

Lucjan ŚLĘCZKA<sup>1</sup>

## ZACHOWANIE ŚRUBOWYCH WĘZŁÓW DOCZOŁOWYCH OBCIĄŻONYCH W SPOSÓB POWTARZALNY

Współczesne normy projektowania konstrukcji metalowych zalecają uwzględniać w analizie układów ramowych wpływ zachowania się węzłów. Podstawą opisu takiego zachowania jest charakterystyka moment-kąć obrotu  $M-\phi$ , której głównymi parametrami są nośność przy zginaniu węzła  $M_{j,R}$ , początkowa sztywność obrotowa  $S_{j,ini}$  oraz zdolność do obrotu  $\phi_C$ . Ocena właściwości strukturalnych węzłów obciążonych w sposób monotoniczny może zostać przeprowadzona za pomocą tzw. metody składnikowej, której główne zasady zawarte są w normie PN-EN 1993-1-8. Tymczasem rzeczywisty charakter obciążeń jest sumą oddziaływań stałych i zmiennych. Najczęściej występującymi obciążeniami zmiennymi w przypadku obiektów budownictwa ogólnego są oddziaływania wiatru, śniegu i obciążeń użytkowych. Pomijając obciążenie wiatrem, które jest najczęściej przenoszone przez kratowy układ stężający, łączny skutek obciążeń stałych i zmiennych, takich jak śnieg czy obciążenie użytkowe wobec ich stałego (grawitacyjnego) zwrotu działania powoduje przeważnie powstanie tętniącej zmienności oddziaływań, niezminiającej znaku. Praca przedstawia analizę zachowania się śrubowych węzłów doczołowych poddanych różnym typom oddziaływania powtarzalnego, przy sterowaniu wartością kąta obrotu. Rozpatrzono trzy węzły z blachą wpuszczoną, o niepełnej nośności. Parametry geometryczne dobrano w nich tak, aby o nośności monotonicznej decydowały różne mechanizmy zniszczenia blachy czołowej i śrub rozciąganych. Oprócz obciążenia monotonicznego rozpatrzono trzy typy historii obciążenia zmiennego. Wyniki wskazują, że w przypadku niedużego zakresu zmienności obciążenia zachowanie węzłów w drugim i kolejnych cyklach obciążeń jest już czysto sprężyste, w przypadku zaś większych zakresów zmienności mogą pojawiać się w nich zjawiska degradacji nośności i sztywności.

**Słowa kluczowe:** węzły ram, połączenia podatne, metoda składnikowa, obciążenia powtarzalne

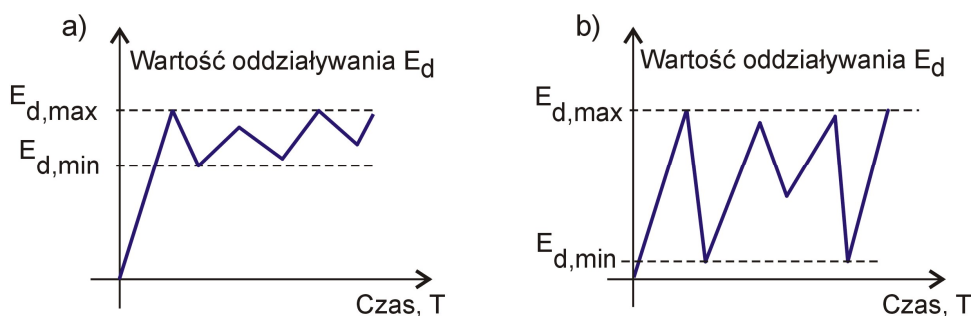
<sup>1</sup> Autor do korespondencji: Lucjan Ślęczka, Politechnika Rzeszowska, Katedra Konstrukcji Budowlanych, ul. Poznańska 2, 35-084 Rzeszów, tel. +48 17 865 16 31, [sleczka@prz.edu.pl](mailto:sleczka@prz.edu.pl)

## 1. Wprowadzenie

Współczesne normy projektowania konstrukcji metalowych, np. [1], zalecają uwzględniać w analizie układów ramowych wpływ zachowania się węzłów. Podstawą opisu takiego zachowania jest charakterystyka moment-obrót  $M-\phi$ , której głównymi parametrami są nośność przy zginaniu węzła  $M_{j,R}$ , początkowa sztywność obrotowa  $S_{j,ini}$  oraz zdolność do obrotu  $\phi_C$ . Powyższe właściwości strukturalne węzłów wpływają na praktycznie wszystkie aspekty projektowania szkieletów stalowych: rozkład momentów zginających, przechył i powstające ugięcia, wrażliwość na efekty II rzędu, wielkość obciążenia krytycznego i granicznego oraz na charakterystyki dynamiczne.

Ocena właściwości strukturalnych węzłów obciążonych w sposób monotoniczny może zostać przeprowadzona za pomocą tzw. metody składnikowej, której główne zasady zawarte są w normie PN-EN 1993-1-8 [2]. Jej zaletami są wszechstronność stosowania i możliwość uzyskania wiarygodnych rezultatów przy stosunkowo niedużym nakładzie pracy obliczeniowej. Inne sposoby wyznaczania właściwości strukturalnych węzłów (np. badania doświadczalne czy metoda elementów skończonych) są o wiele bardziej pracochłonne.

Ograniczeniem metody składnikowej w ujęciu normy [2] jest możliwość stosowania tylko do węzłów podlegających oddziaływaniu o monotonicznie wzrastającej wartości. Tymczasem rzeczywisty charakter obciążeń jest sumą oddziaływań stałych i zmiennych. Najczęściej występującymi obciążeniami zmiennymi w przypadku obiektów budownictwa ogólnego są oddziaływania wiatru, śniegu i obciążeń użytkowych. Pomijając obciążenie wiatrem, które jest najczęściej przenoszone przez kratowy układ stężający, łączny skutek obciążeń stałych i zmiennych, takich jak śnieg czy obciążenie użytkowe wobec ich stałego (grawitacyjnego) zwrotu działania powoduje przeważnie powstanie tętniącej zmienności oddziaływań, niezminiającej znaku, rys. 1.



Rys. 1. Sytuacje projektowe w odniesieniu do charakteru oddziaływań; a) powtarzalne o niewielkim zakresie zmienności, b) powtarzalne tętniące odzerowo

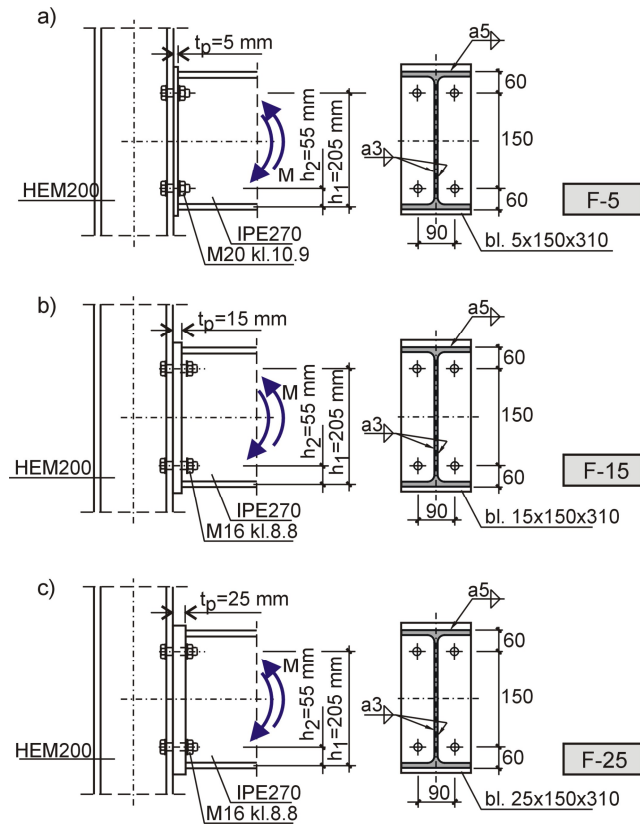
Fig. 1. Design situations according to character of loading: a) repeated with small range of variation, b) pulsating

Taki typ obciążenia zmiennego nazywa się obciążeniem powtarzalnym, w przeciwieństwie do obciążeń cyklicznych, w których dochodzi do zmiany zwrotu oddziaływań. Zależnie od proporcji wielkości oddziaływań stałych do zmiennych, zakres zmienności oddziaływania może być stosunkowo nieduży (rys. 1a), lub może zbliżać się do charakterystyki oddziaływania odzerowo tętniącego (rys. 1b), gdzie  $E_d$  jest obliczeniową wartością oddziaływań całkowitych,  $E_{d,max}$  jest największą ich wartością wynikającą z rozważanej kombinacji obliczeniowej,  $E_{d,min}$  jest zaś obliczeniową wielkością oddziaływań stałych. Ścisłych danych dotyczących widma obciążeń użytkowych obiektów budowlanych i inżynierskich jest stosunkowo niewiele. Oszacowania wskazują, że wartość współczynnika asymetrii cyklu takich oddziaływań może zawierać się w przedziale  $E_{d,min}/E_{d,max}=0,35\div 0,50$  [3].

W referacie prześledzono zachowanie się śrubowych węzłów doczołowych obciążonych powtarzalnie według rys. 1a oraz 1b. Analizom poddano połączenia o niepełnej nośności, czyli takie w której nośność węzła  $M_{j,Rd}$  jest mniejsza od nośności plastycznej przekroju belki przy zginaniu  $M_{b,pl,Rd}$  [2]. Rozpatrzono węzły różniące się parametrami geometrycznymi dobranymi tak, aby o nośności węzła decydowała strefa połączenia, a nie panel środkowa słupa, oraz aby o nośności monotonicznej decydowały różne mechanizmy zniszczenia blachy czołowej i śrub rozciąganych. Wykorzystano opracowany model, będący rozszerzeniem klasycznej metody składnikowej, pozwalający na modelowanie odpowiedzi węzłów śrubowych doczołowych na oddziaływania zarówno cykliczne, jak i zmienne.

## 2. Przedmiot analizy

Analizom poddano trzy rodzaje węzła śrubowego doczołowego z blachą wpuszczoną, różniące się parametrami geometrycznymi. Wszystkie węzły były jednostronne, ze słupem z kształtownika HEM200 oraz z belką IPE270. Zastosowano w nich po dwa szeregi śrub, umieszczone wewnątrz obrysu belki. Pionowa podziałka szeregów śrub wynosiła  $p=150$  mm, poziomy zaś rozstaw śrub  $w=90$  mm. Wymiary blachy czołowej wynoszą 150x310 mm. Przyjęto stal S235 dla słupa, belki i blachy czołowej. Ze względu na symetrię węzłów względem płaszczyzny poziomej, ramiona sił wewnętrznych były stałe i niezależnie od zwrotu momentu zginającego. Układ geometryczny i wymiary rozpatrywanych węzłów pokazano na rys. 2.



Rys. 2. Rozpatrywane węzły doczołowe z blachą wpuszczoną; a) „cienka” blacha czołowa, b) blacha czołowa o „średniej” grubości, b) „gruba” blacha czołowa (opis w tekście)

Fig. 2. Considered flush end plate joints: a) “thin” end plate, b) end plate with moderate thickness, c) with “thick” end plate

W poszczególnych analizach zmianie podlegały grubość blachy czołowej oraz średnica i klasa właściwości mechanicznych łączników śrubowych, rys. 2. Średnicę śrub (M16 i M20), klasę ich właściwości mechanicznych (8.8 i 10.9) oraz grubość blachy czołowej ( $t_p=5, 15$  i  $25$  mm) dobrano w rozpatrywanych węzłach tak, aby o nośności monotonicznej decydowały różne mechanizmy zniszczenia. Potencjalnym miejscem odkształceń plastycznych i tym samym dyssypacji energii w przypadku węzła F-5 jest zginana blacha czołowa ( $\beta_R \approx 0,1$ ), w przypadku węzła F-15 interakcja zginania blachy czołowej i rozciągania śrub ( $\beta_R=1,2$ ), w przypadku zaś węzła F-25 są to śruby rozciągane ( $\beta_R=3,4$ ). Parametr  $\beta_R$  opisuje proporcję nośności giętnej pasów króćca teowego blachy czołowej do nośności śrub na rozciąganie [4].

Wszystkie rozpatrywane węzły są o niepełnej nośności. Charakterystyczna nośność plastyczna belki IPE 270 przy zginaniu wynosi  $M_{pl,Rk}=113,7$  kNm.

Właściwości strukturalne węzłów wyznaczone za pomocą metody składnikowej (wg PN-EN 1993-1-8 [2]) przedstawiono w tabeli 1. Ze względu na poziomą płaszczyznę symetrii węzłów właściwości strukturalne węzła są stałe, niezależnie od zwrotu momentu zginającego działającego na węzeł.

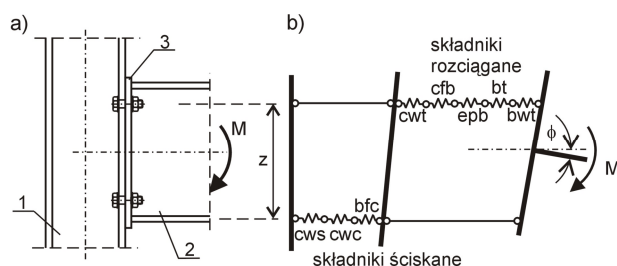
Tabela 1. Właściwości strukturalne rozpatrywanych węzłów

Table 1. Structural properties of considered joints

Węzeł	Metoda składnikowa		Model cykliczny węzła		
	Nośność przy zginaniu $M_{j,R}$ [kNm]	Sztywność obrotowa $S_{j,ini}$ [kNm/rad]	Nośność przy zginaniu $M_{j,R}$ [kNm]	Sztywność obrotowa $S_{j,ini}$ [kNm/rad]	Kąt obrotu $\phi_y$ [mrad]
F-5	7,9	3026	6,7	3380	2,0
F-15	45,8	14829	36,1	13717	2,6
F-25	56,3	15771	47,8	13955	3,4
Charakterystyczna nośność plastyczna przy zginaniu belki IPE 270: $M_{pl,Rk}=113,7$ kNm					

### 3. Budowa modelu węzła

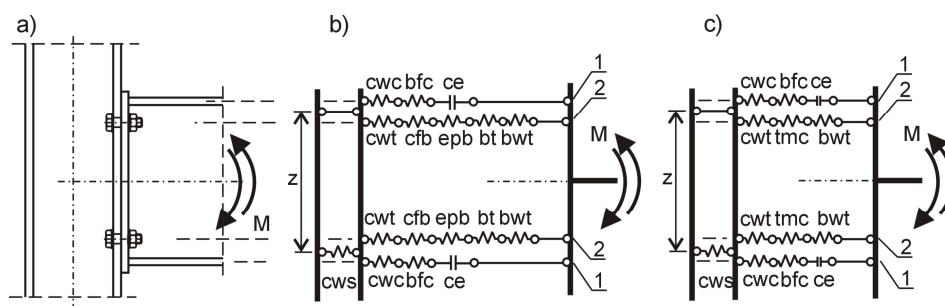
W celu prześledzenia odpowiedzi węzła na działanie obciążenia zmiennego zbudowano model mechaniczny, korzystając z zasad modelowania składnikowego, uwzględniający jednak możliwość działania obciążenia zmiennego. W pierwszym etapie wyróżniono w węźle części podstawowe (składniki). Na rys. 3 pokazano, jakie części podstawowe występują w rozpatrywanym przypadku. Składnikami, odpowiadającymi za zachowanie węzła są: ścinany panel środknika słupa (cws), środknik słupa przy poprzecznym ściskaniu (cwc), pas i środknik belki w strefie ściskania (bfc), środknik słupa przy poprzecznym rozciąganiu (cwt), zginany pas słupa (cfb), zginana blacha czołowa (epb), śruby podlegające rozciąganiu (bt) oraz rozciągany środknik belki (bwt).



Rys. 3. Model składnikowy połączenia z blachą czołową zlicowaną obciążony monotonicznie; a) schemat połączenia, b) model monotoniczny; 1- słup, 2- belka, 3- blacha czołowa

Fig. 3. Model of flush end plate joint based on component method, loaded monotonically; a) general view of joint, b) monotonic model; 1- column, 2- beam, 3- end plate

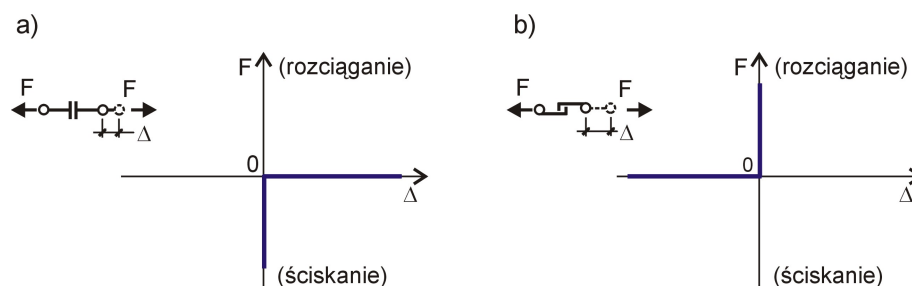
W każdym takim węźle składniki przenoszące ściskanie i rozciąganie występują zarówno w górnej, jak i w dolnej strefie węzła. W przypadku działania obciążenia wyłącznie monotonicznego można rozpatrywać tylko te, które są uaktywnione odpowiednim zwrotem działającego momentu zginającego, (rys. 3). W przypadku działania momentu zginającego o zmieniającym się zwrocie należy uwzględnić składniki ściskane i rozciągane, występujące zarówno w dolnej, jak i górnej strefie węzła (rys. 4). Położenie składników wynika z ich usytuowania w odpowiednich strefach węzła. Składniki ściskane są położone na linii środka ciężkości pasów belki, składniki zaś rozciągane na linii poszczególnych szeregów śrub. Składnik uwzględniający ścinany panel środkowego słupa (cws) powinien mieć odpowiednie ramię działania  $z$ , mierzone od linii śrub do środka ciężkości pasa ściskanego.



Rys. 4. Model węzła z blachą czołową zlicowaną obciążony cyklicznie; a) schemat węzła, b) model cykliczny; c) model cykliczny uproszczony; 1- szereg przenoszący ściskanie; 2 – szereg przenoszący rozciąganie (opis w tekście)

Fig. 4. Model of flush end plate joint based on component method, loaded cyclically; a) general view of joint, b) cyclic model, c) simplified cyclic model; 1 – row of components transferring compression force; 2- row of components transferring tension force

W celu zagwarantowania odpowiedniego włączenia się poszczególnych szeregów składników (ściskanych lub rozciąganych) każdy szereg powinien zostać uzupełniony nieliniowym elementem, przenoszącym tylko rozciąganie lub tylko ściskanie, (rys. 5). Umożliwiają one wybór odpowiedniej „ścieżki” przekazywania sił ściskających lub rozciągających. Element przenoszący wyłącznie ściskanie (ce) jest wbudowany bezpośrednio w szereg składników przenoszących ściskanie, element zaś przenoszący tylko rozciąganie (te) jest uwzględniony przy modelowaniu rozciąganych śrub (bt).

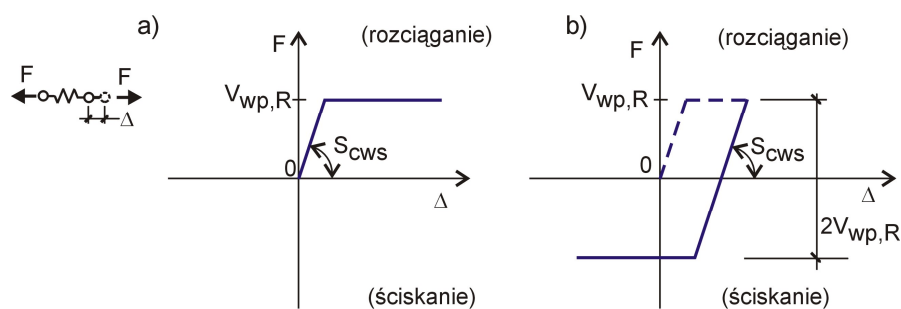


Rys. 5. Elementy nieliniowe; a) przenoszący wyłącznie ściskanie (ce), b) przenoszący wyłącznie rozciąganie (te) (opis w tekście)

Fig. 5. Additional nonlinear elements; a) element transferring only compression force (ce); b) element transferring only tension force (te)

Na rys. 4b składniki, występujące w strefie rozciąganej, takie jak zginany pas słupa (cfb), zginana blacha czołowa (epb) oraz śruby podlegające rozciąganiu (bt) są wyszczególnione jako niezależne od siebie części składowe, podczas gdy w rzeczywistości współdziałają ze sobą i mogą być modelowane jednym makrokomponentem (króćcem teowym), oznaczonym jako (tmc). Prowadzi to do uproszczenia modelu węzła, który ostatecznie wygląda jak na rys. 4c.

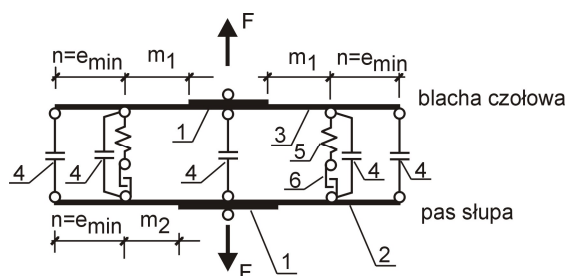
W przypadku tworzenia modelu cyklicznego opisu zachowania się części podstawowych musi uwzględniać charakterystykę siły-przemieszczenia ( $F-\Delta$ ) w zakresie nie tylko obciążenia, lecz również odciążenia i obciążenia w przeciwnym kierunku. Tylko w przypadkach niektórych składników można uwzględniać charakterystykę jednostronną. Nośność i sztywność składników przy pierwszym obciążeniu jest określona zgodnie z zapisami normy PN-EN 1993-1-8 [2], w kolejnych zaś półcyklach opisywana jest według hipotezy Masinga, czyli przy zastosowaniu krzywej monotonicznej przeskalowanej dwukrotnie, co pokazano na rys. 6, dla przypadku panelu środknika słupa (cws).



Rys. 6. Charakterystyka ścinanego panelu środknika słupa (cws); a) model monotoniczny; b) model cykliczny

Fig. 6. Design characteristic of panel zone (cws); a) monotonic characteristic; b) cyclic characteristic

Makrokomponent oznaczony (tmc), uwzględniający łączne zachowanie zginanego pasa słupa (cfb), zginanej blachy czołowej (epb) oraz śrub podlegających rozciąganiu (bt), może być odwzorowany przez model mechaniczny króćca teowego. Jego schemat pokazano na rys. 7. W skład modelu mechanicznego makrokomponentu wchodzi sprężysto-plastyczne elementy belkowe „2” oraz „3”. W środkowej części belki te posiadają fragmenty o zwiększonej sztywności „1” (w obszarze gdzie występuje połączenie ze środkiem słupa lub środkiem belki). Belki są połączone pięcioma elementami kontaktowymi „4” przenoszącymi tylko ściskanie (ce), oraz elementami modelującymi śruby „5” i „6”, z których element „6” jest elementem kontaktowym przenoszącym tylko rozciąganie (te). Szczegółowy opis tworzenia takiego modelu króćca teowego i całego węzła opisano w [5] i [6]. W dalszej części referatu stworzony w ten sposób model jest nazwany cyklicznym.



Rys. 7. Makrokomponent (tmc) uwzględniający współpracę zginanego pasa słupa (cfb), zginanej blachy czołowej (epb) i śrub podlegających rozciąganiu (bt) (opis w tekście)

Fig. 7. Macrocomponent (tmc) including cooperation between column flange in bending (cfb), end plate in bending (epb) and bolts in tension (bt)

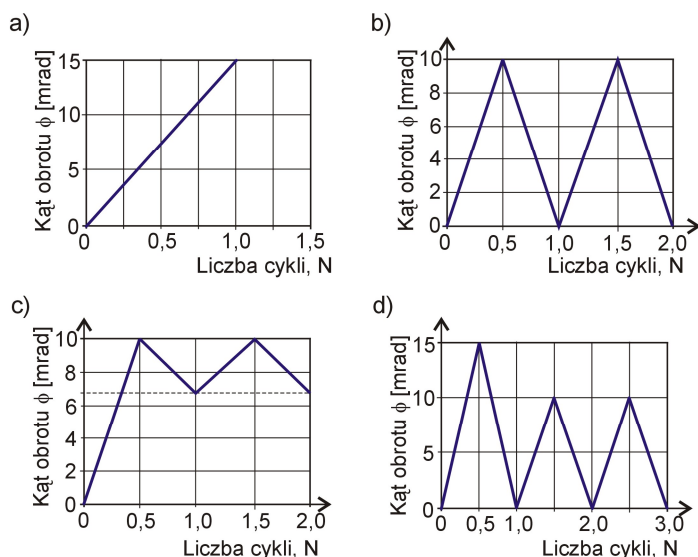
#### 4. Historia obciążenia

Zbudowane modele poddano czterem różnym typom historii obciążenia, które pokazano na rys. 8. We wszystkich przypadkach stosowanych historii obciążenia wymuszenie polegało na sterowaniu kątem obrotu węzła.

Pierwszym typem obciążenia było wymuszenia mające charakter monotoniczny (rys. 8a).

Kolejne historie obciążenia miały już charakter powtarzalny. Drugim rozpatrywanym typem wymuszenia jest obciążenie stałą amplitudą o charakterze odzerowo tętniącym. Zastosowany zakres kąta obrotu węzła wynosi  $\Delta\phi=10$  mrad (rys. 8b), co odpowiada mniej więcej warunkom uplastycznienia węzła w typowych ramach stalowych [7]. Trzeci rodzaj wymuszenia jest obciążeniem o zmiennej wartości zakresu kąta obrotu, lecz stałej wartości maksymalnego wymuszenia (rys. 8c). Szczytowa wartość pierwszego półcyklu obciążenia wynosi 10 mrad, później następuje odciążenie

do takiej wartości, aby moment zginający w węźle zmniejszył się do około 1/3 nośności plastycznej połączenia  $M_{j,R}$ , po czym następuje ponowne obciążenie do 10 mrad i kolejne odciążenie. Ten charakter obciążenia odpowiada mniej więcej typowemu wymuszeniu od oddziaływań stałych i zmiennych, przy możliwości zaniku i ponownego pojawienia się oddziaływania zmiennego. Czwarta historia obciążenia (rys. 8d) jest symulacją przeciążenia węzła, z obrotem do wartości 15 mrad, po którym następuje odciążenie do zera, po czym działają dwa cykle o stałym zakresie kąta obrotu (do 10 mrad). Jest to prosty opis jednorazowego przeciążenia węzła (np. sytuacją obciążenia wyjątkowego) i późniejszej eksploatacji w typowych warunkach obciążeniowych.



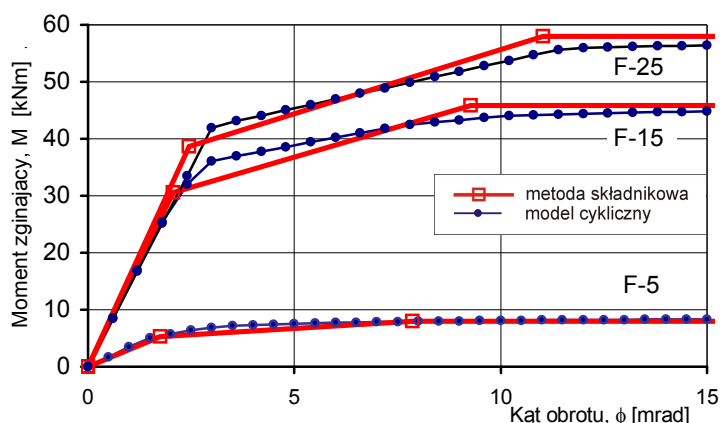
Rys. 8. Rozpatrywane historie obciążenia; a) obciążenie monotoniczne, b) wymuszenie odzerowo tętniące o stałej amplitudzie, c) wymuszenie zmienne, d) wymuszenie z „przeciążeniem” w pierwszym cyklu (opis w tekście)

Fig. 8. Considered loading histories; a) monotonic, b) pulsating with constant amplitude, c) repeated, d) repeated with “overloading” in first cycle

## 5. Wyniki

Uzyskane odpowiedzi monotoniczne wszystkich węzłów pokazano na rys. 9. Przedstawiono je na tle charakterystyk węzłów otrzymanych za pomocą metody składnikowej, według [2]. Pozwalają one na weryfikację dokładności modelu cyklicznego w porównaniu do „klasycznej” metody składnikowej. Przy odwzorowaniu charakterystyki  $M-\phi$  według metody składnikowej przyjęto jej aproksymację trójliniową taką, w której sztywność obrotowa  $S_{j,ini}$  jest ograniczona do wartości momentu  $2/3 M_{j,pl}$ , w zakresie zaś

od  $2/3 M_{j,pl}$  do  $M_{j,pl}$  sztywność obrotowa węzła jest mniejsza. Przyjęto, że nośność plastyczna węzła jest osiągnięta od kąta obrotu wyznaczonego sztywnością sieczną  $S_{j,ini}/\mu = S_{j,ini}/3$ .



Rys. 9. Odpowiedź rozpatrywanych węzłów na wymuszenie monotoniczne

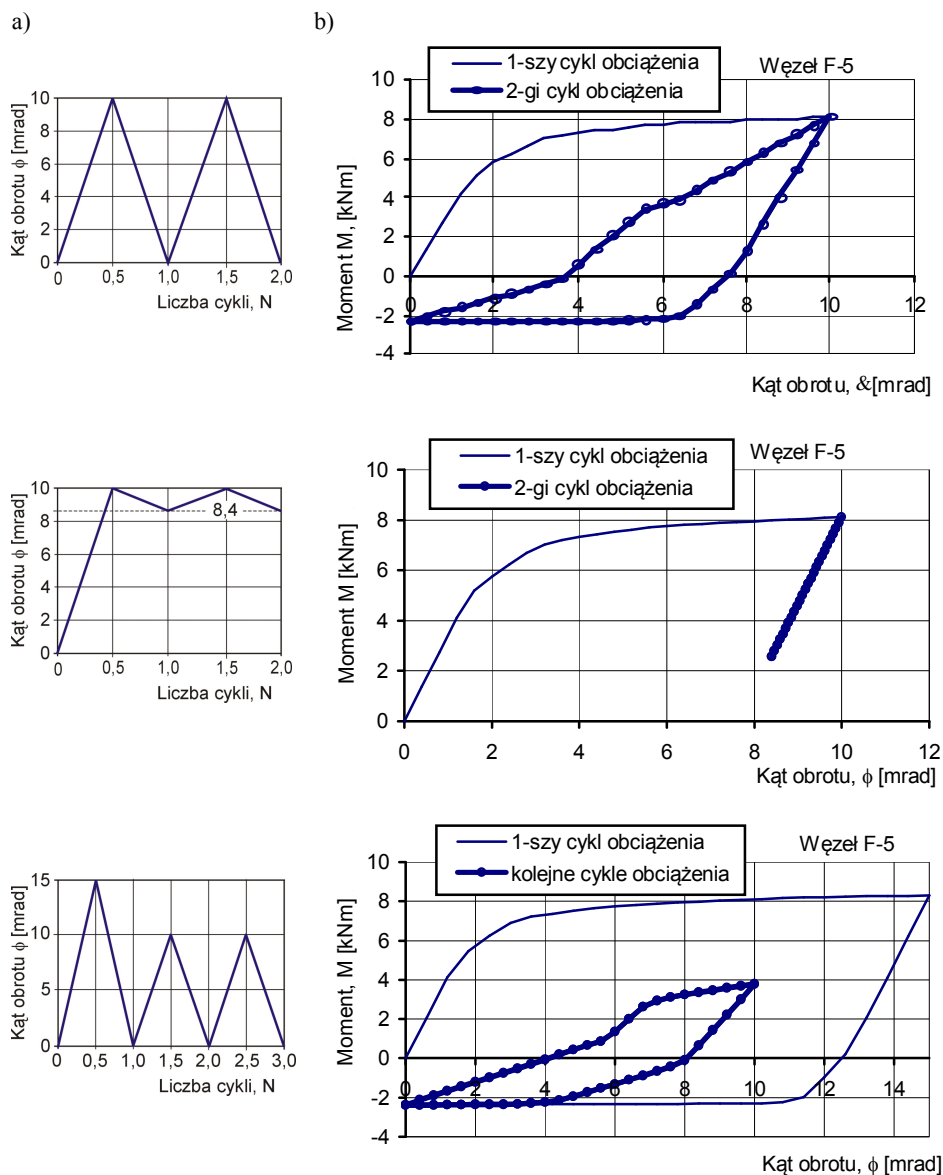
Fig. 9. Response of considered joints under monotonic loading

Charakterystyki strukturalne węzłów wyznaczone metodą składnikową i modelem cyklicznym zestawiono także w tabelicy 1. Różnica w sztywności węzłów uzyskana w modelu cyklicznym w stosunku do wyznaczonej metodą składnikową mieści się w zakresie  $\pm 13\%$ . Różnica w nośności do  $-27\%$  wynika z metodyki jej wyznaczania. Wykresy monotoniczne pokazują dużą zgodność zależności  $M-\phi$  otrzymanej dwoma metodami.

Odpowiedź węzłów na obciążenia powtarzalne pokazano na rys. 10÷12.

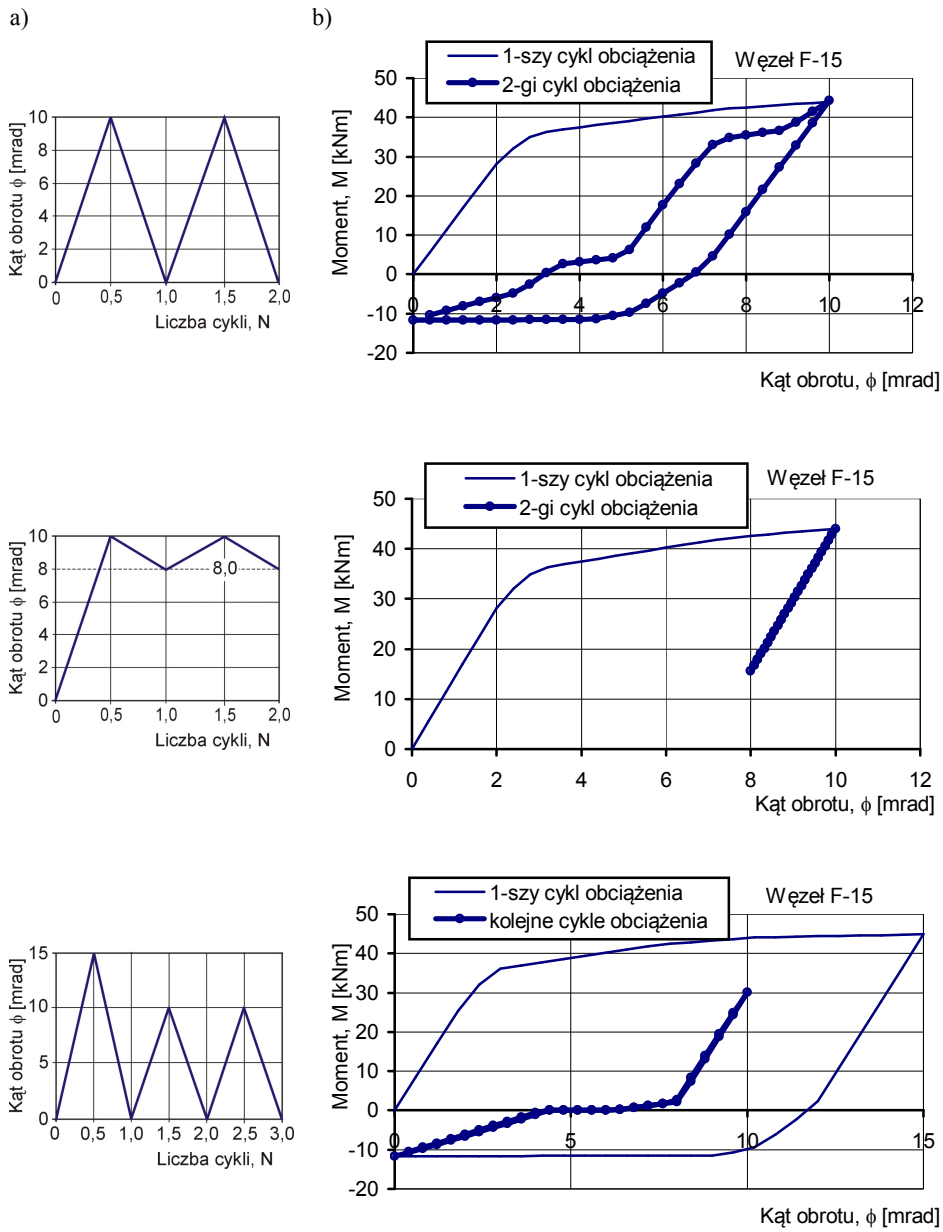
Charakter odpowiedzi węzłów na oddziaływanie powtarzalne odzerowo tętniące (według rys. 8b) zmienia się w zależności od mechanizmu zniszczenia. W przypadku „cienkiej blachy czołowej” występują wyraźne pętle histerezy obciążeniowej. Przy wzroście sztywności i nośności gietnej blachy czołowej (zwiększaniu się wartości parametru  $\beta_{Rd}$ ) na charakter odpowiedzi węzła wpływa w coraz większym stopniu wydłużająca się śruba, która przejmuje tylko oddziaływania rozciągające, przy odciążeniu zaś pozostaje wydłużona, nie przejmując siły ściskającej. Powoduje to zanikanie pętli histerezy w drugim i kolejnych cyklach obciążenia, tworząc charakterystykę  $M-\phi$  zbliżoną do charakterystyki węzła „z luzem”. Na globalne zachowanie węzła wpływa także drugi szereg śrub, który jest położony bardzo blisko strefy ściskanej. Całkowite zachowanie się węzła jest sumą sprężysto-plastycznego zachowania się króćca teowego w obszarze górnego szeregu śrub i sprężystego (z uwagi na nieznaczne

wydłużenie spowodowane małym ramieniem sił) zachowania się króćca teowego w obszarze dolnego szeregu śrub.

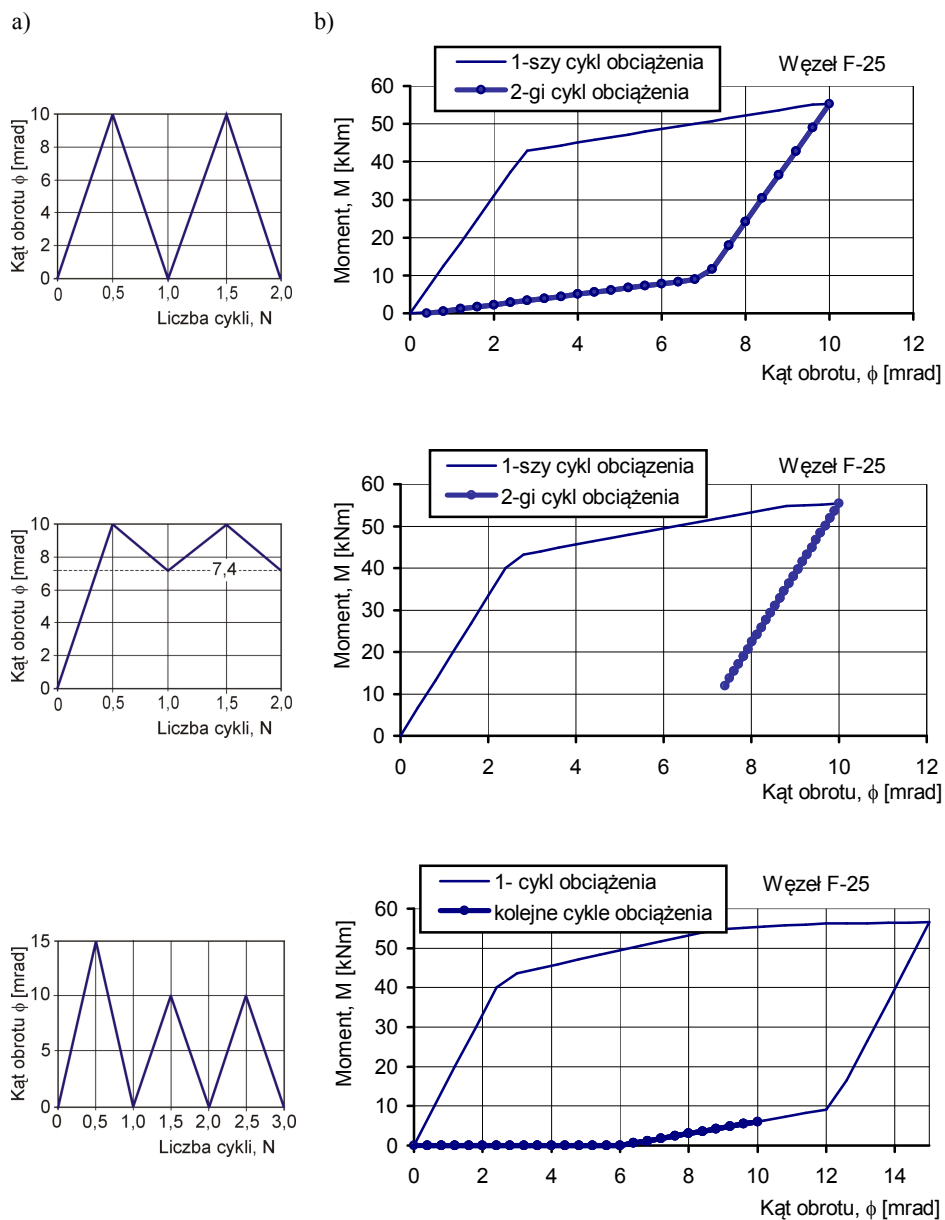


Rys. 10. Odpowiedź węzła F-5; a) charakter wymuszenia, b) odpowiedź węzła

Fig. 10. Response of F-5 joint; a) loading history, b) response of joint



Rys. 11. Odpowiedź węzła F-15; a) charakter wymuszenia, b) odpowiedź węzła  
 Fig. 11. Response of F-15 joint; a) loading history, b) response of joint



Rys. 12. Odpowiedź węzła F-25; a) charakter wymuszenia, b) odpowiedź węzła  
 Fig. 12. Response of F-25 joint; a) loading history, b) response of joint

W przypadku oddziaływania odzerowo tętniącego (według historii obciążenia pokazanej na rys. 8b) żaden z węzłów nie wykazuje znamion degradacji nośności. Moment zginający osiągniany po osiągnięciu maksymalnego kąta obrotu w kolejnych cyklach obciążenia jest identyczny, jak po pierwszym cyklu.

W przypadku oddziaływań powtarzalnych, w których zmiana wielkości oddziaływania nie jest duża (historia obciążenia wg rys. 8c) zachowanie się węzłów jest niesprężyste tylko w pierwszym półcyklu obciążenia (jak dla obciążenia monotonicznego). W kolejnych cyklach zachowanie węzła jest czysto sprężyste i nie zaobserwowano w nich zjawisk degradacji właściwości strukturalnych.

W przypadku symulacji przeciążenia węzła (historia obciążenia wg rys. 8d) późniejsza jego odpowiedź, uzyskana dla mniejszego zakresu kąta obrotu niż osiągnięty w pierwszym cyklu, pokazuje charakterystykę  $M-\phi$  obciążoną degradacją nośności i sztywności. Wskaźnikiem degradacji nośności jest współczynnik nośności, opisujący na ile nośność uzyskana w  $i$ -tym dodatnim półcyklu  $F_i^+$  zmniejszy się w stosunku do nośności monotonicznej  $F_y^+$ :

$$\varepsilon_i^+ = \frac{F_i^+}{F_y^+} \quad (1)$$

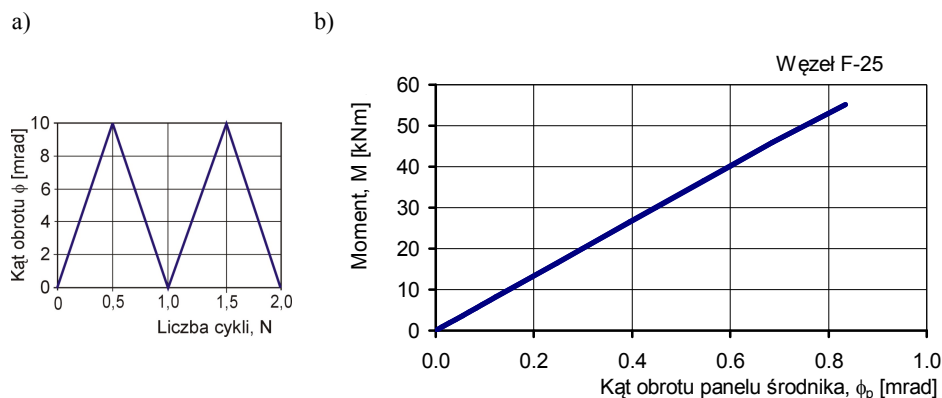
Wyznaczone wartości współczynnika nośności dla przypadku historii obciążenia według rys. 8d zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Współczynnik nośności dla historii obciążenia według rys. 8d

Table 2. Resistance ratio for loading history according to Fig. 8d

Węzeł	F-5	F-15	F-25
Współczynnik nośności $\varepsilon_3^+$	0,56	0,83	0,13

Odształcalność węzłów jest zawsze sumą odkształcalności panelu środknika i strefy połączenia. W przypadku rozpatrywanych węzłów cała ich zdolność do obrotu jest uzyskiwana przez odkształcalność strefy połączenia (styku śrubowego). Udział odkształcalności panelu środknika jest niewielki. Wielkość kąta obrotu panelu środknika uzyskaną w analizie węzła F-25 pokazano na rys. 13. W przypadku pozostałych węzłów uzyskane kąty obrotu panelu środknika były jeszcze mniejsze. Jak widać, odpowiedź panelu środknika w analizowanych węzłach była czysto sprężysta.



Rys. 13. Odpowiedź panelu środknika węzła F-25 na wymuszenie zmienne; a) charakter wymuszenia, b) odpowiedź panelu środknika

Fig. 13. Response of panel zone in F-25 joint; a) loading history, b) response of panel zone

## 6. Podsumowanie

Otrzymane wyniki wskazują, że śrubowe węzły doczołowe o niepełnej nośności obciążone w sposób powtarzalny nie wykazują znamion degradacji nośności i sztywności, w przypadku niedużego zakresu zmienności obciążenia. Ich zachowanie w drugim i kolejnych cyklach obciążeń jest już czysto sprężyste. Jako niewielki zakres zmienności obciążenia można rozumieć taki zakres zmian kąta obrotu węzła, przy którym moment zginający w węźle zmienia się w zakresie  $0,3M_{j,Rd} \div M_{j,Rd}$ .

W przypadku, gdy zakres zmienności jest większy (obciążenie odzerowo tętniące) lub gdy zachodzi przypadek jednorazowego przeciążenia węzła i późniejszej eksploatacji w typowych warunkach obciążeniowych, węzły mogą podlegać degradacji właściwości strukturalnych. Zjawiska degradacji występują w sposób szczególnie zauważalny w sytuacji przeciążenia węzła. W takim przypadku w analizowanych węzłach degradacja nośności opisywana tzw. współczynnikiem nośności osiągała poziom  $0,11 \div 0,68$ .

## Literatura

- [1] PN-EN 1993-1-1 Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1.1: Reguły ogólne i reguły dla budynków. PKN, Warszawa 2006.
- [2] PN-EN 1993-1-8 Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-8: Projektowanie węzłów. PKN, Warszawa 2006.
- [3] Joint Committee on Structural Safety. JCSS Probabilistic Model Code. 12th Draft., 2000.
- [4] Faella C., Piluso V., Rizzano G.: Structural steel semirigid connections. Theory, Design and Software. CRC Press, 2000.

- [5] Ślęczka L.: Zastosowanie metody składnikowej do oceny charakterystyki węzłów obciążonych cyklicznie. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Nr 276, Budownictwo i Inżynieria Środowiska z.58 (3/11/II), 2011, s. 315-322.
- [6] Ślęczka L.: Kształtowanie i analiza wybranych węzłów ram stalowych poddanych oddziaływaniom zmiennym. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2013.
- [7] Krawinkler H.: Loading histories for cyclic tests in support of performance assessment of structural components. 3<sup>rd</sup> Int. Conf. on Advances in Experimental Structural Engineering. October 15 –16, San Francisco, California, 2009.

## BEHAVIOR OF BOLTED END-PLATE JOINTS SUBJECTED TO REPEATED ACTIONS

### Summary

Modern structural codes recommend to take into account the effects of the behaviour of the joints on the distribution of internal forces and moments in frame structures. The structural properties of beam-to-column joints are expressed in the form of moment-rotation relationship ( $M-\phi$ ) and can be effectively predicted by the component method. But such prediction is valid only in case of monotonic loading. Under variable actions (cyclic or repeated) structural properties of joints can deteriorate in terms of strength, stiffness and energy dissipation capacity, and the effects of this deterioration influence the distribution of forces and moments and overall global behaviour of structure. The paper presents analysis of steel bolted end-plate joints, subjected to different histories of repeated actions, with control of rotation range. There were considered three partial-strength flush end-plate joints. Their geometrical parameters were differentiated in such a way, so that the three failure modes of end-plate in bending and bolt in tension, distinguished by EN 1993-1-8, were possible. Apart from monotonic loading, there were considered three types of repeated loading histories. Results shows, that in case of actions characterised by small range of variation, behaviour of joint is pure elastic in second and next cycles of loading, but in case of actions characterised by greater range of variation, deterioration of strength and stiffness can occur.

**Keywords:** frame joints, semi-rigid joints, component method, repeated actions

DOI: 10.7862/rb.2013.31

*Przesłano do redakcji: w maju 2013 r.*

*Przyjęto do druku: w lipcu 2013 r.*