

W artykule pt. „Mury skrzepowane – szansa na zwiększenie nośności konstrukcji”, który został wygłoszony podczas 5. Międzynarodowej Konferencji Autoklawizowanego Betonu Komórkowego (wrzesień 2011 r.) opisano badania czterech modeli ścian z blozków z betonu komórkowego (ABK). Wykazały one wpływ muru skrzepowanego na nośność usztywniającej ściany murowanej. Bardzo dobre, w takich konstrukcjach, połączenie żelbetu z murem jest efektem wylania betonu po wzniesieniu części murowanej.

prof. Wolfram Jäger*
inż. Peter Schöps**

Mury skrzepowane – szansa na zwiększenie nośności konstrukcji

Mury skrzepowane są przedmiotem badań mających na celu zrozumienie zachowania się tych konstrukcji oraz uproszczenie metod projektowania bez konieczności użycia skomplikowanych narzędzi numerycznych [DIN 4149: *Budownictwo na terenach niemieckich aktywnych sejsmicznie. Przyjmowanie obciążeń. Obliczanie i wykonanie budynków typowych*. DIN Beuth Verlag: Berlin, April 2005]. W artykule wprowadzono do przedmiotu badań kilka nowych aspektów, takich jak skurcz ramy żelbetowej oraz lokalizacja punktu zerowego momentu.

Mury skrzepowane różnią się zarówno od murów zbrojonych, jak i od ścian stanowiących wypełnienie szkieletu żelbetowego. Najważniejszą różnicą murów skrzepowanych w stosunku do ścian stanowiących wypełnienie szkieletu żelbetowego jest przenoszenie części obciążeń pionowych. Z tego względu w technologii murów skrzepowanych istotna jest kolejność wznoszenia. W konstrukcjach szkieletowych ze ścianami wypełniającymi najpierw powstaje rama żelbetowa, a następnie wypełnienie. W przypadku ścian skrzepowanych kolejność jest odwrotna. Ma to bezpośredni wpływ na wytrzymałość połączenia żelbetu z murem, a w konsekwencji na nośność konstrukcji.

Technologia muru skrzepowanego łączy pozytywne cechy muru zbrojonego oraz muru stanowiącego wypełnienie żelbetowego szkieletu i pozwala uzyskać większą nośność w warunkach statycznych i sejsmicznych.

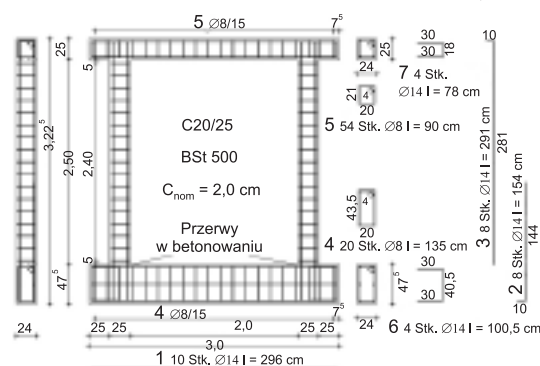
Badania

W celu określenia nośności na ścinanie muru skrzepowanego oraz efektów sprężenia muru wywołanych skurczem betonu, **przeprowadzono badania czterech modeli z blozków z betonu komórkowego (ABK)**. Starano się zwrócić szczególną uwagę na właściwości tego typu konstrukcji, w porównaniu z tradycyjnymi ścianami usztywniającymi.

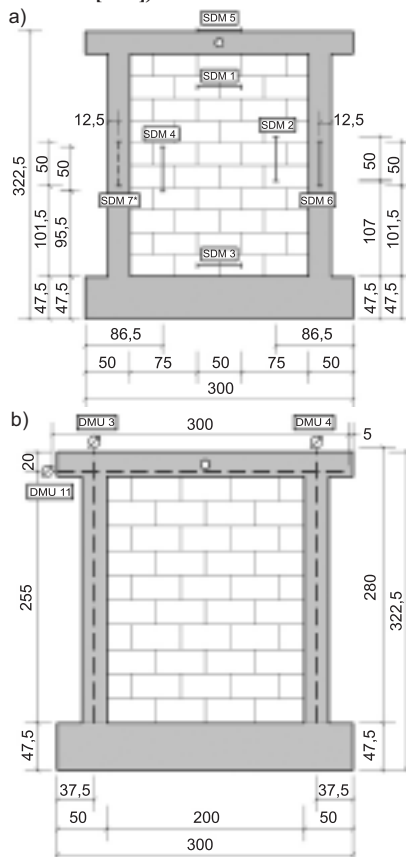
Geometria modeli. Zbrojenie elementów żelbetowych krępujących mur (rysunek 1) spełniało wymagania normy DIN 4149, dotyczącej trzęsień ziemi. Mur wzniesiono z blozków ABK o wymiarach 50 x 24 x 25 cm i wytrzymałości 4 N/mm². Stosowano wiązanie murarskie z wzajemnym przesunięciem elementów murowych o pół bloczka. Spoiny wsporne wykonano jako cienie, a spoiny pionowe pozostawiono bez wypełnienia.

Przemieszczenie modeli badawczych mierzono po ich wykonaniu i podczas badań. Pomiaru przemieszczeń na skutek skurczu betonu i muru dokonano na powierzchni badanych ścian za pomocą tensometrów oraz mierników cyfrowych zamontowanych na końcu prętów stalowych, umieszczonych w rurkach zabetonowanych wewnątrz ramy żelbetowej. Układ punktów pomiarowych pokazano na rysunku 2.

Wyniki badań skurczu. Beton górnych rygli modeli badawczych został wylany kilka dni po betonowaniu pionowych rdzeni. Ze względu na konieczność pozostawienia szalunków na czas dojrzewania betonu rdzeni i rygli pomiar zmiana na długości modeli rozpoczęto dopiero po 21 dniach od zabetonowania rdzeni. W związku z tym, że w tym czasie nastąpiła już



Rys. 1. Zbrojenie elementów (długość [cm]; średnica [mm])

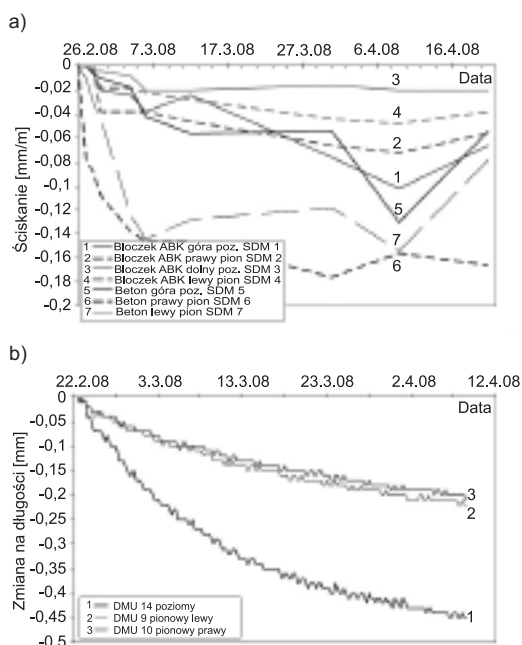


Rys. 2. Plan punktów pomiarowych skurczu ścian: a) baza do pomiaru tensometrem mechanicznym; b) pręty stalowe w rurkach okładzinowych z miernikiem cyfrowym

* Wydział Architektury Politechniki Drezdeńskiej, Niemcy

** Jäger Ingenieure GmbH, Radebeul, Niemcy

istotna część skurczu modeli, zmiana długości w obrębie rdzeni była mniejsza niż w ryglu. Na rysunku 3 przedstawiono przemieszczenie spowodowane skurczem betonu modelu nr 4. Na rysunku 3b widoczny jest mniejszy wzrost nachylenia krzywej przyrostu przemieszczeń dwóch rdzeni w porównaniu z przyrostem przemieszczeń ryglu. W celu właściwego porównania wyników, do uzyskanych pomiarów przemieszczeń modeli ścian nr 1 i 2 należy dodać przybliżoną wartość 0,2 mm, natomiast do wyników pomiaru przemieszczeń ścian 3 i 4 wartość 0,3 mm. Obserwowane skrócenie modeli spowodowane jest skurczem betonu, co z kolei powoduje odkształcenie części murowanej. Wstępne sprężenie muru wywołane skurczem betonu można opisać modelem numerycznym.



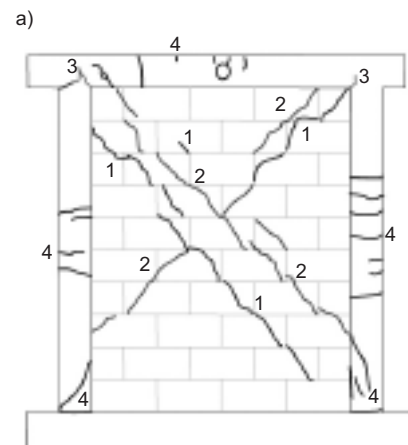
Rys. 3. Przemieszczenie spowodowane skurczem betonu modelu nr 4: a) pomiar tensometrem; b) pomiar miernikiem cyfrowym

Wyniki badań na ścinanie. Podczas badania modeli na ścinanie stosowano dwa warianty obciążenia. W pierwszym modelu obciążono dwiema stałymi siłami pionowymi oraz cyklicznie zmienną siłą poziomą i wówczas punkt zerowego momentu znajdował się na górze ściany. W ostatnim modelu siłownikami wymuszającymi obciążenie pionowe sterował komputer, tak aby utrzymać

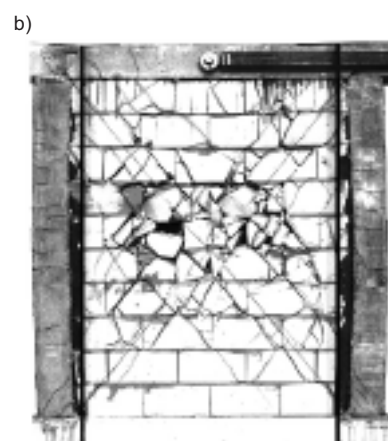
punkt zerowego momentu w połowie wysokości ściany. Nacisk obu siłowników był częściowo różny, ale obciążenie średnie miało stałą wartość. Obciążenie pionowe przykładano w pierwszym kroku. W drugim do ryglu przykładano cykliczne obciążenie poziome. Po każdym trzecim cyklu zwiększano obciążenie. Na rysunku 4 pokazano typowe zarysowania początkowe (rysunek 4a) oraz zarysowania po zakończeniu badania (rysunek 4b). Wytrzymałość na ścinanie w ostatnim cyklu obciążenia była większa niż wytrzymałość na ścinanie żelbetowej ramy bez wypełnienia murem. Osiągnięto granicę pomiaru obciążeń przez sprzęt laboratoryjny. Dalsze zwiększanie obciążenia poziomego (pomimo niewyczerpania nośności) było niemożliwe.

W celu określenia elastyczności modelu uproszczono obwiednię histerezy wykresu przemieszczenie-obciążenie do krzywej dwuliniowej. Przemieszczenia górnych i dolnych elementów, mierzone za pomocą odrębnej ramki pomiarowej, mają wartość względną. Szytywność początkową zazwyczaj wyznacza się przy 70% maksymalnego obciążenia ścinającego, a maksymalne użytkowe przemieszczenie przy 80% maksymalnego obciążenia ścinającego na obniżonej części obwiedni. Maksymalne obciążenie podane na uproszczonych wykresach wyraża się przez porównanie powierzchni wykresu zamkniętych obciążeniami. Wyniki badań podano w tabeli 1.

Przy nieliniowej charakterystyce części wzrostowej krzywych obciążenie-



- 1 — pęknięcie w murze – 10 mm
- 2 — pęknięcie w murze – 18 mm
- 3 — pęknięcie w ramie – 20 mm
- 4 — pęknięcie w ramie – 40 mm



Rys. 4. Typowe zarysowania ściany 2 (opis w artykule)

-odkształcenie przemieszczenie plastyczne nadal jest określane przy 70% maksymalnego obciążenia ścinającego. Prowadzi to do mniejszej sztywności początkowej oraz mniejszej elastyczności. W związku z tym do okre-

Tabela 1. Wyniki prób ścinania

Ścia- na	Nacisk pion. [kN]	H_{max}^- [kN]	H_{max}^+ [kN]	d_{Hmax}^- [mm]	d_{Hmax}^+ [mm]	70% H_{max}^- [kN]	70% H_{max}^+ [kN]	d_{cr}^- [mm]	d_{cr}^+ [mm]	K_e^- [kN/mm]	K_e^+ [kN/mm]
1	330	250	236	24,3	24,5	175	165	10,7	6,5	16,4	25,3
2	132	217	193	22,5	20,9	152	135	9,1	8,7	16,7	15,6
3	—	198	198	25,1	26,0	138	138	13,1	10,0	10,6	13,9
4	330	242	225	15,0	22,1	170	158	6,8	4,3	24,9	36,6

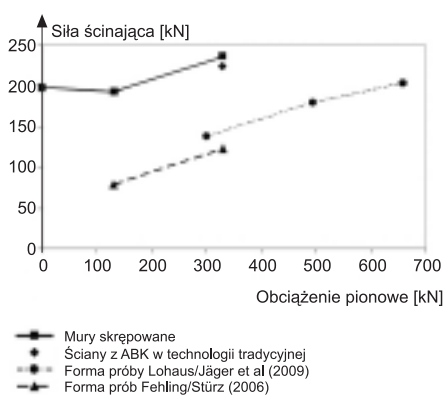
Ścia- na	80% H_{max}^- [kN]	80% H_{max}^+ [kN]	d_u^- [mm]	d_u^+ [mm]	H_u^- [kN]	H_u^+ [kN]	d_e^- [mm]	d_e^+ [mm]	μ^-	μ^+
1	200	189	51,4	52,0	235	213	14,3	8,4	3,58	6,18
2	173	154	30,8	40,2	206	189	12,3	12,1	2,51	3,32
3	158	158	32,5	56,3	210	181	19,8	13,1	1,64	4,30
4	194	180	50,6	48,3	222	207	8,9	5,6	5,68	8,55

Tabela 2. Plastyczność z zaobserwowanym początkowym naciskiem pęknięć

Ściana	H_{cr}^- [kN]	H_{cr}^+ [kN]	d_{cr}^- [mm]	d_{cr}^+ [mm]	K_o^- [kN/mm]	K_o^+ [kN/mm]	H_u^- [kN]	H_u^+ [kN]	d_o^- [mm]	d_o^+ [mm]	μ^-	μ^+
1	100	97	2,4	2,2	41,3	44,9	213	204	5,2	4,6	9,95	11,42
2	107	116	4,0	5,1	26,7	22,8	185	177	6,9	7,8	4,43	5,18
3	86	87	2,7	2,1	31,9	41,8	158	166	4,9	4,0	6,56	14,18
4	125	124	3,8	2,6	32,5	47,6	217	204	6,7	4,3	7,59	11,28

ślenia elastyczności modeli użyto obciążeń odpowiadających powstaniu pierwszej rysy, a nie o wartości 70% maksymalnego obciążenia. W efekcie wartość elastyczności znacznie wzrasta (tabela 2). Możliwości murów skrępowanych pozostają niewykorzystane ze względu na przyjmowanie przemieszczeń maksymalnych na poziomie 80% nośności konstrukcji. Badania wykazały, że możliwy jest dalszy wzrost przemieszczenia na górze ściany, a nośność muru skrępowanego jest większa niż ścian tradycyjnych.

Na rysunku 5 porównano wyniki badań murów skrępowanych z wynikami badań ścian z betonu komórkowego wzniesionego w technologii tradycyjnej. W przypadku wszystkich badań wymiary ścian były identyczne. Ściany wzniesione w technologii tradycyjnej były całkowicie unieruchomione w części górnej. Przy próbie użycia systemu wspornikowego nośność konstrukcji widocznie maleje w przeciwieństwie do muru skrępowanego.



Rys. 5. Porównanie obciążeń niszczących murów skrępowanych z wynikami niezbrojonych ścian z ABK

We wszystkich czterech badaniach nie stwierdzono uszkodzenia muru i betonu ramy krępującej. Uszkodzenia występowały zawsze w obrę-

bie elementów murowych i dlatego wytrzymałość na rozciąganie elementu ogranicza nośność muru na ścinanie.

Propozycja obliczania

Wypełnienie muru. Projekt muru skrępowanego z ABK może być opracowany na podstawie zasad obciążających przy projektowaniu niezbrojonych ścian usztywniających. Bardziej jednolite rozłożenie naprężeń ścinającego może zostać wykorzystane w celu zwiększenia wytrzymałości muru na ścinanie. Współczynnik wzrostu wynosi ok. 1,5. Wyraźnie jest on określony w niemieckiej normie. Obciążenie pionowe na części murowanej zależy od sztywności rdzeni betonowych oraz od skurczu betonu. Obliczenia skurczu należy wykonać rozsądnie, ponieważ wpływa on na nośność konstrukcji, nawet jeżeli zniszczenie przez ścinanie elementu z ABK jest nieistotne z powodu względnie wysokiej początkowej wytrzymałości wiązania. Zniszczenie przez rozciąganie elementu murowego jest również wywołane obciążeniem pionowym. Jeżeli krajowa norma lub krajowy załącznik do normy europejskiej wymaga weryfikacji rozwarcia styku lub zniszczenia przez ściskanie i ścinanie elementów murowanych, należy prowadzić takie analizy również w przypadku murów skrępowanych. Do obliczeń może być wykorzystana cała długość ściany murowanej. Nie jest wymagane obliczanie długości ściskanej jak w przypadku ścian konwencjonalnych.

Rama betonowa. Zakładając równomierne rozmieszczenie naprężeń ścinającego, należy sprawdzić połączenie pomiędzy murem a ramą. W przeciwnym razie mur i rama będą pracowały oddzielnie. Wówczas konstrukcja może zostać potraktowana jako typowa podwójnie unieruchomiona ściana.

W przypadku bloczków z ABK można przewidzieć wiązanie pełne. Rama powinna być zaprojektowana na globalne zginanie. Przy pierwszym oszacowaniu ścianę można opisać jako mur zbrojony pionowymi prętami. W szczegółowych analizach powinna być uwzględniona większa wytrzymałość na ściskanie rdzeni żelbetowych na krawędziach ściany. Obciążenie z rdzeni musi zostać przejęte przez niższą kondygnację. Lokalna wytrzymałość na ścinanie przekroju ramy powinna być wystarczająco duża, aby została przeniesiona połowa obciążenia ścinającego.

Podsumowanie

Przeprowadzone badania ścian wykazały wzrastający wpływ muru skrępowanego na nośność usztywniającej ściany murowanej. Przy połączeniu żelbetu z murem możliwe jest wykazanie, że uzyskanie bardzo dobrego wiązania jest efektem wylania betonu po wzniesieniu części murowanej, a znaczne naprężenie wstępne na mur spowodowane jest skurczem ramy betonowej. Przy większych obciążeniach pionowych pęknięcia wywołane skurczem w ramie stają się mniejsze lub zostają zamknięte, a wartość obciążenia pionowego przejmowanego przez mur wzrasta. Ponadto większe obciążenie pionowe oraz równomiernie rozmieszczone naprężenie ścinające wypełnienia muru prowadzą również do wzrostu nośności. Nośność ta jest większa od nośności ścian wykonanych w technologii tradycyjnej.

Inną ważną cechą murów skrępowanych jest duża elastyczność muru, której efektem są maksymalne przemieszczenia. Elastyczność obliczana w klasyczny sposób nie odzwierciedla dokładnie wpływu skrępowania.

Projekt muru skrępowanego można opracować na podstawie takich samych wytycznych jak w przypadku muru niezbrojonego. Równomierne rozmieszczenie naprężeń ścinającego należy uwzględnić za pomocą współczynnika. Ponadto trzeba również przeprowadzić obliczenia żelbetowych elementów krępujących.