

Efekty technologiczne wzmocnienia mostów murowanych z zastosowaniem blach falistych

Technology of reinforcing masonry bridges with the use of corrugated steel sheets



Czesław Machelski

Prof. dr hab. inż.

Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Wydział Inżynierii Kształtowania Środowiska i Geodezji, Katedra Budownictwa

czeslaw.machelski@upwr.edu.pl



Julia Nowak

Mgr inż.

Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Wydział Inżynierii Kształtowania Środowiska i Geodezji, Katedra Budownictwa

julia.nowak@upwr.edu.pl

Streszczenie: Wzmocnianie profilami blach falistych jest efektywnym sposobem rewitalizacji starych obiektów mostowych wybudowanych z cegły lub kamienia. Prezentowana technologia wzmocnienia polega na wprowadzaniu powłok profilowanych pod eksploatowaną konstrukcję łukową i wypełnianie iniektem wolnego obszaru pomiędzy nimi. Zaletą takiego wzmocnienia sklepienia jest znaczny przyrost nośności konstrukcji. W fazie budowy obiektu, występuje część istniejąca w postaci sklepienia z nadłęczem obciążona nawierzchnią oraz niezależna od niej powłoka. Na obydwie części układu oddziałuje ciśnienie hydrostatyczne mieszanki betonowej. Na przykładzie wzmocnianego obiektu przedstawiono model powłoki i wyniki obliczeń MES. W pracy analizowano siły wewnętrzne w powłoce z blachy falistej określone na podstawie przemieszczeń uzyskanych z geodezyjnych pomiarów jej deformacji. Do przetwarzania danych przygotowano algorytm z wykorzystaniem ujęcia różnicowego. W przykładzie wskazano na możliwość oceny bezpieczeństwa powłoki w trakcie budowy. Z uwagi na duże wartości przemieszczeń i sił wewnętrznych powłoki stosuje się dwie fazy wypełnienia iniektem przestrzeni między istniejącym łukiem a profilem. W analizowanym przykładzie wskazano na rozbieżności pomiędzy modelem numerycznym obiektu a rzeczywistymi warunkami statycznymi wzmocnianej konstrukcji.

Słowa kluczowe: Wzmocnianie mostów murowanych; Blachy faliste; Analizy numeryczne

Abstract: Strengthening, using corrugated metal sheets, is an effective way of revitalizing old arch structures like bridges, tunnels and culverts built of brick or stone. The presented reinforcement technology consists in introducing the coating under the exploited structure and filling the free space between them with concrete blend. The advantage of such a strengthening of the vault is a significant increase in the load-bearing capacity of the structure. During the construction phase, the primary part occurs in the form of a vault with a surface load as well as an independent metal coating. Both parts of the system are affected by the hydrostatic pressure of the concrete blend filling. The example of the reinforced object presents the shell model and numerical FEM calculation results. The work analyses internal forces in a corrugated plate determined on the basis of displacements obtained from geodetic measurements of coating deformations. An algorithm using a differential approach was prepared for data processing. The example indicates the possibility of assessing the safety of the metal coating during construction. Due to the high values of displacements and internal forces, two concrete blend filling phases are used. In the analysed example of the reinforced structure, large discrepancies between the FEM model results and real static conditions of the coating were indicated.

Keywords: Reinforcement of masonry bridges; Corrugated steel sheets; Numerical calculations

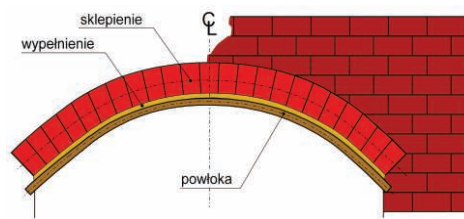
Wstęp

W pracy omówiono przykład jednego ze sposobów przywracania do pełnej eksploatacji komunikacyjnych obiektów o konstrukcji sklepionej [3, 7]. Zwrócono uwagę na technologię wzmocnienia mostów, tuneli i przepustów z użyciem blach falistych jako efektywny zabieg techniczny rewitalizacji starych obiektów wybudowanych z cegły lub kamienia [5,11].

Technologia wzmocnienia polega na wprowadzaniu powłoki pod istniejącą konstrukcję i mocowanie jej w podporach obiektu, a następnie wypełnienie wolnego obszaru pomiędzy wzmocnianą sklepieniem a powłoką - mieszanką betonową (iniektem). W początkowej fazie wzmocnienia obiektu, występują jako niezależne części: sklepienie oraz powłoka z blachy falistej, jak na rys. 1.

Zaletą takiej technologii jest nie-

wielka redukcja przestrzeni pod sklepieniem. W procesie budowlanym nie ma konieczności wprowadzania ograniczeń komunikacyjnych na moście. Podstawowym celem jest zwiększenie nośności konstrukcji w odniesieniu do stanu pierwotnego. Głównym problemem technologicznym wzmocnianego obiektu, stanowią naprężenia wynikające z deformacji blachy falistej powstałe podczas realizacji wypełniania. W pracy rozpatruje się



1. Widok obiektu i schemat wzmocnienia konstrukcji sklepienia [5]

konieczność stosowania przerw technologicznych podczas wprowadzania iniektu. Z uwagi na zasadę pracy sklepienia i powłoki z blachy falistej nie są konieczne łączniki wymuszające współpracę [5, 6, 10].

Model powłoki w fazie realizacji wzmocnienia

W fazie budowy obiektu, przedstawionej na rys. 1, wyróżnia się część pierwotną w postaci sklepienia z pozostałymi elementami wyposażenia oraz powłokę z blachy falistej. W trakcie wypełniania przestrzeni pomiędzy sklepieniem a powłoką, na obie części układu oddziałuje ciśnienie hydrostatyczne zaczynu cementowego $p(z)$, jak na rys. 2. Jego intensywność oraz zasięg wzdłuż długości łuku określony jest przez rzędną z . Z analiz projektowych wynika, że ze względu na bezpieczeństwo powłoki zaleca się zastosowanie przerwy technologicznej podczas wypełniania przestrzeni iniektu. Przerwa ta pozwala na zmniejszenie sił wewnętrznych i przemieszczeń powłoki w porównaniu z pełnym cyklem wypełnienia. W pracy przyjmuje się realizację procesu wypełnienia w dwóch etapach. Założono, że przerwa technologiczna wystąpi na poziomie z_0 , a po częściowym związaniu zaczynu cementowego odbędzie się wypełnianie pozostałej części pomiędzy

tymi elementami – aż do osiągnięcia klucza sklepienia. Stąd w drugim etapie, proporcjonalnie do wzrostu rzędnej $z - z_0$ przyrasta siła rozłożona $p(z)$ w stałej proporcji do ciężaru objętościowego mieszanki betonowej.

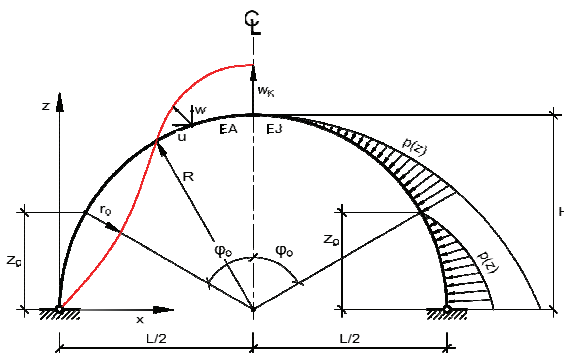
W modelu geometrii konstrukcji wyróżnia się dwa podukłady: murywane sklepienie i wiotką powłokę z blachy falistej. W części dolnej łączy je wzajemne oddziaływanie hydrostatyczne wypełnienia $p(z)$. W schemacie statycznym analizie poddaje się wycinek obwodowy powłoki, modelowany jako łuk o kształcie kołowym i promieniu R . W obliczeniach przyjmuje się jako wartości stałe sztywności na zginanie EI oraz ściskanie EA . Oddziaływanie siły $p(z)$ powoduje deformację powłoki, przedstawioną po lewej stronie schematu. Deformacja ta określona jest przez maksymalne przemieszczenia: pionowe w_k – wypiętrzenie klucza oraz przemieszczenie o kierunku radialnym r_0 – jako zwężenie w części bocznej - ociosie. W pracy przyjęto

symetrię układu, czyli jednakowy poziom wypełnienia przestrzeni pomiędzy powłoką a sklepieniem.

Deformacja powłoki podczas wypełniania mieszanką betonową

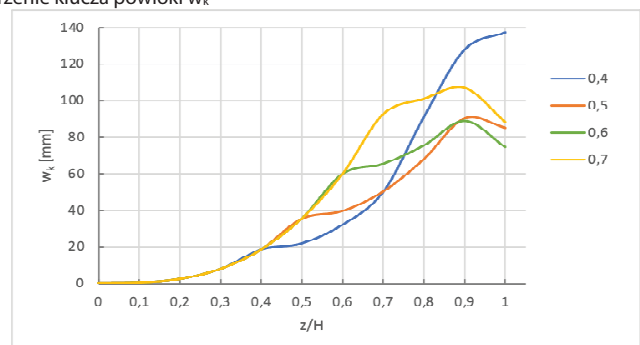
Skuteczność podziału technologicznego na dwie fazy analizowano na przykładzie wzmocnionego obiektu tunelowego o długości 93 m, zlokalizowanego w Jedlinie [6]. W obliczeniach przyjęto dane geometrii powłoki obiektu jako połowy koła, gdy $R = H = L/2 = 3,5$ m. Zastosowano profil z blachy falistej typu MP 200x55x5,5 [mm] z oznaczeniem MP $a \times f \times g$ (długość fali, strzałka, grubość blachy). Parametry geometryczne wycinka obwodowego profilu o szerokości $a = 200$ mm wynoszą: pole powierzchni przekroju poprzecznego $A = 13,024$ cm² i moment bezwładności $I = 50,186$ cm⁴ oraz sztywność na zginanie $EI = 103$ kNm².

Na rys. 3 przedstawiono wyniki analizy przemieszczeń charakterystycznych punktów powłoki, wyróżnionych w schemacie jak na rys. 2. Do utworzenia wykresów wykorzystano rezultaty obliczeń przeprowadzonych w programie MES. Parametrem zmiennym w analizie jest poziom wypełnienia z .

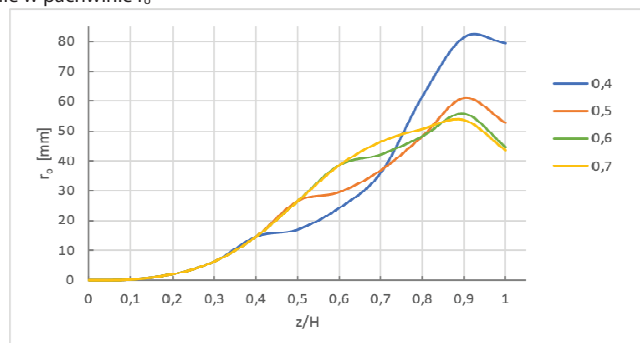


2. Schemat oddziaływania wypełnienia i deformacja pasm obwodowego powłoki

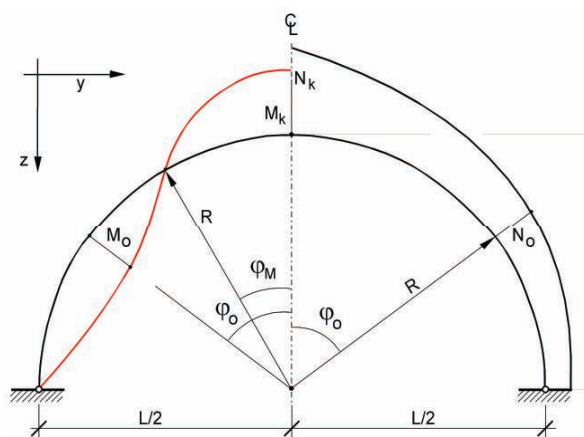
a) wypiętrzenie klucza powłoki w_k



b) zwężenie w pachwinie r_0



3. Zmiana deformacji powłoki podczas wypełnienia



4. Rozkład sił wewnętrznych w łuku

W obliczeniach przyjęto cztery różne poziomy zakończenia pierwszej fazy wypełniania zaczynem. Zostały one podane w legendzie rysunków w odniesieniu do wysokości sklepienia, w postaci parametru z_o/H . Wyniki tych obliczeń są podstawą do opracowania geometrii wykonawczej (projektowanej) pasma obwodowego łuku, a więc takich, aby po zakończeniu robót pasmo obwodowe stanowiło wycinek koła o promieniu R .

Jako podstawową wielkość charakteryzującą deformację przyjmuje się największe przemieszczenie powłoki w jej kluczu, oznaczane jako wypiętrzenie w_k . Na rys. 3a przedstawiono funkcje $w_k(z)$, gdzie zmiennym parametrem jest poziom wypełnienia z . Przestrzeń pomiędzy powłoką a kluczem sklepienia podlega ciągłej redukcji. Jeżeli założy się przerwę technologiczną na poziomie $0,5 < z_o/H < 0,6$ wypiętrzenie powłoki wynosi około 90 mm, a więc znacznie więcej niż wysokość fali blachy ($f = 55$ mm). Natomiast w przypadku ciągłego wypełnienia, gdy $w_k(z)$ traktowane jest jako funkcja nieprzerwanej realizacji iniekcji, wypiętrzenie osiąga maksymalną wartość $w_k = 184$ mm.

Drugim istotnym parametrem jest przyrost przemieszczenia w kierunku radialnym w pachwinie powłoki, oznaczony jako r_o . Wyznaczano go na poziomie zakończenia pierwszej fazy układania wypełnienia. Na rys. 3b przedstawiono funkcje $r_o(z)$. Ciągły przyrost tej wartości stanowi podstawę do uzasadnienia niezmienności schematu obliczeniowego, jak na rys.

2. Ma to istotne znaczenie, szczególnie w drugim etapie wypełniania, czyli gdy $z > z_o$. Korzystne jest uzyskanie minimalnej wartości przyrostu przemieszczenia

$$\Delta r_o = r_o(z) - r_o(z - z_o) \quad (1)$$

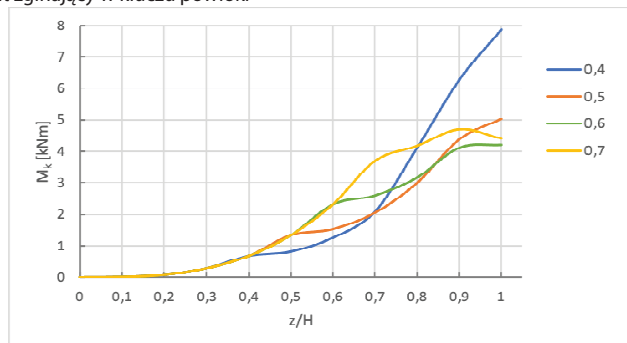
na początku drugiej fazy betonowania. Jest ono szczególnie ważne z uwagi na wypełnianie przestrzeni pomiędzy blachą a sklepieniem. Wówczas występuje tendencja do separacji powłoki od wcześniej ułożonego betonu, a mieszanka betonowa nie wypełnia przestrzeni między powłoką a betonem ułożonym w pierwszej fazie.

Siły wewnętrzne w kluczu powłoki

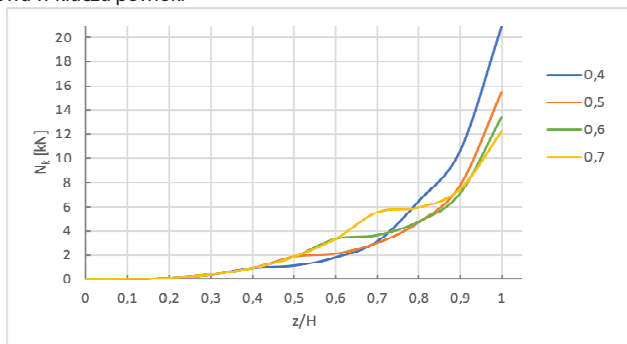
Na rys. 4 przedstawiono rozkłady sił wewnętrznych na długości pasma obwodowego powłoki, przy założeniu symetrycznego oddziaływania $p(z)$. Przy takim założeniu deformacja powłoki powstała podczas wypełniania jest jednakowa po obu stronach osi symetrii. Na rys. 2 i 4 wyróżniono miejsce, gdzie zastosowano przerwę technologiczną podczas układania iniektu. Położenie tego punktu określono przez współrzędną z_o oraz kąt ϕ_o .

Na rys. 5 zamieszczono wyniki

a) Moment zginający w kluczu powłoki



b) Siła osiowa w kluczu powłoki



5. Zmiany sił wewnętrznych w kluczu powłoki podczas wypełnienia

uzyskane z programu MES dla łuku o schemacie przedstawionym na rys. 2. W legendzie podano wartości z_o/H jako parametr zmienny, określający poziom zakończenia pierwszego etapu wypełnienia. Z porównania obu wykresów $M_k(z)$ i $N_k(z)$ wynika, że dominujące znaczenie ma zginanie, co można uzasadnić dużymi wartościami mimośrodu, obliczonego ze wzoru:

$$e_k = \frac{M_k}{N_k} \quad (2)$$

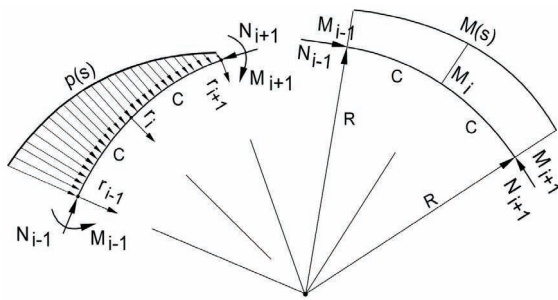
Jego wartość znacznie przekracza wysokość fali blachy $f = 55$ mm.

Dla bezpieczeństwa powłoki istotne znaczenie ma wartość naprężeń normalnych powstałych w końcowej fazie budowy. Na podstawie wyznaczonych sił wewnętrznych w kluczu powłoki, przy założonym poziomie wypełnienia iniektu $z_o/H = 0,6$ można oszacować je na podstawie równania:

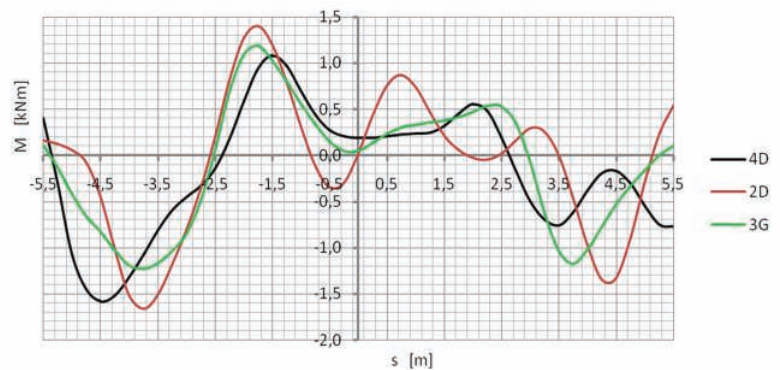
$$\sigma = \frac{N}{A} + \frac{M}{2I}(f + g) = \left(\frac{13,45}{13,024} 10^4 + \frac{4,21}{50,2} 3,025 \cdot 10^6 \right) 10^{-3} = 10,3 + 253,7 = 264 \text{ MPa} \quad (3)$$

Z częściowego wyniku obliczenia wynika drugorzędny wpływ sił osiowych, przedstawionych na rys. 5b.

Z analizy kształtu deformacji powłoki



6. Rozkład przemieszczeń i sił wewnętrznych w wycinku pasma obwodowego powłoki



7. Momenty zginające w pasmach obwodowych powłoki

ki, widocznej na rys. 2 oraz wykresów momentów zginających podanych na rys. 4, widoczne jest ich duże podobieństwo. Korzystając z funkcji $w_k(z)$, jak na rys. 3a, można oszacować moment zginający w kluczu $M_k(z)$ z równania:

$$M_k = \pi \frac{3EI}{2R^2} w_k \quad (4)$$

W ogólności [4], oddziaływanie $p(s)$ wzdłuż pasma obwodowego powłoki związane jest z rozkładem siły osiowej $N(s)$ i momentu zginającego $M(s)$ zgodnie z równaniem:

$$p(s) = \frac{N}{R} + \frac{d^2 M}{ds^2} \quad (5)$$

Do obliczeń siły osiowej w kluczu wykorzystuje się warunek $p(s) = 0$ z ogólnego równania (5) i funkcję M_k z (4). Stąd otrzymano bezpośrednią zależność siły osiowej od wypiętrzenia jako

$$N_k = \frac{3\pi}{2R} M_k = \pi^2 \frac{9EI}{4R^3} w_k \quad (6)$$

Badania przemieszczeń pasma obwodowego powłoki

Deformacja powłoki podczas realizacji wypełnienia przestrzeni pomiędzy sklepieniem a powłoką, jak pokazano na rys. 1, jest z natury zjawiskiem losowym. Parcie hydrostatyczne $p(s)$, wynikające ze zróżnicowanych poziomów wypełnienia po obydwu stronach powłoki, nie jest symetryczne. Dodatkowo, wskutek przerw roboczych, występuje różny stopień wiązania (zagęszczenia) mieszanki wypełnienia. Zatem funkcja oddziaływania $p(s)$ na długości pasma obwodowego może być zróżnicowana, co zgodnie z zależnością (5) prowadzi do złożonych funkcji sił wewnętrznych w powłoce.

Wcześniej, na rysunkach 2 i 4 oraz na podstawie wyników obliczeń podanych na rysunkach 3 i 5, przyjęto symetrię układu, czyli jednakowy poziom wypełnienia przestrzeni pomiędzy powłoką a sklepieniem.

W tym punkcie podaje się metodykę obliczania sił wewnętrznych na podstawie geodezyjnych pomiarów laserowych. Pozwalają ona na określenie linii przemieszczeń wybranych pasm obwodowych powłoki. Do obliczeń momentów zginających, jak na rys. 6, przyjęto przemieszczenia o kierunku radialnym $r(s)$ w ujęciu różnicowym, jak we wzorze

$$M_i = \frac{EI}{c^2} (r_{i-1} - 2r_i + r_{i+1}) \quad (7)$$

oraz stałą sztywność na zginanie $EI = 103 \text{ kNm}^2$ pasma obwodowego o szerokości fali blachy $a = 200 \text{ mm}$. Zmianę krzywizny uzyskano z funkcji przemieszczeń $r(s)$. Istotne znaczenie ma w tym przypadku odległość c pomiędzy analizowanymi punktami jako wycinek koła o promieniu R , co pokazano na rys. 6.

W pracy [6] przedstawiono trzy charakterystyczne profile ugięcia pasma obwodowego badanego obiektu w Jedlinie. Na rys. 7 zamieszczono wykresy momentów zginających obliczonych ze wzoru (6) oraz na podstawie zmierzonych przemieszczeń o kierunku radialnym, podanych na rys. 6. Trzy linie wynikają z pomiaru wzdłuż górnego (G) i dolnego (D) grzbietu blachy falistej, w wybranych pasmach obwodowych o numerach 2, 3, 4. Jak widać, różnią się one co do przebiegu. Wspólną cechą są podobne wartości maksymalne, co oznacza, że betonowana sekcja profilu odkształca się

walcowo. Na wynik obliczenia według (7) ma wpływ dokładność pomiarów przemieszczeń oraz czynniki o cechach losowych, omawiane wcześniej. Jednak podstawowe znaczenie ma odstępstwo od schematu statycznego, w postaci warunków podporowych i wprowadzania iniektu w kluczu powłoki.

Wykresy te znacznie odbiegają od uzyskanych z modelu MES, podanych wcześniej. Wyniki uzyskane z pomiarów różnią się znacznie od wartości zaprezentowanych na rys. 5a. Podstawą różnic są mniejsze wartości przemieszczeń radialnych wynikające z zastosowania dwóch przerw technologicznych w betonowaniu wypełnienia. W praktyce zatem istotne znaczenie ma ciągłość procesu iniektowania, możliwa do stosowania w obiektach o znacznej szerokości (długości).

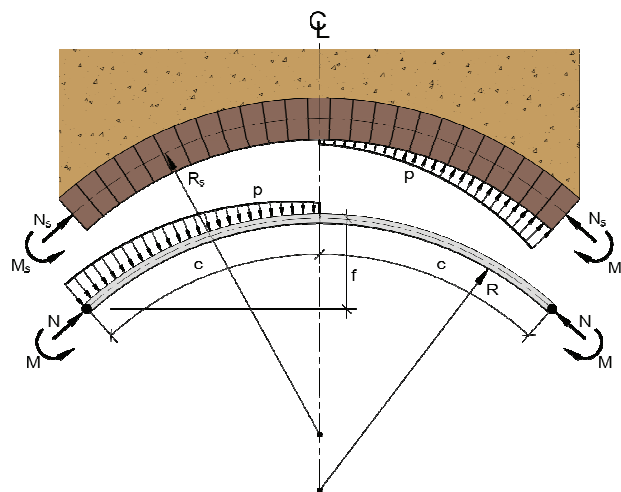
Wypełnianie realizowano na obiekcie w Jedlinie z krótkimi przerwami, które umożliwiały wykonanie pomiarów kształtu powłoki za pomocą naziemnego skaningu laserowego i instrumentu Riegl VZ-400i. Współcześnie technika skaningu laserowego jest coraz częściej stosowana w pomiarach przemieszczeń i odkształceń obiektów budowlanych, czego przykłady można znaleźć m.in. w pracy [9]. Wynikiem pomiarów geodezyjnych były pola przemieszczeń o kierunku radialnym w analizowanym sektorze powłoki o szerokości ok. 7 m. W analizie pola przemieszczeń przetworzono na profile wzdłuż pasm obwodowych.

Podsumowanie i wnioski

Po wzmocnieniu sklepienia, utworzony jest hybrydowy układ trzywarstwowy. Wielokrotnie większy moduł Younga stali powłoki w odniesieniu do pozostałych elementów sprawia, że powłoka stanowi równorzędny element konstrukcyjny w powstałym układzie. Zwiększona grubość konstrukcji (ze wzmocnieniem) oraz rozkład obciążeń eksploatacyjnych z nawierzchni prowadzą do znacznej redukcji zginania (momentów) w sklepieniu [1]. Dodatkowo, w fazie budowy, powstaje hydrostatyczne ciśnienie wypełnienia, jak na rys. 8. Powoduje ono odciążenie wzmacnianego sklepienia. Zatem część dotychczasowego obciążenia stałego sklepienia i jego wyposażenia zostaje przekazana na powłokę z blachy falistej. Dzięki temu zdegradowane sklepienie może przenosić zwiększone obciążenie użytkowe [5]. Po stwardnieniu wypełnienia pozostają siły wewnętrzne w powłoce powstałe z procesu technologicznego.

Na przykładzie wzmacnianego obiektu w Jedlinie przedstawiono wyniki obliczeń z zastosowaniem MES [2]. W modelu obliczeniowym założono równomierny układ wypełnienia, stąd symetryczna deformacja powłoki i rozkłady sił wewnętrznych. W pracy omówiono wpływ parcia hydrostatycznego mieszanki betonowej z zastosowaniem etapowania procesu wypełnienia. Na przykładzie wyników pomiarów analizowanego obiektu wskazano na znaczną rozbieżność warunków rzeczywistych występujących na obiekcie [8]. W praktyce występują zróżnicowane poziomy wypełnienia, po obydwu stronach powłoki. Analiza deformacji powłoki podczas realizacji wypełnienia przestrzeni pomiędzy sklepieniem a powłoką jest z natury zagadnieniem losowym.

Do odwzorowania sił wewnętrznych w blasze falistej powłoki wykorzystuje się zwykle pomiarowe techniki tensometryczne [6]. W pracy, ze względu na znaczne przemieszczenia wiotkiej powłoki wykorzystano pomiary geodezyjne. W przedstawio-



8. Oddziaływanie wzajemne na sklepienie i powłokę w trakcie wypełniania iniektem

nym algorytmie analizowano siły wewnętrzne w blasze falistej obliczane na podstawie przemieszczeń radialnych uzyskanych z pomiarów deformacji na długości pasma obwodowego powłoki. W przypadku gęstej siatki i przy regularnym rozmieszczeniu punktów pomiarowych wyniki opracowano z zastosowaniem ujęcia różnicowego.

Materiały źródłowe

- [1] Brencich A., Cassini G., Pera D., Load bearing structure of masonry bridges. Proc. 8th International Conference on Arch Bridges. 2016 418-425.
- [2] Bednarz Ł., Górski, A., Jasieńko, J., Rusiński, E., Simulations and analyses of arched brick structures. Automation in Construction, 2011, volume 20, 741-754.
- [3] Jasieńko J., Bednarz Ł., Innovative technologies, strengthening historical arches and brick vaults. Building Materials 2/2009.
- [4] Machelski C., Effects of surrounding earth on shell during construction of flexible bridge structure. Studia Geotechnica et Mechanica, No 2 2019)
- [5] Machelski C., Michalski J.B., Czynne wzmocnienie mostu sklepionego z zastosowaniem blachy falistej. Mosty 6/2014 26-28.
- [6] Machelski C., Michalski J.B., Szczesniak K.: The efficiency of reinforcing Masonry Bridges with the use

of corrugated steel sheets. Advanced Models and New Concepts in Concrete and Masonry Structures AMCM 21-23 October 2020 Lublin s. 83-84.

- [7] Madryas C., Wysocki L., Renovation of brick interceptor sewers. Tunneling and Underground Space Technology. 2008 vol. 23 718-726.
- [8] Molins, C., Roca, P., Arnau, O., Farina, R., Numerical Simulation of Experiments on Masonry Arch Bridges. 8th International Conference on Arch Bridges (ARCH2016), 2016, 731-740.
- [9] Muszyński, Z., Milczarek, W.: Application of terrestrial laser scanning to study the geometry of slender objects. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 95(4), 2017, doi:10.1088/1755-1315/95/4/042069
- [10] Nienartowicz B., Analysis of selected aspects of the operation of pipelines renewed with the relining method on the basis of laboratory testing results. Proc. Conference Underground Infrastructure of Urban Areas 3, Wrocław, 2015.
- [11] Pytlos M., Gilbert M., Smith C.C., Use of a physics engine to model soil filled masonry arch bridges. Proc. 8th International Conference on Arch Bridges. 2016 454-457.