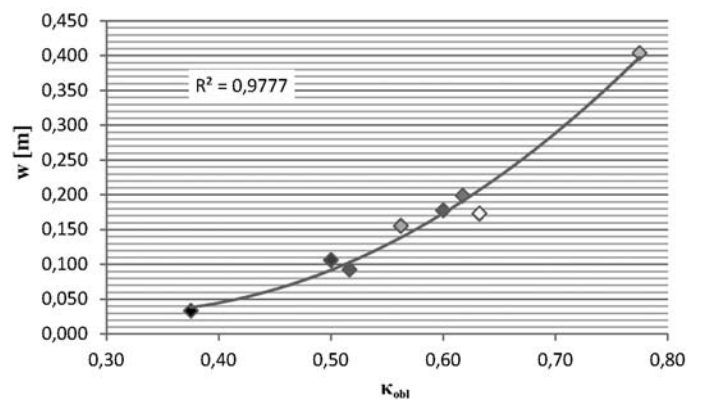
SC381 × 140 × 7 mm							
	$h$	$D$	$\Omega$	$h_{obl}$	$\kappa_{obl}$	$h/D$	$W$
VC150	15,00	15,00	0,6	9,00	0,60	1,00	0,178
VE60	16,74	15,12	0,7	11,72	0,78	1,11	0,404
VE60 90°	15,12	16,74	0,7	10,58	0,63	0,90	0,173
VM50	11,07	15,00	0,7	7,75	0,52	0,74	0,092
VN50	8,04	15,00	0,7	5,63	0,38	0,54	0,034
VR50	12,05	15,00	0,7	8,44	0,56	0,80	0,156
VT50	13,23	15,00	0,7	9,26	0,62	0,88	0,199
łuk $d = 15$ m	7,50	15,00	1	7,50	0,50	0,50	0,106



Rys. 5. Wykres wypiętrzenia powłoki w zależności od kształtu wraz z linią trendu



Rys. 6. Wykres wypiętrzenia powłoki w zależności od kształtu wraz z linią trendu



Rys. 7. Wykres wypiętrzenia powłoki w zależności od kształtu wraz z linią trendu

cji w celu otrzymania wartości obliczeniowej. W badaniach stwierdzono, że wysokości obliczeniowe powinny być dobierane w następujący sposób:

- $h_k = 0,6h$  lub  $h_k = 0,6D$  przy powłokach o kształcie kołowym,
- $h_k = 0,7h$  przy powłokach o kształtach różnych od kołowych,
- $h_k = h$  przy powłokach otwartych.

Dobór wysokości obliczeniowej według tej metody wyeliminuje problem związany z prawidłowym skatalogowaniem obliczanej powłoki.

## SPRAWDZENIE WYNIKÓW

Następnym etapem prowadzonych badań było porównanie opracowanych wyników, otrzymanych za pomocą programu MES, z obecnie stosowaną metodą. W tym celu obliczono wypiętrzenie powłoki za pomocą wzorów Duncana, przyjmując wysokość obliczeniową według wytycznych oraz według przedstawionego sposobu. Wyniki tego porównania zaprezentowano w tabl. 4 i 5.

Z zestawionych rezultatów wynika, że przedstawiony sposób określania wysokości obliczeniowej zaproponowany przez autora jest prawidłowy. Szacowanie wypiętrzenia z wykorzystaniem nowego sposobu określania wysokości obliczeniowej konstrukcji umożliwia uzyskanie dokładniejszych wyników. W niektórych przypadkach nie odnotowano znaczących różnic. Można zauważyć, że szacunki wypiętrzenia są dokładniejsze

w grupie 2., a spowodowane są tym, że w wytycznych do projektowania tego rodzaju konstrukcji zaleca się, aby parametr  $\lambda$  miał wartość od 6000 do 8000. Przekroczenie zalecanych wartości parametru  $\lambda$  może skutkować niedokładnym szacowaniem wypiętrzenia konstrukcji. Na podstawie tego porównania można stwierdzić, że zaproponowana metoda określenia wysokości obliczeniowej konstrukcji jest prawidłowa i może być z powodzeniem stosowana.

## WNIOSKI

Wykonane obliczenia miały na celu ocenę prawidłowości określania wysokości obliczeniowej konstrukcji gruntowo-powłokowych. Obliczenia wykonano na 21 przestrzennych modelach komputerowych, różnicując je rozpiętością teoretyczną, kształtem powłoki, rodzajem powłoki oraz parametrami gruntu.

Tabl. 4. Porównanie wyników, część 1

Powłoka	$h$	$D$	$h_{k, \text{stare}}$	$h_{k, \text{nowe}}$	$\gamma_g$	$a$	$EI$	$Eg$
VC100	10,00	10,00	5,00	6,00	20	0,2	674,55	40000
VE40	11,20	10,08	5,60	7,84	20	0,2	674,55	40000
VE40 90°	10,08	11,02	5,04	7,06	20	0,2	674,55	40000
VM41	7,38	10,06	4,92	5,17	20	0,2	674,55	40000
VN33	5,36	10,07	3,57	3,75	20	0,2	674,55	40000
VR40	8,04	10,00	5,36	5,63	20	0,2	674,55	40000
VT37	8,87	10,00	5,91	6,21	20	0,2	674,55	40000
łuk $D = 10$ m	5,00	10,00	5,00	5,00	20	0,2	674,55	40000
VC90	9,00	9,00	5,00	5,40	20	0,2	621,49	40000
VE38	10,05	9,07	5,03	7,04	20	0,2	621,49	40000
VE38 90°	9,07	10,05	4,54	6,35	20	0,2	621,49	40000
VM37	6,28	9,00	4,19	4,40	20	0,2	621,49	40000
VN29	4,98	9,00	3,32	3,49	20	0,2	621,49	40000
VR27	7,23	9,00	4,82	5,06	20	0,2	621,49	40000
VT37	8,00	9,00	5,33	5,60	20	0,2	621,49	40000
łuk $D = 10$ m	4,50	9,00	4,50	4,50	20	0,2	621,49	40000
VC150	15,00	15,00	5,00	9,00	18	0,381	4598,28	40000
VE60	16,74	15,12	8,37	11,72	18	0,381	4598,28	40000
VE60 90°	15,12	16,74	7,56	10,58	18	0,381	4598,28	40000
VM50	11,07	15,00	7,38	7,75	18	0,381	4598,28	40000
VN50	8,04	15,00	5,36	5,63	18	0,381	4598,28	40000
VR50	12,05	15,00	8,03	8,44	18	0,381	4598,28	40000
VT50	13,23	15,00	8,82	9,26	18	0,381	4598,28	40000
łuk $D = 15$ m	7,50	15,00	7,50	7,50	18	0,381	4598,28	40000

Tabl. 5. Porównanie wyników, część 2

Powłoka	$\lambda$	$\kappa_{stare}$	$\kappa_{nowe}$	$KW_{stare}$	$KW_{nowe}$	$w_{stare}$	$w_{nowe}$	$w_{MES}$
VC100	118597	0,50	0,60	1,40	1,95	0,083	0,116	0,094
VE40	122438	0,56	0,78	1,75	3,30	0,109	0,205	0,201
VE40 90°	174904	0,46	0,64	1,25	2,00	0,133	0,212	0,096
VM41	121469	0,49	0,51	1,40	1,40	0,086	0,086	0,058
VN33	121953	0,35	0,37	0,90	0,93	0,056	0,058	0,024
VR40	118597	0,54	0,56	1,68	1,73	0,100	0,103	0,088
VT37	118597	0,59	0,62	1,95	2,00	0,116	0,119	0,105
łuk $D = 10$ m	118597	0,50	0,50	1,40	1,40	0,083	0,083	0,049
VC90	84455	0,56	0,60	1,85	2,17	0,063	0,074	0,094
VE38	87113	0,55	0,78	1,85	4,00	0,066	0,143	0,201
VE38 90°	131316	0,45	0,63	1,18	2,00	0,078	0,133	0,096
VM37	84455	0,47	0,49	1,40	1,51	0,048	0,052	0,058
VN29	84455	0,37	0,39	1,10	1,15	0,038	0,039	0,024
VR27	84455	0,54	0,56	1,80	1,90	0,062	0,065	0,088
VT37	84455	0,59	0,62	2,10	2,35	0,072	0,080	0,105
łuk $D = 10$ m	84455	0,50	0,50	1,55	1,55	0,053	0,053	0,049
VC150	167786	0,33	0,60	0,75	1,76	0,127	0,298	0,178
VE60	173219	0,55	0,78	1,60	2,50	0,285	0,446	0,404
VE60 90°	260262	0,45	0,63	–	–	–	–	0,173
VM50	167786	0,49	0,52	1,28	1,28	0,217	0,218	0,092
VN50	167786	0,36	0,38	0,85	0,90	0,144	0,153	0,034
VR50	167786	0,54	0,56	1,58	1,63	0,268	0,277	0,156
VT50	167786	0,59	0,62	1,70	1,80	0,289	0,306	0,199
łuk $D = 15$ m	167786	0,50	0,50	1,30	1,30	0,221	0,221	0,106

Liczba wykonanych modeli pozwoliła na uniknięcie poważnego błędu statystycznego. Wyniki badań wykazały nieprawidłowości w obecnie stosowanych założeniach dotyczących wysokości obliczeniowej konstrukcji. Przeprowadzone badania umożliwiły stworzenie nowych wytycznych do określania wysokości obliczeniowej tego rodzaju konstrukcji. Wysokości te powinny być określone w następujący sposób:

- $h_k = 0,6 h$  lub  $h_k = 0,6 D$  przy powłokach o kształcie kołowym,
- $h_k = 0,7 h$  przy powłokach o kształtach różnych od kołowych,
- $h_k = h$  przy powłokach łukowych otwartych.

Stosowanie tych współczynników pozwoli na dokładniejsze szacowanie wypiętrzenia powłoki w czasie budowy oraz umożliwi w niektórych przypadkach zmianę profilu powłoki, a tym samym redukcję kosztów budowy. W przeprowadzanych bada-

niach nie uwzględniano ramowych konstrukcji gruntowo-powłokowych ze względu na ich nietypowe deformacje oraz rzadkość ich wykonywania.

#### LITERATURA

1. Duncan J. M.: Behaviour and design of long span metal culverts. ASCE, Convention „Soil-Structure Interaction for Shallow Foundations and Buried Structures”, San Francisco, USA, October 1977.
2. Janusz L., Madaj A.: Obiekty inżynierskie z blach falistych. Projektowanie i wykonawstwo. WKiŁ, Warszawa, 2007.
3. Machelski Cz.: Modelowanie mostowych konstrukcji gruntowo-powłokowych, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2008.
4. Pettersson L.: Full Scale Tests and Structural Evaluation of Soil Steel Flexible Culverts with low Height of Cover, Doctoral Thesis, KTH, Sweden 2007.