

W ramach realizowanego przez miesięcznik „Builder” programu „Wspieramy młodych inżynierów budownictwa” dajemy możliwość pierwszych publikacji naukowych młodym doktorantom.



Marcelina Jakubczyk, Justyna Nycz
Wydział Inżynierii Lądowej
Politechnika Krakowska



Opiekun naukowy:
dr inż. Rafał Szydłowski
Instytut Materiałów
i Konstrukcji Budowlanych
Politechnika Krakowska

Tarcze, inaczej belki-ściany, to ustroje powierzchniowe obciążone w ich płaszczyznach środkowych. Jeżeli wysokość elementu przekracza 1/4 rozpiętości, to taki element traktujemy jako tarczę, w przeciwnym wypadku jako belkę. Rozkład naprężeń w przekroju tarczy, w odróżnieniu od belki, ma przebieg krzywoliniowy. Elementy tarczowe stanowią poziome (dla obciążeń poziomych) lub pionowe nośne elementy konstrukcyjne.

Stan odkształceń i naprężeń

W przypadku tarcz cienkościennych $h \ll a, b$ wszystkie naprężenia działają w jej płaszczyźnie środkowej, a więc mamy do czynienia z płaskim stanem naprężeń.

Rozkład naprężeń zależy od kształtu tarczy, działających na nią obciążeń, a także schematu statycznego. Te zależności, na przykładzie jednorodnej materiałowo tarczy jednorodnej, przedstawiono na rysunku 1. Im większy stosunek wysokości do rozpiętości, tym bardziej krzywoliniowy rozkład naprężeń. Ponadto gdy na tarczę działa obciążenie przyłożone na małym odcinku o długości $0,1l$, naprężenia na krawędzi gwałtownie rosną (rys. 1b), podczas gdy w przypadku obciążenia ciągłego wzrost ten jest zdecydowanie bardziej łagodny (rys. 1a).

Kształtowanie otworów drzwiowych

W tarczach można zauważyć charakterystyczny przebieg trajektorii naprężeń głównych przypominający łuk ze ściąganiem. Rozkład ten schematycznie przedstawiono na

TARCZA ŻELBETOWA

Elementy tarczowe są powszechnie wykorzystywane w wielu konstrukcjach żelbetowych. Tarcze, czyli belki wysokie, są elementami nośnymi przenoszącymi obciążenia pionowe i poziome, często także pełnią rolę stężeń. Dzięki swojej strukturze dają sposobność przekraczania dużych rozpiętości i mogą zastępować inne elementy nośne w budynkach trójkondygnacyjnych.

rysunku 2. Z drugiej strony często w budynkach zachodzi konieczność lokalizowania otworów drzwiowych w ścianach – tarczach. Ich położenie powinno być tak dobrane, aby w jak najmniejszym stopniu zakłócały pracę łuku ze ściąganiem. Lokalizacja otworów drzwiowych w miejscu, gdzie przecinają łuk naprężeń ściskających, powoduje koncentrację naprężeń w pobliżu krawędzi otworu i problem z przeniesieniem obciążeń pionowych na podpory (rys. 2.). Otwory należy wówczas sytuować z dala od podpór, blisko środka rozpiętości elementu.

Obliczanie i konstruowanie zbrojenia

Odpowiednie ukształtowanie zbrojenia jest istotne dla prawidłowej pracy konstrukcji, a także jej bezpieczeństwa i trwałości. W jednomateriałowych tarczach zbrojenie dobiera się drogą głównych naprężeń rozciągających występujących w każdym punkcie tarczy. Zbrojenie przyjmuje się w taki sposób, by przeniosło powstające naprężenia rozciągające. Zbrojenie nośne przesuwa się w całości do podpory, zapewniając odpowiednie zakotwienie, natomiast dla zbrojenia podporowego zalecane jest, aby nie mniej niż połowa przebiegała przez całą długość elementu. Dodatkowo, dla zabezpieczenia, powinno się umieścić minimum dwa pręty przy górnej krawędzi tarczy. Wykonanie otworu w tarczy jedynie przy stosunkowo dużym otworze skutkuje zmianą układu zbrojenia, natomiast przy małym wystarczające jest lokalne dozbrojenie strefy okolicy otworu, zgodnie z zasadą rozmieszcze-

nia całego zbrojenia przypadającego na powierzchnię otworu w strefach jego krawędzi.

Ponadto, prócz zbrojenia głównego, układa się zbrojenie uzupełniające w postaci siatki ortogonalnej o polu przekroju $A_{s, bdmin} = 0,001A_c$, ale nie mniej niż $150 \text{ mm}^2/\text{m}$ w każdym kierunku, gdzie A_c jest polem odpowiedniego przekroju poprzecznego elementu. Rozstaw prętów siatki nie powinien przekraczać 300 mm oraz podwójnej grubości ściany. W strefie podparcia oraz lokalnego dozbrojenia strefy otworu wymagane jest dwukrotne dogęszczenie siatki.

Tarcza żelbetowa poddasza jako rozwiązanie eliminujące słup

Prezentowany przypadek dotyczy budynku trójkondygnacyjnego zlokalizowanego w Tyńcu. W budynku tym już po rozpoczęciu budowy (po wykonaniu fundamentów) szukano sposobu usunięcia słupa w piwnicy (zaznaczonego na rysunku 3.). Po usunięciu słupa rozpiętość zaprojektowanej pierwotnie belki stropowej o przekroju 300 x 500 mm wynosiła 9,98 m. W niniejszej pracy dokonano porównania rozważanych rozwiązań przeniesienia obciążeń z wyższych kondygnacji po wyburzeniu słupa w piwnicy. Rozważano różne warianty, takie jak: wykonanie sprężenia zaprojektowanej pierwotnie belki żelbetowej (wariant I), wykorzystanie belki stalowej (wariant II). Ostatecznie zdecydowano w miejsce ściany murowanej poddasza (rys. 3b) wykonać żelbetową tarczę, a dwa stropy niższych kondygnacji podwiesić do niej (wariant III).

Dla każdego przypadku stworzono dwuwymiarowe modele w programie Dlubal RFEM, dla wariantu I oraz II jest to jednokondygnacyjna rama, natomiast w wariantcie III – trójkondygnacyjna rama z tarczą w przetrzeniu poddasza.

Wariant I – wykonanie sprężenia

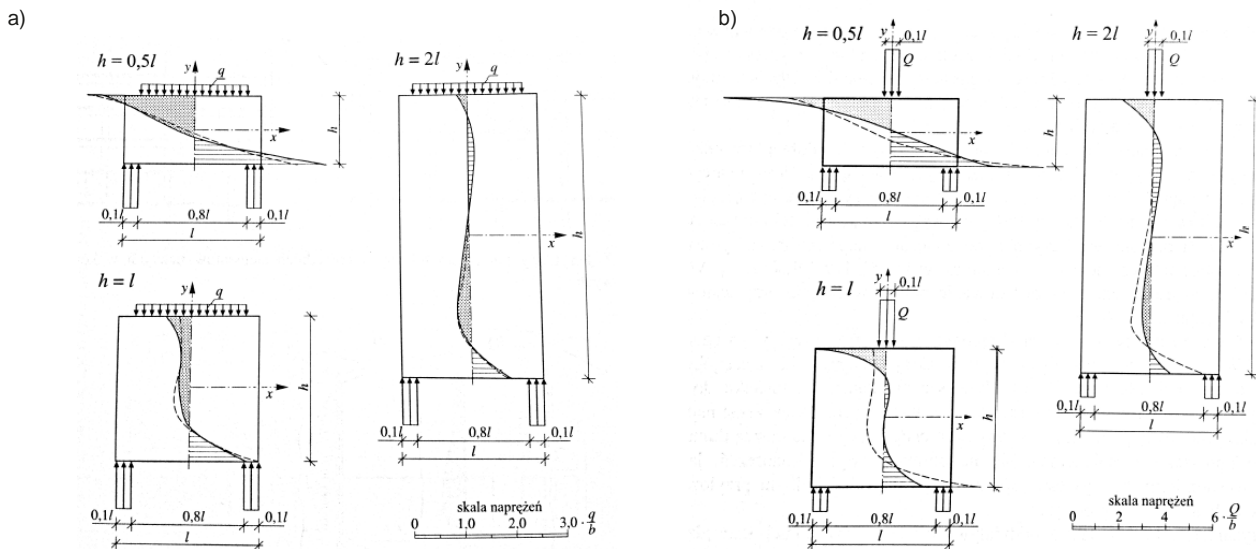
Przeanalizowano możliwość wprowadzenia sprężenia w belkę żelbetową o przekroju 300 x 500 mm, której wysokość przekroju poprzecznego mogła zostać powiększona o 100 mm. Rysunek 4. przedstawia wykres momentów zginających dla belki żelbetowej o wysokości 600 mm. W charakterystycznej kombinacji obcią-

żeń maksymalny moment zginający wynosi $M_{max} = 1217,7$ kNm, a maksymalne naprężenia rozciągające wynoszą $\sigma = 67,6$ MPa. Zakładając kable siedmiosplotowe o powierzchni $A_c = 7 \times 150 \text{ mm}^2$, obliczono, że aby zrównoważyć naprężenia rozciągające, potrzeba trzech kabli. Wprowadzenie tak dużego sprężenia w tak mały przekrój wymaga kilkuetapowego sprężenia i jest zbyt czasochłonne oraz kosztowne w takiej realizacji.

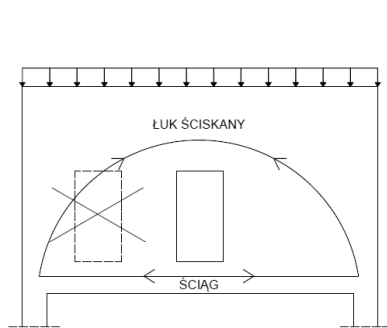
Wariant II – wykorzystanie belek stalowych

Kolejną możliwością było oparcie stropu na belce stalowej złożonej z dwóch ustawio-

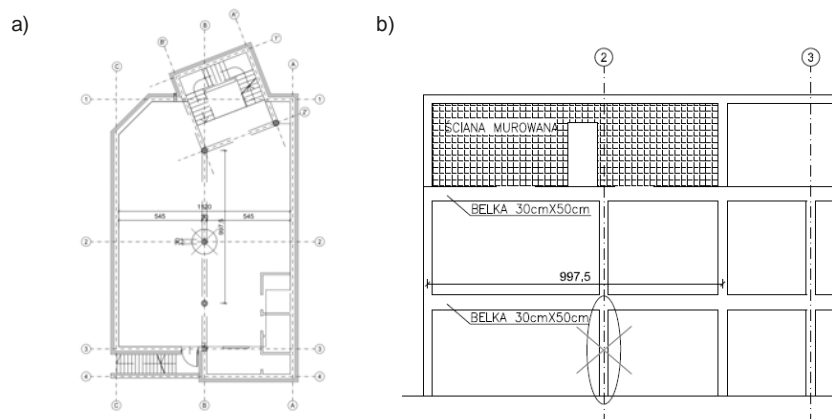
nych obok siebie dwuteowników normalnych IPN 550. Rysunek 5. przedstawia wartości obliczeniowe momentów zginających w takiej belce. Maksymalny obliczeniowy, przęsłowy moment zginający dla rozpatrywanej belki wynosi 1786,4 kNm. Wykonano obliczenia, z których wynika, że aby nośność była spełniona, dwuteowniki powinny być wykonane ze stali S335. Takie rozwiązanie jest kosztowne, ponieważ kształtowniki musiałyby być wykonane na specjalne zamówienie. Uzyskana wartość momentu przęsłowego została ponadto obliczona przy założeniu sztywnego połączenia słupów z belką stalową, co wymagałoby odpowiedniego ukształtowania połączenia.



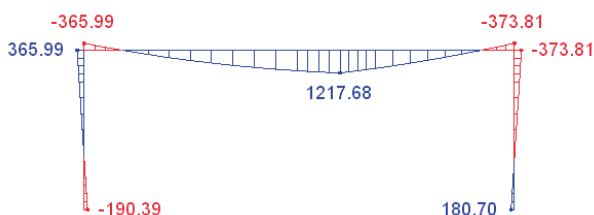
Rys. 1. Wykresy zależności naprężeń σ_x w tarczach od stosunku h/l , a) obciążonych w sposób ciągły obciążeniem q , b) obciążonych siłą Q [3]



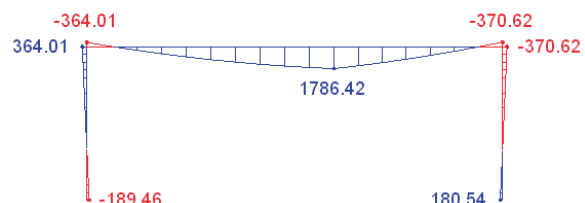
Rys. 2. Schemat trajektorii naprężeń ściskających i rozciągających w tarczy oraz dobra i zła lokalizacja otworu drzwiowego



Rys. 3. a) Rzut budynku w kondygnacji piwnicy, b) przekrój podłużny w osi B



Rys. 4. Wykres momentów zginających – wartości charakterystyczne



Rys. 5. Wykres momentów zginających – wartości obliczeniowe

Wariant III – tarcza żelbetowa w kondygnacji poddasza

Ostatnim rozpatrywanym wariantem, i ostatecznie przyjętym, było wykonanie żelbetowej tarczy w poddaszu. Na poddaszu pierwotnie zaprojektowana była ściana murowana, która tylko dociężała konstrukcję. Zaproponowano, aby w jej miejsce wykonać ścianę żelbetową pełniącą rolę tarczy i podwiesić do niej elementy konstrukcji niższych kondygnacji. W takim rozwiązaniu słup środkowej kondygnacji pracuje na rozciąganie, pełniąc rolę wieszaka, na którym zawisła belka nad piwnicą po usunięciu słupa. Jako że otwór drzwiowy w ścianie zlokalizowano prawie w środku rozpiętości tarczy, nie stał się on przeszkodą. Siły rozciągające w osłabionej tarczy zostały przeniesione przez belkę – ściąg. Na rysunku 6. pokazano rozkład sił podłużnych w elementach prętowych utworzonej ramy. Obecność otworu drzwiowego wygenerowała siłę w belce – ściągu o wartości 613,4 kN. Siła w wieszaku wynosi natomiast 452,3 kN.

Na rysunku 7. pokazano zbrojenie słupa wieszaka oraz sposób jego kotwienia. Zastosowano 8 prętów $\phi 20$ mm oraz strzemiona $\phi 8$ co 150 mm.

Zbrojenie belki – ściągu tworzyły 3 pręty $\phi 20$ mm dołem oraz 2 $\phi 12$ mm góra, bie-

gnące przez całą długość belki. Dodatkowo, w strefie pod otworem drzwiowym, zastosowano 4 pręty $\phi 20$ mm.

Na rysunku 8. przedstawiono rozkład naprężeń poziomych (a) oraz pionowych (b) w tarczy. Warto tutaj zaznaczyć, że wysokość nadproża ponad otworem drzwiowym wynosi zaledwie 650 mm. Pomimo tego wartości naprężeń w tym miejscu nie są wysokie. Poziome naprężenia ściskające w nadprożu osiągnęły wartość zaledwie 7,2 MPa. Również naprężenia pionowe są na niskim poziomie. W okolicach otworu drzwiowego zarejestrowano naprężenia rozciągające o wartości maksymalnej 4,7 MPa, a przy podporach naprężenia ściskające o wartości 17,0 MPa.

Tarczę zbrojono siatką z prętów $\phi 10$ mm co 150 mm przy obu powierzchniach. Dodatkowo zastosowano obwodowe zbrojenie otworu drzwiowego w postaci 2 prętów $\phi 12$ mm (pionowo i poziomo) oraz 2 prętów ukośnych, przy każdej powierzchni, zgodnie z zasadami sztuki budowlanej.

Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych analiz stwierdzono, że:

- Sprężenie belki żelbetowej nie jest możliwe nawet po zwiększeniu jej wysokości o 100 mm. Wprowadzenie tak dużego

sprężenia w tak mały przekrój jest trudne i nieopłacalne.

- Zastosowanie dwuteowników w wariantcie II jest bardzo kosztowne z uwagi na ich gabaryty oraz użytą stal wysokiej klasy.
- Najbardziej efektywny, biorąc pod uwagę koszty oraz nakład pracy, jest ostatni rozważany wariant. Podwieszenie elementów konstrukcji do tarczy przez przekonstruowanie zbrojenia pierwotnie zaprojektowanego zapewni bezpieczne przeniesienie obciążeń powstałych po usunięciu słupa w piwnicy.
- Stosunkowo niskim nakładem kosztów, wykorzystując żelbetową tarczę, uzyskano rozpiętość blisko 10 m i atrakcyjne, wolne od podpór wnętrze. ■

Bibliografia

- [1] Rakowski G., Kacprzyk Z., Metoda Elementów Skończonych w mechanice konstrukcji. Warszawa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2016, s. 110.
- [2] Starosolski W., Konstrukcje żelbetowe według Eurokodu 2 i norm związanych. Warszawa, PWN 2012, tom III, s. 263-267.
- [3] Starosolski W., Konstrukcje żelbetowe według Eurokodu 2 i norm związanych. Warszawa, PWN 2012, tom IV, s. 150-242.
- [4] Eurokod 2 PN-EN 1992-1-1 Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków. Warszawa, PWN, 1970.

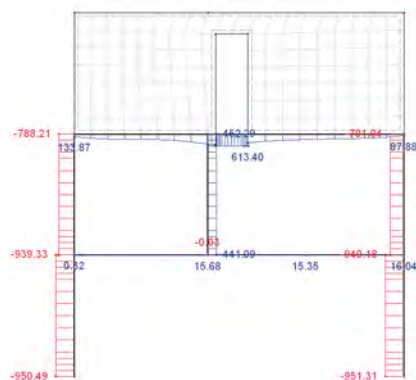
ABSTRACT: TARCZA ŻELBETOWA

W pracy przedstawiono krótką definicję tarcz żelbetowych, rozkład naprężeń, zasady kształtowania otworów drzwiowych i zbrojenia w tarczach. W części zasadniczej przedstawiono przypadek utworzenia tarczy żelbetowej z murowanej ściany poddasza, dzięki czemu możliwe było usunięcie wewnętrzznego słupa w piwnicy budynku trójkondygnacyjnego. Tarcza ze ściągami, do której zostały podwieszone niższe elementy, pozwoliła osiągnąć rozpiętość 10 m. Rozwiązanie to porównano z innymi rozważanymi, takimi jak zastosowanie belek stalowych lub belki sprężonej. **Słowa kluczowe:** tarcze żelbetowe, konstrukcje żelbetowe, zbrojenie, słup

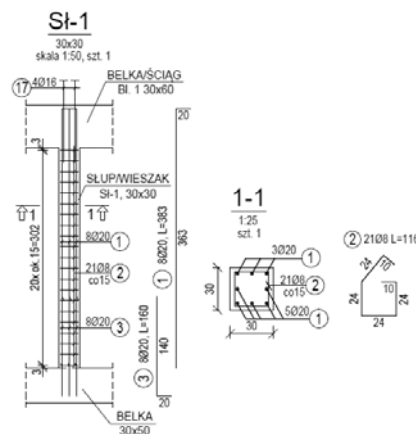
ABSTRACT: REINFORCED CONCRETE DEEP BEAM

The article presents the case of the creating reinforced concrete deep beam instead of brick wall. As a result of this it was possible to remove the inner column in the garage of a 3-story building. Lower elements are suspended to deep beam with tie beam and thanks to that beam reaches a span of 10 meters. The analysis below broaches basing on three various of application of structural elements in that issue. This solution will be compared with others, such as steel beam or prestressed beam.

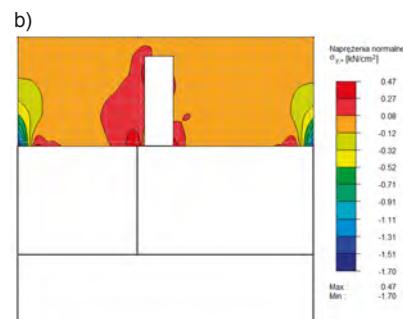
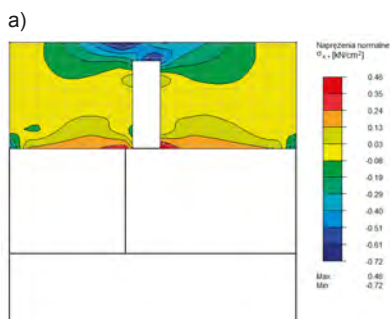
Keywords: reinforced concrete deep beam, reinforced concrete constructions, reinforcement, column



Rys. 6. Wykres sił podłużnych – wartości obliczeniowe



Rys. 7. Rysunek zbrojenia wieszaka



Rys. 8. Rozkład naprężeń w konstrukcji: a) naprężenia poziome, b) naprężenia pionowe