ZAŁĄCZNIK 10

ZACHOWANIE SIĘ BETONOWYCH ELEMENTÓW ZESPOLONYCH Z WIELOPŁASZCZYZNOWYM NIEZBROJONYM STYKIEM

Streszczenie

Zespolone elementy betonowe wykonywane są najczęściej jako połączenie prefabrykatu i nadbetonu układanego na budowie. Elementy te projektowane są jak monolityczne, przy założeniu konieczności nieprzekroczenia dopuszczalnych naprężeń w styku. Pomimo stosunkowo prostych zapisów dotyczących wyznaczania nośności styku w normie PN-EN 1992-1-1:2008 uzupełnionej w zakresie prefabrykacji o zapisy z normy PN-EN 15037-1, procedury wymagają klaryfikacji w kilku aspektach projektowych. Wątpliwości te dotyczą wyznaczania naprężeń w stykach o wielu płaszczyznach zespolenia oraz przyjmowania parametrów powierzchni z uwagi na niespójne zalecenia pomiędzy normami z serii PN-EN. Zagadnienia te stanowiły punkt wyjścia do badań doświadczalnych mających na celu opisanie zachowania się elementów zespolonych z niezbrojonym stykiem wielopłaszczyznowym.

W ramach niniejszej pracy doktorskiej przeprowadzono obszerne studium literaturowe obejmujące analizę parametrów kształtujących zespolenie, mechanizmów odpowiadających za przenoszenie naprężeń w styku, ocenę zapisów krajowych oraz zagranicznych przepisów normowych wraz z przeglądem publikacji naukowych dotyczących badań elementów zespolonych. Opracowano autorski program badań doświadczalnych składający się z badań wstępnych przeprowadzonych na elementach z płaskim stykiem oraz badań na elementach z wielopłaszczyznowym stykiem w testach bezpośredniego ścinania, jak również trzy i czteropunktowego zginania. W ramach badań wykonano dziesięć różnych konfiguracji styku pozwalających na określenie efektywności stref zespolenia w zależności od ich położenia w przekroju poprzecznym. Analizy umożliwiły określenie faz pracy badanych elementów oraz identyfikację zakresu fazy sprężystej, opis fazy lokalnego zarysowania styku oraz fazy zarysowania do osi oparcia elementu, aż po jego zniszczenie. Wykazano niepełną efektywność stref zespolenia w przenoszeniu naprężeń stycznych.

Opracowano modele numeryczne o skalibrowanych parametrach zespolenia w oparciu o badania bezpośredniego ścinania. Modele pozwoliły na dokładny opis efektywności stref zespolenia oraz wydzielenie efektów wpływających na zachowanie się styku na skutek zarysowania oraz jego geometrii styku. Wykazano istotne różnice pomiędzy założeniami normowymi, a wynikami badań doświadczalnych i modelowaniem numerycznym. Zaproponowano modyfikację przepisów normowych w zakresie elementów o wielu płaszczyznach zespolenia. Wyznaczono dalsze kierunki prac badawczych dotyczących przedmiotu rozprawy.

THE BEHAVIOUR OF COMPOSITE CONCRETE ELEMENTS WITH UNREINFORCED MULTIPLANAR INTERFACE

Abstract

Composite concrete elements are typically constructed as a combination of precast concrete components and on-site concrete toppings. These elements are designed to function as monolithic structures, assuming that the stresses at the interface do not exceed resistance. Despite the relatively straightforward provisions for determining the load-bearing capacity of the interface in PN-EN 1992-1-1:2008, supplemented by provisions from PN-EN 15037-1 concerning precasting, several aspects of the design procedures require further clarification. These issues relate to the assessment of stresses in interfaces characterised by multiplanar interface and the adoption of surface parameters due to inconsistent recommendations between the PN-EN series of standards. This identification of gaps served as the starting point for experimental studies aimed at describing the behaviour of composite elements with unreinforced multiplanar interfaces.

This dissertation involved an extensive literature review that includes an analysis of the parameters influencing the interface, the mechanisms governing stress transfer at the interface, an evaluation of both national and international standard regulations, and a review of scientific publications on the testing of composite elements. An experimental research programme was developed consisting of preliminary tests conducted on elements featuring a flat interface, as well as tests on elements with a multiplanar interface subjected to direct shear, alongside three- and four-point bending tests. Ten distinct interface configurations were examined to assess the effectiveness of the interface zones in relation to their position within the cross-section. The analyses facilitated the identification of the phases of the tested elements and to identify the extent of the elastic phase, the description of the local cracking phase of the interface, the cracking phase up to the support axis of the element and subsequent element failure. The inefficiency of the interface zones in transferring shear stresses was indicated.

Numerical models with calibrated interface parameters were developed based on direct shear tests. The models allowed an in-depth description of the efficiency of the interface zones while enabling the distinction between the effects of cracking behaviour and interface geometry. Notable discrepancies between standard provisions, experimental results, and numerical modeling were identified. A modification to the standard provisions for elements featuring multiplanar interfaces was proposed. Further research directions for the subject of the dissertation were established.

26.08 2024

ZACHOWANIE SIĘ BETONOWYCH ELEMENTÓW ZESPOLONYCH Z WIELOPŁASZCZYZNOWYM NIEZBROJONYM STYKIEM

Poszerzone streszczenie

Zespolone elementy betonowe wykonywane są najczęściej jako połączenie prefabrykatu i nadbetonu układanego na budowie. Elementy te projektowane są jak monolityczne, przy założeniu konieczności nieprzekroczenia dopuszczalnych naprężeń w styku. Pomimo stosunkowo prostych zapisów dotyczących wyznaczania nośności styku w normie PN-EN 1992-1-1:2008 uzupełnionej w zakresie prefabrykacji o zapisy z normy PN-EN 15037-1, procedury wymagają klaryfikacji w kilku aspektach projektowych. Wątpliwości te dotyczą wyznaczania naprężeń w stykach o wielu płaszczyznach zespolenia oraz przyjmowania parametrów powierzchni z uwagi na niespójne zalecenia pomiędzy normami z serii PN-EN. Sformułowano zagadnienia, które stanowiły punkt wyjścia do badań doświadczalnych mających na celu opisanie zachowania się elementów zespolonych z niezbrojonym stykiem wielopłaszczyznowym:

- niespójne zapisy normowe dotyczące parametrów styku,
- niespójne ujęcia zasad obliczania i określania efektywnych powierzchni zespolenia w elementach o wielopłaszczyznowym styku,
- brak uwzględnienia wpływu lokalnego poślizgu oraz zarysowań ukośnych na pracę styku,
- niejasne zasady określania wpływu naprężeń spowodowanych zewnętrznymi siłami normalnymi w zależności od położenia płaszczyzny zespolenia (styki poziome i pionowe),
- niejednoznaczne wytyczne w zakresie uwzględniania efektów skurczu oraz pełzania.

Na podstawie powyższych zagadnień przeprowadzono studium literatury obejmujące przedstawienie parametrów kształtujących zespolenie, mechanizmów odpowiadających za przenoszenie naprężeń w styku, zapisów krajowych i zagranicznych przepisów normowych oraz przegląd publikacji naukowych dotyczących badań elementów zespolonych. Główne wnioski i zagadnienia z przeglądu literatury można podsumować w poniższych kilku punktach:

- szorstkość powierzchni wpływa pozytywnie na wytrzymałość styku,

26.09.2024

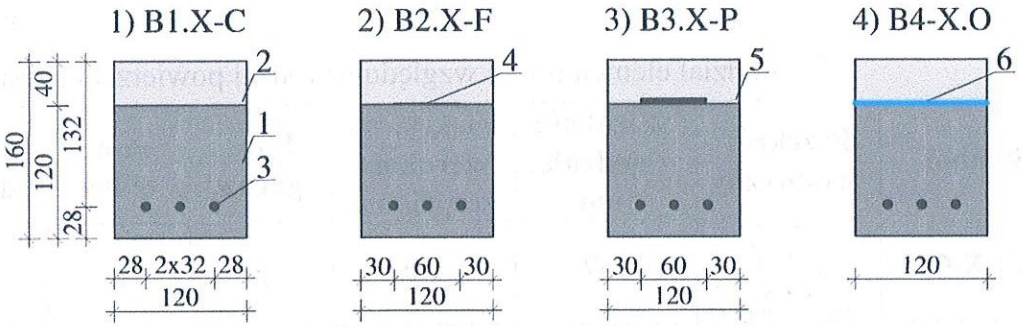
W ramach pracy sformułowano następujące tezy:

1. Współpraca pomiędzy płaszczyznami zespolenia jest zależna od położenia na wysokości przekroju poprzecznego.
2. Styku o wielu płaszczyznach zespolenia odznaczają się charakterystyką nieliniową przed zniszczeniem ze względu na poślizg w styku.
3. Zwiększona nośność zespolenia płaszczyzn pionowych wynika z efektu ich skrępowania.
4. Wydłużenie belki zespolonej poza oś podpory umożliwia zachowanie quasi-monolityczne pomimo zarysowaniu styku aż do osi oparcia.

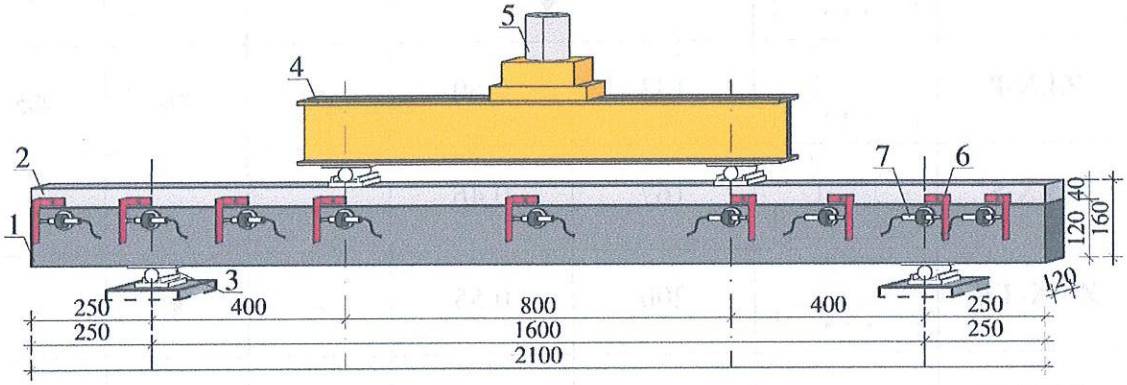
Rozprawa została podzielona na rozdziały poświęcone poszczególnym zagadnieniom. Rozdział 3 zawiera przegląd czynników determinujących parametry zespolenia, zapisy normowe dotyczące zespolenia beton-beton, badania próbek do określania parametrów zespolenia, wybrane badania elementów zespolonych oraz analizy numeryczne, rozdział zakończono wnioskami. Rozdział 4 zawiera sformułowanie tezy i określa szczegółowe cele pracy. W rozdziale 5 przedstawiono główne założenia programu badań. Opisano budowę stanowisk badawczych, geometrię badanych elementów oraz wybrane metody pomiarowe. W rozdziale 6 przedstawiono wyniki trzech rodzajów badań eksperymentalnych. Rozdział 7 zawiera analizy numeryczne wykonane metodą elementów skończonych. W rozdziale 8 przedstawiono analizę oraz obliczenia analityczne dla wyników badań eksperymentalnych oraz numerycznych w kontekście aktualnych norm i omówiono program badań. W rozdziale 9 zaproponowano modyfikacje i rozszerzenie obecnych norm z serii PN-EN. Rozdział 10 zawiera wnioski końcowe i określa kierunki przyszłych prac.

W celu wypełnienia stawionych celów oraz weryfikacji postawionych tez opracowano program badań doświadczalnych. Badania podzielone zostały na trzy główne etapy o następujących założeniach i celach:

1. Badania wstępne:
   1.1. Elementy zostały wykonano z wykorzystaniem prefabrykowanych sprężonych belek o przekroju 120 x 120 mm o płaskiej powierzchni styku, grubość nadbetonu wynosiła 40 mm.
   1.2. Płaska powierzchnia zespolenia została wykonana w czterech wariantach, w celu dobór materiałów i metod do przygotowania głównych elementów badawczych.

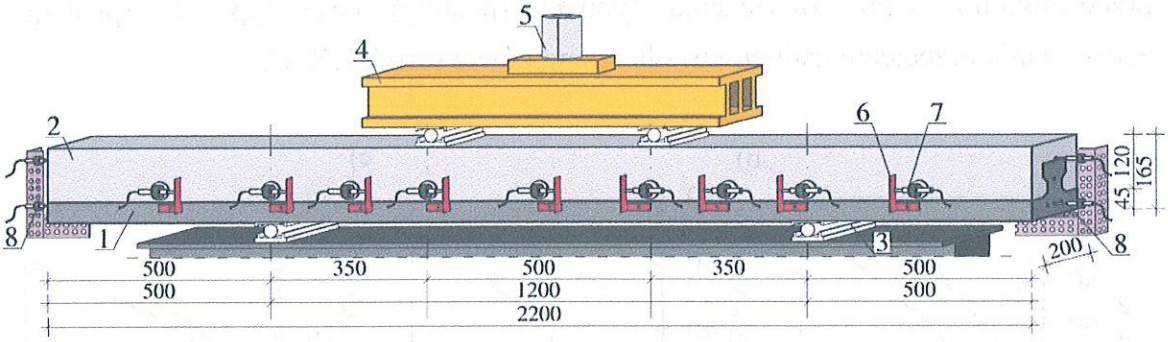


Rys. 1. Przekrój poprzeczny belek do badań wstępnych: 1- prefabrykat, 2- nadbeton, 3- sploty, 4- folia PE, 5- mata PCW, 6- środek antyadhezyjny

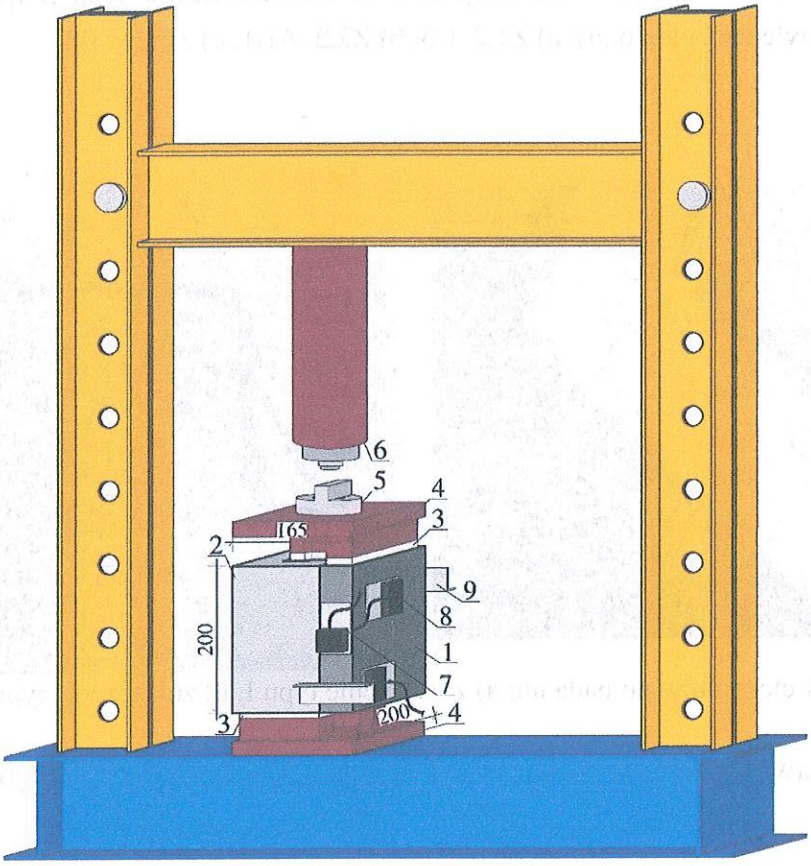


Rys. 2. Stanowisko badawcze belek wstępnych: 1- prefabrykat, 2- nadbeton, 3- podpora, 4- trawers stalowy, 5- siłomierz, 6- baza pomiarowa poślizgu, 7- czujnik LVDT

Badania główne przeprowadzono na sprężonych belkach żebrowych o szerokości 200 mm oraz wysokości 120 mm, z warstwą nadbetonu o grubości 45 mm. Powierzchnię styku przygotowano w dziesięciu wariantach (tabela 1). Typ podstawowy to element o powierzchni nieobrobionej, typ drugi to styk pokryty środkiem antyadhezyjnym, a typ trzeci to styk w całości przykryty matą Kevlarowo-gumową o grubości 0,3 mm. Dla pozostałych typów styk został częściowo zakryty matą. W tabeli określono rodzaj zakrytej powierzchni dzieląc je na powierzchnie górne, dolne oraz boczne. Badania główne przeprowadzono w próbie trzy- oraz czteropunktowego zginania (Rys. 3, 4) z pozostawieniem 500 mm długości elementu poza osią oparcia w celu uzyskania zakotwienia splotów oraz niezbędnej długości dyspersji sprężenia. Badania na elementach belkowych zostały poprzedzone testami bezpośredniego ścinania (Rys. 5) na elementach o długości 200 mm. W badaniu bezpośredniego ścinania wykorzystano czujniki laserowe o zwiększonej precyzji pomiaru oraz system cyfrowej korelacji obrazu o konfiguracji zwiększającej rozdzielczość obrazu w przeliczeniu na px/cm^2. Wariantom badanych elementów nadano oznaczenia zgodne z tabelą 1.



Rys. 4. Stanowisko badawcze czteropunktowego zginania: 1- prefabrykat, 2- nadbeton, 3- podpora, 4- trawers stalowy, 5- siłomierz, 6- baza pomiarowa poślizgu, 7- czujnik LVDT, 8- czujnik poślizgu splotu (LVDT)



Rys. 5. Stanowisko badawcze bezpośredniego ścinania: 1- prefabrykat, 2- nadbeton, 3- podpora, 4- trawers stalowy, 5- siłomierz, 6- siłownik hydrauliczny, 7- pionowy czujnik laserowy, 8- poziomy czujnik laserowy, 9- baza pomiarowa

Na rysunku 6 zestawiono wyniki deformacji odczytany dla czujników laserowych mierzących poślizg oraz wychylenie nadbetonu względem prefabrykatu. Największą sztywność oraz siłę uzyskano dla elementu w pełni zespolonego. Na rysunku 7

- Pomiary LDS oraz analiza DIC wskazują na występowanie różnych wartości przemieszczenia styku na jego długości w ramach fazy I. Sugeruje to różny stopień obciążenia płaszczyzny zespolenia na jej długości.
- Zarysowanie styku występowało po osiągnięciu przemieszczenia o wartości >0.05 mm co jest zgodne z wnioskami przedstawionymi w przeglądzie literaturowym.

Analizując wyniki badań trzy- i czteropunktowego zginania (tabela 2 i 3) w tym wartość siły rysujące, siły skutkującej poślizgiem w styku, siły maksymalnej oraz mechanizm zniszczenia dla belek wyszczególniono cztery fazy pracy:

- Faza I – osiągnięcie siły rysującej przekrój, wyszczególnionej na podstawie analizy sztywności.
- Faza II – wystąpienie zarysowania styku aż do krawędzi jednej z podpór.
- Faza III – osiągniecie siły maksymalnej
- Faza IV – spadek wartości siły do 50% wartości maksymalnej. W przypadku gwałtownego zniszczenia elementu, fazę IV przypisano do wartości siły bezpośrednio po osiągnięciu siły maksymalnej. Faza IV służy do opisu zniszczenia elementu, przy największym rozwarciu zarysowań.

Tabela 2

Zestawienie sił oraz typów zniszczenia belek z serii ZX.1 w teście czteropunktowego zginania

Element	**Sztywność początkowa** K_{init}, kNm^2	**Siłą rysująca** F_{cr}, kN	**Poślizg w osi oparcia** $V_{R,1,cr}$, kN	**Poślizg do czoła** $V_{R,2,cr}$, kN	**Rysa ukośna** $V_{R,c}$, kN	**Siła max.** F_{max}, kN	**Typ zniszcz.**
Z1.1_C	2130	65.6	-	-	130.2	163.6	I
Z2.1_AB	1590	63.5	144.3	-	131.2	157.3	I
Z3.1_CB	1560	51.1	57.9	67.1	97.8	127.7	I
Z4.1_P	1730	67.6	126.8	108.8*	126.8	142.5	II
Z5.1_S	1910	70.7	88.7	149.6*	131.0	162.7	III
Z6.1_TB	1270	19.3	100.1	-	88.7	100.9	III
Z7.1_T	2260	52.0	119.1	119.1	103.3	119.1	II
Z8.1_B	1640	67.8	111.1	-	84.1	146.8	III
Z9.1_SB	1840	63.8	-	-	134.6*	144.8	I
Z10.1_TS	2010	68.3	-	-	134.0	161.4	I

*poślizg w styku lub rysa ukośna po osiągnięciu siły maksymalnej

- W miejscu występowania poślizgu (w tym lokalnego), zaobserwowano oraz zmierzono wypychanie (poziome) nadbetonu względem prefabrykatu.
- Poślizg w zespoleniu aż do czoła elementu należy rozpatrywać jako zniszczenie elementu zespolonego.

Badania eksperymentalne belek nie pozwalają na jednoznaczną ocenę zjawisk wpływających na zachowanie się elementów ze względu na jednoczesne występowanie kilku efektów. Aby ocenić wpływ poszczególnych efektów, takich jak sztywność zespolenia, długość belki za krawędzią podpory, położenie płaszczyzn zespolenia oraz wpływ zarysowań giętnych i ukośnych, wykonano modele numeryczne. Modelowanie posłużyło jako kolejny oddzielny element do analizy zagadnień, których nie można wyodrębnić z programu badań eksperymentalnych ze względu na ograniczenia w metodach pomiarowych lub ilości badań w ramach programu badań eksperymentalnych. Analizy numeryczne podzielono szczegółowo na trzy etapy główne, dla których wydzielono konieczne do uzyskania cele, takie jak:

- Korelacja parametrów styku oraz siatki MES na modelach odwzorowujących badania bezpośredniego ścinania.
- Weryfikacja wartości zmierzonych deformacji w styku oraz typów zniszczenia w badaniu bezpośredniego ścinania.
- Określenie rozkładu naprężeń stycznych w styku.
- Odseparowania efektów wpływających na siłę rysującą oraz zachowanie się styku na podstawie zmodyfikowanego i uproszczonego modelu materiałowego nadbetonu oraz prefabrykatu w schemacie czteropunktowego zginania.

Szeroki program analiz numerycznych pozwolił na sformułowanie szeregu wniosków pozwalających na lepsze rozpoznanie charakterystyki pracy i zachowania się elementów zespolonych z programu badań eksperymentalnych:

- Korelacja styku na modelach z badania bezpośredniego ścinania, pozwoliła na uzyskanie bardzo wysokiej zgodności zachowania się zespolenia w modelach zginanych w tym lokalnego zarysowania w styku oraz wpływu rys ukośnych.
- Rysy giętne oraz ukośne wpływaj na rozkład naprężeń stycznych w zespoleniu. Rysy ukośne ograniczają efektywną długość styku skutkując zmniejszeniem maksymalnej siły przenoszonej przez zespolenie.

pięciokrotnie niższa, a zgodnie z PN-EN 1992-1-1:2004 prawie siedmiokrotnie niższa, oraz od dwóch do trzech razy niższa przy obliczeniach zgodnych z normą PN-EN 15037-1:2011. Różnice obliczonej siły rysującej styk pomiędzy poszczególnymi normami z serii PN-EN sięgają do 100%.

Przeprowadzone badania eksperymentalne połączone z analizami na modelach MES oraz obliczeniami analitycznymi pozwoliły na sformułowanie propozycji modyfikacji normy PN-EN 1992-1-1:2024 oraz PN-EN 15037-1 w zakresie określania efektywnych powierzchni zespolenia dla elementów z wielopłaszczyznowym stykiem oraz obliczania naprężeń dopuszczalnych. Podane zalecenia stanowią wyłącznie punkt do dyskusji, która powinna obejmować również konieczność ujednolicenia zaleceń oraz wymogów względem zbliżonych z punktu widzenia cech zespoleni elementów prefabrykowanych objętych normami PN-EN 13747 oraz PN-EN 15037-1.

W ostatnim rozdziale pracy przedstawione wnioski końcowe ujęte w kolejności zgodnej z przedstawionym w pracy podziałem na pięć obszarów powiązanych z prowadzonymi badaniami eksperymentalnymi, analizami MES oraz obliczeniami analitycznymi. Niniejsze opracowanie stanowi część szerszego programu badań obejmującego szereg zagadnień dotyczących prefabrykowanych sprężonych stropów panelowych (żebrowych). Na podstawie zrealizowanych badań, których charakter można określić jako rozpoznawczy, możliwe jest określenie dalszych kierunków prac obejmujących:

- Badania eksperymentalne na elementach poddanych bezpośredniemu ścinaniu z dodatkową siłą krępującą styki pionowe.
- Badania elementów belkowych z zablokowaną swobodą odkształceń nadbetonu, w celu odwzorowania pracy w ramach stropu z sztywną tarczą.
- Badania na elementach płytowych składających się z kilku żeber.
- Analizy MES na podstawie podanych i skorelowanych w pracy parametrów [illegible]łowych obejmują studium różnych kształtów żebra na rozkład naprężeń oraz efektywność stref zespolenia.
- Analizy wpływu skurczu oraz pełzania na wielopłaszyznowe elementy zespolone.

* wyłączenie jawności w zakresie danych osobowych oraz prywatności osoby fizycznej na podstawie art. 5 ust. 2 ustawy z dnia 6 września 2001 r. o dostępie do informacji publicznej (tj. Dz. U. z 2026 r. poz. 1764)

Marzena Gaura