

Kazimierz FURTAK

POLITECHNIKA KRAKOWSKA

NOŚNOŚĆ NA ZGINANIE ELEMENTÓW ŻELBETOWYCH

Streszczenie. W artykule omówiono ważniejsze prace polskich autorów dotyczące nośności przekrojów normalnych zginanych elementów żelbetowych. Pod uwagę brano publikacje, które ukazały się w centralnych czasopismach technicznych oraz drukowane w materiałach konferencji ogólnopolskich. Przeprowadzono analizę podanych rozwiązań autorów polskich oraz przedstawiono główne kierunki prac zagranicznych w zakresie omawianego tematu.

1. WPROWADZENIE

Przez nośność na zginanie rozumie się tu największy moment zginający, jaki jest w stanie przenieść rozpatrywany przekrój normalny prostopadły do osi podłużnej elementu analizowanego elementu w strefie dominującego działania momentu zginającego.

W zależności od charakteru i rodzaju działających obciążeń można różnić między innymi nośność doraźną, długotrwałą (reologiczną), zmęczeniową, eksploatacyjną. Poza tym nośność może być rozpatrywana w ujęciu deterministycznym, probabilistycznym lub półprobabilistycznym.

Zagadnieniem nośności przekrojów normalnych elementów żelbetowych zajmowali się teoretycy i badacze żelbetu od zarania stosowania tego materiału do wznoszenia konstrukcji budowlanych i inżynierskich. Rozwój teorii i ich weryfikacja doświadczalna miały miejsce przede wszystkim w pierwszej połowie bieżącego stulecia. W rezultacie ustalono podstawowe założenia dotyczące pracy i nośności przekrojów żelbetowych poddanych działaniu momentów zginających.

Podane założenia i rozwiązania oparto przede wszystkim na wynikach prac eksperymentalnych, w których podstawowymi wielkościami mierzonymi były odkształcenia stali zbrojeniowej i - rzadziej - betonu oraz działające siły zewnętrzne. Następnie - zakładając ważność prawa płaskich przekrojów, współodkształcalność betonu i stali zbrojeniowej w strefie ściskanej oraz (najczęściej) pomijając współpracę betonu w strefie rozciąganej - aproksymowano bryłę naprężeń ściskających tak, aby były spełnione warunki równowagi przekroju oraz występowała zgodność wartości wielkości obliczonych z pomierzonymi.

Elementy przyjmowane do analiz teoretycznych oraz wykonywane do badań doświadczalnych miały zazwyczaj kształt prostokątny lub teowy, a niekiedy dwuteowy. Przekrój miał z reguły pionową płaszczyznę symetrii, która pokrywała się z płaszczyzną działania wypadkowych sił zewnętrznych i wewnętrznych.

W latach sześćdziesiątych powstało wiele prac dotyczących strefy ściskanej betonu. Starano się przede wszystkim ustalić zależność pomiędzy odkształceniami i naprężeniami w tej strefie, określić jej wysokość oraz ustalić graniczne odkształcenia betonu ściiskanego w elemencie zginanym. Równoległe z tymi badaniami prowadzone były - dla porównania i lepszego poznania własności wytrzymałościowych - badania betonu w elementach osiowo ściiskanych.

Badania najnowsze wskazują na konieczność wykorzystania w analizie nośności przekrojów normalnych elementów zginanych najnowszych osiągnięć z zakresu mechaniki betonu i uwzględnienia między innymi wpływu: zmian zachodzących w strukturze tego materiału przy obciążeniu (powstawanie i rozwój mikrodefektów), naprężeń własnych, obciążeń długotrwałych, zmęczenia materiałów, temperatury, korozji. Ponadto analizowany jest wpływ kształtu i wielkości przekroju, wieku betonu w momencie przyłożenia pierwszego obciążenia, strzemion, uzwojenia strefy ściskanej.

Przypadek zginania jest coraz częściej rozpatrywany łącznie ze ścinaniem, skręcaniem, siłą podłużną. Oprócz podejścia deterministycznego powszechne stało się rozpatrywanie zagadnień nośności w ujęciu probabilistycznym lub półprobabilistycznym.

Niektóre spośród wymienionych wyżej zagadnień były również przedmiotem prac autorów polskich. Ważniejsze z nich - opublikowane od 1975 roku w ważniejszych czasopismach technicznych oraz materiałach drukowanych konferencji ogólnopolskich - omówiono w punkcie 2. Brano przy tym pod uwagę tylko prace dotyczące elementów żelbetowych wykonanych z betonów zwykłych, a w rozpatrywanych przekrojach występowały tylko momenty zginające.

Wzięto pod uwagę ponad 20 prac. Dokładny ich podział tematyczny - ze względu na dużą różnorodność podejmowanych w nich zagadnień - nie jest możliwy. Stąd też wszystkie prace omówiono w jednym punkcie (punkt 2), bez wyodrębniania grup problemowych.

Omawiane w kolejności prace dotyczą:

- opisu zależności pomiędzy naprężeniami i odkształceniami w betonie strefy ściskanej,
- wpływu wytrzymałości betonu,
- wpływu naprężeń własnych i defektów strukturalnych,
- wpływu charakteru i czasu działania obciążenia,
- wpływu uwzględnienia rozrzutu cech wytrzymałościowych materiałów,
- wpływu korozji,
- metodyki badań,
- odziorowań numerycznych pracy belki żelbetowej.

Niniejszy artykuł jest rozszerzeniem artykułu [10], który był drukowany na łamach "Inżynierii i Budownictwa" jako jeden z raportów cząstkowych, dotyczących stanu wiedzy w zakresie konstrukcji z betonu.

2. KRÓTKIE OMÓWIENIE WYBRANYCH PRAC AUTORÓW POLSKICH OPUBLIKOWANYCH OD 1975 ROKU

Wprawdzie zależności $\sigma_b - \epsilon_b$ dla betonu strefy ściskanej nie ma decydującego wpływu na nośność przekroju zginanego, jednak temu zagadnieniu poświęcono w ostatnich trzynastu latach najwięcej uwagi. Z przedstawionych propozycji najbardziej znana jest zależność podana przez T. Szulczyńskiego [24,25]. Ma ona postać:

$$\sigma_b = E_{bo} \epsilon_b - A (e^{-B \epsilon_b} + B \epsilon_b - 1) \quad (1)$$

Moduł sprężystości E_b zależy od stopnia wyteżenia betonu i jest równy:

$$E_b = E_{bo} - AB(1 - e^{-B \epsilon_b}) \quad (2)$$

Stałą B wyznacza się z równania przestępnego:

$$B = \frac{E_{bo}}{R_c} \frac{1 - e^{-B \epsilon_R}}{1 + \frac{E_{bo} \epsilon_R - R_c}{R_c} e^{-B \epsilon_R}} \quad (3)$$

natomiast stałą A z jednej z dwóch zależności (4):

$$A = \frac{E_{bo} R - R_c}{e^{-B \epsilon_R} + B \epsilon_R - 1} \quad \text{lub} \quad A = \frac{E_{bc}}{B(1 - e^{-B \epsilon_R})} \quad (4)$$

Pozostałe oznaczenia jak na rysunku 1.

Podana zależność (1) jest ważna dla betonów niskich i średnich klas. Nie może być stosowane w przypadku betonów o wytrzymałości $R_c \geq 40$ MPa. Biorąc jednak pod uwagę, że betony wysokich klas są stosowane tylko w konstrukcjach sprężonych i częściowo sprężonych, można uznać, iż zależność $\sigma_b - \epsilon_b$ zaproponowana przez T. Szulczyńskiego może być w pełni wykorzystana w przypadku konstrukcji żelbetowych.

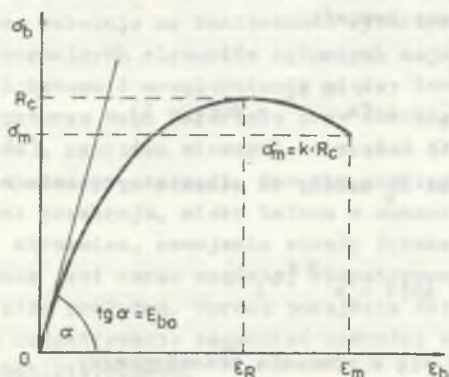
Inne propozycje zależności $\sigma_b - \varepsilon_b$, w odniesieniu do betonu strefy ściskanej belek żelbetowych, podali: - G. Ratajczak i W. Wołowicki [22,23]

$$\sigma_b = E_{bo} \varepsilon_b + c_1 \varepsilon_b^n + c_2 \varepsilon_b^\alpha \quad (5)$$

gdzie:

c_1, c_2, n, α - parametry zależne od zbioru

$Z_b \{ R_c, \varepsilon_R, \varepsilon_m, E_{bo}, k \}$ - por. rys. 1.



Rys. 1. Przyjęte oznaczenia dla wykresu $\sigma_b - \varepsilon_b$

Fig. 1. Assumed designations for $\sigma_b - \varepsilon_b$ diagram

- P. Korzeniowski i M. Wesołowski [16]

- dla zakresu sprężystego $0 \leq \varepsilon_b \leq \gamma \varepsilon_s$ (por. rys. 2)

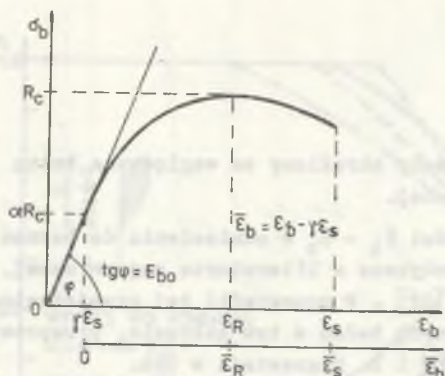
$$\sigma_b = E_{bo} \varepsilon_b \quad (6)$$

- dla zakresu niesprężystego $0 \leq \bar{\varepsilon}_b \leq \bar{\varepsilon}_s$ (por. rys. 2)

$$\sigma_b = \alpha R_s + E_{bo} \bar{\varepsilon}_b + \alpha \bar{\varepsilon}_b^b (\bar{\varepsilon}_b - c) \quad (7)$$

- przy pominięciu zakresu sprężystego

$$\sigma_b = E_{bo} \varepsilon_b + \alpha \varepsilon_b^b (\varepsilon_b - c); \quad (8)$$



Rys. 2. Przyjęte oznaczenia według [16]

Fig. 2. Assumed designations according to [16]

stałe: α , b , c wyznacza się z warunków granicznych,

- J. Grycz i A. Folga [14]

$$\varepsilon_b = \alpha \frac{\sigma_b}{1,1 R_c + \sigma_b} \quad (9)$$

gdzie:

$$\alpha = \frac{1,1 R_0}{E_{b0}} \quad (10)$$

- K. Furtak [8]

$$\sigma_b = (1 - a \chi^2) E_{b0} \varepsilon_b \quad (11)$$

gdzie:

$$a = 1 - \frac{R_c}{R_{b0} \varepsilon_R}; \quad \chi = \frac{M}{M_{bn}} \quad (12)$$

lub (na wysokości strefy ściskanej)

$$\chi = \frac{\epsilon_b}{\epsilon_{bmax}} \quad (13)$$

M_{bn} - moment niszczący określony ze względu na beton strefy ściskanej.

Ważniejsze zależności $\sigma_b - \epsilon_b$ w odniesieniu do betonu strefy ściskanej belek żelbetowych, spotykane w literaturze zagranicznej, podał T. Ćwirko-Godycki w monografii [12]. W monografii tej przedstawiona jest także metodyka najobszerniejszych badań w tym zakresie, przeprowadzonych pod kierunkiem H. Rüscha w RFN i E. Hognestada w USA.

W rzeczywistości na przebieg zależności $\sigma_b - \epsilon_b$ ma wpływ wiele czynników związanych między innymi ze składem betonu oraz zmianami zachodzącymi w jego strukturze pod wpływem obciążeń. Powszechnie uważa się, że wykres $\sigma_b - \epsilon_b$ jest trójstadialny. Można wyróżnić w nim dwa poziomy tak zwanych naprężeń krytycznych, z których pierwszy odpowiada naprężeniom inicjacji i rozwoju mikrozarysowań, a drugi jest utożsamiany z wytrzymałością długotrwałą. Zagadnienia te mają stosunkowo bogatą literaturę w polskim piśmiennictwie technicznym. Nie będzie ona jednak tu prezentowana, gdyż stanowi ona temat oddzielnego raportu.

Porównanie wykresów naprężeń w strefie ściskanej według wybranych wzorów (5), (8), (11) - przy przyjęciu betonu klasy B25 i korzystnym dla zróżnicowania przebiegów zależności $\sigma_b - \epsilon_b$ założeniu, że nośność analizowanej strefy jest w pełni wykorzystana - przedstawiono na rysunku 3.

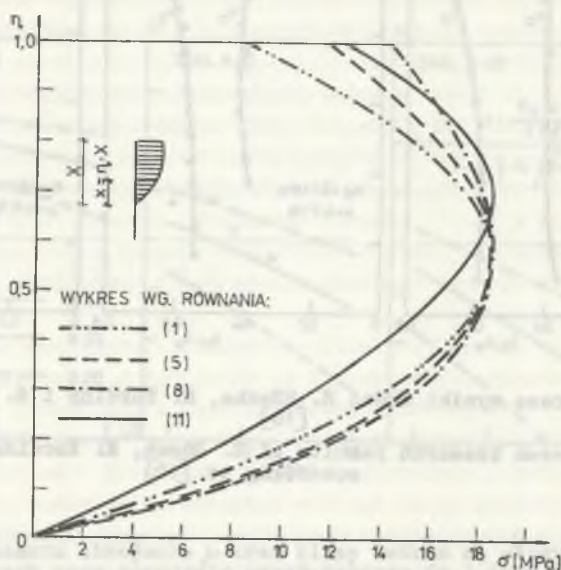
Dla najczęściej spotykanego przypadku, gdy o nośności przekroju decyduje zbrojenie rozciągane, różnice przebiegów wykresów $\sigma_b - \epsilon_b$ w strefie ściskanej będą jeszcze mniejsze.

W przypadku gdy o nośności decyduje zbrojenie rozciągane, ważne jest położenie wypadkowej bryły naprężeń w betonie strefy ściskanej, od którego zależy ramię sił wewnętrznych. Odległość tego środka od krawędzi ściskanej przekroju prostokątnego wynosi:

- 0,45 x - przy wykorzystaniu równania (5),
- 0,44 x - przy wykorzystaniu równania (8),
- 0,40 x - przy wykorzystaniu równania (11),

gdzie "x" wysokość strefy ściskanej. Wyniki te są zgodne z rezultatami najobszerniejszych w tym zakresie - badań doświadczalnych (por. rys. 4), przeprowadzonych pod kierunkiem H. Rüscha (H. Rüscha, K. Kordina, S. Stöckl: Festigkeit der Biegedruckzone. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 190, 1967). Przyjmując wysokość strefy ściskanej równą 0,6 wysokości użytkowej przekroju h_0 , otrzymamy względną (odniesioną do h_0) wartość ramienia sił wewnętrznych równą odpowiednio: 0,73; 0,74; 0,76, wobec 0,80 (dla

trójkątnego wykresu naprężeń w strefie ściskanej) i 0,70 (dla wykresu prostokątnego).



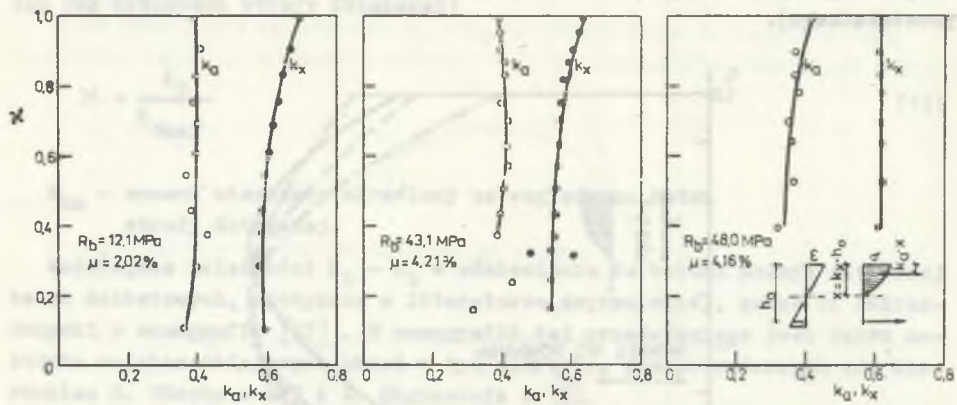
Rys. 3. Porównanie wykresów naprężeń w strefie ściskanej dla różnych zależności $\sigma_b - \epsilon_b$

Fig. 3. Comparison of the diagrams of stresses in compressed zone for different dependences $\sigma_b - \epsilon_b$

O niewielkim wpływie zależności $\sigma_b - \epsilon_b$ w strefie ściskanej na teoretyczną nośność przekroju normalnego wnioskować można na podstawie wykresów przedstawionych na rysunku 5. Obrazują one (dla belek prostokątnych) stosunek momentu sił wewnętrznych przy przyjęciu prostokątnego (z_p) i trójkątnego (z_t) wykresu naprężeń w zależności od procentu zbrojenia μ , klasy stali zbrojeniowej i klasy betonu. Występujące różnice nie mają praktycznego znaczenia i są porównywalne z rozrzutami cech wytrzymałościowych materiałów składowych żelbetu - betonu i stali zbrojeniowej.

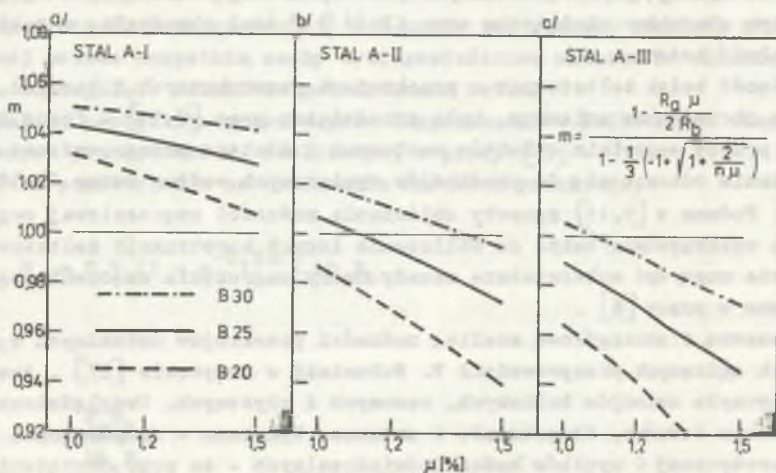
Niewielki jest też wpływ wytrzymałości betonu na nośność zginanych elementów żelbetowych - zwłaszcza dla małych i średnich procentów zbrojenia.

T. Granosik [13] wykazał, że istotny wpływ na moment niszczący belek żelbetowych M_n ma zmiana wytrzymałości betonu rzędu 50%. Zróżnicowane wartości M_n rzędu 15% mieszczą się według [13] w granicach odchyłek losowych wytrzymałości betonu. Należy zauważyć, że stopień zbrojenia badanych belek wynosił 1,77%, a mechanizm zniszczenia nie został opisany.



Rys. 4. Wybrane wyniki badań H. Röscha, K. Kordiny i S. Stöckl - według [10]

Fig. 4. Chosen research results of H. Rösch, K. Kordina and S. Stöckl according to [10]



Rys. 5. Wpływ procentu zbrojenia μ oraz klasy betonu na stosunek m ramienia sił wewnętrznych przy przyjęciu prostokątnego (Z_p) i trójkątnego (Z_t) wykresu naprężeń w strefie ściskanej: a - przy przyjęciu stali zbrojeniowej klasy A-I; b - przy przyjęciu stali zbrojeniowej klasy A-II; c - przy przyjęciu stali zbrojeniowej klasy A-III

Fig. 5. The influence of the reinforcement ratio μ and the concrete class on the ratio m of the arm of internal forces on the assumption of rectangular (Z_p) and triangular (Z_t) diagrams of stresses in compressed zone:

a - for the A-I class of reinforcing steel, b - for the A-II class of reinforcing steel, c - for the A-III of reinforcing steel

Wpływ tak zwanych samonaprężeń (naprężeń własnych) w betonie - powstających przy obciążeniach wielokrotnych wskutek nieliniowego pełzania betonu - na rozkład naprężeń w strefie ściskanej żelbetowych elementów zginanych, a tym samym także na ich nośność był przedmiotem prac A. Borcza i T. Tomczaka [1,2,3,4]. Samonaprężenia te sumują się z naprężeniami skurczowymi oraz własnymi, powstałymi w okresie dojrzewania betonu. Dopiero do tak określonych naprężeń własnych można dodawać [1,2,4] naprężenia sprężyste od momentu zginającego. Uwzględnienie sumarycznych naprężeń własnych sprawia [1], że nie ma potrzeby posługiwania się dwoma pojęciami wytrzymałości na ściskanie (wytrzymałość na ściskanie oraz wytrzymałość na ściskanie przy zginaniu).

Wpływ obciążeń długotrwałych i zmiennych oraz zmian zachodzących w strukturze betonu na nośność przekrojów normalnych w zginanych elementach żelbetowych był przedmiotem prac [6,9,11,27,28]. W. Wołowicki i G. Ratajczak [27,28] analizowali wpływ mikrodefektów strukturalnych oraz zmęczenia zbrojenia i betonu na nośność zginanych elementów, z uwzględnieniem miarodajnych dla mostów warunków bezpieczeństwa. Wyznaczyli oni pole

momentów zginających przenoszonych przez przekrój żelbetowy, uwzględniając przy tym charakter obciążenia oraz ilość i rodzaj zbrojenia, a także wytrzymałość betonu.

Nośność belek żelbetowych o przekrojach prostokątnych i teowych, podanych obciążeniom zmiennym, była przedmiotem prac [9,11]. Prace te dotyczą przede wszystkim obiektów mostowych i dlatego przeprowadzone w nich rozważania odnoszą się do przekrojów wymiarowych według normy PN-58/B-03261. Podane w [9,11] sposoby obliczania nośności zmęczeniowej mogą być jednak wykorzystane także do obliczania innych konstrukcji żelbetowych. Podobnie mogą być wykorzystane zasady oceny zagrożenia zmęczeniowego przedstawione w pracy [6].

Obszerną i szczegółową analizę nośności przekrojów normalnych w elementach zginanych przeprowadził W. Wołowicki w rozprawie [27]. Analiza ta dotyczyła ustrojów belkowych, ramowych i płytowych. Uwzględniono w niej obciążenie doraźne, długotrwałe i zmienne. Wykazano - na podstawie analizy teoretycznej i wyników badań doświadczalnych - że przy obciążeniach doraźnych istnieje pewna rezerwa nośności zwłaszcza w przypadku ustrojów statycznie niewyznaczalnych oraz płyt w stosunku do obliczonych metodą naprężeń liniowych oraz stanów granicznych.

Próbie przetransponowania trójstadijalnego charakteru zależności $\sigma_b - \varepsilon_b$ dla ściskania na trójstadijalny charakter zależności $M - \varepsilon_b$ (M - moment zginający, ε_b - odkształcenie krawędzi ściskanej) podjęto w pracy [7]. Wykazano w niej występowanie charakterystycznych poziomów momentów zginających, których wartość uzależniona jest przede wszystkim od procentu zbrojenia belek. Wskazano, że nośność długotrwała zginanych elementów żelbetowych może być przy dużych stopniach zbrojenia znacznie mniejsza od doraźnej, stanowiącej podstawę oceny bezpieczeństwa oraz obliczania i wymiarowania tych elementów. Oprócz procentu zbrojenia nie bez wpływu na nośność długotrwałą pozostaje rodzaj stali zbrojeniowej oraz rodzaj użytego do betonu kruszywa.

Większą wartość rzeczywistego momentu niszczącego w stosunku do obliczonego na podstawie średnich wytrzymałości betonu i granicy plastyczności stali zbrojeniowej wykazał B. Podolski [20]. W pracy tej przeanalizowano wpływ łącznego rozkładu prawdopodobieństwa wytrzymałości betonu i granicy plastyczności stali zbrojeniowej na nośność zginanych elementów żelbetowych. Zastosowano przy tym współczynnik kombinacji materiałów, a do oceny rozkładu prawdopodobieństwa momentu przyjęto przybliżoną probabilistyczną metodę pierwszego rzędu.

W pracy [20] wykazano, że wpływ uwzględnienia łącznego rozkładu prawdopodobieństwa na teoretyczną nośność na zginanie elementów żelbetowych w sposób istotny zależy od kształtu przekroju oraz rozkładu zbrojenia. Moment niszczący obliczony z uwzględnieniem rozrzutu cech wytrzymałościowych materiałów w stosunku do obliczonego przy przyjęciu średnich wytrzymałości jest tym większy, im mniejszy jest przekrój zbrojenia ściskanego oraz im większa jest wysokość strefy ściskanej betonu.

Probabilistyczne ujęcie nośności elementów zginanych było także przedmiotem pracy G. Ratajczaka [21]. W pracy tej poddano analizie probabilistycznej przede wszystkim cechy wytrzymałościowe materiałów składowych żelbetu. Szczególnie wnikliwie potraktowano beton.

Analizę probabilistyczną zapasu bezpieczeństwa żelbetowych elementów zginanych przedstawił J. Pawlikowski w pracy [19].

Podał on ponadto wzór na obliczanie nośności przekroju:

$$M_n = 0,5 (1 - e^{-2,5\alpha}) bh_o R_b \quad (14)$$

gdzie:

$$\alpha = \frac{P R_a}{bh_o R_b} \quad (15)$$

który dobrze aproksymuje wyniki badań doświadczalnych. Powyższą formułę (14) zastosowali także I. Czmoch i J. Piliszek w pracy [5] do oceny zapasu bezpieczeństwa stropów żelbetowych jednokierunkowo zginanych, projektowanych zgodnie z normą PN-84/B-03264.

Zmiana nośności przekroju żelbetowego elementu zginanego w wyniku korozji zbrojenia była przedmiotem prac J. Kubika i A. Zybury [17,18]. Podane w tych pracach rozwiązanie ogólne umożliwia określenie stanu naprężenia i nośności przekroju w zależności od przyjętych czynników mających wpływ na korozję zbrojenia oraz od geometrii przekroju. Autorzy prac [17, 18] zaproponowali także, aby w konstrukcjach narażonych na agresywne oddziaływanie środowiska wartości częściowych współczynników bezpieczeństwa wyznaczać z uwzględnieniem korozji.

Możliwością wykorzystania elastoplastycznych badań modelowych do doświadczalnego wyznaczania momentu niszczonego i rozkładu naprężeń w belce zajmowali się W. Walczak i J. Jaroniek [26]. W przeprowadzonych przez nich badaniach modele wykonano z żywicy epoksydowej (Epidian 5), zbrojonej prętami miedzianymi. Stwierdzono w [26] pełną przydatność metody elastooptycznej do oceny zmian naprężeń zarówno w fazie liniowo-sprężystej, jak i w fazie bezpośrednio poprzedzającej zniszczenie belki.

Ciekawe wyniki własnych badań belek żelbetowych wzmocnionych doklejanym zbrojeniem przedstawił J. Jasieńko, A. Olejnik i J. Pysznik w pracy [15]. Wzmocnienie przekroju realizowano przez doklejenie płaskowników stalowych o grubości 2 lub 4 mm. Klej wykonano na bazie żywicy Epidian 5 z utwardzaczem Z-1 oraz mączką kwarcową jako wypełniaczem. Przygotowanie powierzchni doklejanej stali polegało na szlifowaniu mechanicznym lub piaskowaniu, a powierzchni betonowej na groszkowaniu i odkurzeniu.

Na podstawie wyników badań wykazano [15] zachowanie w belkach wzmacnianych zasady płaskich przekrojów oraz zadowalającą zgodność rzeczywistych i teoretycznych momentów niszczących. Stwierdzono ponadto, że piaskowanie doklejanych blach stalowych daje lepsze warunki współpracy za spoiną klejową niż szlifowanie stali.

Podstawy teoretyczne odwzorowania na komputerze kolejnych faz pracy belki żelbetowej - w tym także określenia momentów niszczących - podane zostały przez A. Żórawskiego w pracach [29,30] .

Jako zmienną niezależną w podanej w pracach [29,30] metodzie przyjęto odkształcenie jednostkowe stali zbrojeniowej. Przy tym założeniu - zachowując zasadę płaskich przekrojów - określono odkształcenia jednostkowe w dowolnym punkcie przekroju. Tym odkształceniom przyporządkowywano średnie wartości naprężeń (posiłkując się zależnościami $\sigma - \varepsilon$ wyznaczonymi na przykład w drodze badań doświadczalnych próbek betonu i stali). Przekrój dzielono na pasma poziome. W środku każdego z nich wyznaczono siłę podłużną oraz cząstkowy moment zginający.

Położenie osi obojętnej wyznacza się w tej metodzie z warunku sumy rzutów na oś poziomą. Moment zginający od sił wewnętrznych jest równy sumie cząstkowych momentów zginających przenoszonych przez poszczególne pasma. Metoda ta jest uniwersalna - umożliwia nie tylko obliczanie momentu niszczącego, ale także analizę odkształceń i zarysowania oraz ugięć belek żelbetowych w całym zakresie obciążeń (od zera do niszczącego).

3. UWAGI KOŃCOWE

Przedstawione w punkcie 2 wybrane prace autorów polskich dotyczące nośności przekrojów normalnych zginanych elementów żelbetowych dotyczą wprawdzie szerokiego wachlarza zagadnień związanych z omawianą problematyką, ale mają raczej charakter przyczynkowy. W dalszym ciągu brakuje kompleksowych badań doświadczalnych oraz wyczerpującej monografii, które całościowo i wieloaspektowo ujmowałyby omawiane zagadnienia.

W omawianym okresie "modne" stało się opisywanie zależności $\sigma_b - \varepsilon_b$ w strefie ściskanej betonu - chociaż zależność ta nie ma istotnego znaczenia przy obliczaniu nośności przekroju. Omawiana zależność jest o wiele istotniejsza w przypadku obliczania ugięć - zwłaszcza od obciążeń długotrwałych, dla których niezbędne jest wprowadzenie parametru czasu.

pozytywnie należy odnotować pojawienie się prac dotyczących wpływów długotrwałych - tak w zakresie obciążeń (obciążenia długotrwałe i zmienne), jak i oddziaływań. Zwraca się uwagę na zagadnienia strukturalne związane z powstawaniem mikrodefektów i ich rozwojem, a także na wpływ naprężeń własnych. Uwzględnia się losowy charakter cech wytrzymałościowych materiałów: betonu i stali zbrojeniowej.

Problematyka ta jest zgodna z tematyką badawczą wiodących ośrodków zagranicznych i dlatego prace z tego zakresu powinny być kontynuowane.

Nieuchronny i pożądanym jest rozwój metod komputerowej analizy pracy belki żelbetowej - w tym również w obszarze dominującego działania momentu zginającego. Coraz łatwiejszy i powszechniejszy dostęp do komputerów i mikrokomputerów stwarza ku temu praktycznie nieograniczone możliwości.

W stosunku do okresu poprzedniego nieco mniej ukazało się prac związanych z wytrzymałością reologiczną oraz probabilistycznym ujęciem wytrzymałości materiałów składowych żelbetu i nośności przekrojów. Zbyt mało jest jeszcze prac doświadczalnych dotyczących wpływu obciążeń zmiennych, oddziaływań środowiska, zachowania się przekroju w stanie bezpośrednio poprzedzającym wyczerpanie nośności.

Celowe wydaje się przeanalizowanie i przebadanie takich zagadnień szczególnie, jak:

- wpływ strzemion oraz uzwojenia w strzefie ściskanej na nośność przekroju zginanego (strzemiona oraz uzwojenie ograniczają odkształcenia poprzeczne betonu, co powoduje dwu-, a nawet trójosiowy stan naprężenia, zwiększając wytrzymałość betonu),
- wpływ rozwinięcia przekroju poprzecznego oraz efekt skali na nośność oraz ustalenie miarodajnego wymiaru przekroju do określenia wpływu tego efektu,
- nośność przekrojów normalnych poddanych zginaniu dwukierunkowemu,
- praca zbrojenia ściskanego i jego udział w przenoszeniu momentów zginających - zwłaszcza w fazie bezpośrednio poprzedzającej wyczerpanie nośności.

Uzasadnione wydaje się również podejmowanie prób - jednak przy uwzględnieniu zbliżonego do rzeczywistego rozkładu naprężeń w betonie - skonstruowania jednego opisu nośności przekrojów normalnych, poddanych działaniu momentu zginającego i siły podłużnej. Rozpatrywanie oddzielne zginania elementów żelbetowych oraz sprężonych i częściowo sprężonych, ściskania i rozciągania mimośrodowego z małym i dużym mimośrodem stanowiłoby wówczas tylko przypadek szczególny.

Znaczną część przedstawionych zagadnień rozwiązać można na podstawie wyników dotychczas przeprowadzonych badań krajowych i zagranicznych. Niemniej jednak uzupełniające i weryfikacyjne badania doświadczalne w zakresie nośności przekrojów normalnych żelbetowych elementów zginanych wydają się być również uzasadnione.

LITERATURA

- [1] Borcz A.: Fenomenologiczny model reologiczny betonu. Praca Naukowe Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej "Mechanika konstrukcji betonowych", Wrocław 1983.

- [2] Borcz A.: Uwagi o projektowaniu zginanych przekrojów z uwzględnieniem pełzania betonu. Archiwum Inżynierii Lądowej, z. 2-3/1984.
- [3] Borcz A.: W sprawie mechaniki konstrukcji betonowych. Inżynieria i Budownictwo 4-5/1986.
- [4] Borcz A., Tomczak T.: Samonapężenia od pełzania betonu w belkach żelbetowych. XXVIII Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB, Krynica 1983.
- [5] Czmoch I., Piliszek J.: Ocena zapasu bezpieczeństwa stropów żelbetowych jednokierunkowo zginanych projektowanych zgodnie z normą PN-84/B-03264. XXII Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB, Krynica 1986.
- [6] Flaga K., Furtak K.: Zagrożenie zmęczeniowe w mostach żelbetowych. XXX Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB, Krynica 1984.
- [7] Furtak K.: Odkształcenia poprzeczne betonu strefy ściskanej w belkach żelbetowych pojedynczo zbrojonych. XXVII Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB, Krynica 1981.
- [8] Furtak K.: Obliczanie odkształceń i naprężeń w belkach żelbetowych o przekroju prostokątnym w ujęciu kontynuinalnym. Inżynieria i Budownictwo 3/1983.
- [9] Furtak K.: Analiza zmęczeniowa belek mostowych projektowanych według PN-58/B-03261. Inżynieria i Budownictwo 3/1984.
- [10] Furtak K.: Nośność przekrojów normalnych w żelbetowych elementach zginanych. Inżynieria i Budownictwo 6/1986.
- [11] Furtak K.: Nośność przekrojów normalnych w zginanych elementach żelbetowych poddanych obciążeniom zmiennym ze szczególnym uwzględnieniem obiektów mostowych. Politechnika Krakowska, Zeszyt Naukowy Nr 4 (z.64), Kraków 1985.
- [12] Godycki-Ćwirko T.: Mechanika betonu. Arkady, Warszawa 1982.
- [13] Granosik T.: Statystyczne badanie ugięć i nośności zginanych belek żelbetowych. Archiwum Inżynierii Lądowej, z. 1/1979.
- [14] Grycz J., Folga A.: O wyznaczaniu naprężeń i nośności granicznej w prostych prętach żelbetowych poddanych działaniu momentów zginających, sił normalnych oraz wpływów temperatury. XXX Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB, Krynica 1984.
- [15] Jasieńko J., Olejnik A., Pyszniak J.: Badania belek żelbetowych wzmocnionych doklejaniem zbrojeniem. XXX Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB, Krynica 1984.
- [16] Korzeniowski P., Wesołowski M.: Zależność $\sigma - \epsilon$ dla betonu. XXX Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB, Krynica 1984.
- [17] Kubik J., Zybura A.: Zmiany naprężeń w konstrukcjach żelbetowych wywołane korozją. Archiwum Inżynierii Lądowej, z. 4/1980.
- [18] Kubik J., Zybura A.: Zmiana nośności przekroju żelbetowego w wyniku korozji. XXVII Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB, Krynica 1981.
- [19] Pawlikowski J.: Analiza probabilistyczna zapasu bezpieczeństwa żelbetowych elementów zginanych. Archiwum Inżynierii Lądowej (w druku).
- [20] Podolski B.: Nośność żelbetowych elementów zginanych z uwzględnieniem losowego charakteru wytrzymałości betonu i zbrojenia. XXIX Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB, Krynica 1983.
- [21] Ratajczak G.: Szacowanie naprężeń dopuszczalnych dla betonów w konstrukcjach mostów z uwzględnieniem warunków użytkowania - podejście probabilistyczne. Praca doktorska, Poznań 1985.
- [22] Ratajczak G., Wołowicki W.: Ocena wpływu zdolności betonu do odkształceń na moment niszczący dla przekroju żelbetowego. XXX Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB, Krynica 1984.

- [23] Ratajczak G., Wołowicki W.: Krzywoliniowa zależność δ - ϵ . T. Szulczyńskiego jako graniczny przypadek wielomianu. Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej. Budownictwo Lądowe XL, Gdańsk 1984.
- [24] Szulczyński T.: Obliczanie naprężeń w ściskanej strefie zginanego przekroju żelbetowego przy zastosowaniu nieliniowej funkcji δ - ϵ . Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej. Budownictwo Lądowe 26, Gdańsk 1972.
- [25] Szulczyński T.: Zależność między naprężeniami i odkształceniami betonu. Archiwum Inżynierii Lądowej, z. 4/1974.
- [26] Walczak W., Jaroniek M.: Elastooptyczne badania modelowe zbrojonych belek zginanych z uwzględnieniem fazy zniszczenia. Archiwum Inżynierii Lądowej, z. 4/1977.
- [27] Wołowicki W.: Problemy obliczania mostów żelbetowych na quasi-sta-tyczne obciążenia wyjątkowe. Rozprawy Politechniki Poznańskiej Nr 100, Poznań 1980.
- [28] Wołowicki W., Ratajczak G.: Wytyczenie przekroju żelbetowego elementu zginanego z uwzględnieniem miarodajnych dla mostów warunków bezpieczeństwa. Inżynieria i Budownictwo 6/1983.
- [29] Żórawski A.: Aproksymacja faz pracy belki żelbetowej. XXX Konferen-cja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB, Krynica 1983.
- [30] Żurawski A.: Odwzorowanie numeryczne faz pracy belki żelbetowej. In-żynieria i Budownictwo 11/1984.

НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ НА ИЗГИБ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Резюме

В статье обсуждаются важнейшие работы польских авторов касающиеся несущей способности нормальных сечений изгибаемых железобетонных элементов. Брались во внимание работы, которые появились в центральных технических журналах а также в печатанных материалах общепольских конференций. Был проведён анализ указанных решений и были представлены главные направления зарубежных работ в области обсуждаемой темы.

BENDING LOAD CAPACITY OF REINFORCED CONCRETE ELEMENTS

Summary

Major works by Polish authors on load carrying capacity of normal sections of bent reinforced concrete elements have been discussed in the paper. The publications that had been issued in central technical journals and included in the proceedings from all - Polish conferences have been taken into account.

An analysis of the suggested solutions by Polish authors has been carried out and the main trends in foreign research on the subject being discussed have been presented.