

Nowy system zbrojenia elementów ściskanych stalą o wysokiej wytrzymałości SAS 670/800

Zastosowanie i korzyści

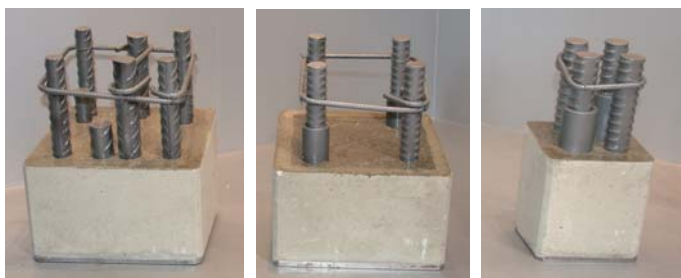
Stosowanie prętów gwintowanych SAS 670/800 o średnicy do 75 mm jako innowacyjnego zbrojenia żelbetowych elementów ściskanych poszerza możliwości kształtowania konwencjonalnych konstrukcji z betonu. Możliwość uzyskania stopnia zbrojenia do 20% i redukcji wymiarów daje istotne oszczędności ekonomiczne przy stosowaniu takich elementów. Uwzględnienie skurczu i pęcznienia betonu oraz stosowanie betonów z ciągliwym zbrojeniem rozproszonym pozwala na pełne wykorzystanie wysokiej wytrzymałości tej stali.

Na rysunku 1 zilustrowano korzyści ekonomiczne wynikające ze stosowania w słupach stali S670 w porównaniu ze stalą BSt500.

A: BSt 500
 $\rho = 9\%$
 32 x 32 cm

B: Zamiennik S 670
 $\rho = 3,9\%$
 32 x 32 cm

C: Minimum S 670
 $\rho = 17\%$
 20 x 20 cm



tradycyjne

zamiennik BSt500

redukcja przekroju

Rys. 1. Redukcja przekroju z zachowaniem jego nośności przy stosowaniu stali S670 i zwiększeniu stopnia zbrojenia (C35/45, 50% łączonych prętów)

Zakres stosowania obejmuje przede wszystkim wszystkie elementy ściskane, wykonane z betonów klas od C25/30 do C100/115 lub wyższych, które są poddane głównie obciążeniom statycznym i dynamicznym, w tym sejsmicznym. Także cienkie płyty i elementy poddane umiarkowanemu rozciąganiu lub zginaniu mogą być zbrojone stalą S670. Z powodu dużych deformacji i nadmiernej szerokości rys, pełne wykorzystanie granicy plastyczności przy rozciąganiu, szczególnie w przypadku dużych średnic, jest możliwe jedynie w szczególnych przypadkach.

Słupy zbrojone prętami SAS 670/800 zapewniają wymierne korzyści ekonomiczne i większą swobodę projektowania. Inną ważną zaletą jest to, że o ile zmniejszenie przekrojów w przypadku użycia stali BSt 500 wymaga stosowania betonów wysokiej wytrzymałości, o tyle w przypadku zbrojenia stalą SAS 670/800 można stosować tańszy beton zwykły. Brak poprzecznych sił rozszczepiających i przenoszenie ścisłań w połączeniach prętów poprawia warunki pracy takich słupów.

Właściwości systemu

- **Właściwości stali SAS 670.** Ulepszana cieplnie stal zbrojeniowa S670 spełnia postanowienia norm DIN 488 i EN 10080 oraz wymagania określone w Eurokodach. Przeprowadzono wymagane badania aprobowane zgodnie z EN ISO 15630-1.

Tablica 1
 Właściwości mechaniczne stali S670

| | | |
|---|---------------------------------|---|
| Charakterystyczna granica plastyczności | R_e , N/mm ² | 670 |
| Charakterystyczna wytrzymałość na rozciąganie | R_m , N/mm ² | 800 |
| Proporcja | R_m/R_e | $\geq 1,10$ |
| Całkowita wydłużalność względna przy obciążeniu niszczącym (określona przy $A_g + R_m/E \cdot 100\%$) | A_{gt} , % | $\geq 5,0$ |
| Względna powierzchnia żebra | f_R | $\geq 0,075$ |
| Wytrzymałość zmęczeniowa (przy górnym naprężeniu $\sigma_0 = 0,7R_{e, nom}$ i $N = 2 \cdot 10^6$ cykli) | $2\sigma_A$, N/mm ² | $d = 18 - 43: 150$ $d = 57,5 - 63,5: 120$ $d = 75: 100$ |
| Zdolność do gięcia | | $d \leq 43$ mm |
| Spajalność | | spajalna |

Stosuje się pręty średnicy od 18 do 75 mm. Właściwości mechaniczne stali podano w tabl. 1.

Stal S670 ma względną powierzchnię żebra $f_R \geq 0,075$, znacznie wyższą niż wymagana według Eurokodu ($f_{Rmin} = 0,056$ w przypadku $\varnothing_{nom} > 12$ mm).

Bilinearny wykres odkształcalności, taki sam przy ściskaniu jak przy rozciąganiu, wykazuje odkształcenie przy granicy plastyczności przy ściskaniu równe $670/205\ 000 = 0,00327 = 3,27\%$.

Właściwości w warunkach pożarowych określone w EN 1992-1-2 są podobne jak stali typu Tempcore.

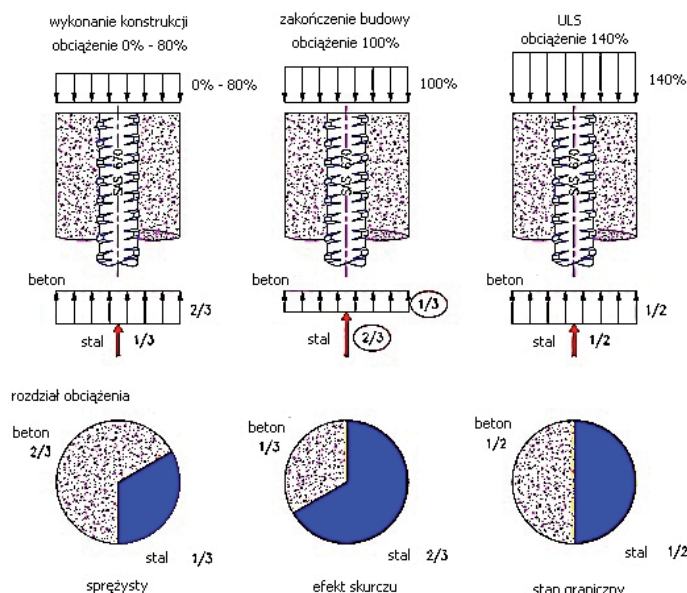
- **Łączniki i zakotwienia.** W połączeniach prętów ściskanych stosuje się ręcznie nakręcaną mufę zdolną do przeniesienia pełnych obciążeń statycznych i dynamicznych z poślizgiem do 0,2 mm (w stanach granicznych użytkowalności). Pręt może także przekazać obciążenie na stalową płytę oporową (zaprojektowaną jako konstrukcja stalowa) przez łącznik dociskowy. Elementy zakotwień końcowych przekazują siły rozciągające lub ścisające na beton.

Zarówno zakotwienia, jak i łączniki blokowane mogą być poddane obciążeniom sejsmicznym zgodnie z EC2 i EC8. Wyszczególnione łączniki były przebadane zgodnie z niemieckimi i europejskimi wytycznymi ETAG013, ISO/DIS 15835-1 i -2 (tj. zmęczenie niskocyklowe). Zostało wydanych kilka niemieckich aprobat krajowych.

Praca w ściskany przekroju żelbetowym

Możliwość pełnego wykorzystania wysokiej granicy plastyczności przy ściskaniu w stanie granicznym nośności wymaga uwzględnienia zwykle występujących zjawisk skurczu i pęcznienia betonu. Rysunek 2 przedstawia typową redystrybucję sił w ściskany elemencie w warunkach występujących w różnym czasie.

Przyłożone obciążenie wstępne jest w 2/3 przejmowane przez beton i w 1/3 przez stal. Wraz z wystąpieniem skurczu i pęcznienia (w czasie, w którym budynek zostaje wykonany



Rys. 2. Redystrybucja sił w czasie od wykonania konstrukcji do osiągnięcia stanu granicznego nośności

i przekazany do eksploatacji) następuje redystrybucja obciążenia, w której efekcie beton zostaje odciążony (1/3 obciążenia) kosztem stali, która przejmuje łącznie 2/3 obciążenia. W obliczeniowym stanie granicznym nośności następuje kolejna redystrybucja sił, w której wyniku beton i stal przenoszą, w przybliżeniu, równoważne części obciążenia niszczącego.

Pod obciążeniem krótkotrwałym naprężenia w stali σ_s są α_e -krotnością naprężeń w betonie σ_c (w płaskich przekrojach Bernoulliego), gdzie

$$\alpha_e = E_s / E_c \quad (1)$$

Przyjmując przekrój sprowadzony

$$A_i = A_c + \alpha_e A_s \quad (2)$$

można naprężenia w betonie i stali wyznaczyć ze wzorów:

$$\sigma_c = P / A_i \quad (3)$$

$$\sigma_s = \alpha_e \sigma_c \quad (4)$$

Redystrybucja naprężeń w czasie może być wyznaczona z wykorzystaniem funkcji skurczu i pęcznienia według Trosta lub, w uproszczeniu, przyjmując efektywny moduł sprężystości, jak w Eurokodzie 2

$$E_{c,eff} = E_{cm} / (1 + \varphi) \quad (5)$$

gdzie φ – współczynnik pęcznienia.

Wówczas

$$\alpha_{e,eff} = E_s (1 + \varphi) / E_c \quad (6)$$

W obliczeniach w stanie granicznym nośności, graniczne obciążenia w betonie i stali sumują się. Jeśli przekrój jest w pełni wstępnie ściskany, odkształcenie w ściskanej stali nie powinno przekraczać $2 \div 2,6\text{‰}$, niezależnie od wytrzymałości stali, czyli np. $\sigma_{su} = 0,002 \cdot 200\,000 = 400 \text{ N/mm}^2$. Nośność graniczna jest wówczas określona z warunków

$$\text{– dopuszczalna nośność betonu} = \alpha f_{ck} A_c / \gamma_c \quad (7.1)$$

$$\text{– nośność stali} = \varepsilon_{c2} E_s A_s / \gamma_s \quad (7.2)$$

gdzie:

α – współczynnik wpływu efektów długotrwałych; zalecany $\alpha = 0,85$,

f_{ck} – wytrzymałość charakterystyczna betonu,

A_c – pole powierzchni betonu, netto,

ε_{c2} – graniczne odkształcenie betonu przy ściskaniu osiowym równe $2,0\text{‰}$, w przypadku betonów C55 ÷ C90 zwiększające się proporcjonalnie do $2,6\text{‰}$,

E_s – moduł sprężystości stali, równy $200\,000 \text{ N/mm}^2$,

E_{cm} – moduł sprężystości betonu według EC2,

γ_c – częściowy współczynnik dotyczący betonu, równy 1,4,

γ_s – częściowy współczynnik dotyczący stali, równy 1,15.

Jeśli w stanach granicznych użyteczności jest uwzględniana redystrybucja w przypadku efektów długotrwałych albo jest stosowany beton o potwierdzonej nośności pokrywyczej, można także w pełni wykorzystać granicę plastyczności stali wysokiej wytrzymałości. Przy redystrybucji zmniejszają się naprężenia w betonie, a zwiększają w zbrojeniu.

Redystrybucja naprężeń wskutek skurczu i pęcznienia „odpręża” beton, który tym samym uzyskuje rezerwy nośności.

Na rysunku 3 pokazano odpowiednio obciążenie w betonie i stali w funkcji odkształceń i z uwzględnieniem prędkości przyrostu obciążenia. Odkształcenia $\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$ o różnej genzie pozwalają w efekcie na zwiększenie odkształceń w stali

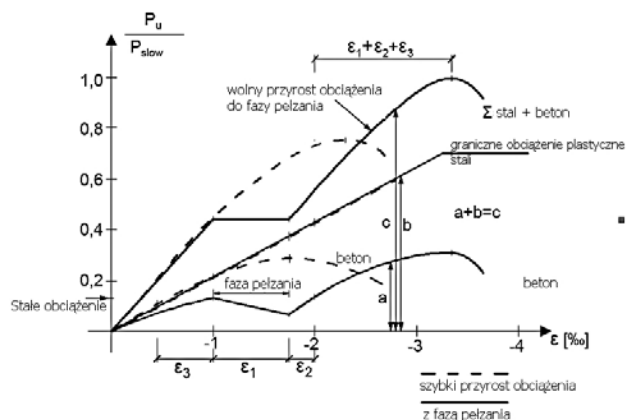
$$\Delta \varepsilon_s = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 \quad (8)$$

gdzie:

ε_1 – odkształcenia wskutek skurczu i pęcznienia,

ε_2 – odkształcenia w betonie w wyniku jego odciążenia redystrybucją naprężeń,

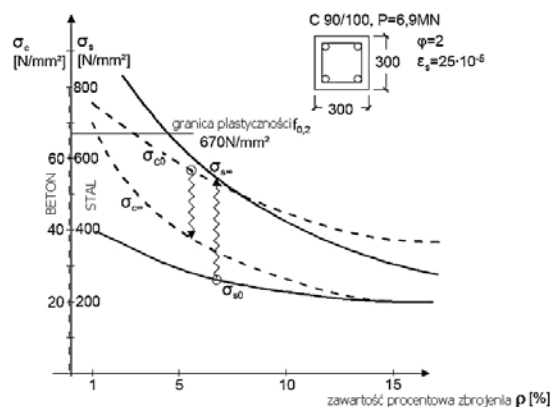
ε_3 – różnica odkształceń w wyniku różnego stopnia obciążenia (zazwyczaj pomijalna).



Rys. 3. Wykresy odkształcalności słupa zbrojonego stalą S670 z uwzględnieniem efektu pęcznienia

Wpływ stopnia zbrojenia na redystrybucję naprężeń wskutek pęcznienia jest istotny, zwłaszcza przy rozpatrywaniu dużych stopni zbrojenia $\rho_1 > 4\%$ (rys. 4).

Przy małym stopniu zbrojenia redystrybucja jest niewielka. Wraz ze zwiększeniem r_1 naprężenia w stali zwiększają się wolniej, jednak beton jest szybciej odciążany i redystrybucja się zwiększa.



Rys. 4. Wpływ stopnia zbrojenia na redystrybucję pod stałym obciążeniem P

Wyniki badań

● **Badania wytrzymałościowe słupów.** Badano 8 słupów wysokości 1 m o przekroju 20×20 cm, wykonanych z betonu C50/60 i zbrojonych centralnie jednym prętem \varnothing 75 mm ze stali S670 oraz 4 prętami \varnothing 10 i 14 mm oraz strzemiionami \varnothing 6 mm ze stali BSt500. W celu poprawy odporności ogniowej zastosowano włókna polipropylenowe w ilości 1,5 kg/m³ betonu.

W celu określenia redystrybucji wywołanej skurczem i pełzaniem, symulujących warunki długotrwałe, w czasie badań utrzymywano stałą wartość obciążenia na różnych poziomach i mierzono przemieszczenia oraz siły (tabl. 2).

Tablica 2
Podstawowe dane i wyniki badań

| Ozn. próbki | Program badania | Wynik analityczny: $F_u = 5160$ kN $\varepsilon_{cu} = 3,3\%$ Wynik badania |
|-------------------|---|--|
| S5 | ≈ 3300 kN = 70% F_u 480 h badanie do zniszczenia z kontrolą przemieszczeń | $F_u = 5492$ kN $\varepsilon_{cu} = 3,39\%$ |
| S6 z mufą łączącą | ≈ 3300 kN = 70% F_u 24 h badanie do zniszczenia z kontrolą przemieszczeń | $F_u = 5219$ kN $\varepsilon_{cu} = 3,92\%$ |
| S7 | F_u 0,002 mm/s badanie do zniszczenia z kontrolą przemieszczeń | $F_u = 5120$ kN $\varepsilon_{cu} = 2,80\%$ |
| S8 | Obciążenie schodkowe w ciągu 1 dnia: 639 kN – 2 h 1278 kN – 2 h 1917 kN – 2 h 2555 kN – 2 h 3194 kN – 2 h 3833 kN – 2 h badanie do zniszczenia | $F_u = 5320$ kN $\varepsilon_{cu} = 3,20\%$ |

Wszystkie próby wykazały, że wykorzystanie reologicznych właściwości betonu pozwala na pełne wykorzystanie granicy plastyczności stali S670 i że oba materiały mogą współpracować nawet w przypadku dużych średnic zbrojenia (75 mm). Przy dużym stopniu obciążenia beton musi osiągać graniczne odkształcenia równe 2,8‰ przy maksymalnym naprężeniu. W takim przypadku oba obciążone składniki elementu wykazują dobrą współpracę także w fazie pokrytycznej betonu.

● **Badania odporności ogniowej słupów.** Badania wykonano w związku z pierwszym zastosowaniem w konstrukcji w budynku Opernturm Frankfurt, w którym słupy o znacznej smukłości pracowały w warunkach dużego wykorzystania nośności.

Ogólnie można stwierdzić, że słupy główne ze zbrojeniem o wysokiej wytrzymałości w konstrukcji Opernturm Frankfurt, a także próbne słupy S1 i S2 wykazały zadowalające właściwości w warunkach pożaru. Wykazane rezerwy nośności pozwalają na klasyfikację do klasy odporności ogniowej R120. Istotnym czynnikiem wpływającym na pozytywny wynik był brak rozłupywania betonu, uzyskany dzięki zastosowaniu dodatku włókien polipropylenowych w ilości 1,5 kg/m³ mieszanki.

Zalecenia projektowe

● **Projektowanie elementów ściskanych.** Przy smukłościach $\lambda = l_0/i$ (i – promień bezwładności przekroju) nie większych niż 25, zginanie i dodatkowe obciążenie wywołane efektami drugiego rzędu są nieznaczące przy projektowaniu słupów dwuprzegubowych. Przekrój jest w pełni osiowo ściskany i podstawowym czynnikiem jest obciążenie osiowe.

W słupach osiowo ściskanych odkształcenie graniczne ε_{c2} ma wartość 2‰ w przypadku betonu do C50/60 i zwiększa się do 2,6‰ w przypadku betonu C90/105. Jeżeli klasa betonu nie jest mniejsza niż C55/67, to teoretycznie nie można uzyskać odkształceń o wartości $\varepsilon_{yd} = 500 / (200 \cdot 1,15) = 2,18\%$

przy granicy plastyczności w stali BSt500.

W przekrojach w pełni ściskanych z małym mimośrodem ($e_d/h = 0,1$), $\varepsilon_{c2} = 2,2\%$ jest dopuszczalne w przypadku betonu zwykłego, co pozwala na pełne wykorzystanie granicy plastyczności stali BSt500. Podstawą zwiększenia tych odkształceń jest występowanie skurczu i pełzania przy ściskaniu.

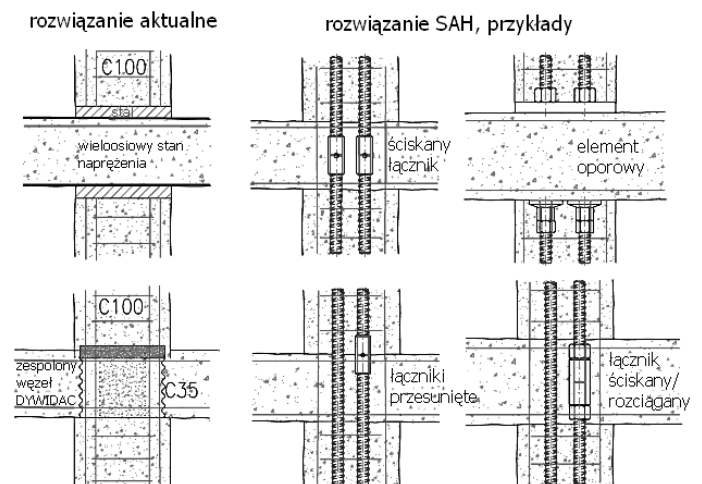
Przy większej smukłości λ_{crit} , pomiędzy 25 i 75, wpływ mimośrodków niezamierzonych może być istotny, w zależności od długości wybocheniowej wynikającej z warunków podparcia. Interakcja momentu zginającego i siły osiowej jest wówczas tak samo istotna, jak w przypadku działania statycznego mimośrodu obciążenia.

Wykresy zależności naprężenie – odkształcenie i deformacje wywołane efektami drugiego rzędu powinny być odpowiednio rozpatrzone. Zazwyczaj efekty długotrwałe, jak skurcz i pełzanie, są pomijane. Zgodnie z EC2 odkształcenia w betonie są zwiększone o wartość $1 + \varphi_{ef}$, gdzie $\varphi_{ef} = \varphi M_{Ed,qp} / M_{1Ed}$ ($M_{Ed,qp}$ – moment zginający w sytuacji prawie stałej, M_{1Ed} – moment zginający w stanie granicznym nośności).

Przy stosowaniu stali S670 wysokiej wytrzymałości, do pełnego wykorzystania jej granicy plastyczności jest wymagana większa odkształcalność graniczna betonu. W szczególności dotyczy to przypadku krępego elementu ściskanego przeważnie osiowo.

W sytuacji, gdy efekty długotrwałe są korzystne, należy przyjąć mniejsze wartości współczynników skurczu i pełzania.

Omówione wyżej zjawiska nie są groźne przy rozpatrywaniu problemu oparcia słupów pośrednich na stropach, w których beton ma wytrzymałość nie mniejszą niż 1/3 wytrzymałości betonu słupów. Decyduje o tym zwiększenie wytrzymałości betonu w płytach przez jego poprzeczne skrępowanie. Ponadto można zastosować rozwiązania projektowe ograniczające niekorzystne zjawiska występujące w takiej sytuacji (rys. 5).



Rys. 5. Przejście słupów o wysokiej wytrzymałości przez stropy o niskiej klasie betonu

● **Uwagi ogólne.** Warunki wymagane do pełnego wykorzystania granicy plastyczności przy ściskaniu stali S670 można przedstawić następująco:

- wyznaczenie w przypadku stali redystrybucji odkształceń betonu $\Delta\varepsilon_s$ zaistniałych w czasie budowy i uwzględnianej w stanie granicznym użyteczności;
- redystrybucja $\Delta\varepsilon_s$ jest uwzględniona jako „wstępne sprężenie” (analogicznie do wstępnego naciągu w konstrukcjach sprężonych w obliczeniach stanu granicznego nośności);
- alternatywnie można zwiększyć odkształcenie graniczne betonu o $\Delta\varepsilon_s$ i zbrojenie obliczać konwencjonalnie;
- nie należy w pełni wykorzystywać granicy plastyczności stali S670 z uwzględnieniem $\Delta\varepsilon_s$; uwzględnienie efektu wzmoc-

nienia betonu w stanie pokrytycznym przez stal, zwłaszcza przy dużym stopniu zbrojenia, stosuje się przede wszystkim wtedy, kiedy ciągliwość betonu jest zwiększona dodatkiem włókien;

– procedura obliczeniowa powinna przebiegać w przedziałach czasowych – fazach występujących w wydzielonych etapach realizacji obiektu, z reguły za pomocą oprogramowania kalkulacyjnego.

● **Uwarunkowania normowe.** Eurokody dopuszczają stosowanie odpowiednich postanowień krajowych. Należy rozważyć następujące ograniczenia lub modyfikacje zawarte w EC2:

– nie stosuje się zakładów zbrojenia, wobec czego naprężenia przyrzepności pozostają małe;

– umiarkowane rozciągania przy dużych średnicach zbrojenia ograniczają możliwość wykorzystania granicy plastyczności z uwagi na dużą szerokość rozwarcia rys;

– z uwagi na ryzyko powstania rys podłużnych, wynikających z różnicy odkształceń poprzecznych betonu i stali, oraz z uwagi na zapewnienie odporności ogniowej, należy stosować otulenie betonem nie mniejsze niż $0,8\phi$;

– należy przyjmować maksymalny stopień zbrojenia $\rho_{max} \leq 20\%$, maksymalną średnicę zbrojenia ϕ_{max} do 75 mm i klasę wytrzymałościową stali S 70/800;

– należy ograniczyć wymaganą minimalną średnicę zbrojenia poprzecznego do 1/4 średnicy zbrojenia ze stali S670 (pręty nieulegające wyboczeniu).

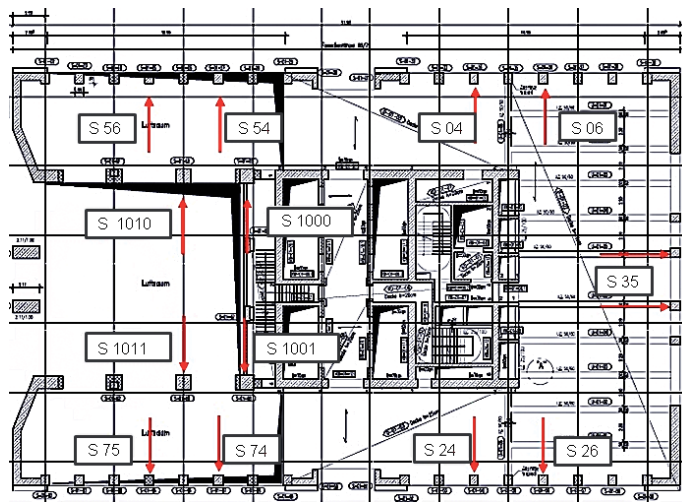
Łączniki sąsiednich prętów, choć są zaprojektowane do przeniesienia pełnej nośności elementów, powinny być przesunięte względem siebie o 15ϕ . Siły ściskające i rozciągające mogą być przekazane z dopuszczalnym przemieszczeniem (do 0,2 mm) przez elementy zakotwień lub płyty kotwiące oraz długość zakotwienia pręta prostego. W przypadku dużego zagęszczenia zbrojenia powinno się stosować zakotwienia przez spajanie czołowe do płyt stalowych o odpowiednio sprawdzonej nośności.

Przykład projektu – budynek Opernturm Frankfurt

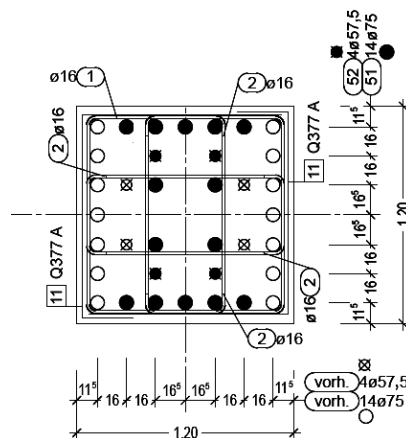
Wykorzystanie systemu prętów SAS 670/800 do zbrojenia elementów ściskanych, zwłaszcza słupów w budynkach wysokich, jest już bardzo rozpowszechnione w Stanach Zjednoczonych. Pierwszym obiektem w Europie, w którym zastosowano nowy system, jest konstrukcja budynku Opernturm we Frankfurcie, w Niemczech.

Budynek ma 46 kondygnacji nadziemnych, w tym 5 kondygnacji rozbudowanego podium, oraz 2 użytkowe kondygnacje podziemne – parkingi. Część wysoka, o wymiarach zewnętrznych 33×52 m i wysokości 169 m, jest żelbetową konstrukcją trzonową (trzon 16×26 m) otoczoną rzędem słupów fasadowych. Kondygnacje mają wysokość 3,625 m.

Ze względów architektonicznych, przekrój poprzeczny megasłupów w 5-kondygnacyjnym lobby powinien być jak najmniejszy. Wykorzystując standardowe zbrojenie, ten warunek można było spełnić jedynie przy zastosowaniu betonu wysokiej wytrzymałości. Jednak bardziej ekonomiczne okazało się użycie betonu zwykłego klasy C50/60 i stali zbrojeniowej wysokiej



Rys. 6. Lokalizacja słupów z wykorzystaniem zbrojenia ze stali wysokiej wytrzymałości S670



Rys. 7. Przykładowy przekrój megasłupa ($\phi 75$ i $\phi 57,5$ S670)

wytrzymałości (SAS 670/800) produkcji Annahütte. Z analogicznych względów i w podobny sposób skonstruowano słupy w elewacjach o smukłości $\lambda < 85$ (rys. 6 i 7).

PIŚMIENNICTWO

[1] Rüsç H.: Stahlbeton – Spannbeton, Band 1. Werner-Verlag, Düsseldorf 1972.
 [2] Trost H.: Spannungs-Dehnungs Gesetz eines viskoelastischen Festkörpers wie Beton und Folgesungen. „Beton”, nr 6/1966.
 [3] Falkner H., Gerritzen D., Jungwith D., Sparowitz L.: Das Neue Bewehrungssystem. Druckgliedern mit hochfestem Betonstahl SAS 670/800. Teil I: Entwicklung, Versuche, Bemessung und Konstruktion. „Beton- und Stahlbetonbau”, nr 5/2008.
 [4] Bachmann H., Benz M., Falkner H., Gerritzen D., Wlodkowski H.: Das Neue Bewehrungssystem. Druckgliedern mit hochfestem Betonstahl SAS 670/800. Teil II: Opernturm Frankfurt – Anwendung. „Beton- und Stahlbetonbau”, nr 8/2008.

Artykuł sponsorowany



ATM Sp. z o.o.
 ul. Sienkiewicza 145M
 39-400 Tarnobrzeg
 www.atm-tech.pl