

O połączeniach w konstrukcjach stalowych odpornych na obciążenia dynamiczne

Momentem przełomowym w odniesieniu do połączeń stosowanych w konstrukcjach stalowych był rok 1994, kiedy Kalifornię nawiedziło potężne trzęsienie ziemi. Wielu ekspertów ostrzegało, że tradycyjne rozwiązania połączeń stosowanych w ramach stalowych nie zapewnią stateczności konstrukcji i przeniesienia obciążeń, na które będą narażone budowle w razie kataklizmu. Zapowiedzi te spełniły się – konstrukcje szkieletowe stalowe uległy znacznym uszkodzeniom. Po tym kataklizmie nastąpiło zintensyfikowanie badań nad rozwiązaniami, które miałyby w przyszłości zapobiec podobnym katastrofom.

Kolejny etap tworzenia nowych rozwiązań i ich badań rozpoczął się po ataku terrorystycznym w Nowym Jorku. Po tych wydarzeniach zaproponowano wiele różnych rozwiązań połączeń w konstrukcjach stalowych. Najczęściej stosowano trzy z nich: opatentowany system SidePlate, połączenie Reduced Beam Section (RBS) i Slotted Beam Connections (SBW) oraz różne ich modyfikacje.

W artykule przeanalizowano rozwiązania połączeń konstrukcji stalowych stosowanych w obszarach najbardziej narażonych na trzęsienia ziemi, w szczególności w Stanach Zjednoczonych, Kanadzie i Nowej Zelandii.

System SidePlate

SidePlate to system wysokiej jakości połączeń ram stalowych zabezpieczających konstrukcje przed zniszczeniem podczas wybuchów, trzęsień ziemi, jak również przed zniszczeniem postępującym.

Technologia połączeń, z tzw. płytami bocznymi, została zaprojektowana w celu ochrony konstrukcji stalowych przed skutkami katastrof spowodowanych przez żywioły. System SidePlate opracował *David L. Houghton* po trzęsieniu ziemi w Northridge w 1994 r. Po kataklizmie, który zniszczył wiele ważnych obiektów, zostały powołane komisje złożone z niezależnych ekspertów. W warunkach laboratoryjnych były wówczas przeprowadzane symulacje obciążeń konstrukcji poddanych oddziaływaniom sejsmicznym i wiatrowym. Prowadzono analizy konstrukcji z tzw. płytami bocznymi, obejmujące symulacje komputerowe i badania modelowe w skali naturalnej przy obciążeniu cyklicznym. Modele poddawano głównie obciążeniom odwzorowującym siły wywoływane przez trzęsienia ziemi i silne podmuchy wiatru, ale również cyklicznym oddziaływaniami, w tym dwóm wybuchom bomby (w konstrukcji ze stropem lub bez stropu) i obciążeniami powodującym „złożenie się” konstrukcji (stopniowy upadek). W jednym przypadku konstrukcja była nieuszkodzona, w drugim – naruszona wskutek dwóch wybuchów.

Konstrukcja poddana cyklicznym obciążeniom symulującym siły grawitacyjne miała nośność od 2 do 5 razy większą niż w przypadku rozwiązań tradycyjnych.

Badania przeprowadzono m.in. na Uniwersytecie Kalifornijskim w San Diego oraz Laboratoriach Badawczych Charles Lee Powell.

Połączenie SidePlate zostało wstępnie zakwalifikowane do użytku przez trzy niezależne amerykańskie organizacje: ICBO Evaluation Service Inc., City of Los Angeles Engineering Research Section (Department of Building and Safety) i Coun-

ty of Los Angeles Technical Advisory Panel on Steel Moment Resisting Frame Connection Systems (FEMA 350).

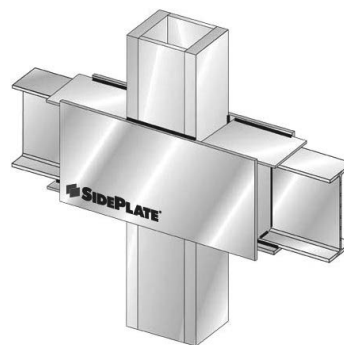
System SidePlate jest rozwiązaniem, które daje możliwość zastosowania większości kształtowników stalowych w różnych układach.

Innowacyjnością w tym rozwiązaniu są dwie płyty boczne przyspawane do pólki belki, które tworzą „uciąglenie” konstrukcji i znacznie zwiększają sztywność połączenia. W tradycyjnych rozwiązaniach belki były spawane do słupa spoinami „na pełny przetop”. Powodowało to powstawanie dodatkowych naprężeń w połączeniu wskutek wpływu skurczu na czole belki. Naprężenia koncentrowały się w miejscu połączenia belki ze słupem i dodatkowo „obciążały” konstrukcję, stwarzając niebezpieczeństwo pęknięcia spoin. Konstrukcje badane po trzęsieniu ziemi w Northridge wykazywały, że nawet spoiny wcześniej badane metodą ultradźwiękową stwierdzającą brak uszkodzeń były wadliwe. Zastosowanie płyt powoduje oddzielenie belki od powierzchni słupa. Płyty boczne są przyspawane wzdłuż belki do jej pólki. Oprócz połączenia bocznego na końcach belek są mocowane nakładki poziome zapewniające ciągłość belki w styku ze słupem. Nie jest to element konieczny, ale stosowany często ze względu na różnice w szerokości belki i słupa. Wszystkie spoiny są spoinami pachwinowymi. Połączenie belki ze słupem jest śrubowe z wykorzystaniem 4÷6 śrub średnio dokładnych klasy B. Połączenie to eliminuje przede wszystkim koncentrację naprężeń w słupie, konieczność wykonywania spoin na pełny przetop i ich badania metodą UT, a dzięki temu znacznie skraca czas montażu. Tak sztywne połączenie umożliwia stosowanie znacznie mniejszych kształtowników stalowych.

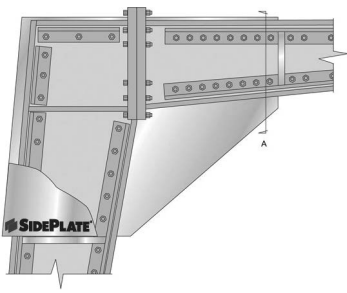
W połączeniu SidePlate nie ma ograniczeń wielkości łączonych elementów. Mogą być stosowane również różne kształtowniki stalowe, m.in. dwuteowniki i rury prostokątne, jak również elementy złożone np. z dwóch dwuteowników. Przykłady węzłów pokazano na rys. 1÷3.

Oprócz badań konstrukcji prototypowych przeprowadzono również wiele symulacji komputerowych. Zajmował się tym m.in. prof. *A. Deylami* z University of Technology w Iranie, który przeprowadził serie obliczeń metodą elementów skończonych systemu SidePlate za pomocą programu ANSYS.

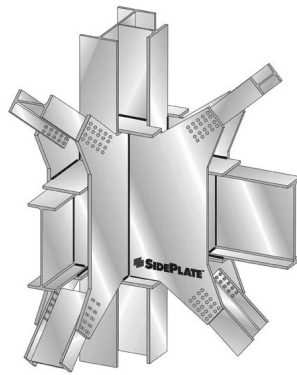
W pierwszym etapie analizowano wpływ grubości płyt bocznych, pionowych płyt ścinanych i poziomych nakładek (górną



Rys. 1. Schemat systemu SureFrame™ – połączenie belki ze słupem w jednej płaszczyźnie [www.sideplate.com]

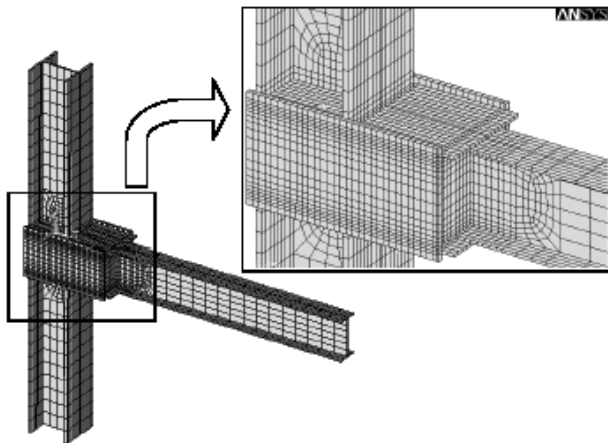


Rys. 2. Schemat systemu SureBent™ – połączenie rygla ramy ze słupem [www.sideplate.com]



Rys. 3. Węzeł ze stężeniami w dwóch płaszczyznach [www.sideplate.com]

i dolnej) oraz wysokości belki i słupa na nośność połączenia. W drugim etapie zmieniano jedynie grubość płyt bocznych, przy takich samych pozostałych parametrach. W strefie połączenia siatka MES została zagęszczona w celu zwiększenia precyzji obliczeń (rys. 4). Wszystkie modele miały takie same warunki brzegowe i obciążenie, zarówno siłami stałymi, jak i zmiennymi cyklicznie.

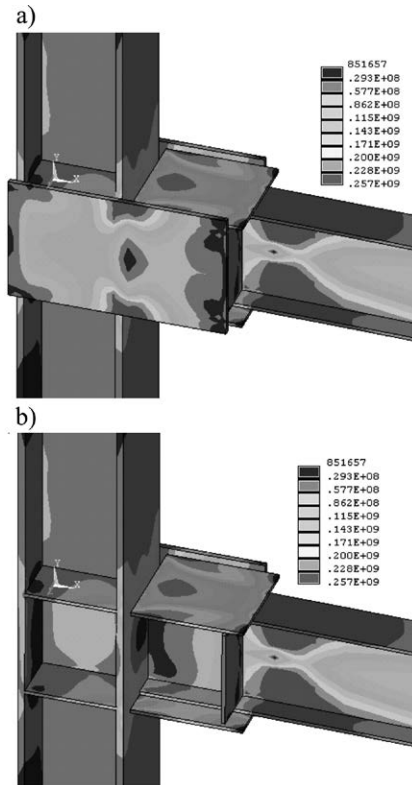


Rys. 4. Siatka elementów skończonych [2]

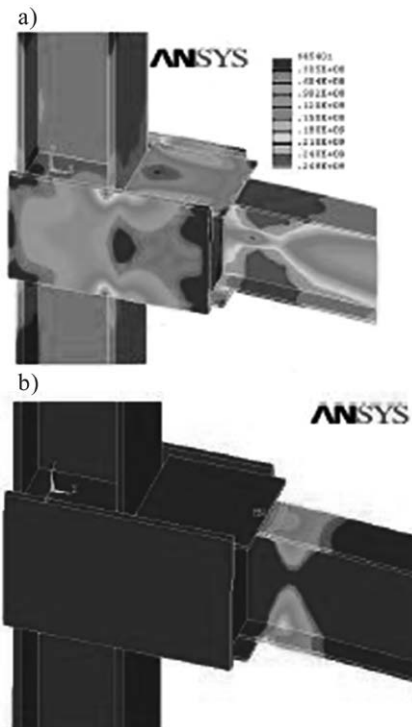
Rozkład naprężeń w połączeniu przedstawiono na rys. 5. We wszystkich przypadkach strefa uplastycznienia jest odsunięta od końca belki. Przegub plastyczny nie tworzy się (jak w tradycyjnych rozwiązaniach) na końcu elementu, ale poza połączeniem. Dzięki temu rozwiązaniu jest eliminowana możliwość wystąpienia kruchego pęknięcia w strefie spawania, co jest często przyczyną uszkodzeń konstrukcji obciążanych dynamicznie. Ponadto w strefie płyt bocznych naprężenia mają wartości poniżej granicy sprężystości. Reakcje rozkładają się na dwie płyty boczne i poziome żebra wewnątrz słupa, zabezpieczając słup i czoło belki przed nadmiernym odkształceniem. Wynika z tego, że nośność połączenia jest znacznie większa niż samej belki w połączeniu.

Badano również wpływ grubości płyt bocznych na zachowanie połączenia. Przy założeniu, że słup jest wykonany z dwuteownika IPB300, belka z IPE300, a płyty pionowe ścinane i nakładki poziome mają grubość 10 mm, zmieniano grubość płyt bocznych (10, 15, 20, 25 mm). Jedynie w przypadku grubości 10 mm płyty uplastyczniały się wcześniej niż belka. W przypadku stosowania płyt grubości 15 mm i większej, różnice w wytrzymałości i sztywności połączenia były nieznaczne (rys. 6).

Badania nad systemem są prowadzone nadal. Modyfikuje się m.in. wielkość płyt bocznych i układ płyt poziomych wzmacniających słup.



Rys. 5. Rozkład naprężeń w węźle: a) węzeł z płytami bocznymi, b) węzeł bez płyt bocznych [2]

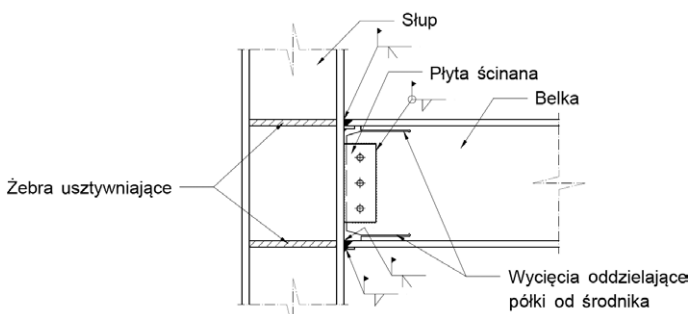


Rys. 6. Model z płytą boczną grubości 20 mm: a) rozkład naprężeń, b) strefy uplastycznienia [2]

System Slotted-Web-Reduced-Flange

W tym systemie poza usztywnieniem węzłów w ramach stalowych na terenach zagrożonych obciążeniami sejsmicznymi stosuje się również inne rozwiązania. Ich zadaniem jest zwiększenie zdolności plastycznych w połączeniu elementów ram stalowych.

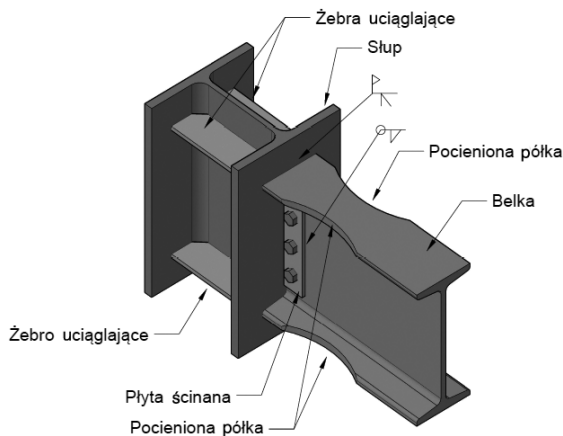
Pierwsze z nich, zwane Reduced Beam Section (RBS), polega na zmniejszeniu przekroju poprzecznego belki łączonej ze słupem przez pocienienie jej pólki (rys. 7).



Rys. 7. Schemat systemu Reduced Beam Section (RBS)

Dzięki takiemu rozwiązaniu w miejscu przewężenia tworzy się „przegub”, powodując wyeliminowanie możliwości powstania momentu zginającego w połączeniu. Połączenie staje się elastyczne i podatne na obciążenia sejsmiczne.

Drugie rozwiązanie, nazwane Slotted Beam Connections (SBW), polega na oddzieleniu pólki belki od środka (rys. 8). W tym przypadku każda część kształtownika, z którego jest wykonana belka, łączy się niezależnie ze słupem. Rozwiązanie takie chroni koniec belki i miejsce styku słupa z belką przed powstaniem naprężeń skręcających. Zamiast trójosiowego stanu naprężenia i odkształcenia jest uzyskiwany stan dwuosiowy.



Rys. 8. Schemat systemu Slotted Beam Connections (SBW)

Jako kombinację połączeń RBS i SBW opracowano innowacyjne hybrydowe połączenie, znane Slotted-Web-Reduced-Flange (SWRF). W tym rozwiązaniu jest tworzony przegub na końcu belki, a także eliminuje się koncentrację naprężeń i skręcanie w styku słupa z belką.

Przeprowadzono wiele nieliniowych analiz metodą elementów skończonych zgodnie z zaleceniami AIS, dotyczącymi przepisów sejsmicznych. Badania te prowadził m.in. dr *Shervin Maleki* z University of Technology w Teheranie.

Analizowano dziewięć przypadków, w których zmieniano parametry modelu (bez żeber usztywniających lub z żebrami usztywniającymi, grubości płytek oraz długości wycięć poszczególnych elementów połączenia – zgodnie z przepisami sejsmicznymi AIS).

Układ modelowano w programie ANSYS i poddawano analizie nieliniowej. Modele poddawano cyklicznym obciążeniom odwierciedlającym siły powstające w czasie trzęsienia ziemi.

Wyniki badań analitycznych potwierdzały rezultaty wcześniejszych badań doświadczalnych. Porównano je z wynikami badań na konstrukcjach, w których zastosowano tylko jeden rodzaj połączenia (RBS lub SBW).

Najkorzystniejsze okazało się rozwiązanie z płytką uciągającą. Badania wykazały m.in., że poziome zebra w słupie znacznie zwiększają zdolność połączenia do rozpraszania energii w połączeniu i powodują przesunięcie maksymalnych naprężeń na słupie w kierunku środka belki (zamiast wzdłuż półki w miejscu spoiny).

Przeprowadzono badania wpływu długości wycięcia w belce na nośność połączenia. Stwierdzono, że zbyt długie wycięcia osłabiają połączenia i powodują zwiększenie naprężeń.

W celu porównania z najlepszym przypadkiem SWRF wykonano dwa modele, które różniły się tym, że zastosowano w nich pojedyncze systemy RBS i SBW. W obu przypadkach okazało się, że najbardziej narażone na zniszczenie są miejsca spawów. Są to punkty najstabsze i wymagające ochrony.

Analizując wszystkie przypadki można wnioskować, że układ złożony z dwóch różnych systemów połączeń jest bezpieczniejszy niż pojedyncze i łączy zalety obu systemów RBS i SBW.

Podsumowanie

Systemy scharakteryzowane w artykule są jednymi z najbezpieczniejszych połączeń stosowanych obecnie w budownictwie. Potwierdzają to wyniki licznych badań i doświadczeń.

Przedstawione rozwiązania są stosowane głównie na terenach sejsmicznych w Stanach Zjednoczonych, Kanadzie i Nowej Zelandii. Coraz częściej połączenia te znajdują zastosowanie w obiektach użyteczności publicznej, administracji państwowej, a nawet obiektach wojskowych.

Systemy te spełniają wymagania amerykańskiego instytutu konstrukcji stalowych i są stosowane w obiektach nowo projektowanych i istniejących.

PIŚMIENICTWO

- [1] *Deylami A., Yakhchalian M.*: Comparison between “Common Moment Connection” and Moment Connection with Side Plates for Double-I Built-up Columns. The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China, October 2008.
- [2] *Deylami A., Ashraf R.*: Moment resisting connection with SidePlate (geometric aspects 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, August 2004.
- [3] *Kulkarni Swati Ajay, Vesmawala Gaurang R.*: Modern Strengthening Strategies for Steel Moment Resisting Frames: State of the Art Review. “Civil and Environmental Research”, Vol. 3, No. 7/2013.
- [4] *Maleki S., Tabbakhha M.*: Numerical study of Slotted-Web-Reduced-Flange moment connection. “Journal of Constructional Steel Research”, September 2011.
- [5] *Zembaty Z.*: Adaptacja Eurokodu 8 do obliczeń budowli na wpływy wstrząsów górniczych. „Inżynieria i Budownictwo”, nr 3/2011.