
**Katalog
Cyfrowych
Narzędzi
Mostowych**

CNM-08-20-01

**Wyznaczanie
zbrojenia na
wczesny skurcz
termiczny
w przyczółkach
mostowych
i ścianach
oporowych**

Katalog Cyfrowych Narzędzi Mostowych

CNM-08-20-01 **Wyznaczanie zbrojenia na wczesne wpływy termiczno-skurczowe w przyczółkach i ścianach oporowych**

Przedmiotowe opracowanie nie stanowi przepisów techniczno-budowlanych w rozumieniu art. 7 ustawy – Prawo budowlane i zgodnie z art. 17 ust. 4 ustawy o drogach publicznych, przeznaczone jest do dobrowolnego stosowania.

Spis opracowań z serii wzorce i standardy oraz informacje na temat ich nowelizacji znajdują się w dokumencie głównym zatytułowanym „Powiązanie wymagań technicznych dotyczących drogowych obiektów inżynierskich z narzędziami cyfrowymi”.

Opracował Zespół w składzie:

Janusz RYMSZA – Koordynator realizacji przedmiotu zamówienia
Marek SALAMAK – Kierownik Zespołu
Grzegorz WANDZIK

Jednostka odpowiedzialna:

Ministerstwo Infrastruktury
Departament Dróg Publicznych
ul. Chałubińskiego 4/6
00-928 Warszawa

Opracowanie sfinansowano ze środków Funduszu Spójności w ramach działania 2.1 Programu Operacyjnego Pomoc Techniczna 2014-2020.



Fundusze Europejskie
Pomoc Techniczna



**Rzeczpospolita
Polska**

Unia Europejska
Fundusz Spójności



Spis treści

1	PRZEDMIOT, ZAKRES I PODSTAWY IMPLEMENTACJI NARZĘDZIA	1
1.1	PRZEDMIOT	1
1.2	ZAKRES	1
1.3	PODSTAWY	1
1.4	NAJWAŻNIEJSZE DEFINICJE	1
2	OPIS NARZĘDZIA	3
2.1	WPROWADZENIE	3
2.2	DANE WEJŚCIOWE	3
2.3	ALGORYTM PRZETWARZANIA	7
2.4	INTERPRETACJA WYNIKÓW	8
2.5	RAPORT	9
2.6	OGRANICZENIA	9
3	PRZYKŁAD DZIAŁANIA PROGRAMU	10
3.1	DANE WEJŚCIOWE	10
3.2	OBLICZENIA ZBROJENIA – METODA POZIOMU 0	10
3.3	OBLICZENIA ZBROJENIA – METODA POZIOMU 1	11
	ZAŁĄCZNIKI	13
	ZAŁĄCZNIK NR 1. RAPORT Z WYNIKAMI DZIAŁANIA NARZĘDZIA	13

1 Przedmiot, zakres i podstawy implementacji narzędzia

1.1 Przedmiot

Przedmiotem zaimplementowanego narzędzia cyfrowego, oznaczonego w Katalogu Cyfrowych Narzędzi Mostowych jako **CNM-08**, jest wyznaczanie zbrojenia na wczesny skurcz termiczny w przyczółkach mostowych i ścianach oporowych.

1.2 Zakres

Narzędzie służy do wyznaczania zbrojenia minimalnego niezbędnego ze względu na wpływy termiczne i skurczowe w ścianach oporowych i przyczółkach mostowych. Wynikiem obliczeń jest zbrojenie, mające zabezpieczyć ścianę/przyczółek przed wystąpieniem nadmiernego zarysowania we fazie największej intensywności wpływów termiczno-skurczowych. Użytkownik może wykonać obliczenia z wykorzystaniem dwóch metod i ocenić wpływ przyjętych założeń na wynik końcowy obliczeń.

Narzędzie pozwala wyznaczyć zbrojenie według ogólnych wymagań normy PN-EN 1992-1-1 [1] (**metoda poziomu 0**) lub alternatywnie z wykorzystaniem metody analitycznej przyjętej na podstawie literatury (**metoda poziomu 1**). Sposób prowadzenia obliczeń został krótko scharakteryzowany w kolejnych punktach.

1.3 Podstawy

Podstawą formalną jest umowa nr DDP-POPT-U-96/18 z dnia 18.10.2018 r. zawarta w Warszawie między konsorcjum, którego liderem jest Instytut Badawczy Dróg i Mostów w Warszawie a Skarbem Państwa – Ministrem Infrastruktury.

1.3.1 Normy

- [1] PN-EN 1992-1-1:2008 Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków. PKN Warszawa 2008.
- [2] PN-EN 1992-2:2010 Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 2: Mosty z betonu. Obliczanie i reguły konstrukcyjne. PKN Warszawa 2010.
- [3] PN-EN 1992-3:2008 Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 3: Silosy i zbiorniki na ciecze. PKN Warszawa 2008.

1.3.2 Inne publikacje

- [4] Bamfort P.B., Ciria C660: Early-age thermal crack control in concrete. Ciria, Classic House London 2007.
- [5] Flaga K., Klemczak B.: Konstrukcyjne i technologiczne aspekty naprężeń termiczno-skurczowych w masywnych i średnio masywnych konstrukcjach betonowych. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2016.
- [6] Klemczak B., Flaga K., Knoppik-Wróbel A.: Analytical model for evaluation of thermal–shrinkage strains and stresses in RC wall-on-slab structures. Archives of Civil and Mechanical Engineering Vol. 17, 2017, p. 75-95.
- [7] Knauff M., Grzeszykowski B., Golubińska A.: Przykłady obliczania konstrukcji żelbetowych. Zeszyt 3: zarysowanie. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2018

1.4 Najważniejsze definicje

Ściana oporowa. Samodzielna konstrukcja zabezpieczająca skarpe lub nasyp i zapewniająca przejście naporu poziomego powodowanego przez grunt.

Przyczółek mostowy. Skrajna podpora mostu pełniąca równocześnie funkcję ściany oporowej.

Naprężenia własne. Naprężenia będące efektem różnicy odkształceń fragmentów ściany położonych w jej wnętrzu i przy jej powierzchni.

Naprężenia wymuszone. Naprężenia będące efektem ograniczenia swobody odkształceń termiczno-skurczowych ściany przez więzy zewnętrzne.

Odształcenie swobodne. Względna zmiana wymiarów liniowych elementu/materiału występująca przy braku jakichkolwiek więzów wewnętrznych i zewnętrznych.

Odształcenia skurczowe betonu. Zmniejszenie objętości betonu spowodowane wysychaniem (migracją wilgoci) i procesami chemicznym zachodzącymi podczas hydratacji cementu (skurcz autogeniczny).

Odształcenia termiczne betonu. Zmiana wymiarów liniowych betonu spowodowana zmianą temperatury, będącą skutkiem wydzielaniem ciepła podczas procesu hydratacji cementu.

Ciepło hydratacji cementu. Ilość ciepła wydzielana z 1 kg cementu podczas egzotermicznego procesu wiązania.

2 Opis narzędzia

2.1 Wprowadzenie

Narzędzie przeznaczone jest do obliczania minimalnej ilości zbrojenia w ścianach oporowych i przyczółkach mostowych, niezbędnego ze względu na występowanie naprężeń rozciągających w betonie, będących efektem wpływów termiczno-skurczowych powstających w okresie twardnienia betonu.

Można stwierdzić, że zagadnienie jest jedynie wzmiankowane w Eurokodzie 2 [1]. W rozdziale 7. tej normy zdefiniowano wyłącznie bardzo ogólnikowe i niezbyt precyzyjne zasady. Metoda postępowania proponowana w Eurokodzie bywa określana w literaturze [7] jako metoda poziomu 0 i taką nomenklaturę przyjęto również przy prezentacji wyników. Stosując to podejście nie analizuje się odkształceń termicznych i skurczowych, a jedynie rozważa się wartość potencjalnej siły rozciągającej w momencie wystąpienia zarysowania. Jeżeli równocześnie przyjmie się, że zarysowanie nastąpi po osiągnięciu przez beton docelowej wytrzymałości na rozciąganie (zarysowanie po 28 dniach), to zastosowanie tej metody w elementach o dużym przekroju poprzecznym prowadzi często do silnego zbrojenia.

Norma [1] dopuszcza stosowanie mniejszej ilości zbrojenia niż wyznaczone według niniejszych założeń, pod warunkiem wykonania bardziej szczegółowych analiz, w tym wyznaczenia rozkładu temperatury, wielkości odkształceń skurczowych, wpływu pęcznienia itp. Ze względu na złożoność zachodzących procesów, zasady prowadzenia takich obliczeń nie są jednak określone w normie. Nie ma więc bardziej precyzyjnej metody (niż metoda poziomu 0), która byłaby usankcjonowana w Eurokodzie 2 [1]. Propozycje takie można znaleźć w literaturze, jednak są one zróżnicowane, wykorzystują istotnie różniące się założenia i prowadzą do różnych wyników. Narzędzie CNM-08 pozwala na wykonanie takich obliczeń według schematu wykorzystującego kilka źródeł i są one tutaj określane mianem metody poziomu 1.

Zasady prowadzenia obliczeń i przyjęte w nich założenia zostały omówione w podpunkcie 2.3 poświęconym algorytmowi postępowania.

2.2 Dane wejściowe

2.2.1 Grupy danych

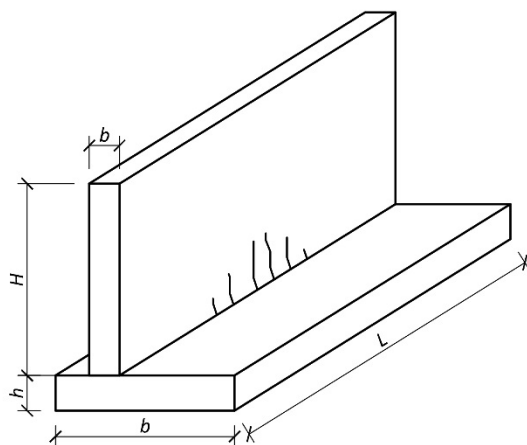
Narzędzie wyposażone jest w interfejs obsługiwany z poziomu dowolnej przeglądarki internetowej. Dane wprowadzane przez użytkownika podzielone są na 5 głównych grup:

- **dane dotyczące ściany** (geometria, cechy betonu oraz cementu i kruszywa, granica plastyczności stali oraz średnica i sposób rozmieszczenia prętów zbrojeniowych),
- **dane dotyczące fundamentu** (geometria, cechy betonu oraz cementu i kruszywa),
- **warunki środowiskowe** (wilgotność i temperatura oraz czas, dla którego ma zostać przeprowadzona analiza obliczeniowa),
- **zarysowanie** (sposób podejścia do analizy zarysowania oraz dopuszczalna szerokość rozwarcia rys),
- **opcje obliczeniowe** (możliwość wyboru alternatywnych zasad wykonania obliczeń).

2.2.2 Dane dotyczące ściany

Podstawowa wielkością geometryczną jest **grubość ściany b** (rys. 1). Decyduje ona o efektach termicznych (ilości wydzielanego ciepła, rozkładzie temperatur) zachodzących podczas hydratacji cementu. Ma ona również wpływ na wielkość skurczu, gdyż decyduje o proporcji pola przekroju elementu w stosunku do powierzchni, przez którą następuje odprowadzenie wilgoci (wysychanie).

Dwa pozostałe wymiary (**wysokość H** i **długość L**) mają wpływ na rozkład naprężeń wymuszonych wynikających z ograniczenia swobody odkształceń ściany w stosunku do wcześniej wykonanego fundamentu. W niektórych metodach (niezaimplementowanych w module WZTS) długość ściany wykorzystywana jest w analizie możliwości wystąpienia poślizgu, do którego może dojść na styku długiej ściany z fundamentem.



Rys. 1. Podstawowe wymiary ściany oporowej i fundamentu

Wszystkie **wielkości charakteryzujące cement** (w tym ciepło hydratacji Q_7 wydzielane w ciągu pierwszych 7 dni procesu), a także zawartość cementu w mieszance betonowej służą do określenia ilości ciepła wydzielającego się podczas procesu hydratacji, a w konsekwencji do wyznaczenia rozkładu temperatur w ścianie (temperatury średniej oraz temperatur wewnątrz ściany i na jej powierzchni). Deklarowana szybkość wiązania cementu stosowana jest do oceny skurczu w rozpatrywanym czasie.

Cechy mechaniczne betonu w funkcji czasu (wytrzymałości na rozciąganie i ściskanie oraz moduł sprężystości) obliczane są z użyciem standardowych procedur Eurokodu 2 [1]. W obliczeniach nie uwzględnia się wpływu temperatury na szybkość rozwoju tych cech.

Właściwości stali oraz proponowana **średnica prętów zbrojeniowych** wykorzystywane są do obliczenia podstawowego wyniku, którym jest wymagane pole przekroju zbrojenia. Na podstawie zadeklarowanej średnicy ustala się wymagany rozstaw prętów. W obliczeniach kontrolowane są również maksymalne rozstawy zgodnie z wymaganiami Eurokodu 2 [1]. **Średnica prętów zbrojeniowych** wraz z przyjętą **grubością otuliny** wpływają na wartość wymaganego pola przekroju zbrojenia. Wymienione wielkości decydują o granicznej wartości naprężeń w stali ze względu na spełnienie warunku zarysowania elementu.

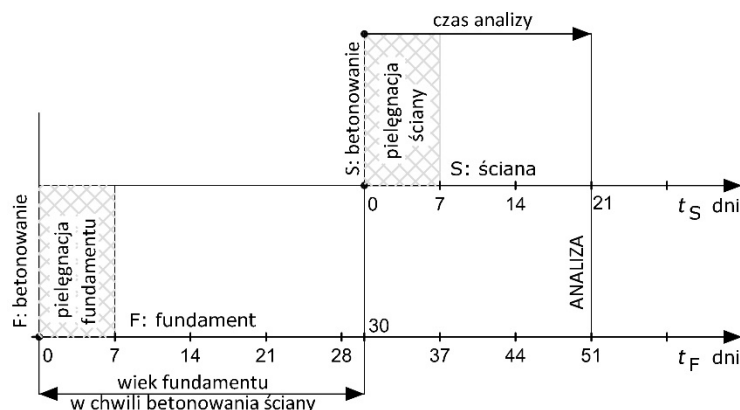
Rzędy zbrojenia odnoszą się do sposobu rozmieszczenia zbrojenia na grubości ściany (patrz rys. 4). Standardowo proponowane jest przyjęcie zbrojenia przy każdej z dwóch powierzchni bocznych ściany (czyli w 2 rzędach). Jeżeli uzyskiwana w obliczeniach ilość zbrojenia jest bardzo duża, to użytkownik może zwiększyć liczbę rzędów, tzn. oprócz zbrojenia przypowierzchniowego zastosować zbrojenia wewnątrz ściany. Wspomniana możliwość nie dotyczy zbrojenia na naprężenia własne. Ponieważ w fazie stygnięcia mamy do czynienia z rozciąganiem przy powierzchniach bocznych ściany więc rozmieszczanie zbrojenia przeciwdziałającego skutkom działania tych naprężeń w jej wnętrzu byłoby niecelowe. W związku z tym w przypadku naprężeń własnych moduł obliczeniowy wymusza sytuowanie zbrojenia w 2 rzędach (wyłącznie przy obydwu powierzchniach).

2.2.3 Dane dotyczące fundamentu

Informacje na temat fundamentu wykorzystywane są wyłącznie w metodzie poziomym 1. Służą one do oceny jego odkształceń skurczowych. W dalszych obliczeniach, przy wyznaczaniu naprężeń wymuszonych w ścianie, oblicza się różnicę odkształcenia skurczowych ściany i fundamentu. Uwzględnienie odkształceń skurczowych fundamentu pozwala w nieznaczny sposób zredukować wartości naprężeń wymuszonych w ścianie, będących pochodną różnicy odkształceń skurczowych ściany i fundamentu.

Wiek fundamentu oznacza szacowany (na etapie projektowania) czas pomiędzy betonowaniem fundamentu i ściany (patrz rys. 2). Podana wielkość jest wykorzystywana do obliczenia przyrostu skurczu fundamentu jaki nastąpi w okresie od betonowania ściany do czasu, dla którego prowadzona jest analiza. Im wiek fundamentu będzie większy tym wpływ tego korzystnego efektu (równoczesnego skurczu ściany i fundamentu) będzie mniejszy.

Przy określeniu wielkości skurczu, zarówno fundamentu, jak i ściany uwzględnia się **czas pielęgnacji betonu** (określany przez użytkownika niezależnie dla każdego z tych elementów). Poszczególne czasy deklarowane przez użytkownika zilustrowano na wykresie (rys. 2).

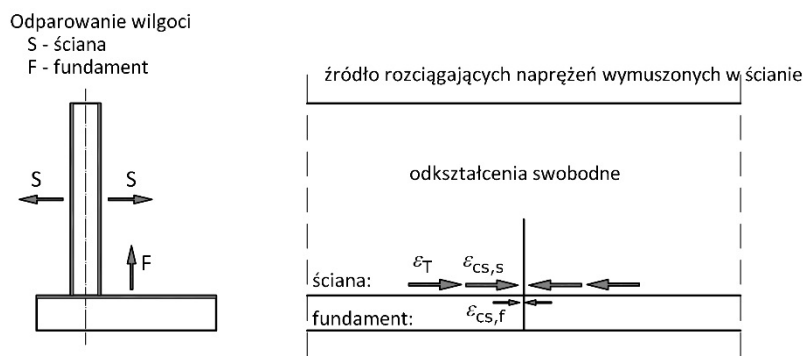


Rys. 2. Zależności czasowe wykorzystywane w obliczeniach

Część odkształceń skurczowych wynikająca z wysychania betonu wymaga wskazania części obwodu przekroju przez którą następuje odparowanie wilgoci. W obliczeniach przyjmuje się, że wilgoć odparowuje (rys. 3):

- przez powierzchnie boczne ściany,
- przez powierzchnię górną fundamentu.

Na rysunku nr 3 pokazano również kierunek i rodzaje odkształceń uwzględnianych w obliczeniach.



Rys. 3. Kierunki i rodzaje odkształceń uwzględnianych w obliczeniach oraz powierzchnie odparowania wilgoci

2.2.4 Warunki środowiskowe

Do przeprowadzenia analizy wymagane jest zadeklarowanie następujących danych na temat warunków środowiskowych: **wilgotności względnej środowiska RH** i **temperatury zewnętrznej otoczenia**. Przy określaniu temperatur betonu przyjęto założenie, że początkowa temperatura mieszanki betonowej jest równa temperaturze otoczenia. Pierwsza z wymienionych wyżej wielkości (RH) wykorzystywana jest przy wyznaczeniu skurczu od wysychania, a druga (temperatura zewnętrzna) do wyznaczenia temperatur w przekroju ściany.

W tej samej grupie danych deklarowany jest **czas analizy**, dla którego mają zostać przeprowadzone obliczenia (patrz rys. 2). Oznacza on liczbę dni, które upłynęły od momentu betonowania ściany. Czas ten stanowi podstawę wyznaczenia cech wytrzymałościowych betonu oraz wielkości odkształceń skurczowych ściany i fundamentu (z uwzględnieniem wieku fundamentu w momencie betonowania ściany).

Przyjęcie krótszego czasu (związane z możliwością wystąpienia zarysowania w czasie krótszym niż 28 dni) skutkuje przyjęciem niższych wytrzymałości betonu we wzorach na zbrojenie minimalne. Takie założenie wpływa na zmniejszenie wymaganej ilości zbrojenia minimalnego, gdyż w obliczeniach zakłada się niższą wartość siły rysującej. Zakłada się wtedy, że zarysowania od wpływów termiczno-skurczowych następuje przy niższym poziomie naprężeń.

2.2.5 Zarysowanie

Obliczając zbrojenie minimalne na podstawie założeń zdefiniowanych w rozdziale 7 Eurokodu 2 [1] wymaga się, aby siła rozciągająca występująca w momencie powstania rysy nie doprowadziła do kruchego zniszczenia elementu i mogła zostać bezpiecznie przeniesiona przez zbrojenie. Zakłada się wtedy, że

bezpośrednio po zarysowaniu naprężenia w stali σ_s mogą osiągnąć wartość równą granicy plastyczności stali $\sigma_s = f_{yk}$. Jeżeli oczekuje się równocześnie ograniczenia szerokości rozwarcia rys (poniżej wartości dopuszczalnej), to jest to równoznaczne z przyjęciem w obliczeniach niższej wartości naprężeń w stali $\sigma_s < f_{yk}$.

Aby zwiększyć możliwości analizy użytkownik może samodzielnie dokonać wyboru w tym zakresie i wybrać jedną z **3 opcji kontroli zarysowania**:

- nigdy,
- automatycznie,
- zawsze.

W pierwszym przypadku (**opcja: nigdy**) nie jest sprawdzana szerokość rozwarcia rys, a we wzorze na minimalne zbrojenie (wzór (1)) zawsze przyjmuje się $\sigma_s = f_{yk}$. Przy wyborze **opcji zawsze**, szerokość rozwarcia rysy szacowana jest bez względu na wartość naprężeń rozciągających w betonie (określanych każdorazowo w metodzie poziomu 1). Wybór opcji pośredniej (**opcja: automatycznie**) powoduje, że przyjmuje się obniżone naprężenia w stali tylko wtedy, gdy naprężenia rozciągające w betonie osiągną wytrzymałość betonu na rozciąganie $f_{ct,eff}(t)$. W metodzie obliczeń poziomu 0 założenie opcji *automatycznie* jest tożsame z przyjęciem opcji *zawsze* (ponieważ w metodzie poziomu 0 nie określa się naprężeń i a priori zakłada się, że osiągną one wytrzymałość betonu na rozciąganie $f_{ct,eff}(t)$). Ze sposobem postępowania związany jest wybór **metody kontroli zarysowania**. Dokonywany jest on w grupie danych opcje obliczeniowe (punkt 2.2.6).

2.2.6 Opcje obliczeniowe

Użytkownik ma dostęp do ustawienia trzech założeń przyjmowanych w obliczaniu zbrojenia minimalnego. Pierwsze z tych założeń (**naprężenia maksymalne w betonie**) pozwala na wybór czy siła rozciągająca w momencie zarysowania ma być określona dla wartości f_{ctm} (wybór *EC-2 bez modyfikacji*), czy też dopuszczona jest redukcja naprężeń rozciągających w betonie do poziomu $\sigma_{ct} = 0,5f_{ctm}$ (*EC-2 NNA Niemcy*). Wspomniana redukcja sugerowana jest w niemieckim załączniku krajowym do normy PN-EN 1992-1-1 [1] i opisana w pracy [7]. Wybór załącznika niemieckiego jako podstawy obliczeń powoduje, że w dalszych obliczeniach pomija się wpływ czasu na wytrzymałość betonu.

Użytkownik może dokonać wyboru **metody kontroli zarysowania**. Sugerowanym wyborem jest sprawdzenie zarysowania za pomocą standardowej procedury wyznaczania szerokości rozwarcia rys według punktu 7.3.4. Eurokodu 2 [1]. Alternatywne podejście polega na wyznaczeniu maksymalnych naprężeń w stali σ_s z wykorzystaniem wzoru zaproponowanego przez Rüscha i Jungwirtha. Wzór ten jest podstawą zestawienia tabelarycznego w punkcie 7.3.3. Eurokodu 2 [1] i pozwala w przybliżony sposób powiązać wartość naprężenia w stali σ_s z maksymalnym rozwarciem rysy i średnicą zastosowanych prętów zbrojeniowych.

Trzecia opcja w tej grupie danych, określona jako **redukcja ze względu na naprężenia samorównoważące**, ma związek z zasadami przyjęcia współczynnika k (patrz wzór 7.1. w Eurokodzie 2 [1]) uwzględniającego rozkład naprężeń rozciągających w przekroju w momencie zarysowania. Przy wyznaczaniu naprężeń wymuszonych sugerowane jest założenie $k = 1,0$ [4]. Takie założenie jest przyjmowane, jeżeli opcja ta jest niezaznaczona. Może to powodować, że zbrojenie na naprężenia wymuszone obliczone według metody poziomu 1 będzie większe nawet niż zbrojenie określone według metody poziomu 0. Źródłem takiego efektu jest fakt, że w metodzie poziomu 0 (dla ścian o grubości powyżej 30 cm) stosuje się współczynnik $k < 1,0$, przez co odwzorowuje się nierównomierny rozkład naprężeń w przekroju. Dzięki temu bierze się pod uwagę, że w momencie, gdy na powierzchni ściany naprężenia osiągną wartość równą wytrzymałości betonu na rozciąganie, to średnia wartość tego naprężenia w całym przekroju będzie nieco niższa. Zaznaczenie wymienionej opcji powoduje, że taka sama redukcja dokonywana jest nawet wtedy, gdy analizowany jest wpływ tylko naprężeń wymuszonych (skutkujących teoretycznie równomiernym rozkładem naprężeń na grubości ściany).

2.3 Algorytm przetwarzania

2.3.1 Zasady wyznaczania zbrojenia na wczesne wpływy termiczno-skurczowe

Obliczenia ilości zbrojenia na wpływy termiczno-skurczowe wykonywane są za pomocą metody analitycznej. Należy mieć świadomość, że złożoność procesów zachodzących w fazie dojrzewania betonu (przepływ ciepła i wilgoci, rozwój cech mechanicznych betonu, pełzanie betonu, wzajemne ograniczenie swobody odkształceń sąsiadujących elementów itp.) sprawia, że nie ma w pełni wiarygodnej metody analitycznej służącej do rozwiązania tego problemu. Każdy ze sposobów postępowania ma charakter techniczny i obarczony jest koniecznością przyjęcia nie w pełni ścisłych założeń.

2.3.1.1 Metoda poziomu 0

W Eurokodzie 2 [1] zagadnieniu wyznaczania zbrojenia minimalnego poświęcony jest podpunkt 7.3.2. Podano w nim bardzo ogólne zasady wyznaczania tego zbrojenia w strefach zagrożonych wystąpieniem naprężeń rozciągających. Metoda (określana jako **metoda poziomu 0**) bazuje na ogólnym założeniu wyrażonym wzorem:

$$A_{s,min} = \frac{k_c \cdot k \cdot f_{ct,eff}(t) A_{ct}}{\sigma_s} \quad (1)$$

Istota tej zależności wynika z porównania siły przenoszonej przez beton strefy rozciąganej bezpośrednio przed wystąpieniem zarysowania (licznik wzoru (1)) i siły przenoszonej przez zbrojenie zaraz po ukształtowaniu się rysy. Wzór ten stosuje się bez jakiegokolwiek oceny samego zjawiska (rozkładu temperatur w twardniejącym betonie, oceny odkształceń skurczowych itp.). Zakłada się, że element zostanie zarysowany bez względu na panujące warunki. W elementach o dużych przekrojach zastosowanie tej metody prowadzi do dużej ilości zbrojenia minimalnego. Dodatkowo, dążąc do ograniczenia szerokości rozwarcia rys i przyjmując z tego względu zredukowane naprężenia w stali zbrojeniowej σ_s ilość wymaganego zbrojenia $A_{s,min}$ staje się jeszcze większa.

2.3.1.2 Metoda poziomu 1

Eurokod 2 dopuszcza (patrz paragraf 7.3.2.(2) [1] zastosowanie dokładniejszych obliczeń, których wynikiem może być zbrojenie mniejsze niż otrzymane ze wzoru (1). Tego typu obliczenia określane są mianem **metod poziomu 1**. W tym podejściu wyznacza się wartości temperatur i odkształceń skurczowych, a następnie na ich podstawie oblicza wielkości sił rozciągających, które mogą wystąpić w analizowanym elemencie.

Przy zastosowaniu tego podejścia rozpatrywane są dwa rodzaje naprężeń związanych z oddziaływaniami termiczno-skurczowymi:

- **naprężenia własne** – wynikające z różnicy odkształceń (efekt różnicy temperatury) pomiędzy wnętrzem ściany, a jej powierzchnią,
- **naprężenia wymuszone** – wynikające z ograniczonej swobody odkształceń ściany (zarówno odkształceń skurczowych, jak i termicznych). Źródłem naprężeń rozciągających w ścianie jest ograniczenie swobody deformacji ściany przez fundament i różnica odkształceń występujących między tymi elementami.

Do określania zbrojenia na **naprężenia własne** w przypowierzchniowych warstwach ściany wykorzystano zalecenia z monografii [5]. Z tej publikacji zaczerpnięto zasadę wyznaczania grubości warstwy przypowierzchniowej (przekroju strefy rozciąganej A_{ct}). Wytyczne określania rozkładów temperatur oraz wartości naprężeń i sił zaadoptowano z monografii [5] i [7]. Metodę postępowania proponowaną w monografii [5] rozszerzono o możliwość kontroli szerokości rozwarcia rys za pomocą metody bezpośredniej kontroli ich rozwarcia.

Do określania zbrojenia na **naprężenia wymuszone** w przypowierzchniowych warstwach ściany wykorzystano zalecenia z artykułu [6] i monografii [5]. Punktem wyjścia jest wyznaczenie całkowitej różnicy odkształceń ściany i fundamentu $\Delta \varepsilon_{tot}$. Jest ona efektem różnicy odkształceń termicznych $\Delta \varepsilon_T$ oraz różnicy odkształceń skurczowych $\Delta \varepsilon_{cs}$:

$$\Delta \varepsilon_{tot} = \Delta \varepsilon_T + \Delta \varepsilon_{cs} \quad (2)$$

Różnica odkształceń $\Delta \varepsilon$ wykorzystywana jest do wyznaczenia naprężeń w ścianie. W zaproponowanym algorytmie oblicza się je ze wzoru z załącznika L trzeciej części Eurokodu 2 – PN-EN 1992-3 [3] (normy służącej do projektowania zbiorników żelbetowych). Po przekształceniu zaproponowanej tam zależności uzyskuje się wzór na naprężenia w ścianie w sąsiedztwie styku z fundamentem:

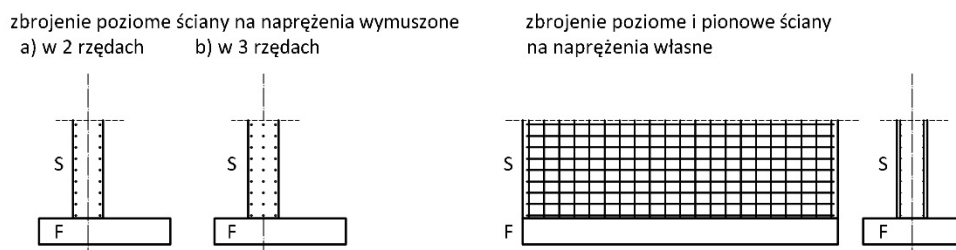
$$\sigma_{H=0} = R_{x,H=0} \Delta \varepsilon_{\text{tot}} E_{c,\text{eff}}, \quad (3)$$

gdzie:

$R_{x,H=0} = 0,5$ jest współczynnikiem liniowego oporu fundamentu na przesunięcie ściany (określonego dla styku ściany z fundamentem), a $E_{c,\text{eff}}$ jest efektywnym modułem sprężystości betonu (uwzględniającym wpływ pełzania betonu). Na podstawie zaleceń z artykułu [6] przyjęto współczynnik pełzania dla młodego betonu równy 1,1.

Dalsze postępowanie polega na wyznaczeniu siły rozciągającej w paśmie ściany o wysokości 1,0 m i dobór odpowiedniego zbrojenia będącego w stanie przenieść tę siłę i dodatkowo zapewnić ograniczenie rozwarcia rys mniejsze niż wartość graniczna (gdy zostanie wybrana opcja kontroli zarysowania).

Rodzaje naprężeń uwzględniane w analizie oraz związane z nimi typy zbrojenia pokazano na rysunku nr 4.



Rys. 4. Rodzaje naprężeń w ścianie i związane z nimi typy zbrojenia oraz sposób jego rozmieszczenia

2.3.2 Kontrola danych

Przyjęto założenie o możliwie dużej elastyczności narzędzia i dopuszczono dosyć dużą dowolność deklarowania danych przez użytkownika. Kierowano się stworzeniem użytkownikowi możliwości oceny wpływu przyjęcia zróżnicowanych założeń na uzyskiwane wyniki końcowe.

2.4 Interpretacja wyników

Wynikiem działania modułu WZTS są następujące wyniki:

- zbrojenie poziome obliczone z wykorzystaniem metody poziomu 0,
- zbrojenie poziome i pionowe potrzebne do zabezpieczenia ściany przed wpływem naprężeń własnych spowodowanych różnicą temperatur w przekroju ściany w fazie stygnięcia (zbrojenie obliczone metodą poziomu 1),
- zbrojenie poziome potrzebne do zabezpieczenia ściany przed wpływem naprężeń wymuszonych wynikających z różnicy odkształceń termicznych i skurczowych ściany i fundamentu (zbrojenie obliczone metodą poziomu 1 wyznaczone dla dolnego fragmentu ściany – w sąsiedztwie połączenia z fundamentem).

Wynik dla każdego przypadku podawany jest w postaci: $n \times A_{s11}$ [cm²/m], gdzie n oznacza liczbę rzędów zbrojenia, a A_{s11} teoretyczne pole przekroju zbrojenia w pojedynczym rzędzie. Jest to przekrój przypadający na 1 mb ściany (dla zbrojenia poziomego na 1mb wysokości, dla zbrojenia pionowego na 1mb jej długości). Dodatkowo, aby ułatwić ocenę, podawane są odstępy między prętami dające przy danej średnicy prętów wymagane pole przekroju zbrojenia. W przypadku gdy odstępy teoretyczne (niezbędne do osiągnięcia odpowiedniego pola przekroju) są bardzo duże, to dodatkowo podawany jest drugi rozstaw spełniający wymagania konstrukcyjne (nie więcej niż 400 mm i nie więcej niż $5 \cdot (c_c + 0,5\varnothing)$), gdzie: c_c – jest grubością otuliny, a $\varnothing$ – średnicą zastosowanych prętów. Wyniki końcowe wyświetlane są w kolorach. Kolory niebieski i czerwony wskazują, że wyświetlony wynik jest bezpośrednio wynikiem obliczeń. Kolor czerwony sygnalizuje, że przy zastosowanych założeniach uzyskane rozstawy zbrojenia są bardzo małe (mniejsze niż 50 mm). Użycie koloru zielonego do wyświetlenia wyniku wskazuje, że uzyskany z obliczeń rozstaw zbrojenia został zmniejszony w celu spełnienia wyżej wspomnianych warunków konstrukcyjnych.

Informacja o zbrojeniu uzupełniana jest komunikatem: „**Rysa**” lub „**Brak rysy**”. Komunikat wskazuje czy naprężenia rozciągające w betonie osiągają wartość równą jego wytrzymałości (i w konsekwencji można oczekiwać pojawienia się zarysowań). Dodatkowo po tym komunikacie pojawia się umieszczony w nawiasach znak „+” lub „-”. Plus wskazuje, że w obliczeniach przekroju zbrojenia obniżono dopuszczalne naprężenia w stali (w celu ograniczenia szerokości rozwarcia rys), a znak minus, że rozwarcie rys nie było kontrolowane i dopuszczone było naprężenie w stali równe granicy plastyczności f_{yk} . W metodzie poziomym 0, **komunikat**

Rysa pojawia się zawsze, gdyż takie założenie leży u podstaw tej metody (bez próby oceny czy tak jest w rzeczywistości).

2.5 Raport

Wzór raportu znajduje się w załączniku nr 1. Na wydruku podawane są podstawowe wyniki obliczeń.

2.6 Ograniczenia

Narzędzie służy do szacowania niezbędnej ilości zbrojenia w ścianach oporowych lub przyczółkach mostowych ze względu na wczesne wpływy termiczno-skurczowe. W obliczeniach **nie jest uwzględniany wpływ oddziaływań innych niż wczesne wpływy termiczno-skurczowe**, którym poddane są tego typu elementy, np. oddziaływania naporem gruntu.

Na skutek zewnętrznego ograniczenia swobody odkształceń ściany w fazie obniżania się temperatury betonu powstaje zróżnicowany układ naprężeń wymuszonych – o wartościach zależnych od rozpatrywanego punktu. Wynikiem obliczeń uzyskiwanym z narzędzia CNM-08 są **naprężenia wymuszone i wynikające z nich zbrojenie poziome w środkowej części ściany w sąsiedztwie styku z fundamentem**. Narzędzie nie pozwala na wyznaczenie naprężeń i zbrojenia w pasmach położonych wyżej. W ścianach o większej długości wraz z oddalaniem się od styku fundament/ściana następuje zmniejszenie wartości tych naprężeń i możliwa byłaby redukcja zbrojenia.

W celu wyznaczenia naprężeń wymuszonych nie prowadzi się analizy statycznej układu ściana, fundament, podłoże gruntowe. Oblicza się je przy użyciu prostej metody analitycznej zaczerpniętej z załącznika M normy PN-EN 1992-3 [3]. Przy wyznaczaniu tych naprężeń przyjmuje się, że ograniczenie swobody odkształceń występuje wyłącznie na dolnej krawędzi ściany (na styku z fundamentem). W obliczeniach uwzględnia się opór fundamentu na przesuw, natomiast pomija się składową związaną z wygięciem ściany. Takie podejście zaczerpnięte zostało z publikacji [6]. Narzędzie nie umożliwia zadania innych warunków brzegowych.

Z tej samej publikacji przyjęto założenie o stałej wartości współczynnika pełzania dla młodego betonu wynoszącej 1,1. W aktualnej wersji narzędzie nie pozwala na przyjęcie innego sposobu odwzorowania wpływu zjawiska pełzania.

3 Przykład działania programu

3.1 Dane wejściowe

Dane dotyczące projektowanego elementu	
Nazwa zadania:	Droga krajowa DK88 - most na 88 km trasy
Nazwa elementu:	Ściana oporowa

Dane dotyczące ściany	
Wymiary (rys.1):	$b = 0,50 \text{ m}$, $H = 3,0 \text{ m}$, $L = 12,0$ (niewykorzystywane w tej metodzie)
Beton: właściwości po 28 dniach:	C30/37 $f_{ck} = 30 \text{ MPa}$; $f_{cm} = 38 \text{ MPa}$; $f_{ctm} = 2,9 \text{ MPa}$; $E_{cm} = 32,8 \text{ GPa}$ czas pielęgnacji: 7 dni rodzaj kruszywa: granitowe wskaźnik $w/c = 0,4$
Cement: właściwości:	CEM II/B - S 32,5R szybkość wiązania: N (normalna) współczynnik szybkości wiązania $s = 0,25$ ilość cementu w mieszance betonowej: $m_{cem} = 350 \text{ kg/m}^3$ ciepło hydratacji w okresie 7 dni: $Q_7 = 294 \text{ kJ/kg}$
Stal i zbrojenie:	stal B500C: $f_{yk} = 500 \text{ MPa}$, $E_s = 200 \text{ GPa}$ liczba rzędów zbrojenia: 2 pręty zbrojeniowe: $\varnothing = 14 \text{ mm}$ otulina: $c_c = 40 \text{ mm}$

Dane dotyczące fundamentu	
Wymiary (rys.1):	$b = 3,0 \text{ m}$, $h = 0,6 \text{ m}$, $L = 12,0$ (niewykorzystywane w tej metodzie)
Beton: właściwości po 28 dniach:	C30/37 $f_{ck} = 30 \text{ MPa}$; $E_{cm} = 32,8 \text{ GPa}$ czas pielęgnacji: 7 dni rodzaj kruszywa: granitowe wskaźnik $w/c = 0,4$
Cement: właściwości:	CEM II/BS 32,5R szybkość wiązania: N (normalna) współczynnik szybkości wiązania $s = 0,25$ ilość cementu w mieszance betonowej: $m_{cem} = 350 \text{ kg/m}^3$ ciepło hydratacji w okresie 7 dni: $Q_7 = 294 \text{ kJ/kg}$
Wiek fundamentu:	$t_f = 30 \text{ dni}$ – wiek fundamentu w chwili betonowania ściany

Warunki środowiskowe	
Wilgotność względna:	$RH = 70\%$
Temperatura zewn.:	15°C
Czas analizy:	28 dni od betonowania ściany

Rysy	
Kontrola rys:	automatyczna
Rozwarcie max rys:	0,3 mm

Opcje obliczeń	
Naprężenia max w betonie:	EC-2 bez modyfikacji
Kontrola rys:	wzór Rüscha i Jungwirtha (pkt. 7.3.3 normy [1])

3.2 Obliczenia zbrojenia – metoda poziomu 0

Obliczenie zbrojenie przypadającego na 1 mb wysokości ściany

Wielkości potrzebne do obliczenia siły rysującej N_{cr}	
Współczynnik k	$k = 0,86$ (dla $b = 0,50 \text{ m}$ – według [7])
Współczynnik k_c	$k_c = 1,0$
Przekrój strefy rozciąganej betonu	$A_{ct} = 0,5 \text{ m}^2$ (osiowe rozciąganie w całym przekroju)

Wytrzymałość efektywna betonu na rozciąganie	$f_{ct,eff} = 2,9 \text{ MPa}$
Siła rysująca	$N_{cr} = 1245 \text{ kN}$
Napężenie zredukowane w stali zbrojeniowej ze wzoru Ruscha, Jungwirtha:	$\sigma_s = \sqrt{\frac{0,45 f_{cm} w_{lim} E_s}{\phi}} = 271 \text{ MPa}$ napężenie wyznaczone dla: zbrojenia o średnicy $\phi = 14 \text{ mm}$, szerokości rozwarcia rysy $w_{lim} = 0,3 \text{ mm}$.

Zbrojenie poziome ze względu na wczesne wpływy termiczno-skurczowe – metoda poziomu 0

Pole przekroju:	$A_{s1} = 2 \times 23,00 \text{ cm}^2/\text{m}$
Rozstaw prętów zbrojeniowych:	$2 \times \emptyset 14 \text{ co } 66 \text{ mm}$

3.3 Obliczenia zbrojenia – metoda poziomu 1

Obliczenia rozkładu temperatur (według [5] i [6])	
Temperatura otoczenia	$T_0 = 15^\circ\text{C}$
Temperatura początkowa mieszanki betonowej	$T_{b0} = T_0 = 15^\circ\text{C}$
Ciepło właściwe betonu	$c_b = 0,88 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ – beton / kruszywo granitowe
Gęstość objętościowa betonu	$\rho_b = 2400 \text{ kg}/\text{m}^3$
Współczynnik przewodnictwa cieplnego betonu	$\lambda_b = 2,96 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
Współczynnik wymiany ciepła z otoczeniem	$\alpha_p = 6 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ – warunki bezwietrzne
Współczynnik rozszerzalności termicznej betonu	$\alpha_T = 1 \cdot 10^{-5} \text{ 1/deg}$
Przyrost temperatury w przemianie adiabatycznej w okresie 7 dni	$\Delta T_{adiab} = \frac{m_{cem} Q_7}{c_b \rho_b} = 48,7 \text{ deg}$
Współczynnik redukcji χ	$\chi = 0,45$ (ściana $b = 0,5 \text{ m}$, cement CEM II)
Zredukowany przyrost temperatury w przemianie adiabatycznej (wymiana ciepła z fundamentem)	$\Delta T_{adiab,red} = \chi \cdot \Delta T_{adiab} = 21,9 \text{ deg}$
Temperatura wnętrza ściany	$T_{int} = T_{b0} + \Delta T_{adiab,red} = 36,9^\circ\text{C}$
Temperatura powierzchni ściany	$T_p = T_{int} + (T_0 - T_{int}) \frac{0,5b}{0,5b + 2\lambda_b/\alpha_p} = 31,7^\circ\text{C}$
Średnia temperatura ściany (na linii kompensacji)	$T_m = T_{int} - \frac{T_{int} - T_p}{3} = 35,2^\circ\text{C}$

Obliczenia zbrojenia poziomego/pionowego na naprężenia własne od wczesnych wpływów termiczno-skurczowych metoda poziomu 1 (według [5])

Odształcenie odpowiadające różnicy temperatur	$\varepsilon_T = 0,035 \cdot 10^{-3}$
Naprężenia własne	$\sigma_{wlasne} = \varepsilon_T \cdot E_{cm}(t) = 1,14 \text{ MPa}$
Kontrola zarysowania	Brak rys w analizie liniowo-sprężystej: $\sigma_{wlasne} = 1,14 \text{ MPa} \leq f_{ct,eff} = f_{ctm} = 2,89 \text{ MPa}$
Współczynnik b_1	$b_1 = 0,175$
Grubość rozciąganej warstwy przypowierzchniowej	$b_1 \cdot b = 0,088 \text{ m}$
Przekrój przypowierzchniowej strefy rozciąganej	$A_{ct} = 0,088 \text{ m}^2$
Siła rysująca dla warstwy przypowierzchniowej	$N_{cr} = k_c \cdot f_{ct,eff} \cdot A_{ct} = 126 \text{ kN}$
Naprężenia w stali (brak zarysowania)	$\sigma_s = f_{yk} = 500 \text{ MPa}$
Pole przekroju zbrojenia (przy obydwu powierzchniach)	$A_{s1} = 2 \times 2,53 \text{ cm}^2$
Rozstaw prętów zbrojeniowych (zbrojenie przy obydwu powierzchniach bocznych ściany)	obliczony: $2 \times \emptyset 14 \text{ co } 607 \text{ mm}$ zredukowany: $2 \times \emptyset 14 \text{ co } 235 \text{ mm}$ (warunek konstrukcyjny $a \leq 5 \cdot (c_c + 0,5\phi)$)

Obliczenia zbrojenia na naprężenia wymuszone od wczesnych wpływów termiczno-skurczowych metoda poziomu 1 (według [6])

Różnica temperatur ściana – fundament (z uwzględnieniem wtórnego nagrzania fundamentu)	$\Delta T = 0,9 \cdot (T_m - T_0) = 18,2^\circ\text{C}$
Odształcenie odpowiadające różnicy temperatury średniej ściany i fundamentu (otoczenia)	$\Delta \varepsilon_T = 0,18 \cdot 10^{-3}$
Swobodne odształcenie skurczowe ściany	$\varepsilon_{cs,S} = 0,052 \cdot 10^{-3}$ (czas $t_A = 28 \text{ dni}$)

Swobodne odkształcenie skurczowe fundamentu	$\varepsilon_{cs,F} = 0,048 \cdot 10^{-3}$ (czas $t_{F1} = 30$ dni) $\varepsilon_{cs,F} = 0,058 \cdot 10^{-3}$ (czas $t_{F2} = t_{F1} + t_A = 58$ dni)
Przyrost odkształceń skurczowych fundamentu	$\Delta \varepsilon_{cs,F} = 0,010 \cdot 10^{-3}$ (w czasie $t_A = 28$ dni)
Różnica odkształceń skurczowych ściana – fundament	$\Delta \varepsilon_{cs} = 0,042 \cdot 10^{-3}$
Suma odkształceń termiczno – skurczowych w fazie stygnięcia	$\Delta \varepsilon_{tot} = \varepsilon_T + \Delta \varepsilon_{cs} = 0,22 \cdot 10^{-3}$
Efektywny moduł sprężystości betonu (z uwzględnieniem pełzania – według [6] – $\varphi(t, t_0) = 1,1$)	$E_{c,eff} = \frac{E_{cm}}{1 + \varphi(t, t_0)} = 15,6 \text{ GPa}$
Współczynnik utwardzenia ściany w fundamencie (według PN-EN 1992-3 [3])	$R_{x,H=0} = 0,5$
Napężenie wymuszone w ścianie na styku z fundamentem	$\sigma_{wym,H=0} = R_{x,H=0} \cdot \Delta \varepsilon_{tot} \cdot E_{c,eff} = 1,75 \text{ MPa}$
Kontrola zarysowania	Brak rys: $\sigma_{wym,H=0} = 1,75 \text{ MPa} \leq f_{ct,eff} = 2,89 \text{ MPa}$
Przekrój strefy rozciąganej betonu	$A_{ct} = 0,50 \text{ m}^2$
Siła rozciągająca w dolnym paśmie ściany o szerokości b i wysokości $1,0 \text{ m}$	$N_t = \sigma_{wym,H=0} \cdot A_{ct} = 873 \text{ kN}$
Napężenia w stali (brak zarysowania)	$\sigma_s = f_{yk} = 500 \text{ MPa}$
Pole przekroju zbrojenia (z rozbiem na 2 powierzchnie boczne)	$A_{s1} = 2 \times 8,73 \text{ cm}^2$
Rozstaw prętów zbrojeniowych (zbrojenie przy obydwu powierzchniach bocznych ściany)	$2 \times \varnothing 14 \text{ co } 176 \text{ mm}$

Załączniki

Załącznik nr 1. Raport z wynikami działania narzędzia

ANALIZA JAKOŚCI TECHNICZNEJ PROJEKTÓW DROGOWYCH WSPÓŁFINANSOWANYCH Z FUNDUSZY UNII EUROPEJSKIEJ WRAZ Z REKOMENDACJAMI OPTIMALIZACJI I SZCZEGÓŁOWYMI WARUNKAMI TECHNICZNYMI PROJEKTOWANIA, REALIZACJI, EKSPLOATACJI I UTRZYMANIA DROGOWYCH OBIEKTÓW INŻYNIERSKICH

POWIĄZANIE WYMAGAŃ TECHNICZNYCH DOTYCZĄCYCH DROGOWYCH OBIEKTÓW INŻYNIERSKICH Z NARZĘDZIAMI CYFROWYMI

Wyznaczanie zbrojenia na wczesne wpływy termiczno-skurczowe w przyczółkach i ścianach oporowych

Nr katalogowy: CNM-08

Raport

Data: 07.08.2019

Nazwa zadania: Droga krajowa DK88 - most na 88 km trasy

Nazwa elementu: **Ściana oporowa**

Dane wejściowe:

Ściana	
wymiary	grubość: 0.5 m ; wysokość: 3 m ; długość: 12 m
beton	C30/37
cement	CEM II; rodzaj: N ; 350 kg/m³ ; w/c: 0.4 ; ciepło hydratacji (7 dni) Q7: 294 kJ/kg
stal	B500 (f_{yk} = 500 MPa)
pręty	średnica: 14 mm; otulina: 40 mm

Fundament	
wymiary	szerokość: 3 m ; wysokość: 0.6 m
beton	C30/37
cement	CEM II; rodzaj: N ; 350 kg/m³ ; w/c: 0.4 ; ciepło hydratacji (7 dni) Q7: 294 kJ/kg

Wersja: 19-01

Str. 1/2



Fundusze
Europejskie
Pomoc Techniczna



Rzeczpospolita
Polska

Unia Europejska
Fundusz Spójności



Wyniki:

Zbrojenie minimalne ściany na wczesne wpływy termiczno-skurczowe:

A. Obliczenia za pomocą metody poziomu 0 (ogólne założenia Eurokodu 2):

2 x 23 cm²/m (Φ 14 co 66 mm) - zbrojenie poziome

B1. Obliczenia za pomocą metody poziomu 1 (naprężenia własne):

2 x 2.53 cm²/m (Φ 14 co 607 mm => Φ 14 co 235 mm) - zbrojenie poziome/pionowe

B2. Obliczenia za pomocą metody poziomu 1 (naprężenia wymuszone)

2 x 8.73 cm²/m (Φ 14 co 176 mm) - zbrojenie poziome na styku ściany z fundamentem

Uwaga: Przed znakiem „x” podano liczbę pionowych rzędów zbrojenia

Przyjęte założenia:

wilgotność względna środowiska RH = **70 %**,

temperatura otoczenia = **15 °C**,

czas analizy: **28** dni po wykonaniu ściany (uwzględnione w cechach betonu i wartościach odkształceń skurczowych),

założone maksymalne rozwarście rys: **0.3 mm**,

osiągnięta wytrzymałość betonu na rozciąganie (potencjalne zarysowanie):

naprężenia własne (**NIE**) naprężenia wymuszone (**NIE**),

ograniczone maksymalne naprężenia w stali ze względu na potencjalne zarysowanie

naprężenia własne (**NIE**) naprężenia wymuszone (**NIE**).