



Wybrane zagadnienia inżynierii środowiska w budownictwie

*Praca zbiorowa pod redakcją:
Adama Raka, Volodymyra Boychuka i Wiesława Barana*

OPOLE 2014

Rozdział 21	
Rewitalizacja budowli hydrotechnicznej jako zabytkowego elementu systemu wodnego miasta Nysy"	
Paweł Opałka	243
Rozdział 22	
Projekt renowacji zabytkowego mostu w Ozimku w świetle uwarunkowań środowiskowych	
Przemysław Jakiel	255
Rozdział 23	
Rewaloryzacja stalowej konstrukcji dawnej cementowni w aspekcie zrównoważonego rozwoju	
Anna Rawska-skotniczny, Elżbieta Kokocińska-Pakiet, Jan Prokop	267
Rozdział 24	
Rekonstrukcja zbiornika stalowego na wodę w zabytkowej wieży murowanej.	
Wiesław Baran, Jan Żmuda	279
Rozdział 25	
Określanie podatności na ścinanie złączy w stropach zespolonych drewniano-betonowych przy wykorzystaniu pomiarów drgań	
Mariusz Czabak, Zbigniew Perkowski	291
Rozdział 26	
Wykorzystanie pomiarów czasów propagacji fal ultradźwiękowych do identyfikacji stref uszkodzonych w elementach żelbetonowych	
Karolina Gozarska, Zbigniew Perkowski	303
Część IV	
Zagadnienia prawno-organizacyjne przygotowania i realizacji przedsięwzięć budowlanych.....	315
Rozdział 27	
Aspekty organizacyjno-prawne, ekonomiczne i techniczne wdrażania projektu dofinansowanego ze środków Unii Europejskiej	
Katarzyna Siejka	317
Rozdział 28	
Realizacja procesu inwestycyjnego w świetle zamówień publicznych na roboty budowlane	
Agata Modrzycka, Małgorzata Ulewicz, Jacek Sielejdak	327
Rozdział 29	
Wpływ uwarunkowań prawnych i rynkowych na opłacalność budowy suszarni osadów ściekowych w miejskiej oczyszczalni ścieków	
Katarzyna Siejka, Mariusz Tańczuk	339
Rozdział 30	
Predykcja lokalizacji elektrowni wiatrowych przy użyciu analizy wielokryterialnej	
Dariusz Fabianowski	351

Mariusz CZABAK
Zbigniew PERKOWSKI

Politechnika Opolska, Wydział Budownictwa, Katedra Fizyki Materiałów, Katowicka 48, 45-061 Opole

OKREŚLANIE PODATNOŚCI NA ŚCINANIE ZŁĄCZ W STROPACH ZESPOLONYCH DREWNIANO- BETONOWYCH PRZY WYKORZYSTANIU POMIARÓW DRGAŃ

DETERMINING SHEAR DEFORABILITY OF CONNECTION COMPOSITE WOOD-CONCRETE FLOORS USING VIBRATION MEASUREMENTS

Słowa kluczowe: strop, zespolenie, drewno, beton, łączniki, drgania swobodne

Streszczenie: W artykule omówiono korzyści płynące z wykorzystania konstrukcji stropu drewniano-betonowego, jako alternatywę w stosunku do ciężkich stropów monolitycznych, podkreślając ich walory ekologiczne i ekonomiczne. Przy tym prezentowana jest innowacyjna metoda szacowania sztywności na ścinanie złączy w tego typu konstrukcjach. Zaproponowany model matematyczny zweryfikowano badaniami na rzeczywistej belce zespolonej. Ostatecznie, w przypadku badanej belki drewnianej połączonej wkrętami z płytą betonową, oszacowana została sztywność tego typu połączenia na podstawie analizy drgań swobodnych.

Keywords: floor, composite, wood, concrete, connectors, free vibrations

Summary: The article presents advantages of wood and concrete slabs as an alternative in a comparison with heavy concrete floors, emphasizing their ecologic and economic benefits. Moreover an innovative method for estimating shear stiffness of connectors in this type of construction is presented. The proposed mathematical model is verified by the investigation made on the real composite beam. Finally, shear stiffness for the tested wooden beams combined by screws with a concrete slab is estimated basing on the analysis of free vibrations.

1. Wstęp

Obecnie właściwie wszystkie dziedziny nauki, w mniejszym lub większym stopniu, skupiają się na proekologicznym rozwoju. W dziedzinie budownictwa nie jest inaczej. Poszukiwanie ekologicznych rozwiązań i metod konstrukcyjnych, które pozwolą na wyższą efektywność energetyczną, a przy tym ograniczą negatywny wpływ na środowisko, jest w fazie intensywnego rozwoju. Należy zwrócić również uwagę na fakt, że przemysł budowlany jest jednym z największych konsumentów energii (w każdej postaci), a także wytwarza wiele rodzajów odpadów i gazów cieplarnianych. Dlatego też korzystanie z ekologicznych technologii i materiałów budowlanych staje się coraz ważniejsze. Przy tym nowo wznoszone jak również rewitalizowane obiekty powinny charakteryzować się niskim zapotrzebowaniem na energię (pasywność energetyczna).

Budownictwo ekologiczne (pasywne) stało się dziś faktem. Obowiązujące przepisy nie pozwalają na budowę obiektów emitujących zbyt dużą ilość energii [1]. Dotyczy to zarówno budownictwa przemysłowego jak i mieszkalnego (w tym domów jednorodzinnych). Jednocześnie dąży się do jeszcze większego zaostrzania przepisów. Nie mniej jednak większość istniejących zabudowań nie jest w stanie sprostać restrykcyjnym wymogom proekologicznym. Stąd, w Polsce co najmniej od 15 lat, wiele istniejących budynków poddawanych jest remontom, mającym na celu poprawę zapotrzebowania na energię (ocieplanie przegród zewnętrznych, wymiana okien i drzwi, modernizacja instalacji grzewczych). Dodatkowy problem pojawia się w wypadku obiektów objętych nadzorem Konserwatora Zabytków, stanowiących dziedzictwo architektoniczne minionych czasów. Wówczas istotnym jest zachowanie istniejącej formy, a coraz częściej również i konstrukcji obiektów.

Jednym z podstawowych proekologicznych materiałów budowlanych jest drewno. Jak wiadomo, drzewa podczas wzrostu pochłaniają i magazynują znaczne ilości dwutlenku węgla i tym samym odgrywają bardzo istotną rolę w redukcji CO₂ [2]. Co ciekawe, na podstawie badań [3] można dowiedzieć się, że wzrost ilości dwutlenku węgla wpływa korzystnie na rozwój lasów i obecnie ich przyrost jest większy, niż to miało miejsce 200 lat temu, a wykorzystanie drewna pochodzącego z upraw specjalnie przeznaczonych pod budownictwo dodatkowo napędza zalesianie. Jeśli przy tym porównamy drewno do innych materiałów (jak np. ceramiki czy betonu, których produkcja odpowiedzialna jest za około 10% emisji CO₂ przez człowieka na świecie) i walory cieplno-wilgotnościowe przegród wykonanych na jego bazie, to okaże się, że będzie ono w kontekście polityki ekologicznej coraz bardziej pożądanym materiałem budowlanym. Ponadto proces jego wytwarzania nie jest związany z emisją gazów cieplarnianych, a wręcz ich pochłanianiem.

Drewno jako materiał budowlany powszechnie stosowane było mniej więcej do połowy XX w. Był to budulec łatwy w pozyskaniu i obróbce. Rozwój nowych technologii (głównie w okresie wojen) pozwolił na ekspansję takich materiałów jak beton czy stal, które zepchnęły na drugi plan budownictwo drewniane. Obecnie tendencja ta zaczyna się odwracać na korzyść konstrukcji drewnianych. Postęp technologii materiałów drewnopochodnych, drewna klejonego oraz konstrukcji zespolonych pozwala na stosowanie drewna w obiektach o znacznych rozpiętościach i dużych obciążeniach (jak np. w centrach handlowych). Z drugiej strony, w chwili obecnej coraz większa liczba remontowanych obiektów zabudowy miejskiej to te, które zostały wzniesione na przełomie XIX i XX w. ze stropami na obelkowaniu drewnianym. Często spotykaną praktyką rewitalizacji tego typu konstrukcji jest ich wymiana na stropy gęstożebrowe. Jednakże takie rozwiązanie niesie za sobą wiele niedogodności związanych z ich zaprojektowaniem (ciężar), wykonawstwem i ceną. Alternatywną metodą rewitalizacji jest wykorzystanie istniejących belek stropowych (o ile ich stan na to pozwala) i zespolenie

ich z cienką płytą żelbetową. Takie rozwiązanie nie tylko znacząco zwiększa nośność całego stropu, ale również korzystnie wpływa na jego walory użytkowe – np. eliminuje się tzw. efekt „klawiszowania” i zwiększa się jego odporność ogniową. Na podstawie prezentowanych faktów można stwierdzić, że w chwili obecnej tematyka projektowania, wykonawstwa i diagnostyki tego typu konstrukcji powinna być szczególnie mocna propagowana, z którego to powodu poświęcono jej niniejszą pracę. Stąd, m.in., w dalszej jej części opisano ogólnie technologię zespawania belek drewnianych z płytą żelbetową i bardziej szczegółowo analizowano możliwości diagnostyki złączy takich konstrukcji w oparciu o analizę pomiarów ich drgań.

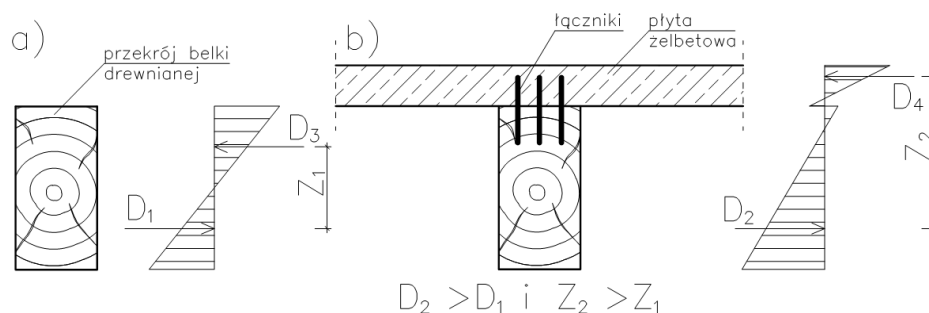
2. Zespolecie belek drewnianych z płytą żelbetową

Wówczas, gdy stan techniczny belek drewnianych w istniejących budynkach pozwala na ich dalszą eksploatację, możliwe jest zastosowanie zespolonego stropu drewniano-żelbetowego. Konstruuje się go po przez, zespolenie nowo ułożonej płyty żelbetowej z belkami przy pomocy łączników stalowych (np. [4]).

Na podstawie rys. 1, który ilustruje typowy rozkład naprężeń normalnych w poprzecznym przekroju samej belki drewnianej przed wzmocnieniem (a) i po jej połączeniu z płytą (b), łatwo jest wyróżnić podstawowe czynniki prowadzące do znacznej poprawy warunków pracy w przypadku (b). W przekroju zespolonym belka drewniana pracuje prawie w całości w strefie rozciąganej, co ma miejsce bez zwiększania naprężeń krawędziowych u jej dołu w porównaniu do sytuacji przed wzmocnieniem. Jest to niezwykle korzystne z uwagi na fakt, że drewno znacznie lepiej przenosi naprężenia rozciągające w porównaniu do ściskających.

Rys. 1. Rozkłady naprężeń normalnych w przekroju zginanej belki drewnianej (a) i po jej zespoleniu z płytą żelbetową (b) [5]

Fig. 1. Distributions of normal stresses in the cross-section of bending wooden beam (a) and after its connection with reinforced concrete slab (b) [5]



Z_1, Z_2 – ramiona wypadkowych naprężeń, rozciągających (D_1 i D_2) i ściskających (D_3 i D_4).

Z_1, Z_2 – arms of resultant forces for tensile stresses (D_1 and D_2) and compressive stress (D_3 and D_4).

W związku z uzyskaniem rozkładu naprężeń, jak na rys. 1(b), mamy również do czynienia ze wzrostem ramienia sił wewnętrznych, co w konsekwencji prowadzi do znacznego wzrostu nośności i sztywności stropu. Zastosowanie takiego rozwiązania eliminuje praktycznie w całości efekt klawiszowania, jaki występuje na stropach drewnianych. Dodatkową zaletą stosowania tego typu stropów jest fakt, że płyta betonowa tworzy poziomą tarczę usztywniającą

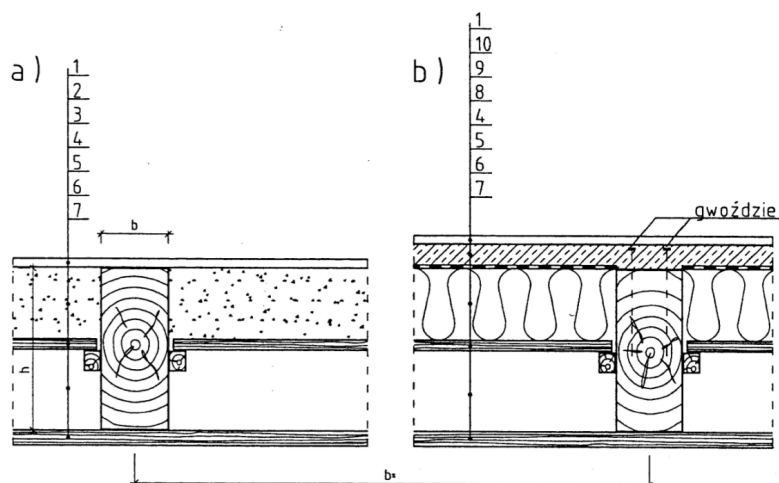
cały budynek. W porównaniu do innych sposobów renowacji, strop zespolony drewniano-żelbetowy ma tą zaletę, że jego ciężar (ok. $1,5 \text{ kN/m}^2$) jest znacznie mniejszy od np. stropów gęstożebrowych (ok. $2,5 \text{ kN/m}^2$). Z drugiej strony, tym sposobem, przy stosunkowo niewielkim ciężarze własnym ustrój ten nabiera już zalet ciężkiego stropu żelbetowego. Płyta żelbetowa pełni również funkcję zabezpieczenia przeciwpożarowego belek z góry i przy zastosowaniu dodatkowo osłonięcia od dołu podsufitką, klasa odporności ogniowej stropu zespolonego drewniano-żelbetowego znacznie wzrasta.

1.2. Konstrukcja stropu

Elementy nośne stropu zespolonego drewniano-żelbetowego to belki drewniane połączone za pomocą łączników stalowych z monolityczną płytą żelbetową. Belki drewniane mogą być oparte na ścianie nośnej wykonanej w dowolnej technologii, oczywiście pod warunkiem bezpiecznego wykorzystania nośności tych ścian. Układ typowego stropu drewnianego, przed i po wzmocnieniu, poglądowo prezentuje rys.2.

Rys. 2. Typowe warstwy stropu na obelkowaniu drewnianym przed i po jego wzmocnieniu [6]

Fig. 2. The typical layers of wooden beam floor before and after its strengthening [6]



a) strop przed wzmocnieniem, b) strop po zespoleniu belki drewnianej z płytą żelbetową, (1-posadzka, 2- ślepa podłoga, 3- polepa gliniana, 4- ślepy pułap, 5- pustka powietrzna, 6- podsufitka, 7- tynk cem.-wap., 8- izolacja cieplna i dźwiękochłonna (np. styropian, wełna mineralna lub szklana), 9- ciągła izolacja przeciwwilgociowa, 10- płyta żelbetowa).

a) floor before strengthening, b) wooden floor after strengthening using reinforced concrete slab (1-flooring, 2 - subfloor, 3 - heavy insulation, 4 - suspended ceiling, 5 - air gap, 6 – soffit ceiling, 7 – cement-lime plaster, 8 - thermal and sound insulation (eg.: polystyrene, mineral or glass wool), 9 - continuous vapor barrier, 10 - reinforced concrete slab).

Zespolenie belek drewnianych z płytą betonową najczęściej odbywa się przez zastosowanie łączników stalowych np. gwoździ lub wkrętów do drewna. Dodatkowo można zastosować wręby w zębrze drewnianym. Tego typu połączenia nie zapewniają jednak „idealnego” zespolenia obu elementów i umożliwiają wzajemny poślizg warstw. Dlatego też w obliczeniach projektowych fakt ten powinien zostać uwzględniony, a po wykonaniu tego typu konstrukcji

należałoby dysponować łatwą do zastosowania metodą diagnostyczną do kontroli stopnia zespolenia obu warstw. W dalszej części opracowania proponowana jest metoda szacowania sztywności połączenia w belkach zespolonych drewniano-betonowych na podstawie wyników badań dynamicznych belki i analizy jej zagadnienia własnego. Przykład praktycznego wykonania takiego stropu w poszczególnych etapach prezentuje rys. 3.

Rys. 3. Przykład wykonania wzmocnienia stropu drewnianego [7]

Fig. 3. Example of strengthening the wooden floor using reinforced concrete slab [7]



3. Pomiar drgań własnych belki zespolonej drewniano-betonowej

W niniejszym rozdziale opisano przeprowadzone przez autorów pomiary drgań swobodnych na wykonanych w tym celu dwóch belkach: drewnianej i zespolonej drewniano-betonowej. Wymiary belek były następujące: długość 3,5m, przekrój belki drewnianej ~ 0,1m x 0,2m, przekrój płyty betonowej ~ 0,05m x 0,3m (rys. 4 i 6). Badany element poddany został wymuszeniom o charakterze impulsowym, po czym rejestrowano wibrogramy w wybranych jego punktach.

Rys. 4. Zdjęcie badanej belki drewnianej

Fig. 4. The picture of the tested wooden beam



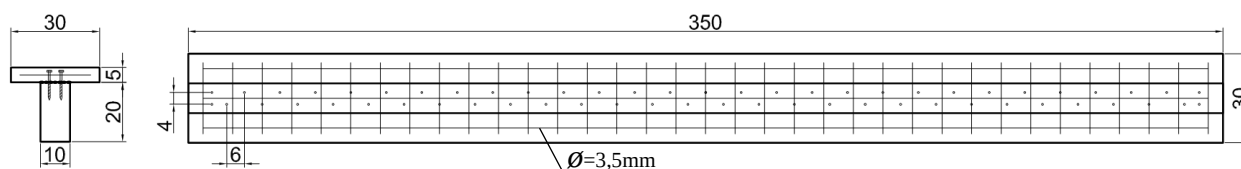
Rys. 5. Zastosowany wkręt 8mm x 100mm o efektywnej średnicy 5,5mm

Fig. 5. The used screw 8mm x 100mm with an effective diameter of 5.5 mm



Rys. 6. Zdjęcie, rzut i przekrój poprzeczny badanej belki zespolonej

Fig. 6. The picture, horizontal projection and cross-section of the tested composite beam

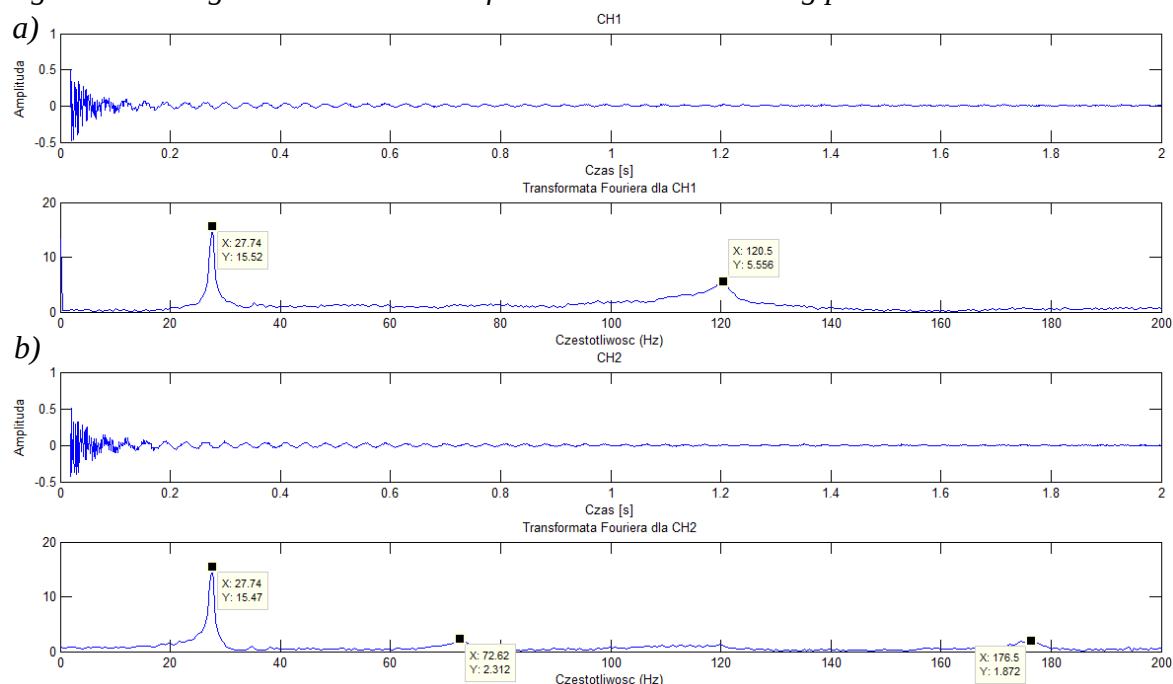


Prezentowana belka na rys 6. została wykonana, w sposób, umożliwiający badanie podatności jej złącza (w tym wypadku wykonanego za pomocą stalowych wkrętów do drewna (rys. 5)), z pominięciem tarcia powierzchni drewnianej z płytą betonową. W tym celu górną powierzchnię belki drewnianej wyszlifowano, a dodatkowo część drewnianą i betonową rozdzielono podwójną warstwą folii, co dało możliwość poślizgu pomiędzy dwoma elementami konstrukcji i w rzeczywistości zespolenie zapewniały wyłącznie łączniki. Na tak wykonanej belce wolnopodpartej zamocowano przyspieszeniomierze. Wskazania akcelerometrów rejestrowano za pomocą oscyloskopu, przy czym zapisywano przyśpieszenia od impulsowych uderzeń (punktowych) zadanych w okolicach umieszczenia czujników.

Na rys. 7 przedstawiono przykład niektórych z uzyskanych akcelerogramów wraz z ich transformatami Fouriera (FFT). Czujniki były zamocowane w połowie i $\frac{1}{4}$ rozpiętości belki.

Rys. 7. Akcelerogramy i ich szybkie transformaty Fouriera w przypadku dwóch wybranych punktów pomiarowych

Fig. 7. Accelerograms and their FFT for two chosen measuring points



a) wzbudzenie i pomiar przyspieszeń w środku rozpiętości, b) wzbudzenie w środku i pomiar w $\frac{1}{4}$ rozpiętości.

a) excitation and measurement of accelerations at the beam midspan, b) excitation at the midspan and measurement of accelerations at the quarter of beam span from the support.

Z powyższych transformat Fouriera możliwe jest odczytanie częstotliwości drgań własnych belki zespolonej. W tym przypadku z oczywistych względów przy wymuszeniu w $\frac{1}{2}$ rozpiętości widoczne są pierwsza i trzecia częstość. Druga ujawnia się przy wymuszeniu w $\frac{1}{4}$ rozpiętości. Średnio ze wszystkich otrzymanych akcelerogramów odczytano następujące częstości drgań własnych: $f_{(1)}=27,57\text{Hz}$, $f_{(2)}=72,54\text{Hz}$ i $f_{(3)}=119,20\text{Hz}$.

4. Matematyczny opis problemu

W celu opracowania uproszczonego opisu matematycznego prezentowanego zagadnienie sprowadzono rozważania do przypadku pręta warstwowego, który może modelować zachowanie się pojedynczego zebra stropu. Element różniczkowy takiego pręta wraz z siłami, oddziałującymi na niego przedstawiono na rys.8, przy czym w celu uproszczenia nie uwzględniono sił tłumiących drgania. Poślizg międzywarstwowy opisano w tym przypadku relacją:

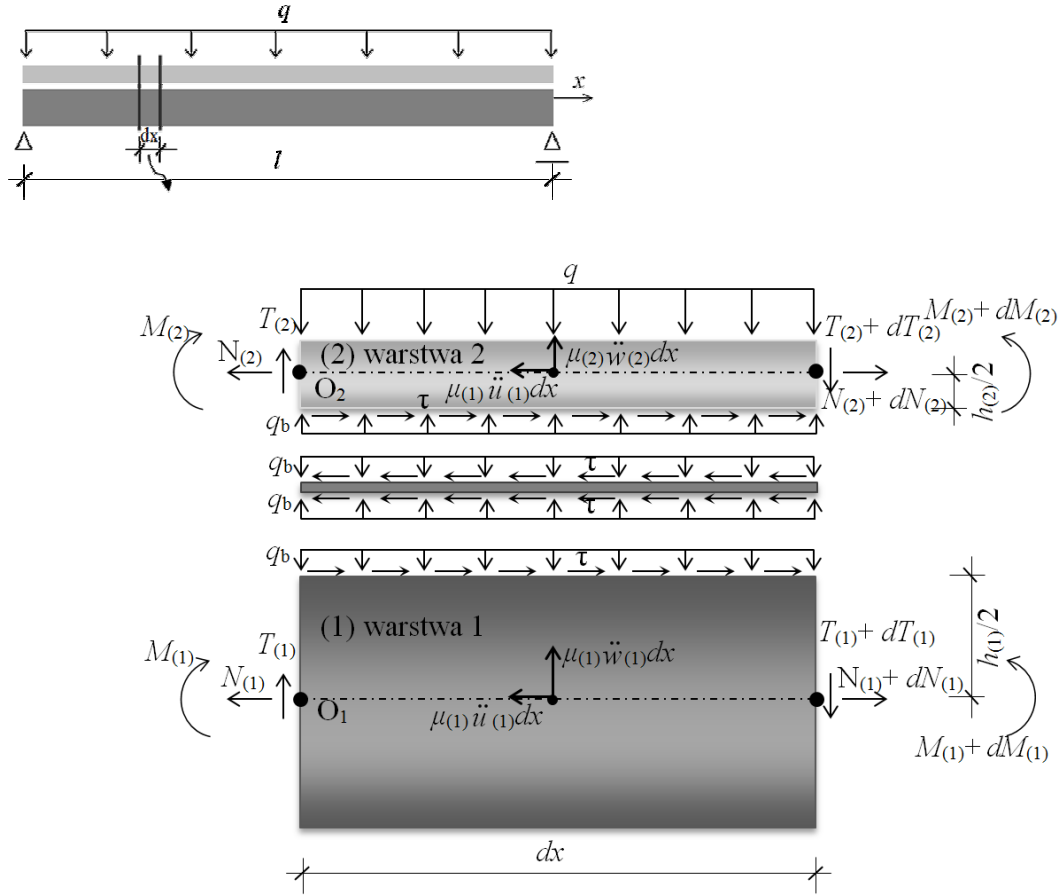
$$s = u_{(1)} - u_{(2)} - ew' . \quad (1)$$

Opis równania:

- s – poślizg między warstwami;
- $u_{(i)}$ – przemieszczenie poziome w osi i -tej warstwy;
- $e = \frac{1}{2}(h_{(1)} + h_{(2)})$, gdzie $h_{(i)}$ to wysokość warstwy (i);
- w – przemieszczenie pionowe elementu.

Rys. 8. Element różniczkowy belki wraz z siłami wewnętrznymi i siłami bezwładności

Fig. 8. Beam differential element with the internal forces and forces of inertia



Zakładając najprostszy model liniowo-sprężysty dwuwarstwowej belki z podatnym złączem [6] można uzyskać układ trzech równań różniczkowych względem funkcji w , $u_{(1)}$ i $u_{(2)}$.

$$\begin{cases} w^{IV} (E_{(1)}I_{(1)} + E_{(2)}I_{(2)}) - ke^2 w'' & + ke u_{(1)}' & - ke u_{(2)}' & = -q - \mu \ddot{w} \\ ke w' & + E_{(1)}A_{(1)}u_{(1)}'' - ku_{(1)} & + ku_{(2)} & = \mu_{(1)}\ddot{u}_{(1)} \\ -ke w' & + ku_{(1)} & + E_{(2)}A_{(2)}u_{(2)}'' - ku_{(2)} & = \mu_{(2)}\ddot{u}_{(2)} \end{cases} \quad (2)$$

Opis równania:

k – sztywność złącza (w Nm^{-2});

$E_{(i)}$, $I_{(i)}$, $A_{(i)}$, $\mu_{(i)}$ – moduł Younga, moment bezwładności i pole przekroju, masa na jednostkę długości warstwy (i) ($i=1,2$);

$()''$, $()^{IV}$ – druga i czwarta pochodna funkcji po x ;

$(\ddot{})$ – druga pochodna funkcji po czasie.

Wykorzystując Metodę Elementów Skończonych (MES) lub Metodę Różnic Skończonych (MRS) można powyższy układ równań wyrazić, po algebraizacji zagadnienia, w postaci macierzowej:

$$\mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{P} - \mathbf{B}\ddot{\mathbf{u}}. \quad (3)$$

Opis równania:

- $\mathbf{K}$ – macierz sztywności;
- $\mathbf{u}$ – wektor przemieszczeń węzłowych;
- $\mathbf{P}$ – wektor sił węzłowych;
- $\mathbf{B}$ – macierz bezwładności.

Wtedy, w celu przeprowadzenia analizy modalnej problemu, zakładamy w równaniu (3) $\mathbf{P}=\mathbf{0}$ i $\mathbf{u} = \mathbf{u}_0 \sin(\omega t + \phi)$ (np. [8]). Możemy wówczas otrzymać następujące równanie na wartości własne λ_i macierzy $\mathbf{KB}^{-1}$ i, tym samym, na częstotliwości giętych drgań własnych:

$$(\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{B}\mathbf{I})\mathbf{u}_0 \sin(\omega t + \phi) = \mathbf{0} \rightarrow \det(\mathbf{KB}^{-1} - \lambda \mathbf{I}) = 0 \rightarrow \lambda_i = \omega_i^2. \quad (4)$$

Opis równania:

- $\mathbf{I}$ – macierz jednostkowa;
- $\mathbf{0}$ – wektor zerowy;
- $\mathbf{u}_0$ – wektor drgań własnych;
- ω – i -ta częstotliwość drgań własnych;
- t – czas.

Poniżej podano warunki brzegowe w przypadku belki swobodnie podpartej, które należy wykorzystać przy wyznaczaniu składowych macierzy $\mathbf{K}$:

$$\begin{aligned} u'_{(1)}(x=0) = u'_{(1)}(x=l) = 0 ; u'_{(2)}(x=0) = u'_{(2)}(x=l) = 0 , \\ w(x=0) = w(x=l) = 0 ; w''(x=0) = w''(x=l) = 0 . \end{aligned} \quad (5)$$

Rozwiązanie zagadnienia własnego (4) można w chwili obecnej przeprowadzić stosunkowo łatwo, wykorzystując odpowiednie oprogramowanie komputerowe. Wynika stąd ponadto, że w sytuacji, gdy częstotliwości drgań rzeczywistej konstrukcji i moduły Younga poszczególnych jej warstw są znane, możliwe jest wyznaczenie parametru sztywności na ścinanie złącza k , znajdując minimum funkcji błędu:

$$F(k) = \sum_{i=1}^n \left| \frac{f_{i(\text{pomiar})} - f_{i(\text{model})}(k)}{f_{i(\text{pomiar})}} \right| \quad \text{lub} \quad F(k) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{f_{i(\text{pomiar})} - f_{i(\text{model})}(k)}{f_{i(\text{pomiar})}} \right)^2. \quad (6)$$

Opis równania:

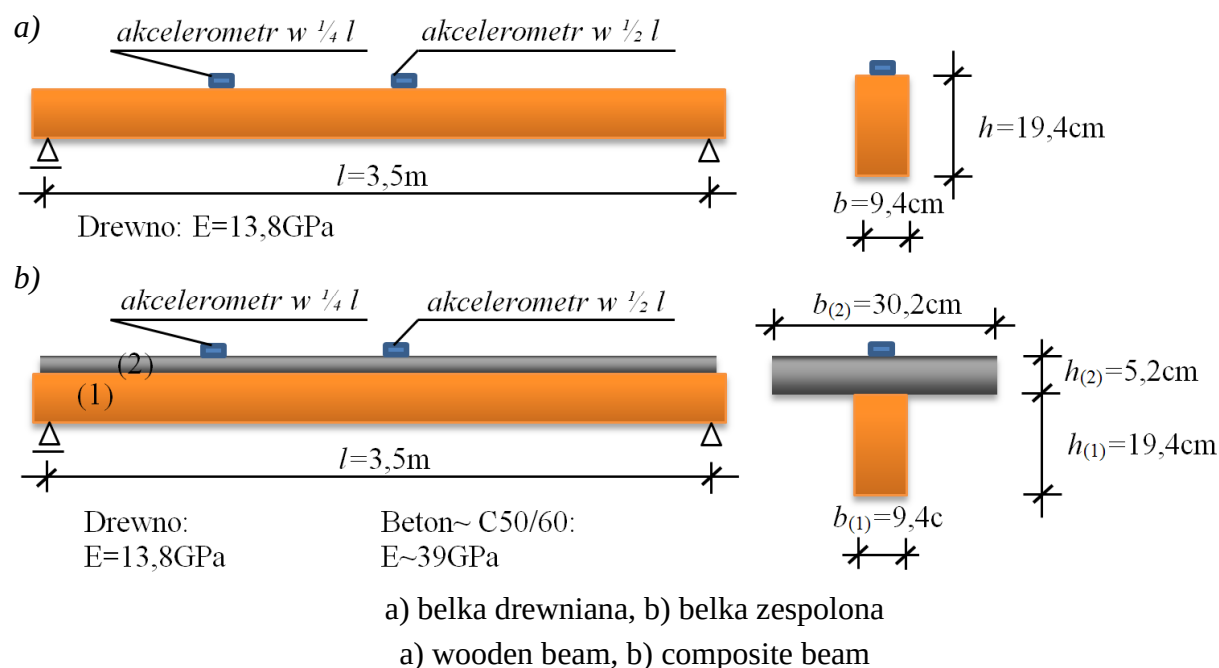
- $f_{i(\text{pomiar})}$ – zmierzona i -ta częstotliwość drgań własnych konstrukcji;
- $f_{i(\text{model})}$ – i -ta częstotliwość drgań własnych otrzymana z modelu obliczeniowego;
- n – liczba pierwszych częstotliwości drgań własnych wziętych do analizy.

5. Szacowanie sztywności złącza

Podstawowe parametry geometryczne i materiałowe badanych elementów belkowych wraz ich schematami statycznymi zaprezentowano na rys. 9.

Rys. 9. Schemat statyczny i przekrój poprzeczny badanej belki zespolonej

Fig. 9. The static scheme and sectional view of the composite tested beam



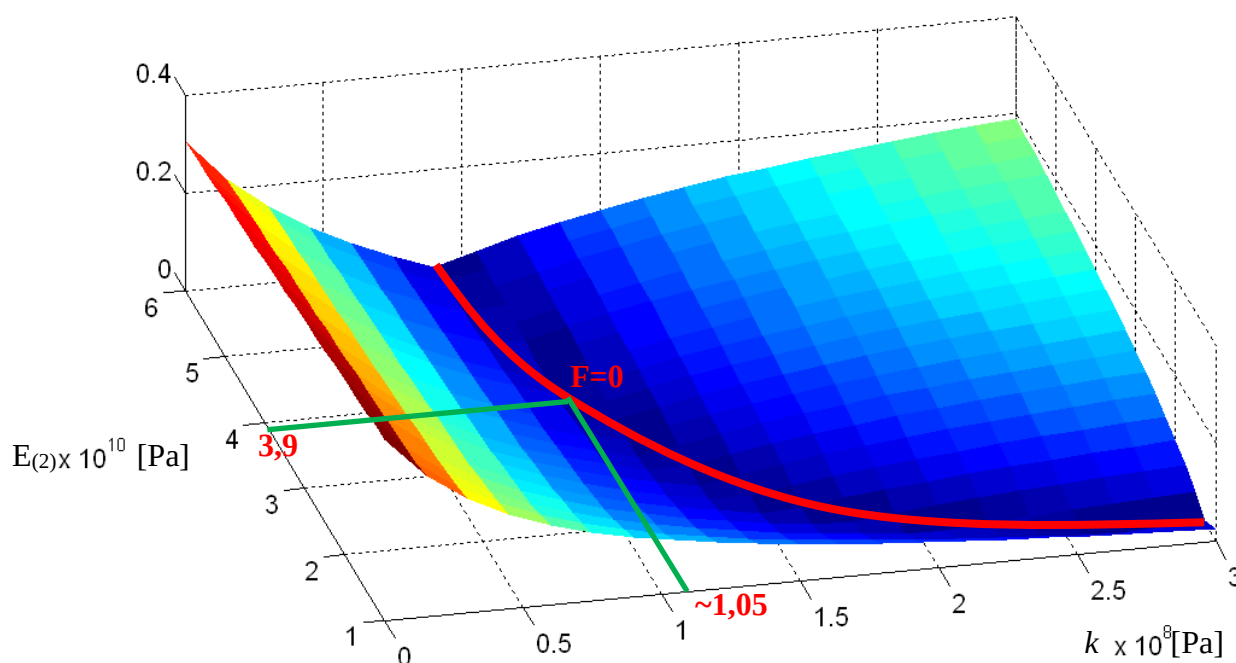
Moduł sztywności elementu drewnianego ustalono na podstawie badania dynamicznego bliźniaczej belki drewnianej (rys. 4 i 9a), o schemacie statycznym identycznym jak w wypadku elementu zespolonego i takich samych warunkach przechowywania. Obliczenia prowadzono przy wykorzystaniu wzoru na pierwszą częstość drgań własnych jednorodnego elementu belkowego (np. [9]). W ten sposób dynamiczny moduł Younga badanego elementu drewnianego wzdłuż włókien wyznaczono jako równy 13,8GPa. Natomiast moduł Younga warstwy betonowej oszacowany został na podstawie badań wytrzymałościowych. W tym celu, w trakcie formowania warstwy betonowej, wykonano z tej samej partii betonu 4 próbki kostkowe o wymiarach 10cm x 10cm x 10cm, i przechowywano je w identycznych warunkach jak całą belkę. Ich wytrzymałość na ściskanie średnio wynosiła 62MPa, co stwierdzono w tym samym dniu, w którym przeprowadzono badania dynamiczne belek. Na tej podstawie, przy wykorzystaniu wzorów wiążących wytrzymałość i sztywność betonu wg [10], oszacowano pośrednio średni, dynamiczny moduł Younga betonu na poziomie 39GPa.

Wykorzystując dalej równanie (4) przy dyskretyzacji zagadnienia zgodnie z MRS i warunków brzegowych (5) napisany został autorski program w języku MATLAB, pozwalający obliczyć częstotliwości drgań własnych dwuwarstwowego elementu zespolonego z poślizgiem warstw. Bazując na tym programie, możliwe było wyznaczenie położenia minimum funkcji (6₁) przy przyjęciu $n=1$ $E_{(1)}=13,8\text{GPa}$, $E_{(2)}=39\text{GPa}$ i $f_{1(\text{pomiar})}=27,57\text{Hz}$. W tym przypadku realizowane było ono przy sztywności złącza $k\sim 105\text{MPa}$. Do analiz wzięto pod uwagę tylko pierwszą częstość drgań własnych z uwagi na fakt, iż w przypadku drugiej i następnych postaci giętych drgań własnych belki nie otrzymano już dostatecznej zgodności pomiędzy wy-

nikami eksperymentalnymi i tymi z obliczeń prowadzonych na modelu prętowym z uwagi na zbyt dużą krępość belki. Poglądowo wykres funkcji błędu (6₁) przedstawiono na rys. 8 w zależności od podatności na ścinanie złącza k i modułu Younga płyty betonowej $E_{(2)}$ przy $n=1$, $E_{(1)}=13,8\text{GPa}$, i $f_{1(\text{pomiar})}=27,57\text{Hz}$, przy czym zaznaczono położenie minimum w przypadku $E_{(2)}=39\text{GPa}$. Na podstawie tego wykresu można zauważyć, że ewentualny błąd w oszacowaniu modułu Younga płyty będzie mieć duży wpływ na dokładność wyznaczenia sztywności k w przypadku betonów o niższych klasach wytrzymałości. W przypadku betonów wyższych klas wpływ ten znacznie maleje.

Rys. 8. Wykres funkcji błędu

Fig. 8. The diagram of the error function



6. Wnioski:

Ciągły rozwój dziedziny budownictwa w kierunku ochrony środowiska zmusza do rozwiązywania problemów w nowy, niekonwencjonalny sposób. Zaprezentowana w artykule technika wzmacniania stropów drewnianych z powodzeniem może być stosowana przy rewitalizacji istniejących jak i w nowo budowanych obiektów, ograniczając w ten sposób nakład materiałów i pracy, a co za tym idzie negatywnych oddziaływań na środowisko. Jednakże stosowanie takich rozwiązań niesie za sobą konieczność opracowania technik kontroli jakości wykonania takiej konstrukcji jak i nadzoru nad jej kondycją w czasie.

Konstrukcje zespolone przy optymalnym wykorzystaniu użytych materiałów z uwagi na ich sztywność i nośność, coraz częściej i chętniej znajdują zastosowanie w budownictwie. Stąd też nieniszczące metody diagnostyki istniejących jak i nowo wznoszonych tego typu ustrojów powinny być intensywnie rozwijane. Przedstawiono w pracy metoda oparta na analizie drgań swobodnych pozwala na podstawie znajomości jednej częstotliwości drgań własnych (przy znanych parametrach geometrycznych i modułach Younga poszczególnych warstw) oszacować sztywność poprzeczną styku (realizowaną przez kołki, wkręty, gwoździe itp.) i dalej całego elementu zespolonego, co z kolei umożliwia wiarygodne sprawdzenie jego SGU. Oczywiście, czasochłonność poszukiwania minimum funkcji błędu jest osobną kwestią,

co zmusza, w celu zastosowania metody, do wykorzystywania oprogramowania komputerowego. Należy wspomnieć, że dokładność tak prowadzonych szacunków można znacznie zwiększyć przy wykorzystaniu specjalistycznych programów MES, modelując układ zespolony z podatnym złączem w 3D. Przykładowo taką analizę modalną belek zespolonych stalowo-betonowych przedstawiono w pracy [11], gdzie pokazano także, że wykorzystanie narzędzi do modelowania trójwymiarowego daje możliwość jeszcze lepszego oszacowania sztywności na ścinanie (uwzględnienie większej ilości częstości drgań własnych w funkcjach błędu (6)), jak i dodatkowo wyznaczenia sztywności złącza w kierunku pionowym.

Podziękowania:

Autorzy składają podziękowania firmie Adamietz Sp. z o.o., a w szczególności inż. Michałowi Chrobrowskiemu, za współpracę przy wykonywaniu modelu belki zespolonej drewniano-betonowej.

Bibliografia

- [1] Zbijowski K. Świadectwa energetyczne w budownictwie. Zbiór przepisów, Wydawnictwo Sto, 2009
- [2] Kiełczewski B., Wiśniewski J. Las w środowisku życia człowieka. Warszawa :Państw. Wydaw. Rolnicze i Leśne, 1982
- [3] Sean M. McMahon, Geoffrey G. Parker, Dawn R. Miller, Evidence for a recent increase in forest growth, Proceedings of the National Academy of Science, 2010
www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.0912376107#sthash.fESZluSH.dpuf
- [4] Godycki-Ćwirko T., Kleszczewski J., Pawlica J., Wzmacnianie stropów na belkach drewnianych przez ich zespolenie z płytą żelbetową, Tom I, PWN, Warszawa 2006
- [5] Czabak M., Perkowski Z., Analiza wpływów reologicznych w zespolonym stropie drewniano-żelbetowym, Roczniki Inżynierii Budowlanej, PAN oddział w Katowicach, 2012
- [6] Rudziński L.: Naprawy i wzmocnienia konstrukcji drewnianych, Kielce: Wydawnictwo PŚ w Kielcach, 2000
- [7] Czabak M. Analiza statyczno-wytrzymałościowa drewniano-żelbetowych stropów zespolonych, Opole: Praca dyplomowa WB PO, 2012
- [8] Kuczma B., Kuczma M. Badania doświadczalne i modelowanie klejonych stalowo-betonowych belek zespolonych, Rzeszów: ZN Politechniki Rzeszowskiej, 283, Bud. i Inżynieria Środowiska, 59 (3/2012/II), 2012
- [9] Chmielewski T., Zembaty Z. Dynamika budowli, Studia i monografie, z. 97, Opole: Politechnika Opolska, 1998
- [10] Neville A.M., Właściwości betonu, wyd. 4, Kraków: Polski Cement, 2000
- [11] Wróblewski T., Pełka-Sawenko A., Abramowicz M., Berczyński S.: Modeling and analysis of free vibration of steel-concrete composite beams by finite element method, Rzeszów: Politechnika Rzeszowska, 2012