
Inżynieria Bezpieczeństwa Obiektów Antropogenicznych

WPLYW POŻARU ZEWNĘTRZNEGO NA WYŁĘŻENIE OBUDOWY SCHRONU WYKOPOWEGO

Adam BARYŁKA

Centrum Rzecznawstwa Budowlanego, Warszawa

Grzegorz BĄK

Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa

Abstract

A numerical analysis is performed to determine the influence the ground surface fire on the straining the shelter housing with the ground cover. It is assumed the underground shelter is longitudinal and the fire contains a considerate area. Both assumptions enable to treat the problem as the flat material heterogeneous shield with boundary temperature disposition. A no stationary heat conduction is considered on the basis of the Fourier's equation in the form with the average constant values of the temperature compensation coefficient in the particular zones.

Słowa kluczowe: analiza numeryczna, schron, pożar zewnętrzny, grunt, beton.

Streszczenie

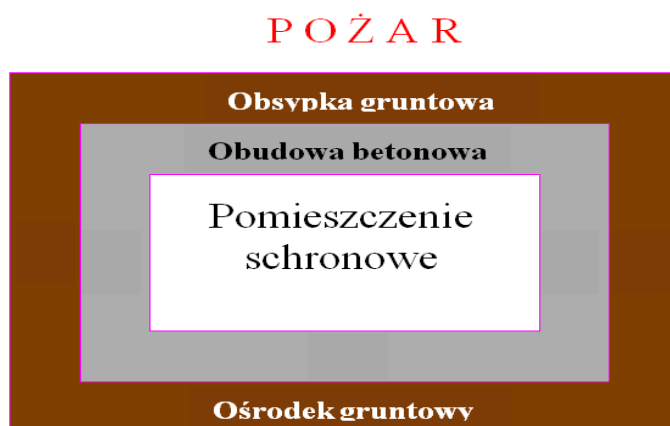
W referacie przedstawiono wyniki analizy numerycznej wyłężenia obudowy schronu wykopowego na skutek oddziaływania temperatur wywołanych pożarem zewnętrznym rozgorzałym na powierzchni terenu. Założono, że rozległość pożaru jest duża i znacznie przekracza powierzchnię obrysu wydłużonego schronu. Ośrodek gruntowy otaczający obudowę potraktowano jako ciało charakteryzujące się uśrednionymi stałymi termodynamicznymi. Proces nagrzewu i stygnięcia opisano równaniem Fouriera przewodzenia ciepła uwzględniając niejednorodność materiałową, grunt i beton.

Key words: numerical analysis, shelter, external fire, ground, concrete.

1. PRZEDMIOT ANALIZY

Analizie poddano wyłężenie obudowy schronu wykopowego spowodowane pożarem zewnętrznym na powierzchni gruntu. Prognozę numeryczną przeprowadzono dla wydzielonego obszaru obejmującego obudowę wydłużonego schronu wykopowego wraz z przyległym ośrodkiem gruntowym. Przyjęto założenie o dużej rozległości pożaru, co pozwoliło na przyjęcie do analizy modelu geometrycznego w postaci płaskiej tarczy niejednorodnej materiałowo o szerokości równej wymiarowi schronu powiększonemu obustronnie o ΔL . Struktura tarczy obejmuje pomieszczenie schronowe wypełnione powietrzem, monolityczną obudowę żelbetową i przylegający ośrodek gruntowy, ograniczony nad stropem ustaloną grubością obsypki Δh . W obudowie schronu zaniebano zbrojenie główne i konstrukcyjne, traktując, że o przepływie ciepła decydują własności termodynamiczne betonu. Na krawędzi górnej tarczy zadajemy

temperaturę środowiska. Krawędź dolną tarczy usytuowano poniżej spodu płyty fundamentowej. Jej usytuowanie ustalono na takiej głębokości, aby wyniki analizy numerycznej były mało wrażliwe na jej położenie. Model analizowanej tarczy przedstawia rys. 1.



Rys. 1. Model tarczy niejednorodnej

Analizę numeryczną przeprowadzono w dwóch stadiach. W stadium pierwszym poszukiwano quasi stacjonarnego rozkładu temperatur początkowych w ośrodku gruntowym i obudowie schronu. Założono, że stan ten określają dwa czynniki: temperatura powietrza właściwa w okresie letnim oraz oddziaływanie termiczne wywołane osobami chronionymi i załogą schronu, który po jego napełnieniu znajdzie się w stanie całkowitej hermetyzacji. Przyjęto, że temperatura powietrza w okresie letnim wynosi $t_0=22^{\circ}C$. Początkową temperaturę w ośrodku gruntowym, obudowie i pomieszczeniu schronowym założono $t_{schr}=12^{\circ}C$. Jednocześnie przyjęto pewną funkcję narastania temperatur w pomieszczeniu schronowym. Wzrost temperatury jest spowodowany wydzielaniem ciepła przez użytkowników schronu. Zakładamy, że temperatura w pomieszczeniu schronowym po jednej dobie osiąga stacjonarny rozkład w postaci funkcji liniowej na wysokości pomieszczenia. Funkcja ta jest rozpięta na rzędnych w poziomach podłogi i sufitu, ($t_{podł}$, t_{sufit}). Zadano końcowe wartości tych temperatur, $t_{sufit}=28^{\circ}C$ oraz $t_{podł}=0,8 t_{sufit}$. Dalszą stacjonarność tego rozkładu zapewniają urządzenia klimatyzacyjne schronu. Po 4,5 dobach uzyskano stan quasi stacjonarnych temperatur w analizowanej tarczy – obudowie i otaczającym ją ośrodku gruntowym.

W drugim stadium analizy rozważono oddziaływania pożarowe według czasowego profilu zmienności temperatur zgodnego z [1]. Profil ten obejmuje zmienność największych temperatur pożaru w okresie $\tau_{iP} \leq \tau \leq \tau_{kP}$. Określimy ten okres mianem nagrzewu. Po jego zakończeniu rozpocznie się okres schładzania powietrza zewnętrznego. W okresie schładzania ($\tau > \tau_{kP}$) założymy, że temperatury zewnętrzne opisuje odpowiednie równanie gałęzi opadającej krzywej Gaussa.

$$t_P(\tau) = \left\{ \begin{array}{l} t_{\max} [1 - 0,325 \cdot e^{-0,167(\tau - \tau_{iP})} - 0,675 \cdot e^{-0,675(\tau - \tau_{iP})}] + t_0 \\ t(\tau_{kP}) \cdot e^{b(\tau - \tau_{kP}) - c(\tau - \tau_{kP})^2} + t_{asympt} \end{array} \right\} \quad (1.1)$$

We wzorze (1.1)₁ temperatura początkowa powietrza przed wybuchem pożaru jest t_0 , a w (1.1)₂ t_{asymp} jest temperaturą wygaszenia popożarowego. Do analiz numerycznych przyjęto $t_{asymp} = 30^{\circ}C$.

2. RÓWNANIA PODSTAWOWE

Rozważono niestacjonarny proces przewodzenia ciepła na podstawie równania Fouriera w formie ze stałym, uśrednionym współczynnikiem wyrównania temperatur w poszczególnych obszarach tarczy.

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} = \frac{1}{a} \cdot \frac{\partial t}{\partial \tau}, \quad (2.1)$$

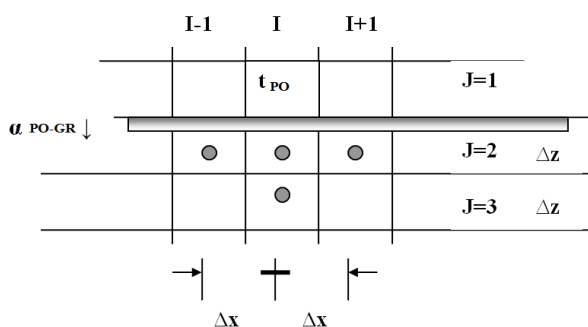
Gdzie: $a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_w}$ – uśredniony współczynnik wyrównania temperatur, zależny od współczynnika przewodzenia λ , ciepła właściwego c_w i gęstości objętościowej ρ , gruntu albo betonu.

Równanie (2.1) rozwiązujemy metodą różnicową z jawnym schematem całkowania względem czasu przy założonych rozkładach temperatur – w pierwszym etapie ustalania warunków początkowych w tarczy według p.1 oraz w drugim etapie oddziaływań pożarowych (1.1) na powierzchni terenu, z zachowaniem ciągłości temperatur w tarczy w chwili $\tau = \tau_{iP}$.

Wprowadzono taki podział przestrzenny Δx i Δz oraz krok czasowy Δt , które zapewniły stabilność procedury numerycznej oraz zbieżność rozwiązania różnicowego. Wzory ewolucyjne na temperaturę dla pól siatki wyprowadzono metodą bilansów energetycznych A. P. Waniczewa [2], dogodnej do analizy obszarów o własnościach termodynamicznie heterogenicznych. Niżej podano wzory ewolucyjne w charakterystycznych węzłach siatki.

Węzeł siatki w powierzchniowej warstwie gruntu (I,J=2).

Układ węzłów biorących udział w bilansie energii elementarnych dla węzła (I, J = 2) przedstawia rys. 2.1. Zakładamy, że współczynnik przejmowania temperatury z powietrznego obszaru pożaru do gruntu jest $\alpha_{PO-GR} = 2,4 \frac{W}{m^2 K}$.



Rys. 2.1. Układ węzłów biorących udział w bilansie energii elementarnych dla węzła (I, J = 2)

Bilans energii elementarnych wyraża równanie (2.2), w którym uwzględniono $t^n(I-1,2) = t^n(I,2) = t^n(I+1,2)$, jako konsekwencję założenie o znacznej rozciągłości pożaru.

$$\Delta x \cdot \frac{t^n(I,3) - t^n(I,2)}{\frac{\Delta z}{\lambda_{GR}}} \cdot \Delta \tau - \Delta x \cdot \frac{t^n(I,2) - t^n(I,1)}{\frac{1}{\alpha_{PO-GR}} + \frac{\Delta z}{2\lambda_{GR}}} \cdot \Delta \tau = \quad (2.2)$$

$$= \rho_{GR} \cdot c_{wGR} \cdot \Delta x \cdot \Delta z \cdot [t^{n+1}(I,2) - t^n(I,2)]$$

Współczynniki przejmowania ciepła z pożaru do gruntu i odwrotnie były różnicowane. Z równania bilansu energii cieplnej, po podstawieniu $t^n(I,1) = t^n_{PO}$, wyznaczmy

$$t^{n+1}(I,2) = \left[1 - \frac{1}{M_{z,GR}} \cdot \left(1 + \frac{1}{N_{z,PO-GR}} \right) \right] \cdot t^n(I,2) + \frac{1}{M_{z,GR}} \cdot \left[\frac{t^n_{PO}}{N_{z,PO-GR}} + t^n(I,3) \right] \quad (2.3)$$

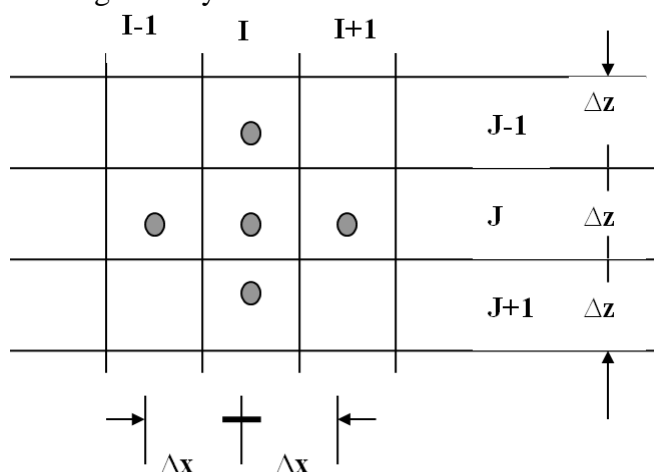
$$\text{gdzie oznaczono: } M_{z,GR} = \frac{\Delta z^2}{a_{GR} \cdot \Delta \tau}, \quad N_{z,PO-GR} = \frac{1}{2} + \frac{1}{\Delta Bi_{z,GR}} \quad (2.4)$$

W (2.4)₂ współczynnik $N_{z,PO-GR}$ jest zdefiniowany różnicową liczbą Biota,

$$\Delta Bi_{z,GR} = \frac{\alpha_{PO-GR} \cdot \Delta z}{\lambda_{GR}} \quad (2.5)$$

Węzeł siatki w obszarach jednorodnych (I,J).

Przypadek, gdy węzeł ze swoim otoczeniem pozostaje w obszarze jednorodnym, przykładowo w ośrodku gruntowym.



Rys.2.2. Układ węzłów biorących udział w bilansie energii elementarnych

Z równania bilansu energii wyznaczmy:

$$t^{n+1}(I, J) = \left[1 - 2 \cdot \left(\frac{1}{M_{z,GR}} + \frac{1}{M_{x,GR}} \right) \right] \cdot t^n(I, J) + \frac{1}{M_{x,GR}} [t^n(I-1, J) + t^n(I+1, J)]$$

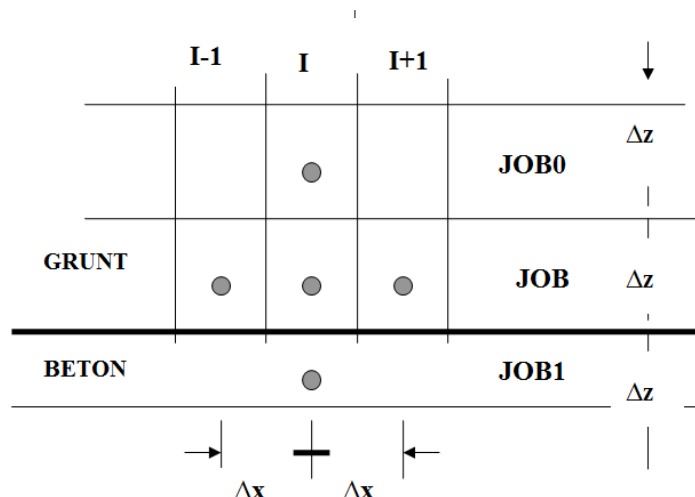
$$+ \frac{1}{M_{z,GR}} [t^n(I, J-1) + t^n(I, J+1)] \quad (2.6)$$

$$\text{gdzie: } M_{x,GR} = \frac{\Delta x^2}{a_{GR} \cdot \Delta \tau}, \quad M_{z,GR} = \frac{\Delta z^2}{a_{GR} \cdot \Delta \tau}, \quad \alpha_{GR} = \frac{\lambda_{GR}}{\rho_{GR} \cdot c_{w,GR}}$$

Węzeł w warstwie obsypki gruntowej przyległej do betonu (I, J=JOB)

Oddzielnej analizy wymagają węzły leżące w bezpośrednim sąsiedztwie granic obszarów gruntu i obudowy betonowej. Niżej podamy wzór ewolucję temperatury w

węzle położonym w obsypce gruntowej, w warstwie J=JOB przyległej do obudowy betonowej. Wykorzystamy schemat geometryczny jak niżej.



Rys.2.3 . Układ węzłów biorących udział w bilansie energii elementarnych

Z bilansu energetycznego uzyskujemy wzór na ewolucję temperatury w węźle (I, JOB)

$$t^{n+1}(I, JOB) = \left[1 - \left(\frac{2}{1 + \frac{\lambda_{GR}}{\lambda_C}} + 1 \right) \cdot \frac{1}{M_{z,GR}} - \frac{2}{M_{x,GR}} \right] \cdot t^n(I, JOB) \quad (2.7)$$

$$+ \frac{1}{M_{z,GR}} \cdot \left[\left(\frac{2}{1 + \frac{\lambda_{GR}}{\lambda_C}} \right) \cdot t^n(I, JOB1) + t^n(I, JOB0) \right] +$$

$$\frac{t^n(I1, JOB) + t^n(I0, JOB)}{M_{x,GR}}$$

W analogiczny sposób wyznaczamy wzory na ewolucję temperatury w pozostałych obszarach tarczy.

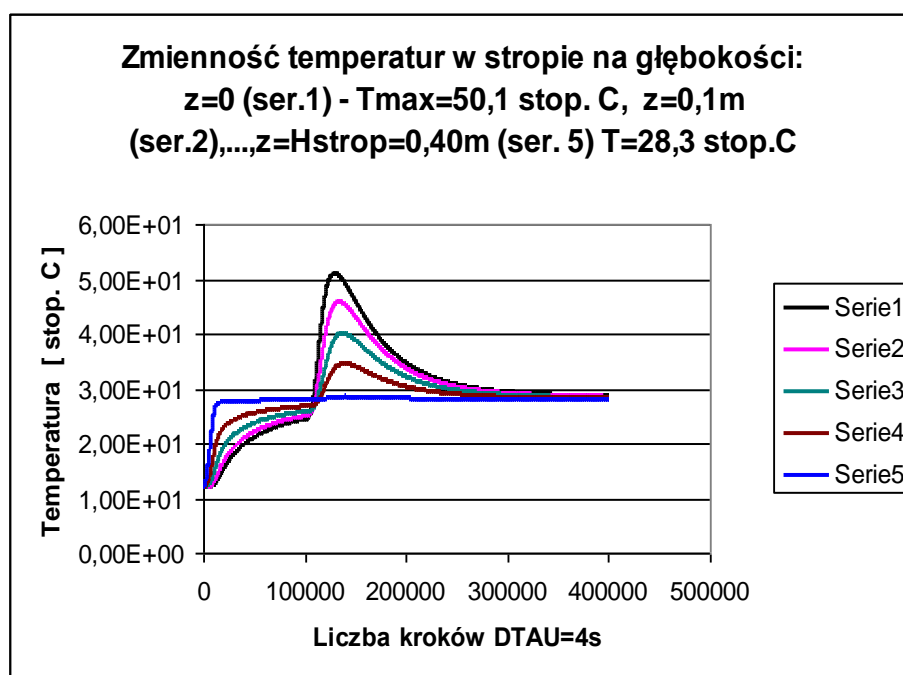
3. WYNIKI ANALIZY NUMERYCZNEJ

Rozpatrywano obudowę o grubości $\Delta h = 0,4m$ i wymiarach osiowych elementów składających się na obudowę $L = 6,00m$ i $H = 2,80m$. W analizie numerycznej stwierdzono, że oddziaływania termiczne obejmowały zasadniczo przypowierzchniowy pas o łącznej grubości równej sumie grubości obsypki i stropu obudowy, tzn.: $\Delta h + 0,40m$. Spostrzeżenie to wykorzystano w ustaleniu oddziaływania termicznego na obudowę. Uzasadnione więc było obciążanie zmianami temperatur jedynie stropu obudowy – rygla górnego ramy.

Rozpatrzono dwa przypadki. W pierwszym rozważano pożar o parametrach: $t_{max} = 650^{\circ}C$, $\tau_m = \tau_{kP} - \tau_{iP} = 2h$. Przyjęto grubość obsypki gruntowej $\Delta h_1 = 0,40m$. Wyniki numeryczne obejmujące stadium analiz, których celem było wyznaczenia warunków początkowych tarczy na chwilę inicjacji pożaru $\tau = \tau_{iP}$ oraz stadium nagrzewu i schładzania temperatur pożarowych są zamieszczone na rys. 3.1. Poszczególne krzywe zmian temperatury w czasie dotyczą wybranych warstw: podstropowej oraz pięciu warstw wewnętrznych stropu. Linia czarna dotyczy skrajnej, zewnętrznej warstwy stropu.

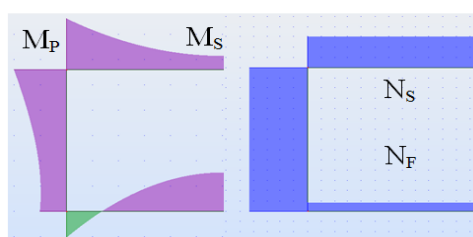
Układ krzywych w stadium początkowym odzwierciedla rozkład temperatur w tarczy dążący do stabilizacji. Zakładamy, że temperatury te stanowią długotrwałe oddziaływanie na obudowę schronu i efekty takiego oddziaływania podlegają relaksacji.

Z tego powodu nie uwzględnimy ich prognozując początkowe wyężenie schronu. Poszukujemy przyrostu wyężenia spowodowanego wystąpieniem pożaru.



Rys. 3.1. Zmienność temperatur w warstwach: podstropowej oraz w pięciu warstwach wewnętrznych stropu w stadiach ustalania warunków początkowych analizy i stadium oddziaływań pożarowych (650°C, 2h)

Na podstawie analizy oszacowano przyrosty temperatur spowodowane pożarem: na wierzchu stropu $t_z = 25,5^{\circ}\text{C}$ i na powierzchni wewnętrznej $t_w = 3,7^{\circ}\text{C}$. Kształty wykresów momentów zginających i sił podłużnych wywołane obciążeniami: łącznie, ciężarem obsypki,arciem bocznym na ściany obudowy, ciężarem własnym obudowy i oddziaływaniem temperatury (t_z , t_w) na rygiel ramy, podano na rys.3.2



Rys. 3.2. Kształt wykresów sił wewnętrznych w obudowie

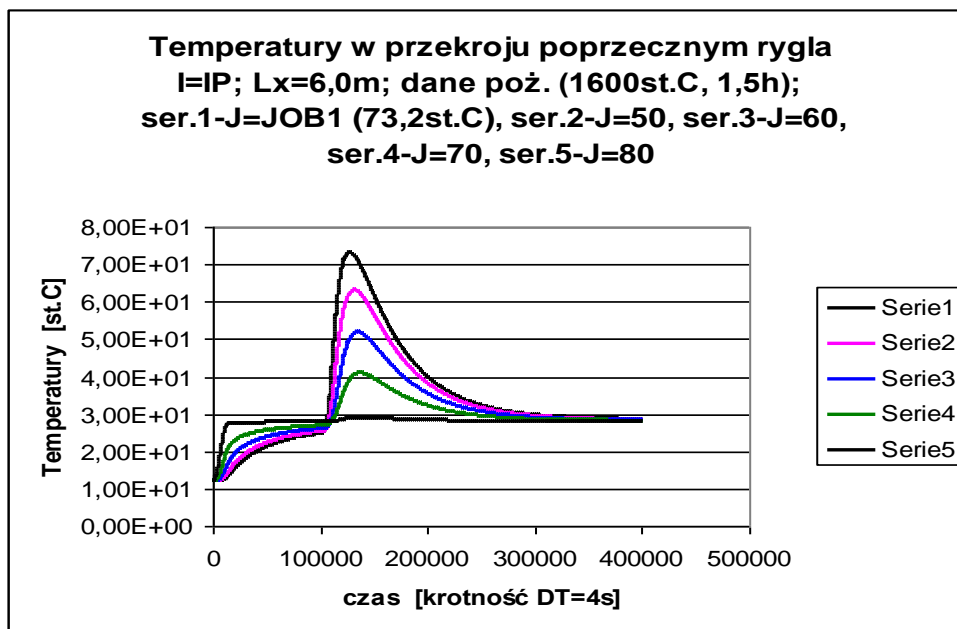
Charakterystyczne wartości rzędnych tych wykresów wynoszą:

$$\begin{aligned} M_P &= -111,11\text{kNm/m}, & M_S &= -30,11\text{kNm/m}, & (2.1) \\ N_S &= -38,18\text{kN/m}, & N_F &= -10,51\text{kN/m}. \end{aligned}$$

Wartości wywołane tylko samą temperaturą są równe:

$$M_P = M_S = -74,41\text{kNm/m}, \quad N_S = -N_F = -31,92\text{kN/m}. \quad (2.2)$$

Z porównania (2.1) i (2.2) wnioskujemy, że udział oddziaływania termicznego w wyężeniu przekrojów krytycznych rygla ramy jest znaczący. Uwaga ta odnosi się szczególnie do przekrojów krytycznych górnego węzła ramy. Powstanie siły ściskającej w ryglu górnym jest korzystne z uwagi na szczelność konstrukcji obudowy. W przypadku drugim rozważano pożar o parametrach: $t_{max}=1600^{\circ}C$ i $\tau_m = 1,5h$. Konieczne było przyjęcie obsypki o zwiększonej grubości $\Delta h_2=0,60m$. Analogiczna zmienność temperatur w warstwach stropu obudowy jest przedstawiona na rys. 3.3.



Rys. 3.3. Zmienność temperatur w warstwach: podstropowej oraz w pięciu warstwach wewnętrznych stropu w stadiach ustalania warunków początkowych analizy i stadium oddziaływań pożarowych ($1600^{\circ}C$, 1,5h)

Podobnie jak w poprzednim przypadku poszukujemy przyrostów temperatur w ryglu ramy obudowy spowodowanego wystąpieniem pożaru. Mogą być one oszacowane: $t_z=47,7^{\circ}C$ i $t_w=4,6^{\circ}C$. Charakterystyczne wartości rzędnych wykresów sił wewnętrznych wynoszą wówczas:

$$M_P = -190,71 \text{ kNm/m}, \quad M_S = -91,71 \text{ kNm/m},$$

$$N_S = -70,62 \text{ kN/m}, \quad N_F = 17,06 \text{ kN/m}.$$

Wartości wywołane samą temperaturą są natomiast równe:

$$M_P = M_S = -145,47 \text{ kNm/m}, \quad N_S = -N_F = -61,93 \text{ kN/m}.$$

4. WNIOSKI I PODSUMOWANIE

Wyniki analiz numerycznych wskazują, że grubość obsypki gruntowej powinna być ustalana w zależności od parametrów pożaru. Najbardziej narażony na oddziaływanie temperaturą strop schronu doznaje korzystnego ściskania. Wygięcie ku górze wywołuje ociążenie odcinka środkowego z uwagi na zginanie jednocześnie niekorzystnie dociąży węzeł monolitycznego utwierdzenia stropu w ścianie.

Literatura

1. *PN-EN: 1991-1-2:2006* Oddziaływanie pożaru na konstrukcje.
2. Kostowski E., *Przepływ ciepła*, WPŚL, Gliwice, 2000
3. Abramowicz M., Kowalski R., Wróbel P.: *Zastosowanie naturalnych modeli pożaru w procesie projektowania konstrukcji na warunki pożarowe na przykładzie garażu podziemnego*. Warszawa, 2008 r.
4. Abramowicz M.: *Projektowanie konstrukcji budowlanych poddanych oddziaływaniu pożaru według Eurokodów*. Praca zwięta. Kalendarz budowlany - 2008r. Rozdział 18. Wydawca Warszawskie Centrum Postępu Techniczno-Organizacyjnego Budownictwa WACETOB.