PRACE INSTYTUTU TECHNIKI BUDOWLANEJ – KWARTALNIK nr 4 (136) 2005
BUILDING RESEARCH INSTITUTE – QUARTERLY No 4 (136) 2005

Jarosław Szulc*

WPŁYW SZTYWNOŚCI POŁĄCZENIA NA STAN NAPRĘŻENIA I ODKSZTAŁCENIA ZGINANEGO USTROJU DWUPASMOWEGO

W postanowieniach PN-B-03264:2002 [1] dotyczących zakresu sprawdzania stanów granicznych użytkowalności, przyjmuje się konieczność weryfikacji projektowanych elementów konstrukcyjnych z uwagi na ugięcia oraz występowanie rys ukośnych i prostopadłych. W swoich regulacjach norma nie odnosi się do wielkości zjawiska tzw. poślizgu, zakładając na przykład w przypadku konstrukcji zespolonych pełną jednorodność elementu (pod warunkiem odpowiedniego zabezpieczenia go przed możliwością rozwarstwienia w płaszczyźnie styku). Uwzględnienie podatności połączenia (w świetle dotychczasowej wiedzy) może mieć jednak znaczący wpływ na stan naprężenia i odkształcenia elementu konstrukcji – projektant przy określaniu ilości i sposobu zbrojenia powinien przewidzieć możliwość pojawienia się konsekwencji takiego założenia (tzn. wzajemnych przemieszczeń stycznych w złączu). W celu jakościowego wyjaśnienia zagadnienia przeprowadzono serię analiz numerycznych modelu wspornikowego ustroju dwupasmowego (ściana usztywniająca obciążona poziomo), w którym złącza odwzorowano za pomocą elementów typu *interface*, nadając im sztywności odpowiadające różnego rodzaju połączeniom.

1. Sformułowanie problemu

Znaczenie podatności złącza pionowego we wspornikowym ustroju dwupasmowym jest możliwe do uzasadnienia na drodze obliczeń analitycznych, na przykład lepkosprężystego pręta zespolonego z poślizgami *n*-warstw materiałów o różnych właściwościach reologicznych (opisanych odpowiednimi równaniami całkowymi odpowiadającymi teorii starzenia). W wyniku odpowiednich przeliczeń można bez problemu otrzymać wzór na rozkład naprężeń w poszczególnych warstwach jako funkcję danych momentów cząstkowych.

W przypadku jednak konieczności prowadzenia analiz parametrycznych złożonych ustrojów przestrzennych zasadnym (z uwagi na pracochłonność obliczeń analitycznych) staje się wykorzystanie metod numerycznych. Do opisu układów tarczowych w modelach złożonych konstrukcji ścianowych stosowano dotychczas tzw. metodę pasmową ([2], [3]) bazującą na schemacie prętów połączonych ośrodkiem ciągłym. Obecnie do analizy przestrzennej pracy budowli wykorzystuje się powszechnie – wygodną do implementacji

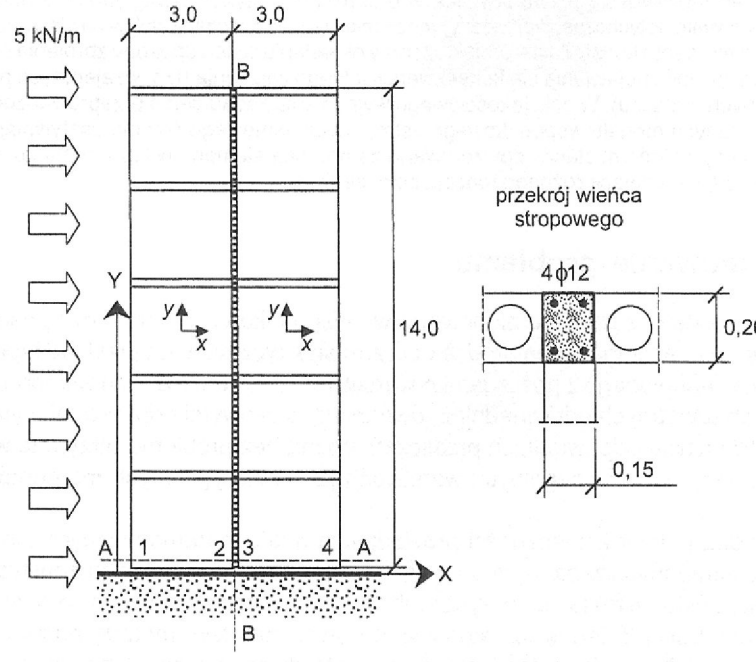
* dr inż. – adiunkt w Zespole Obserwacji i Analiz Budowli ITB

mentacji na sprzęt komputerowy – metodę elementów skończonych (również jej modyfikacje, np. omówione w pracy [4]), mającą praktycznie nieograniczone możliwości obliczeniowe.

Podany przykład wariantowych analiz wspornikowego ustroju dwupasmowego (np. ściany usztywniającej konstrukcji wielkopłytowej) pozwala na usystematyzowanie i wzbogacenie zakresu wiedzy w aspekcie określenia jakościowego i ilościowego wpływu sztywności/podatności złącza na stan naprężenia i odkształcenia ustroju oraz wielkość powstającego zjawiska poślizgu połączenia. Wyniki przeprowadzonych analiz numerycznych znajdują też wymiar praktyczny, wzbogacając świadomość konstruktora na przykład przy projektowaniu zespołów usztywniających i występujących w nich połączeń elementów.

2. Model numeryczny wspornikowego ustroju dwupasmowego

Zagadnienie wpływu sztywności połączenia na stan naprężenia i odkształcenia zginanego ustroju dwupasmowego wyjaśniono na drodze analiz numerycznych, tworząc model zginanego wspornikowego ustroju dwupasmowego (rys. 1).

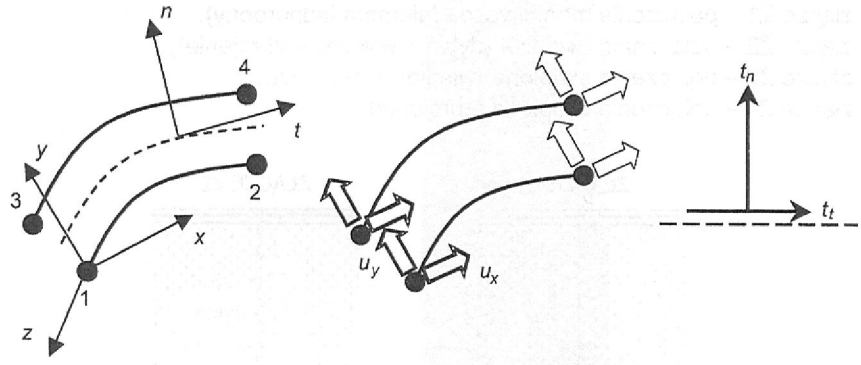


Rys. 1. Model numeryczny ustroju dwupasmowego
Fig. 1. Numerical two-beams model

Realizację postawionych zadań uzyskano przy wykorzystaniu systemu komputerowego DIANA [5] współpracującego z post- i preprocesorem FEMSYS.

W modelu 2D zastosowano następujące elementy skończone:

- plane stress Q8MEM – odwzorowujące pasma analizowanego ustroju,
- interface L8IF – odwzorowujące połączenie pasm rys. 2).



Rys. 2. Element typu „interface" (oznaczenia według systemu [5])
Fig. 2. Interface element (sign by [5])

Wprowadzenie w modelu numerycznym elementów typu *interface* pozwala na rzeczywistą symulację zachowania ustroju dwupasmowego przy dowolnej zmienności skorelowanych lub całkowicie niezależnych parametrów określających podatność połączenia w kierunku normalnym i stycznym, wyznaczaną według zależności

$$K_n = \frac{t_n}{u_n} \tag{1}$$

$$K_t = \frac{t_t}{u_t} \tag{2}$$

gdzie: t_n, t_t – naprężenia w połączeniu (w kierunku normalnym i stycznym),
u_n, u_t – wzajemne przemieszczenia połączenia, odpowiadające naprężeniom t_n, t_t.

Faktyczne występowanie sztywnych tarczy stropowych odwzorowano, wprowadzając w opcji warunków brzegowych utożsamienie przemieszczeń poziomych pasm w analizowanym ustroju.

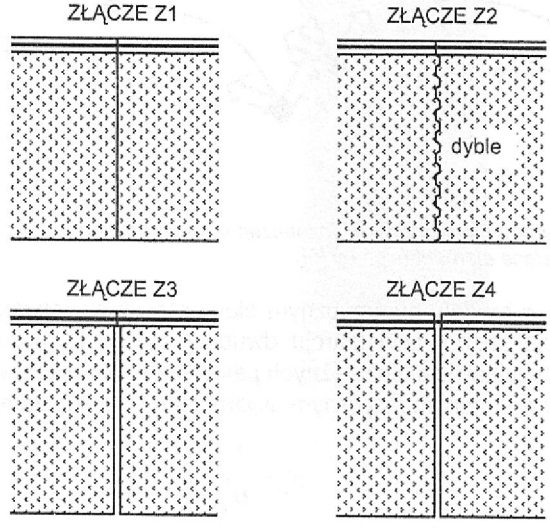
W modelu numerycznym ustroju dwupasmowego przyjęto w opcji własności materiałowych: beton klasy B20 (ściany), stal klasy AIII (zbrojenie wieńca).

Poziome obciążenie liniowe ustalono na poziomie 5 kN/m (w przybliżeniu odpowiadającym obciążeniu wiatrem) – założenie takie pozwala na pominięcie w analizach numerycznych opcji nieliniowości materiałowych (złącza) bez utraty wiarygodności uzyskanych wyników obliczeń.

3. Sztywności połączenia pasm ustroju

W celu określenia jakościowych i ilościowych zmian stanu naprężenia i odkształcenia (również wielkości zjawiska poślizgu) w analizowanym modelu obliczeniowym konstrukcji przeprowadzono cztery warianty analiz numerycznych dotyczących następujących rodzajów połączeń (rys. 3):

- złącze Z1 – połączenie monolityczne (element jednorodny),
- złącze Z2 – połączenie dyblowe (dyble + wieniec + zbrojenie),
- złącze Z3 – połączenie skupione (wieniec + zbrojenie),
- złącze Z4 – połączenie skupione (zbrojenie).



Rys. 3. Warianty złączy pionowych w ustroju dwupasmowym
Fig. 3. Types of vertical joints in two-beams model

Zasadniczym czynnikiem warunkującym wiarygodność wyników analiz numerycznych jest poprawne przyjęcie parametru określającego sztywność/podatność połączenia (w kierunku stycznym) w obliczeniowym ustroju dwupasmowym. Obliczeniowe wartości jednostkowe K_t (w kPa/m, według systemu [5]), dotyczące różnych rodzajów złączy (warianty Z1–Z4) określono według prac [6] i [7], (przyjmując jednakowe grubości złącza i ściany $h_{vz} = h_v$) z zależności:

$$K_{t1} = \frac{E_{cm}}{2\,(1+\nu)\,2\,a_z} \tag{3}$$

$$K_{t2} = 6\left(3{,}4\cdot 10^6\,\frac{A_d + A_w}{A_z} + 700\,\rho f_{yk}\right) \tag{4}$$

$$K_{t3} = 4\left(1{,}7 \cdot 10^6 \frac{A_w}{A_z} + 700\ \rho\ f_{yk}\right) \tag{5}$$

$$K_{t4} = 1{,}25\left(700\ \rho\ f_{yk}\right) \tag{6}$$

gdzie: E_{cm} – moduł sprężystości betonu (klasa B20: $E_{cm} = 27{,}5 \cdot 10^6$ kPa),
a_z – szerokość złącza ($a_z = 0{,}01$ m),
A_d – całkowita powierzchnia przekroju ścięcia dybli ($A_d = 0{,}0972$ m^2),
A_w – pole przekroju wieńca ($b \cdot h = 0{,}15 \cdot 0{,}20$: $A_w = 0{,}03$ m^2),
A_s – pole przekroju zbrojenia wieńca (4ϕ12: $A_s = 4{,}52 \cdot 10^{-4}$ m^2),
A_z – pole przekroju złącza pionowego ($b \cdot h = 0{,}15 \cdot 2{,}80$: $A_z = 0{,}42$ m)^2,
ρ – stopień zbrojenia złącza A_s / A_z ($\rho = 0{,}0011$),
f_{yk} – granica plastyczności stali (klasa AIII: ($f_{yk} = 410\ 000$ kPa),

Podstawiając powyższe dane do wzorów (3–6), otrzymano w przypadku sztywnego złącza monolitycznego Z1 wartość $K_{t1} = 572\ 916\ 666$ kPa/m oraz w przypadku złączy podatnych Z2–Z4 odpowiednio wartości: $K_{t2} = 8\ 072\ 478$, $K_{t3} = 1\ 748\ 532$, $K_{t4} = 394\ 625$ kPa/m, a więc zbliżone do zakresu wartości określonych doświadczalnie w wielu ośrodkach naukowo-badawczych (np. według prac [2] i [8]),

4. Wyniki analiz numerycznych

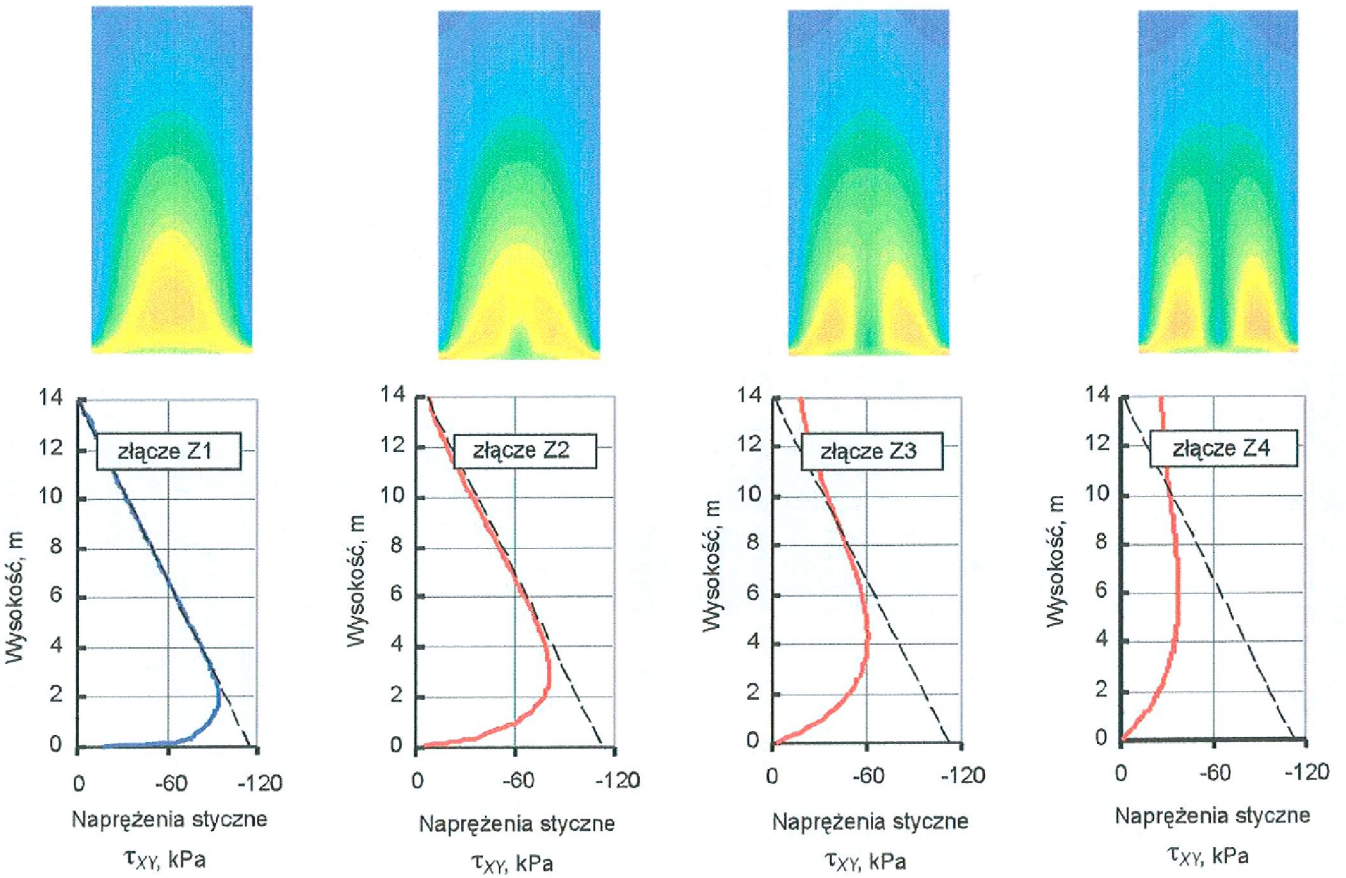
Przeprowadzone analizy numeryczne dwupasmowego ustroju wspornikowego (przy określonej parametryzacji wartości K_t) pozwoliły określić tendencje w zakresie zmian:

- naprężeń pionowych σ_y w pasmach ściennych,
- naprężeń ścinających τ_{xy} w połączeniu pasm,
- deformacji ustroju dwupasmowego (przemieszczenia u_x, u_y),
- wzajemnych przemieszczeń stycznych w połączeniu – wielkość poślizgu s_y.

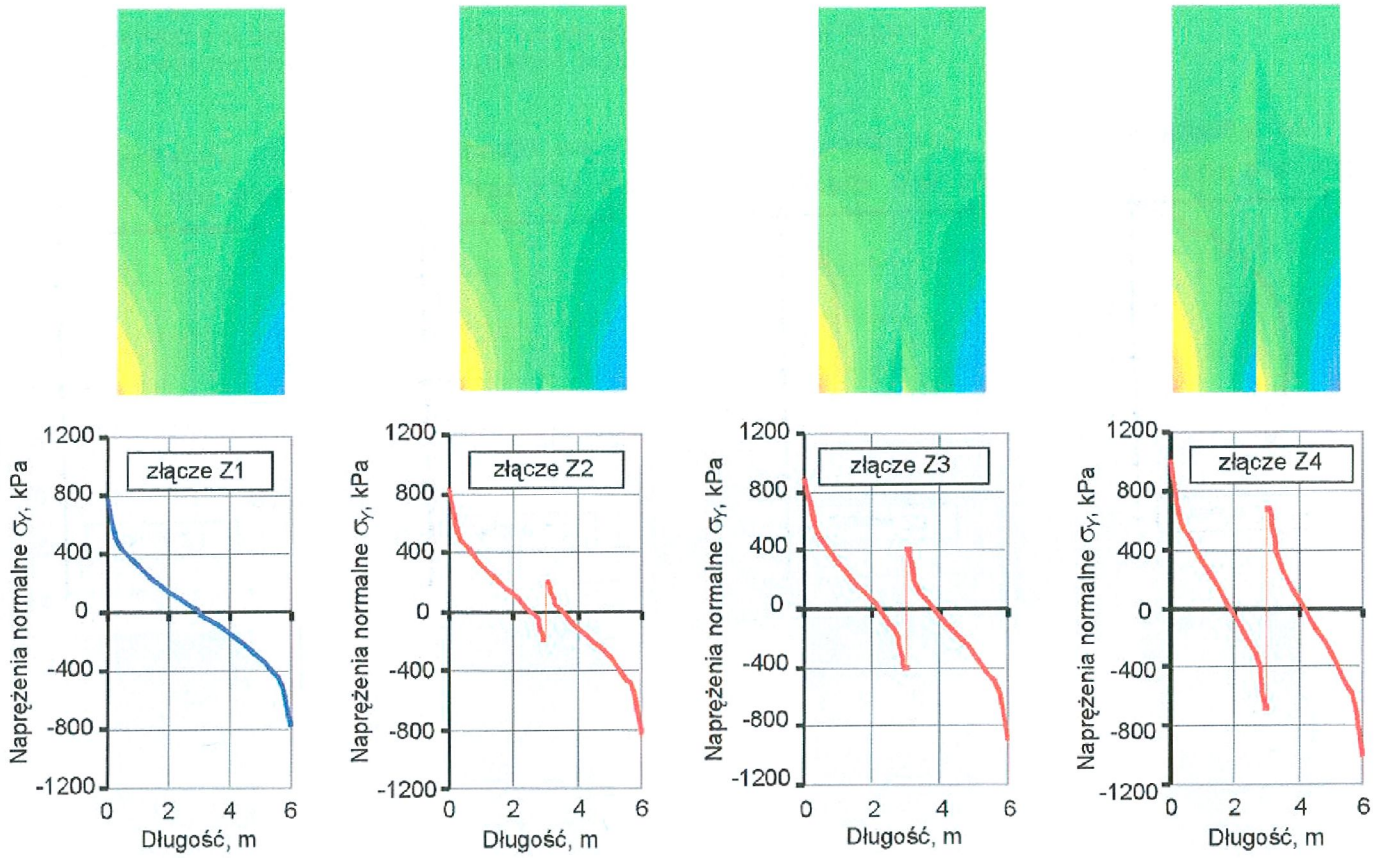
W uzupełnieniu powyższego należy dodać, że naprężenia i deformacje określono w układzie globalnym XOY (rys. 1), natomiast poślizg w układzie lokalnym, zorientowanym w kierunku stycznym i normalnym do złącza.

Wszystkie analizy wykonano w zakresie sprężystej pracy materiałów, świadomie (mając na uwadze poziom obciążeń) pomijając w algorytmie obliczeniowym możliwe efekty nieliniowości, odwzorowujące na przykład zjawiska dyskretnego zarysowania, swobodnego poślizgu, tarcia czy przyczepności (system DIANA pozwala również symulować efekt tzw. *wedging*). Dotychczas przeprowadzone badania złączy (w ograniczonym zakresie wpływu parametrów określających sztywność połączenia) wskazują na przebieg charakterystyki sztywnościowej daleki od modelu idealnie sprężysto-plastycznego.

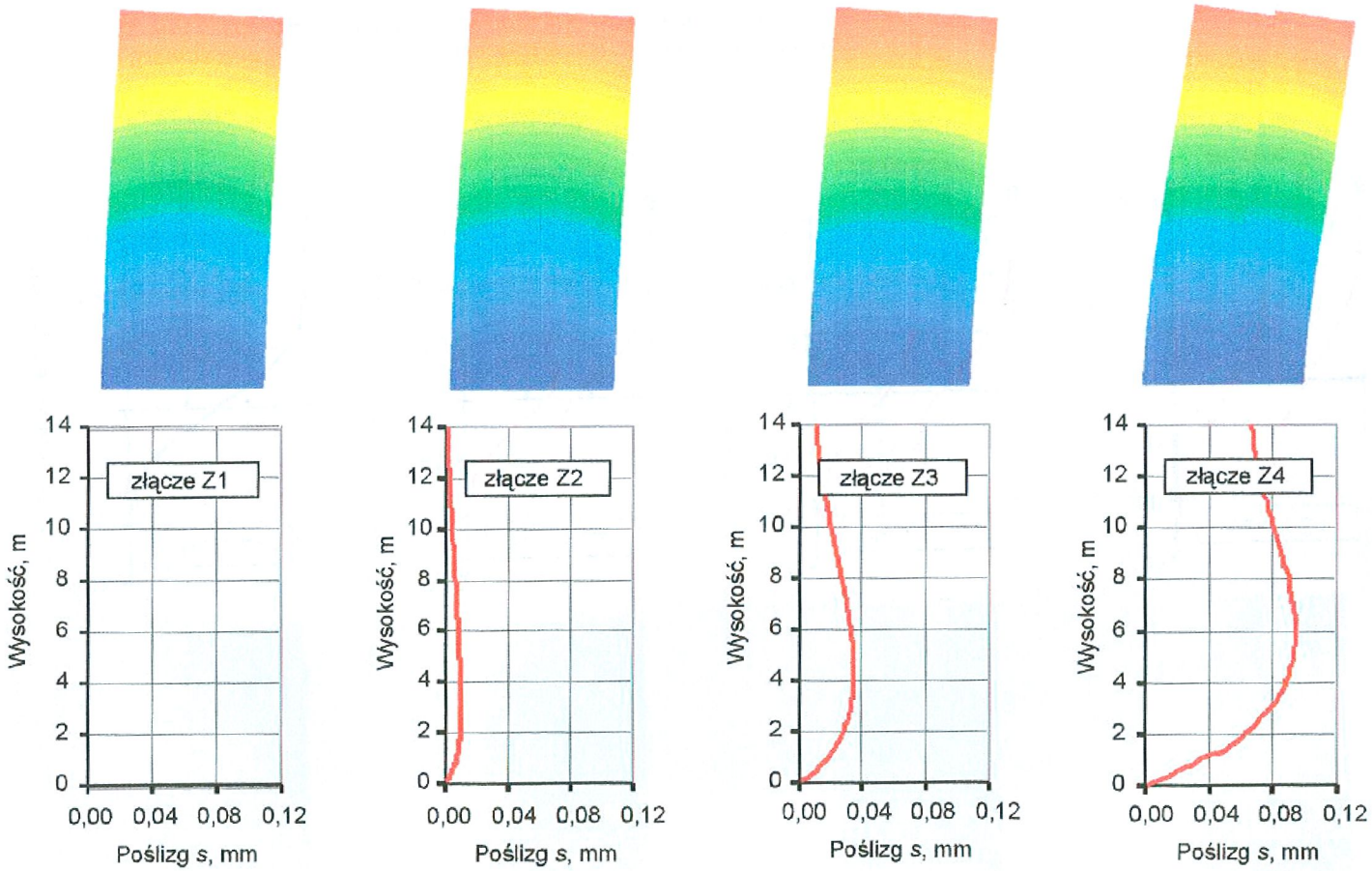
Graficzną prezentację wyników czterech wariantów obliczeniowych przedstawiono w postaci wykresów i map naprężeń na rysunkach 4–6.



Rys. 4. Naprężenia styczne w pasmach ściennych (u góry) i w złączu (przekrój B-B, u dołu); linią przerywaną oznaczono rozkład naprężeń stycznych według teorii wytrzymałości materiałów
Fig. 4. Shear stresses in wall (top) and joint (cross B-B, bottom); broken line – distribution of shear stresses according to mechanics of materials theory



Rys. 5. Naprężenia normalne pionowe w pasmach ściennych (i w przekroju A-A)
Fig. 5. Vertical normal stresses in wall (top) and cross A-A (bottom)



Rys. 6. Deformacja ustroju dwupasmowego i poślizg (przekrój B-B)
Fig. 6. Deformations of two-beams model (top) and the slip in joint (cross B-B, bottom)

Tablica 1. Zestawienie wyników analiz numerycznych
Table 1. Results of numerical analysis

	Naprężenia normalne pionowe (przekrój A-A), kPa				Naprężenia styczne (przekrój B-B), kPa	Przemieszczenia mm		Poślizg mm
	σ_{Y1}	σ_Y^2	σ_Y^3	σ_Y^4	τ_{XY}^{max}	u_X^{max}	u_Y^{max}	s_y^{max}
Z1	792	10	–10	–792	94,6 (y = 1,96 m)	0,378	–0,093	0,0002
Z2	834	–198	198	–834	80,9 (y = 2,96 m)	0,399	–0,094	0,0100
Z3	905	–389	389	–905	60,7 (y = 4,16 m)	0,460	–0,096	0,0347
Z4	1020	–656	656	–1020	37,2 (y = 5,96 m)	0,639	–0,112	0,0943
(–) – ściskanie, (+) – rozciąganie								

Przeprowadzone analizy numeryczne zginanego, wspornikowego ustroju dwupasmowego (zestawienie wyników w tablicy 1) pozwoliły na dostrzeżenie kilku interesujących, skorelowanych ze sobą zjawisk, które mają istotny wpływ przy projektowaniu konstrukcji (połączeń między elementami); w szczególności stwierdzono, że:

- W przypadku złączy monolitycznych Z1 wartości naprężeń i przemieszczeń są zgodne z wartościami określonymi analitycznie (według zasad wytrzymałości materiałów) przy założeniu jednorodności elementu i jego pracy w zakresie sprężystym, czyli:
  - naprężenia normalne pionowe: $\sigma_Y^{1,4} = \pm 544$ kPa,
  - naprężenia styczne: $\tau_{XY}^{max} = 116$ kPa,
  - przemieszczenia poziome: $u_Y^{max} = 0{,}323$ mm.

Powyższa zgodność świadczy o poprawności przyjętych założeń w modelu numerycznym ustroju dwupasmowego.

- W przypadku upodatnienia złączy Z2–Z4 (tj. konstruowania ich jako dyblowe, skupione czy bezdyblowe) w ustroju następują wyraźne procesy redystrybucyjne: około 15–60-procentowe zmniejszenie ekstremalnych naprężeń stycznych w połączeniu (z jednoczesną zmianą wysokości, na której ekstremum występuje), kosztem około 5–30-procentowego zwiększenia normalnych naprężeń pionowych (z jednoczesnym powstaniem stref rozciągania w okolicy połączenia).
- Konsekwencją zmian sztywności powstałych w wyniku przyjęcia złączy podatnych Z2–Z4 są również zmiany stanu deformacji ustroju – na przykład maksymalne przemieszczenia poziome (złącze bezdyblowe Z4 w odniesieniu do monolitycznego Z1) wzrastają o około 70%. Dodatkowym skutkiem obniżania sztywności połączenia w ustroju dwupasmowym jest powstanie zjawiska tzw. poślizgu: w złączu monolitycznym Z1 praktycznie nie występującego, a na przykład w złączu bezdyblowym Z4 osiągającego wartość około 0,1 mm.

5. Wnioski

Wyniki przeprowadzonych obliczeń wspornikowego ustroju dwupasmowego (z uwzględnieniem podatności połączenia) pozwalają na sformułowanie szeregu uwag, wzbo-

gacających istniejący stan wiedzy i w sposób znaczący poszerzających świadomość konstruktora (również rzeczoznawcy budowlanego) przy projektowaniu i diagnozowaniu różnego typu budowli inżynierskich.

1. Kształtowanie połączeń w ustrojach konstrukcyjnych (np. obciążonych poziomo ścian usztywniających budynków prefabrykowanych) powinno następować w wyniku wariantowych analiz (przy zmiennych wartościach sztywności/podatności złączy) i pełnej świadomości konsekwencji stosowania różnych typów połączeń. Jak wykazano w obliczeniach, przyjęcie założenia jednorodności elementu (złącze monolityczne Z1) może prowadzić do nieprawidłowego ukształtowania i zbrojenia zespołów usztywniających projektowanych budynków, jak również dopuszczenia nadmiernych deformacji ustroju.

2. Analiza zmian rozkładu i wartości naprężeń normalnych, stanu deformacji i możliwości występowania efektów poślizgowych w złączu (przeprowadzona w wyniku parametrycznych obliczeń) pozwala na przyjęcie optymalnego rozwiązania konstrukcyjnego połączenia w aspekcie na przykład konieczności dyblowania czy też ilości zbrojenia wieńców stropowych.

3. Przeprowadzone wariantowo analizy potwierdziły – jakościowo i w ograniczonym zakresie ilościowo – możliwość pojawienia się w konstrukcjach o charakterze dwupasmowym tzw. zjawiska poślizgu. Zagadnienie to, jakkolwiek od dawna sygnalizowane w literaturze, nie znalazło jak dotąd właściwego miejsca w uregulowaniach normowych, na przykład w postaci określenia wartości granicznych – wydaje się więc, że zasadnym byłoby prowadzenie dalszych prac naukowo-badawczych w celu pełnego wyjaśnienia tego problemu (również w odniesieniu do innych schematów statycznych oraz np. zasad wymiarowania konstrukcji zespolonych).

4. Analizy numeryczne wpływu sztywności połączeń na stan naprężenia i odkształcenia zginanego ustroju ściany usztywniającej znalazły szereg zastosowań praktycznych, na przykład w diagnostyce budynków (wzniesionych w technologii WBL i WWP) poddanych poziomym obciążeniom od wstrząsów górniczych oraz przy projektowaniu wzmocnień złączy pionowych (wprowadzenie dodatkowych dyblowań elementów ściennych) zwiększających sztywność przestrzenną budowli i w konsekwencji jej odporność na wzrastającą w ostatnich latach aktywność parasejsmiczną na terenie LGOM.

5. Niedoceniane w Polsce złożone analizy numeryczne (powszechnie stosowane w daleko bardziej rozwiniętych krajach zachodnich) pozwalają na odwzorowanie dowolnych niemal zjawisk zachodzących w ustrojach konstrukcyjnych budowli. Wykorzystanie elementów typu *interface* znakomicie wzbogaca zakres zastosowań systemu DIANA – w orbicie działalności autora znalazły się już na przykład zagadnienia dotyczące interakcji budynku z podłożem (funkcja stropów i zbrojenia wieńców stropowych), wzmacniania elementów żelbetowych taśmami z włókiem węglowych CFRP czy też ostatnio analizy ścian wypełniających w konstrukcjach szkieletowych (z opcją wariantowych nieliniowości materiałowych połączeń i możliwością odwzorowania zarysowania ściany o charakterze diagonalnym lub poślizgowym).

Bibliografia

[1] PN-B-03264:2002: Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Obliczenia statyczne i projektowanie

[2] Cholewicki A.: Obliczanie ścian usztywniających. COBPBO, Warszawa 1980

[3] Petersson H.: Analysis of loadbearing walls in multistorey buildings. Chalmers University of Technology. Göteborg 1974
[4] Miedziałowski C.: Dyskretny model złożonych konstrukcji ścianowych budynków uwzględniający współpracę podłoża gruntowego. Rozprawy naukowe nr 24. Wydawnictwa Politechniki Białostockiej, Białystok 1999
[5] DIANA – Finite Element Analysis. Users Manual. TNO Building and Construction Research. Delft 1996
[6] Lewicki B. i in.: Budynki wznoszone metodami uprzemysłowionymi. Projektowanie konstrukcji i obliczenia. Arkady, Warszawa 1979
[7] Lewicki B. i in.: Bulletin d'Information No 169, Contribution à la Session Plénière du CEB, Rotterdam, Comité Euro-International du Beton, 1985
[8] Straman J.P.: Finite Element Analysis of Prefabricated Shear Walls. Diana World 2000 Issue No 1

THE INFLUENCE OF SHEAR STIFFNESS IN JOINT ON THE STATE OF STRESS AND STRAIN OF TWO-BEAMS MODEL IN BENDING

Summary

The paper presents results of numerical analysis of two-beams model (wall with one vertical joint) with use of interface element (designation L8IF according to [5]). The shear displacement (slip), shear and normal stress distributions was analyzed for specified different types of joints (for example: plain with smooth or rough surfaces and keyed, distributed or concentrated). The value of slip, maximum shear stress (and its distribution along the wall) were dependent on the shear rigidity (deformability) of the joint.

Praca wpłynęła do Redakcji 23 VII 2005