

REDYSTRYBUCJA NAPRĘŻEŃ W BELCE ŻELBETOWEJ NA SKUTEK WYKONANIA OTWORU

Grzegorz BAK*

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45 A, 15-351 Białystok

Streszczenie: W pracy poddano analizie zmianę stanu odkształcenia i naprężenia w przekroju poprzecznym belki żelbetowej, w której wykonano otwór, nie usuwając obciążenia zewnętrznego. Taka ingerencja w belkę wywołuje lokalne dociążenie przekroju centralnego w miejscu wykonania otworu. Przedstawiono algorytm analizy w zależności od fazy jego wytyżenia, oparty na sformułowaniu problemu w postaci układów równań równowagi stosownie do fazy wytyżenia, według teorii żelbetu Ib oraz dla fazy tworzenia się rysy. Układy równań są formułowane w sytuacjach przed i po wykonaniu otworu. Wskazano, że wykonanie otworu zmienia stan zgięciowy przekroju na stan mimośrodowego rozciągania. Wyniki szczegółowe wyznaczono metodą numeryczną na podstawie algorytmu iteracyjnego, który umożliwia wyznaczenie ciągłego rozwoju rysy normalnej i efektów niestabilności w uogólnionym prawie zginania.

Słowa kluczowe: redystrybucja naprężeń w zginanych przekrojach żelbetowych, osłabienie belki otworem, efekty zarysowania przekroju.

1. Wstęp

W praktyce inżynierskiej występują potrzeby wykonywania otworów w elementach żelbetowych stropów belkowych w istniejących obiektach. Otwory te służą do montażu przewodów wszelkiego rodzaju instalacji, które są prowadzone pod sufitem pomieszczeń w obiektach przemysłowych, handlowych, użyteczności publicznej i innych. Wynikają one z podjętej przebudowy lub modernizacji tych obiektów. Współcześnie jest wykonywanych wiele modernizacji budynków biurowych, które są wyposażane w systemy wentylacyjno-klimatyzacyjne. Wbudowanie takich instalacji wymaga wykonania otworów w naprężonych elementach konstrukcyjnych, co prowadzi nie tylko do ich osłabienia, ale również zmiany sił w przekroju poprzecznym usytuowanym centralnie w stosunku do wykonanego otworu. W pewnych przypadkach może to nawet wywoływać istotne efekty wytyżeniowe lub skutki deformacyjne.

Zgodnie z teorią żelbetu zdolności betonu do przenoszenia naprężeń rozciągających są pomijane, jeżeli rozważa się nośność przekrojów (Suwalski, 1963). Wynika stąd, że w obszarach elementu konstrukcyjnego, gdzie występują naprężenia rozciągające usunięcie betonu nie skutkuje ujemnymi efektami obliczeniowymi z uwagi na stan graniczny konstrukcji. Zauważyć jednak należy, że beton rozciągany ma duży wpływ na sztywność elementów żelbetowych. Współdziałając ze zbrojeniem

poprzez przyczepność usztywnia je, przez co zmniejszają się znacznie odkształcenia i ugięcia elementu żelbetowego. Wytrzymałość na rozciąganie i zdolności plastyczne betonu rozciąganego decydują o siłach rysujących przekroje. Powyższe spostrzeżenia należy mieć na uwadze w analizie podjętego problemu.

Celem pracy jest przedstawienie sposobu analizy zmiany wytyżenia przekrojów poprzecznych belek żelbetowych, które są wywoływane wykonaniem otworów. Decyzję o umiejscowieniu i średnicy otworu należy umotywić wynikami analiz. Przykłady takich analiz zamieszczono w pracy.

2. Ogólna metoda analizy

Wykonywanie otworów w naprężonych elementach konstrukcyjnych prowadzi do zmiany rozkładu naprężeń i wywołuje lokalne efekty koncentracji naprężeń. Zmiany te to redystrybucja naprężeń na skutek lokalnych procesów odciążenia i dociążenia zachodzących w obszarze otaczającym wykonany otwór. Fakt ten był wykorzystywany w doświadczeniach do wyznaczania naprężeń w elementach konstrukcyjnych poddanych działaniu nieusuwalnych, bliżej nieokreślonych obciążeń zewnętrznych. Stosowana była tzw. metoda trepanacji, która polegała na pomiarze odkształceń wokół otworu, powstających na skutek wykonania tego otworu (Dyłał i Orłoś, 1986). Opracowano metodykę interpretacji

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: g.bak@pb.edu.pl

wyników pomiarów tak wywołanych odkształceń. Podstawą interpretacji było rozwiązanie zadania teorii sprężystości o koncentracji naprężeń w tarczy z otworem wykonanej z jednorodnego materiału liniowo-sprężystego, nie wykazującego lepkości materiałowej. Metoda była polecana do badania elementów metalowych, z uwagi na wysoką zgodność stali z modelowym materiałem liniowo-sprężystym. Zastosowanie tej procedury do wyznaczania naprężeń w elementach żelbetowych nie wydaje się zasadne. Beton jest ciałem pseudo stałym oraz silnie niejednorodnym z powodu swojej struktury, jak również występowania zarysowań i mikrorys wywołanych skurczem zaczynu cementowego. Wykazuje ponadto cechy reologiczne, w tym opóźnienie sprężyste. Jego reakcja odkształceniowa jest wrażliwa na procesy obciążenia – odciążenia, w których różnicują się parametry materiałowe. Nie są one dobrze rozpoznane. Właściwości mechaniczne betonu znacznie odbiegają więc od modelu odkształceniowego idealnego materiału sprężystego, a taki właśnie model jest podstawą badania naprężeń według metody trepanacji. Można prognozować, że efekty koncentracji naprężeń są zmniejszane wymienionymi właściwościami betonu.

Sposób oceny efektów wyężeniowych, które spowoduje wykonanie otworów w belce żelbetowej, zaproponowano według następujących przesłanek:

1. wyężenie elementu zginanego zdominowane jest jednokierunkowym, osiowym stanem odkształcenia i naprężenia,
2. wykonanie otworu to przecięcie odkształconych i naprężonych warstw belki, które powoduje eliminację tych warstw z dalszego wyężenia oraz wywołuje samo zrównoważony układ sił lokalnie dociążający przekrój poprzeczny rygla,
3. ilościowo efekty dociążenia mogą być wyznaczone na podstawie analizy stanu naprężenia w przekroju poprzecznym rygla, poprowadzonym przez oś otworu.

Jest oczywistym, że należy unikać wykonywania otworów na przypodporowych odcinkach, z uwagi na znaczne zagęszczenie zbrojenia poprzecznego w postaci strzemion i prętów odgiętych. Również wykonanie otworów na odcinkach obejmujących zginane przekroje krytyczne może powodować niekorzystny efekt eliminacji betonu rozciąganego ze współpracy ze zbrojeniem rozciągającym.

Naturalną lokalizacją otworów powinny być miejsca w otoczeniu małych wartości momentów oraz sił poprzecznych. Realizacja takiego postulatu jest korzystniejsza w przypadku belki ciągłej niż w przypadku belki swobodnie podpartej. W belce ciągłej występuje w przęsłach odcinek zmiany znaku momentu zginającego. Z uwagi na zmienność obciążenia użytkowego przekrój z zerowym momentem zginającym zmienia położenie. Z tego powodu należy zakładać pewne wyężenie przekroju przeznaczonego do realizacji otworu. Do analiz przyjmujemy, że przekrój belki poprowadzony przez oś projektowanego otworu, może być wyężony w fazie Ib, tzn. będzie wykazywał efekty uplastycznienia betonu rozciąganego.

Celem określenia skutków wykonania otworu, sformułujemy równania umożliwiające określenie

redystrybucji odkształceń i naprężeń w przekroju poprzecznym belki. Będą one opisywać zachowanie przekroju, przed i po wykonaniu otworu. Wyznamy teoretyczną zależność $M-k$ obciążania przekroju przyjmując model odkształceniowy betonu na podstawie propozycji Hognestadta przyjętej w rekomendacjach CEB-FIB (1990). Model ten definiuje zachowanie betonu ściskanego następującą formułą

$$\sigma = f_{cm} \frac{\eta(k - \eta)}{1 + (k - 2)\eta} \quad (1)$$

gdzie oznaczono

$$\eta = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c1}},$$

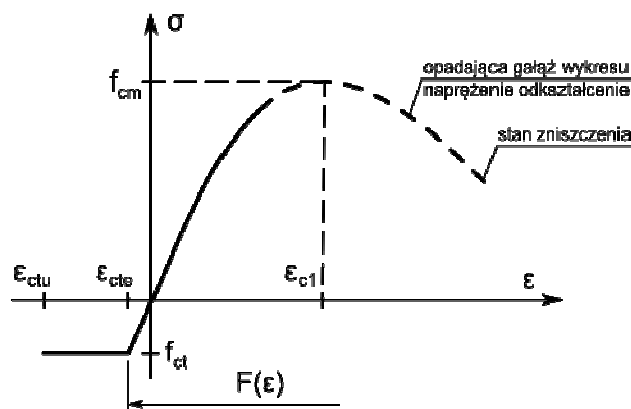
$$\varepsilon_{c1} = 0.7 f_{cm}^{0.31},$$

(2)

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 [MPa]$$

$$k = 1.1 \frac{\varepsilon_{c1} E_{cm}}{f_{cm}}, \quad E_{cm} = 22 \cdot (0.1 f_{cm})^{0.3} [GPa]$$

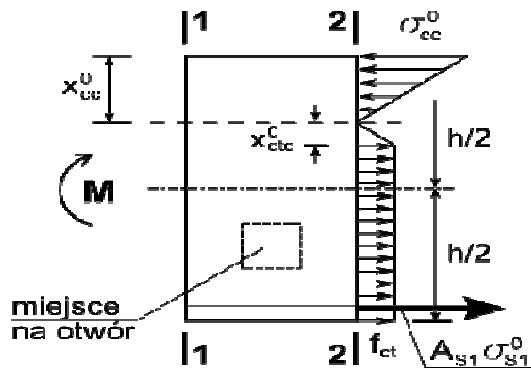
Zależność (1) ujmuje właściwości nieliniowe betonu, z efektem osłabienia włacznie – opadająca krzywa w zakresie odkształceń $\varepsilon > \varepsilon_{c1}$. Zakresu tych odkształceń nie będziemy analizować. Skoncentrujemy się na uzupełnieniu tego prawa fizycznego w zakresie rozciągania. W otoczeniu odkształceń $\varepsilon = 0$ zależność (1) jest quasi-liniowa. Wykorzystamy ten fakt i założymy, że formuła (1) może opisywać poprawnie zachowanie betonu również w ograniczonym zakresie małych odkształceń rozciągających (0, ε_{cte}). W zakresie tych odkształceń nie jest przekraczana wytrzymałość betonu na rozciąganie f_{ct} . Założymy, że po osiągnięciu f_{ct} beton rozciągany deformuje się idealnie plastycznie i ulega zarysowaniu po osiągnięciu odkształcenia granicznego $\varepsilon_{ctu} = 2\varepsilon_{cte}$. Model odkształceniowy betonu, uszczegółowiony w zakresie odkształceń rozciągających, jest przedstawiony na rys. 1.



Rys. 1. Wykres σ - ε dla betonu z idealną, ograniczoną, idealną półką plastyczną przy rozciąganiu

Sposób analizy wyężenia przekroju żelbetowego z uwzględnieniem uplastycznienia betonu strefy rozciąganej jest podany w PN-84/B-03264 Konstrukcje

betonowe – żelbetowe i sprężone. Obliczenia statyczne i projektowanie. W przypadku, w którym nie występuje rysa (faza Ib), rozkład naprężeń przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Rozkład naprężeń w przekroju bez otworu w przypadku fazy Ib

Układ równań równowagi przekroju teowego przed wykonaniem otworu jest jak niżej.

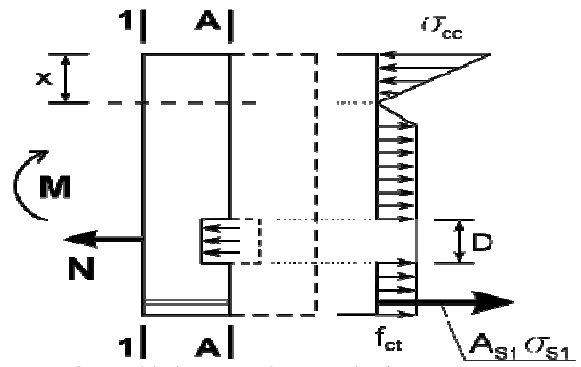
$$\left[b_t - (b_t - b) \left(1 - \frac{t}{x^0} \right)^2 \right] \frac{x^0}{2} \sigma_{cc}^0 - (h - x^0 - D) b f_{ct} - A_{S1} \sigma_{S1}^0 = 0 \quad (3)$$

$$\left[b_t - (b_t - b) \left(1 - \frac{t}{x^0} \right)^3 \right] \frac{(x^0)^2}{3} \sigma_{cc}^0 + \frac{b(h - x^0)^2}{2} f_{ct} + A_{S1} \sigma_{S1}^0 (d - x^0) - M = 0$$

Wielkości z górnym indeksem „0” dotyczą stanu przed wykonaniem otworu. Równania (3) opisują w sposób przybliżony stan wyteżenia przekroju w fazie Ib, ponieważ zaniedbano w nich quasi-liniową część wykresu naprężeń rozciągających w przekroju poprzecznym belki. Nie występuje wielkość niewiadoma x_{cc}^0 , którą przyjęto jako równą zero. Równania (3) obowiązują jeżeli $x \geq t$. Zależność pomiędzy niewiadomymi σ_{cc} oraz σ_{S1} należy ustalić na podstawie założenia płaskiego przekroju dla przyjętej wartości odkształcenia w dolnej warstwie betonu rozciąganego. Można w tym celu kierować się wartościami odkształceń granicznych ε_{ctw} , które szacuje się na 0,1‰ albo 0,18‰ (Suwalski, 1963). Ta druga z wymienionych wartości jest właściwa dla silnego zbrojenia rozciągającego usytuowanego w dolnej części przekroju.

Po wykonaniu otworu należy analizować przekrój niespójny i jest konieczne rozważenie kilku sytuacji szczegółowych z uwagi na nie wystąpienie, albo wystąpienie zarysowania. W tym ostatnim przypadku intensywność zarysowania mierzona wysokością rysy może być różna. Rysa może obejmować tylko część przekroju poniżej dolnej krawędzi otworu, wnikać w przestrzeń otworu, albo uwidaczniać się powyżej otworu.

W przypadku nie wystąpienia zarysowania rozkład naprężeń przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Rozkład naprężeń w przekroju z otworem przy zachowaniu fazy Ib

Odpowiadający układ równań równowagi przekroju ma wówczas postać jak niżej.

$$\left[b_t - (b_t - b) \left(1 - \frac{t}{x} \right)^2 \right] \frac{x}{2} \sigma_{cc} - (h - x - D) b f_{ct} - A_{S1} \sigma_{S1} + N = 0 \quad (4)$$

$$\left[b_t - (b_t - b) \left(1 - \frac{t}{x} \right)^3 \right] \frac{x^2}{3} \sigma_{cc} + \frac{b(h - x)^2}{2} f_{ct} + A_{S1} \sigma_{S1} (d - x) - 2N \left(\frac{h}{2} + e_0 - x \right) - M = 0 \quad (5)$$

W równaniach (4) i (5) występuje siła odprężająca N powstała na skutek „przecięcia” odwiertem naprężonych (umownych) warstw belki. W analizowanym przypadku jest ona rozciągająca dla przekroju centralnego przez otwór i równa

$$N = b D f_{ct} \quad (6)$$

Siła ta wywołuje dodatkowy moment zginający w przekroju poprzecznym. Po wykonaniu otworu przekrój belki jest lokalnie mimośrodowo rozciągany. Stan odkształceń i naprężeń może odpowiadać fazie po wystąpieniu zarysowania, która w teorii żelbetu nie jest zwykle analizowana, a którą można określić mianem fazy formowania się rysy normalnej. Pomijanie całej strefy naprężeń rozciągających w betonie ponad wierzchołkiem rysy jest nieuzasadnione.

Rozwiązania układów równań (4) i (5) wymagają ustalenia relacji pomiędzy podstawowymi niewiadomymi, wartościami maksymalnego naprężenia w strefie ściskanej betonu oraz naprężeniami w stali zbrojeniowej. W tym celu wykorzystujemy hipotezę płaskiego przekroju, z której wynika liniowo zmienny rozkład odkształceń na wysokości przekroju. Wyrażając zasadę współpracy betonu i stali zbrojeniowej zgodnością odkształceń w przyległych warstwach, ustalimy na tej podstawie zależność pomiędzy naprężeniami krawędziowymi. Równania równowagi uzupełnione o tą zależność stają się oznaczone. Można więc określić miary redystrybucji naprężeń krawędziowych

$$\Delta \sigma_{cc} = \sigma_{cc} - \sigma_{cc}^0, \quad \Delta \sigma_{S1} = \sigma_{S1} - \sigma_{S1}^0 \quad (7)$$

Szczegółowej postaci wzorów na $\Delta\sigma_{cc}$ i $\Delta\sigma_{s1}$ nie podajemy, ponieważ są one rozbudowane, a analizowany przypadek braku zarysowania po wykonaniu otworu nie wyczerpuje innych sygnalizowanych przypadków. Efektywnym sposobem poszukiwania może być metoda numeryczna opracowana jako procedura iteracyjna.

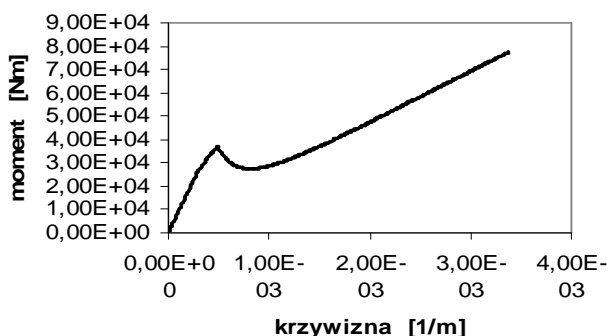
3. Metoda numeryczna

Wyniki na redystrybucję naprężeń można uzyskać wykorzystując podejście numeryczne do wyznaczania naprężeń w żelbetowym przekroju poprzecznym. W podejściu tym przekrój traktujemy jako układ warstw betonowych i stalowych deformujących się zgodnie hipotezą płaskiego przekroju i lokalną zasadą współpracy przyległych warstw obydwu materiałów. Jeżeli stopień zbrojenia jest znaczny w modelu można uwzględnić efekt betonowego przekroju netto. Przy typowych stopniach zbrojenia może być on zaniedbany. Prawo fizyczne $\sigma-\epsilon$ dla betonu może być przyjęte w formie (1), a stal zbrojeniową będziemy traktować jako materiał idealnie liniowo-sprężysty. Specyfikowanie plastycznych właściwości nie jest wymagane, jeżeli nie przewidujemy nadmiernego osłabienia przekroju dużym otworem. Na rys. 4 przedstawiono model warstwowy przekroju zdeformowanego siłami przekrojowymi powodującymi zarysowanie. Aktywnie naprężona strefa betonu nie obejmuje całego przekroju.

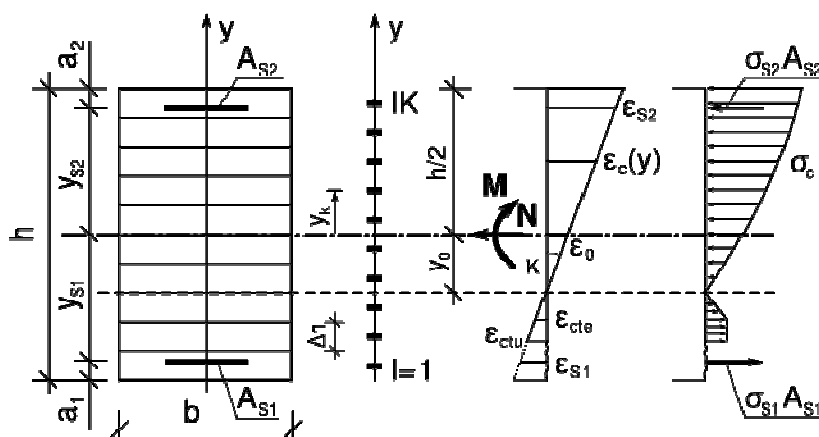
Zasadniczą częścią algorytmu obliczeniowego jest iteracyjne wyznaczanie położenia osi obojętnej dla znanych sił przekrojowych (N , M), z jednoczesnym badaniem wystąpienia zarysowania i jego postępu. Oznaczając przekroje warstw betonowych jako wielkości indeksowane rozstrzygamy w procesie wymuszenia krzywizną o ich trwałym wyzerowaniu, ale po wyznaczeniu poprawnego położenia osi obojętnej i spełnieniu równań równowagi. Analiza jest dwuetapowa. Etap I obejmuje analizę przypadku przekroju bez otworu, poddanego działaniu zadanym momentem zginającym wywołanym obciążeniem zewnętrznym. W etapie II osłabiamy przekrój otworem zerując trwale przekroje

warstw betonowych na wysokości otworu. Przekrój staje się niespójny, a jego dodatkowym obciążeniem jest mimośrodowa siła odprężająca przekrój i jej moment względem osi środkowej przekroju. Spełnienie równań równowagi takiego przekroju mimośrodowo obciążonego umożliwi wyznaczenie redystrybucji naprężeń krawędziowych według (7).

Podkreślenia wymaga, że analiza przekroju żelbetowego z postępującym zarysowaniem prowadzi do wystąpienia efektu niestateczności bezpośrednio po wystąpieniu rysy normalnej. Analitycznie nie był on dotychczas analizowany. Jego występowanie jest konsekwencją postępującej materialnej degradacji przekroju na skutek ograniczonych zdolności odkształceniowych betonu rozciąganego. Teoretyczne przewidywanie pojawienia się tego efektu sygnalizował Suwalski (1963). Jest on też stwierdzany w badaniach eksperymentalnych belek żelbetowych. Pojawienie się każdej rysy ujawnia się pewnymi efektami dynamicznymi. Są one wynikiem zjawiska przeskoku do nowego, jakościowo i ilościowo różnego stanu równowagi. Efekty dynamiczne występują podczas procesu obciążania sterowanego siłą, której wartość nie zależy od deformacji belki. Efekty dynamiczne nie były analizowane w omawianym programie komputerowym, ponieważ analizowano proces obciążania sterowany krzywizną osi belki. Mogą być one znaczne w przypadku belek słabo zbrojonych. Uzyskaną zależność $M-k$ ilustruje krzywa na rys. 5.



Rys. 5. Zależność moment – krzywizna dla prostokątnego przekroju żelbetowego zginanego ze zbrojeniem rozciągającym o stopniu zbrojenia $\rho_{s1} = 0,7\%$



Rys. 4. Warstwowy model przekroju żelbetowego

4. Wyniki analiz numerycznych

Przedstawimy wyniki liczbowe dla danych:

- przekrój belki 0,25 x 0,50m;
- beton: $f_{ck} = 20$ MPa, $\varepsilon_{cl} = 2,2\%$, $f_{ct} = 2,0$ MPa;
- stopień zbrojenia rozciąganego: $\rho_{Sl} = 0,7\%$;
- krzywizna stowarzyszona z maksymalnie wyiężonym stanem według fazy Ia;
- $k_{la} = 2,25 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ (maksymalne odkształcenie betonu w warstwie I = 1, równe ε_{cte});
- wartość momentu rysującego przekrój zginany $M_f = 37,0 \text{ kNm}$;
- krzywizna stowarzyszona z M_f :
 $k_f = 4,95 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1} = 2,20 k_{la}$.

Będziemy analizować wykonanie odwiertu w stanie bezpośrednio poprzedzającym zarysowanie przekroju poprzecznego.

Celem przeprowadzenia analizy utworzono warstwowy model przekroju przyjmując liczbę warstw betonowych równą 1000, tzn. grubość warstwy wynosiła 0,0005m. Warstwy numerowano od krawędzi dolnej przekroju.

Przypadek 1: otwór o średnicy $D = 80 \text{ mm}$, z środkiem umiejscowionym na poziomie warstwy 350. Numery warstw krawędziowych otwory były więc – dolnej 269, górnej 429. Siła odprężająca wynosiła $N = -25,7 \text{ kN}$. Moment tej siły względem osi środkowej wynosił $\Delta M = 2,13 \text{ kNm}$. Sumaryczny moment zginający w przekroju $\Sigma M = 37,0 + 2,13 = 39,13 \text{ kNm}$.

Wartości sił przekrojowych i krzywizn w stanach równowagi przekroju:

- nieosłabionego otworem, w stanie tuż przed zarysowaniem:
 - położenie osi obojętnej 510/511 (1000), strefa zarysowana (0);
 - uplastycznienie strefy rozciąganej betonu obejmowało 255 warstwę,
 - wyiężenie skrajnego włókna ściskanego betonu: $\varepsilon_{cc} = 0,121 \cdot 10^{-3} \Rightarrow \sigma_{cc} = 3,60 \text{ MPa}$,
 - wyiężenia zbrojenia rozciąganego A_{Sl} : $\varepsilon_{Sl} = -0,124 \cdot 10^{-3}$, $\sigma_{Sl} = -21,12 \text{ MPa}$,
- osłabionego otworem
 - wartość sił przekrojowych ($N = 25,7 \text{ kN}$, $\Sigma M = 39,13 \text{ kNm}$),
 - wartość krzywizny $k = 17,76 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1} = 3,62 k_f = 7,81 k_{la}$;
 - położenie osi obojętnej 753/754;
 - warstwy strefy zarysowanej (1 ÷ 430 / 1000);
 - uplastycznienie strefy rozciąganej betonu obejmuje 710 warstwę,
 - naprężenia w zbrojeniu rozciągającym A_{Sl} , $\varepsilon_{Sl} = -0,59 \cdot 10^{-3}$, $\sigma_{Sl} = -121,2 \text{ MPa}$,
 - odkształcenie w skrajnym włóknie ściskanym $\varepsilon_{cc} = 0,217 \cdot 10^{-3} \Rightarrow \sigma_{cc} = 6,14 \text{ MPa}$.

Wniosek z analizy przypadku 1

Wykonanie otworu może spowodować zmiany naprężeń w betonie o $\Delta \sigma_{cc} = 2,54 \text{ MPa}$, a w zbrojeniu rozciągającym nawet o $\Delta \sigma_{Sl} = 100,1 \text{ MPa}$.

Przypadek 2: otwór o średnicy $D = 160 \text{ mm}$, z środkiem na poziomie 449 warstwy. Numery warstw krawędziowych otworu były więc następujące: dolna 289, górna 609. Siła odprężająca wynosiła $N = -19,1 \text{ kN}$. Moment tej siły względem osi środkowej wynosił $\Delta M = 1,87 \text{ kNm}$. Sumaryczny moment zginający w przekroju $\Sigma M = 37,0 + 1,87 = 38,87 \text{ kNm}$.

Wartości sił przekrojowych i krzywizn w stanach równowagi przekroju

- nieosłabionego otworem, są takie same jak poprzednio;
- osłabionego otworem
 - wartość sił przekrojowych ($N = -19,1 \text{ kN}$, $\Sigma M = 38,87 \text{ kNm}$).
 - wartość krzywizny $k = 17,76 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1} = 3,62 k_f = 7,81 k_{la}$;
 - położenie osi obojętnej 748/749;
 - warstwy strefy zarysowanej (1 ÷ 609 / 1000);
 - uplastycznienie strefy rozciąganej betonu obejmuje warstwy (610 ÷ 660),
 - naprężenia w zbrojeniu rozciągającym A_{Sl} , $\varepsilon_{Sl} = -0,57 \cdot 10^{-3}$, $\sigma_{Sl} = -117,5 \text{ MPa}$,
 - odkształcenie w skrajnym włóknie ściskanym $\varepsilon_{cc} = 0,216 \cdot 10^{-3} \Rightarrow \sigma_{cc} = 6,12 \text{ MPa}$.

Wniosek z analizy przypadku 2

Wykonanie otworu o średnicy znacznie większej niż w przypadku 1, nie spowodowało istotnych zmian w redystrybucji naprężeń w przekroju centralnym otworu.

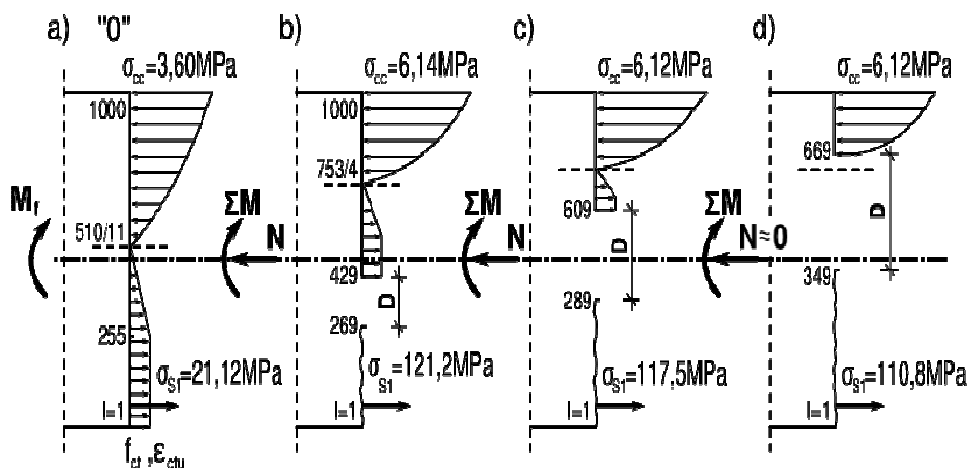
Przypadek 3: otwór o średnicy $D = 160 \text{ mm}$, z środkiem na poziomie 509 warstwy, a więc w osi obojętnej przekroju. Numery warstw krawędziowych otworu są: dolnej - 349, górnej - 669. Globalna siła odprężająca wynosi $N \approx 0 \text{ kN}$. Ponieważ odwiert narusza warstwy ściskane i rozciągane, to na skutek odwiertu pojawia się moment dodatkowy. Jego wartość była równa 0,17 kNm. Sumaryczny moment zginający w przekroju zmienił się więc nieznacznie i wyniósł $\Sigma M = 37,17 \text{ kNm}$. Przekrój doznaje głównie osłabienia i z tego tylko powodu następuje redystrybucja naprężeń.

- wartość krzywizny $k = 16,28 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1} = 3,29 k_f = 7,23 k_{la}$;
- położenie osi obojętnej 745/746;
- warstwy strefy zarysowanej (1 ÷ 669 / 1000);
- wyiężenie zbrojenia rozciąganego A_{Sl} , $\varepsilon_{Sl} = -0,54 \cdot 10^{-3}$, $\sigma_{Sl} = -110,8 \text{ MPa}$,
- wyiężenie skrajnej warstwy ściskanej betonu $\varepsilon_{cc} = 0,207 \cdot 10^{-3} \Rightarrow \sigma_{cc} = 5,89 \text{ MPa}$.

Wniosek z analizy przypadku 3

Wykonanie otworu o średnicy $D = 160 \text{ mm}$ w otoczeniu osi obojętnej nieznacznie zmniejsza wyiężenie przekroju w stosunku do przypadku 2. Położenie otworu jest centralne w stosunku do teoretycznej osi obojętnej. Nie powstaje siła odprężająca, a tylko pewien moment dodatkowy. Stan naprężenia w przekroju jest zbliżony do stanu właściwego fazy IIa. Strefa aktywna betonu obejmuje tylko część ściskaną. Nie występuje strefa naprężeń rozciągających.

Ilustrację uzyskanych wyników przedstawiono na rys. 6.



Rys. 6. Wyniki redystrybucji naprężeń w przekroju na skutek odwiertu, a) stan naprężeń odpowiadający założonemu stanowi pierwotnemu dla wartości momentu rysującego M_f , b) przypadek 1: otwór o średnicy $D = 80 \text{ mm}$, c) przypadek 2: otwór o średnicy $D = 160 \text{ mm}$, d) przypadek 3: otwór o średnicy $D = 160 \text{ mm}$ położony centralnie w stosunku do teoretycznej osi obojętnej przekroju żelbetowego

5. Wnioski

W pracy przedstawiono sposób określenia redystrybucji naprężeń w betonie i zbrojeniu zginanego przekroju żelbetowego. Wskazano, że użyteczna analiza powinna bazować na sprężysto-plastycznym modelu odkształcenia betonu w zakresie odkształceń rozciąganych, z ograniczeniem zdolności deformacyjnych do granicznej wartości ε_{ctu} . Wykonanie otworu powoduje nie tylko osłabienie przekroju belki, ale wywołuje lokalną siłę odprężającą oraz dodatkowy moment zginający. Przekrój pierwotnie zginany przechodzi w stan mimośrodowego rozciągania, rzadziej ściskania.

Prognozowanie skutków wykonania otworu w istniejącej naprężonej belce bezpiecznie jest przyjąć założenie, że przekrój znajduje się bezpośrednio przed stanem zarysowania. Efekty redystrybucji naprężeń są wówczas największe. Zależą one od średnicy otworu oraz jego usytuowania na wysokości przekroju poprzecznego belki. Korzystne jest sytuowanie otworu w otoczeniu osi obojętnej. Nie występuje wówczas siła odprężająca, ale generuje się nieznaczny, dodatkowy moment odprężenia warstw betonowych belki. Przekrój pozostaje zginany, ale jest niespójny materiałowo – jest osłabiony otworem. Konsekwencją tego osłabienia może być brak strefy naprężeń rozciągających w betonie i „obcięcie” wysokości strefy ściskanej.

Literatura

- Bąk G. (2008). Efekty utraty stabilności procesu odkształcania przekrojów żelbetowych. *Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej*, Budownictwo z. 32, 2008, 21–34.
- CEB-FIB (1990). Model Code for Concrete Structures. *Comite Euro-International du Beton – Federation Internationale de la Precontrainte*. T. Telford, Lausanne.
- Dyląg Z., Orłoś Z. (1986). *Metody doświadczalne w mechanice*. PWN, Warszawa.
- Suwalski L. (1963). *Żelbet*. Arkady, Warszawa.

STRESS REDISTRIBUTION IN RESULT OF OPENING EXECUTED IN REINFORCED CONCRETE BEAM

Abstract: The paper deals with the manner of analyzing of stress redistribution effects caused by the made hole in the existing reinforced concrete beam. The analysis bases on determination of stress redistribution in the cross-section of the reinforced bar being under the phase of ideal plasticizing concrete in tension. It is indicated that making the hole generates additional a local self-balancing loads which must be take into account as the additional load of the weakened cross-section. A numerical approach to determining the states of stresses while propagating of the normal crack in the cross-section is proposed. This approach enables to catch the lack of local stability of loading process which makes the curvature essentially increases.

Pracę wykonano w ramach realizacji zadania statutowego S/WBIS/2/08 realizowanego w Politechnice Białostockiej