

mgr inż. Dorota Krystosik¹⁾
ORCID:0000-0001-5861-8530

Experimental studies of welded knee joints of steel frames

Doświadczalne badania spawanych węzłów narożnych ram stalowych

DOI: 10.15199/33.2024.11.05

Abstract. The article addresses issues related to the experimental testing of steel frame knees with slender webs. The tested knees are described, and a custom-designed testing stand is introduced, which generates the real loading conditions in the knees. The testing stand is equipped with two independently operating data acquisition systems. The first system manages a set of sensors that collect information on displacements and forces, while the second system records data using opto-electronic methods.

The tests were conducted on three identical knees, with particular care taken to maintain the repeatability of the testing conditions. The collected and analyzed data enabled the determination of the moment-rotation characteristics of the tested joints, as well as the initial stiffness, elastic resistance, and ultimate bending resistance. The obtained results are very similar to each other, suggesting that the proposed method for testing the joints is appropriate.

Keywords: knee; joint; stiffness; resistance.

Streszczenie. W artykule przedstawiono zagadnienia dotyczące doświadczalnych badań stalowych naroży ram o smukłych środnikach. Scharakteryzowano badane naroża oraz przedstawiono autorskie stanowisko badawcze, za pomocą którego wywołano w narożach realny układ obciążenia. Stanowisko badawcze wyposażono w dwa niezależnie działające systemy akwizycji danych. Pierwszy system obejmuje zestaw czujników zbierających informacje o występujących przemieszczeniach oraz siłach, natomiast drugi rejestruje dane z wykorzystaniem metod optyczno-elektronicznych.

Badania przeprowadzono na trzech jednakowych narożach, ze szczególną dbałością o zachowanie powtarzalności warunków wykonania badań. Zebrane i poddane analizie informacje umożliwiły wyznaczenie charakterystyki moment-obrót badanych węzłów, a także określenie wartości sztywności początkowej, nośności sprężystej oraz nośności granicznej. Uzyskane wyniki są do siebie bardzo zbliżone, co oznacza, że zaproponowany sposób badania węzłów jest właściwy.

Słowa kluczowe: naroże; węzeł; sztywność; nośność.

Steel frame knee, also known as a knee joint, eaves joint or corner joint, is the connection point between a column and a beam of a frame. In engineering practice, such joints can be designed as bolted or welded. Provided certain requirements are met (e.g., resistance to out-of-plane buckling of flat, sheared plates), these types of joints can be calculated using the component method recommended by Eurocode [1]. In the calculation process using this method, so-called basic components (areas where a dominant type of forces and deformation can be assumed) are identified in the joint, and then their mechanical characteristics – stiffness and resistance are determined. In the next stage of calculations, based on geometric relationships and equilibrium conditions, the bending resistance and rotational stiffness of the joint are determined. Detailed information and extensive calculation examples can be found in the literature, e.g. in [2, 3].

The proper design of a knee joint is a relatively challenging task [4–6]. This is primarily due to the existing of large internal forces in the corner and the complex geometry of the joint itself. Designing and dimensioning high-resistance joints is often easier in the case of welded joints [7]. On the other hand, connecting the column and beam on-site using a bolted connection can be performed at some distance from the corner, in a place where the values of internal forces are smaller.

Naroże ramy stalowej, nazywane również węzłem narożnym, okapowym bądź wierzchołkowym jest miejscem połączenia słupa oraz rygła ramy. W praktyce inżynierskiej węzły tego typu można projektować jako śrubowe bądź spawane. Przy spełnieniu pewnych wymagań, dotyczących np. odporności na niestateczność płaskich, ścinanych ścianek, węzły tego typu można obliczać metodą składnikową zalecaną przez Eurokod [1]. W procesie obliczeń tą metodą określa się w węźle tzw. składniki podstawowe (obszary, w których można przyjąć dominujący rodzaj oddziaływania oraz deformacji), a następnie ich cechy mechaniczne – sztywność oraz nośność. W kolejnym etapie obliczeń, na podstawie związków geometrycznych oraz warunków równowagi, wyznacza się nośność na zginanie oraz sztywność obrotową węzła. Szczegółowe informacje oraz obszerne przykłady obliczeniowe można znaleźć w literaturze, np. w [2, 3].

Właściwe zaprojektowanie węzła okapowego jest dosyć trudnym zagadnieniem [4–6]. Wynika to przede wszystkim z występowania dużych sił wewnętrznych w narożu oraz skomplikowanej geometrii samego węzła. Konstruowanie i wymiarowanie węzłów o dużej nośności jest często łatwiejsze w przypadku węzłów spawanych [7]. Natomiast połączenie słupa oraz rygła na budowie, za pomocą styku śrubowego, można wykonać w pewnej odległości od naroża, gdzie wartości sił wewnętrznych są małe.

W artykule przedstawiono metodę i wyniki badań naroży ram stalowych poddanych obciążeniu statycznemu. W ba-

¹⁾ Politechnika Koszalińska, Wydział Inżynierii Lądowej, Środowiska i Geodezji; dorota.krystosik@tu.koszalin.pl

This article presents the methodology and results of tests on steel frame knee joints subjected to static loading. The research focused on assessing the stiffness and resistance of joints with slender webs. The test stand made for this purpose was designed to induce a loading condition in the tested element that actually occurs in the corners of steel frames. The experiment was carried out on three identical knee joints, with the test of the first one being a pilot test to verify the test stand and the measurement methods used.

Description of the tested knee joint

A knee joint of S355J2 steel was adopted for the study, in which two I-beam stubs connected at right angle and capped with end plates. As a result, the main part of the joint took the form of a square web panel, with all edges supported by flanges and stiffeners (Figure 1).

Prior to the main tests, corners 2 and 3 were evaluated for the accuracy of their fabrication, with particular attention to geometric deviations from the middle plane of the web

daniach szczególną uwagę skupiono na ocenie sztywności i nośności naroży o smukłych środnikach. Wykonane w tym celu stanowisko badawcze zaprojektowano w taki sposób, aby wywołać w badanym elemencie stan obciążenia, jaki realnie występuje w narożach ram stalowych. Eksperyment przeprowadzono na trzech jednakowych narożach, przy czym badanie pierwszego było badaniem pilotażowym, w którym sprawdzano stanowisko badawcze oraz zastosowane metody pomiarowe.

Opis badanego naroża

Do badań przyjęto węzeł narożny ze stali S355J2, w którym pod kątem prostym połączono dwa dwuteowe króćce blachownicowe, zakończone blachami węzłowymi. W efekcie zasadnicza część węzła przyjęła postać kwadratowego panelu środnika, którego wszystkie krawędzie są podparte pasami oraz żebrami usztywniającymi (rysunek 1).

Przed przystąpieniem do badań, naroża nr 2 i 3 poddano ocenie dokładności wykonania ze szczególnym uwzględnieniem

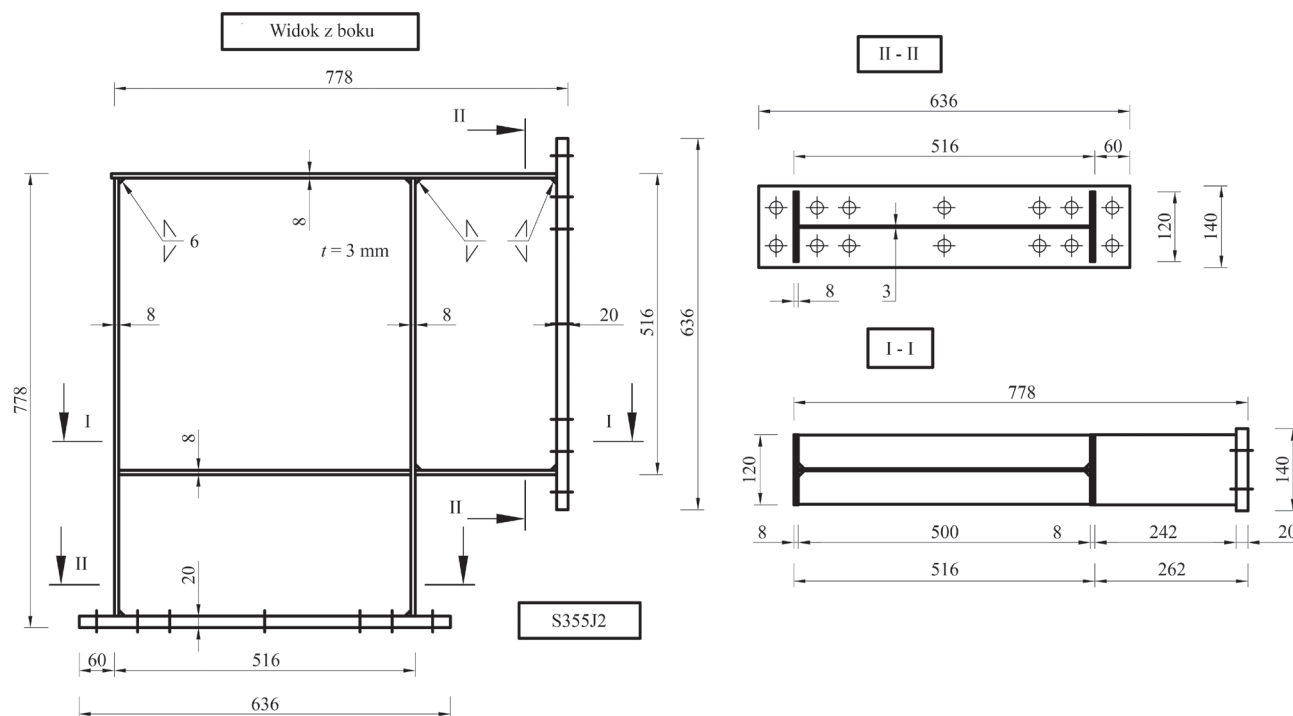


Fig. 1. Dimensions of knee intended for testing

Rys. 1. Wymiary naroża przeznaczanego do badań

(table 1). The knee joints, placed horizontally (with the middle plane parallel to the ground), were measured using a precise geometric leveling method with a Leica DNA 03 device and an invar bar code staff. These instruments were used to determine the position of selected points on the leveled corner. The difference in elevation between the theoretical middle plane and the given point

Table 1. Summary of the most important results from the imperfection measurements

Tabela 1. Zestawienie najważniejszych wyników z pomiarów imperfekcji

Knee joint/ Węzeł narożny	Web panel deviation / Odchyłka panelu środnika	
	average / średnia [mm]	maximum / maksymalna [mm]
nr 2	0.085	0.302
nr 3	-0.039	0.234

odchyłek geometrycznych względem płaszczyzny środkowej naroża (tabela 1). Pomiary naroży ułożonych poziomo (płaszczyzną środnika równoległe do podłoża) przeprowadzono metodą geometrycznej niwelacji precyzyjnej przy użyciu urządzenia Leica DNA 03 oraz kodowej łąty inwarowej, za pomocą których określono położenie wybranych punktów wypoziomowanego naroża. Różni-

represented the sought-after deviation. For each element, several dozen readings were taken within the web, as well as in narrow planes of the flanges, stiffeners, and end plates.

Based on the obtained results, it was concluded that the tested elements show high manufacturing accuracy and the measured deviations do not exceed the allowable values, according to guidelines [8].

Within the adopted research program, the mechanical parameters of the material from which the corners were made were determined. At the prefabrication stage of the joints, samples were taken from the sheet metal for material testing in a static tensile test according to [9]. Twenty four samples were made in the shape of “dogbones”. Twelve from 3 mm thick sheet metal (group A), and twelve from 8 mm thick sheet metal (group B). Figure 2 shows the stress-strain ($\sigma - \varepsilon$) curves for samples from both groups. An analysis of the graphs for both groups clearly shows that the results for one of the samples in group A (9A) deviate from the others. Therefore, a statistical test was conducted to reject a single outlier using the Dixon's Q test [10] and assuming a significance level of 0.05. The values of the random variable Q were compared with the critical value Q_{kr} , and based on this comparison, the result for sample 9A was rejected as a gross error. Table 2 presents a summary of the average values of the obtained results for both groups. Based on the obtained results, it can be concluded that the steel used in both groups shows high quality (with small fluctuations in mechanical properties). The differences between the two groups are significant. In the case of Group B, the obtained mechanical parameters correspond to those of S450 steel.

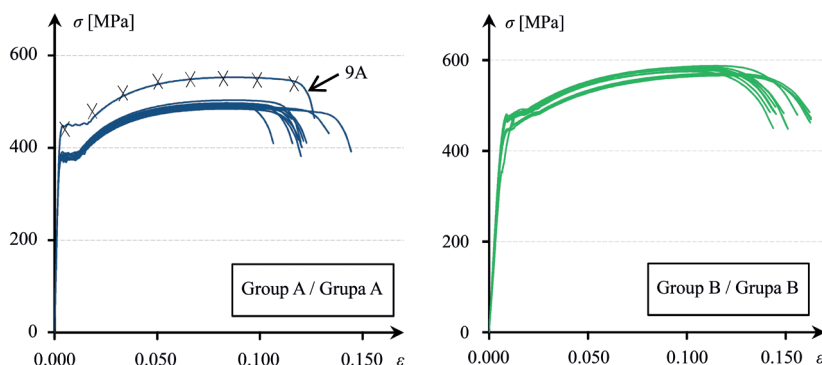


Fig. 2. Characteristics $\sigma - \varepsilon$ for samples from group A and B
Rys. 2. Charakterystyki $\sigma - \varepsilon$ w przypadku próbek z grupy A i B

Table 2. Results of tests on samples from groups A and B

Tabela 2. Wyniki badań próbek z grupy A i B

Samples / Próbki	Plastic strain / Odkształcenia plastyczne ε_p [%]	Yield strength / Granica plastyczności R_e [MPa]	The ultimate force / Największa siła F_m [kN]	Ultimate strength / Granica wytrzymałości R_m [MPa]	Young's modulus / Modul Younga E [GPa]
Group A / Grupa A	0.02	380.98	22.12	496.65	201.49
Group B / Grupa B	0.02	468.28	138.55	577.03	201.01

Description of the test stand, equipment, and measurement methods

The laboratory tests of steel frame corners were conducted in the Faculty Laboratory of Building Materials and Structures at the Koszalin University of Technology, on a specially prepared test stand presented in Photo 1. The stand

ca rzędnych (teoretycznej płaszczyzny środka oraz danego punktu) stanowiła poszukiwaną odchyłkę. W przypadku każdego elementu wykonano kilkadziesiąt odczytów w obrębie płaszczyzny środka, jak również wąskich płaszczyzn pasów, żeber oraz blach czołowych. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że badane elementy odznaczają się dużą dokładnością wykonania, a pomierzone odchyłki nie przekraczają wartości dopuszczalnych, zgodnie z wytycznymi [8].

W ramach przyjętego programu badań określono parametry mechaniczne materiału, z którego wykonano naroża. Na etapie prefabrykacji węzłów, z arkuszy blach pobrano próbki do badań materiału w statycznej próbie rozciągania wg [9]. Wykonano po 12 próbek, w kształcie tzw. wiosełek, z blachy o grubości 3 mm (grupa A) oraz 8 mm (grupa B). Na rysunku 2 przedstawiono przebieg charakterystyki naprężenie -odkształcenie ($\sigma - \varepsilon$) w przypadku próbek z obu grup. Wyniki jednej z próbek w grupie A (9A) odbiegają od pozostałych, dlatego też przeprowadzono test statystyczny na odrzucenie pojedynczego odstającego pomiaru, wykorzystując metodę Q-Dixona [10] i przyjmując poziom istotności wynoszący 0,05. Porównano wartość zmiennej losowej Q z wartością krytyczną Q_{kr} i na tej podstawie odrzucono wynik próbki 9A, traktując go jako błąd grubo. W tabeli 2 przedstawiono średnie wartości wyników badań próbek dla obu grup. Na ich podstawie stwierdzono, że stal użyta

w obu grupach próbek odznacza się bardzo dobrą jakością (niewielkimi fluktuacjami cech mechanicznych). Różnice pomiędzy obiema grupami są znaczne. W przypadku grupy B uzyskano parametry mechaniczne odpowiadające stali w gatunku S450.

Opis stanowiska, urządzeń i metod pomiarowych

Badania laboratoryjne naroży ram stalowych odbyły się w Wydziałowym Laboratorium Materiałów i Konstrukcji Budowlanych Politechniki Koszalińskiej, na specjalnie przygotowanym do tego celu stanowisku badawczym, przedstawionym

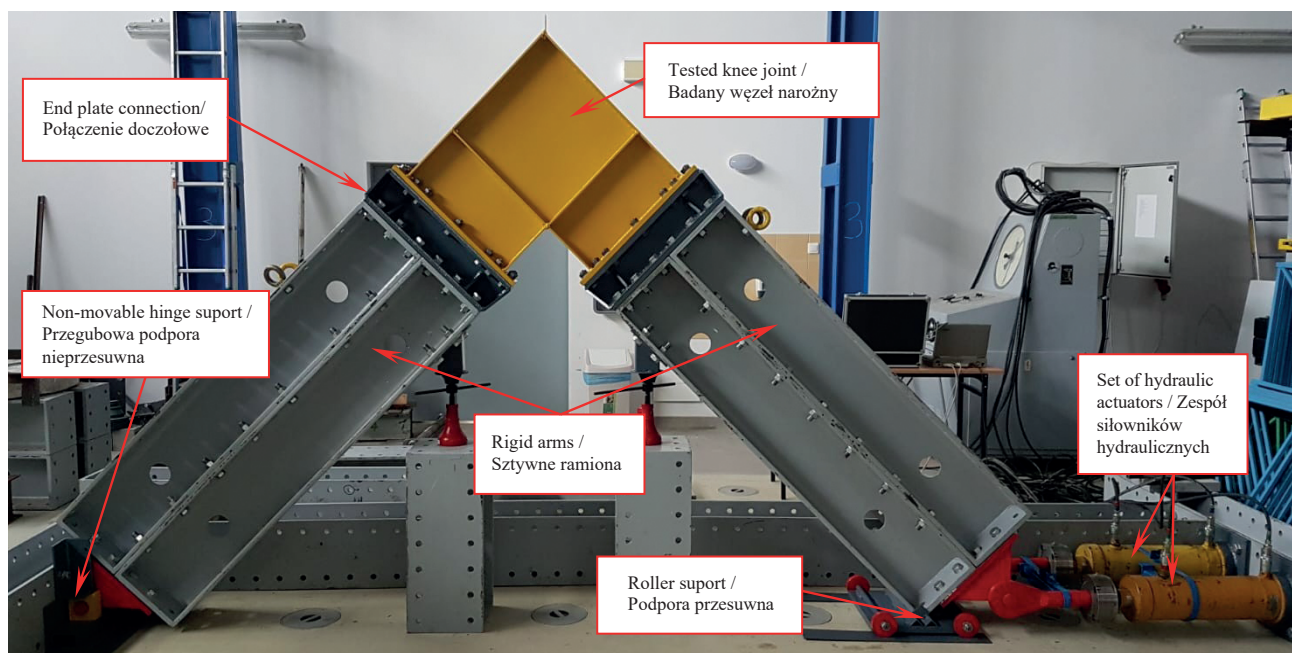


Photo 1. The testing stand

Fot. 1. Stanowisko badawcze

consists of two rigid arms connected at the top by the tested knee joint. The connection of the joint to the arms of the stand was made using 20 mm thick end plates and 14 sets of M20 class 10.9 HV bolts on each side. The assembled elements were placed on two supports: a non-movable hinged support on the left side (with a horizontal movement lock for the main part of the test), and a roller support on the right side. The load acting on the tested frame corner was obtained using hydraulic actuators that exerted a horizontal force at the support point of the right arm.

Data acquisition during the tests was performed using two independently operating systems: SAD 256 with a set of integrated sensors and Pontos/Aramis with two cameras. This modern measurement system is currently widely used in medicine, the aviation and automotive industries, energy, and research into new materials [11÷12]. The first of these systems is a multi-channel recorder of non-electrical quantities that works with sensors for measuring deformations, displacements, forces, temperature, and pressure. During the corner tests, this equipment was used to record data from force sensors (mounted on hydraulic actuators) and displacement sensors, including those in the direction of the applied load.

The second method of data recording was based on optoelectronic methods. During the test, the equipment takes a series of high-resolution images. These images are recorded at a user-defined frequency. Subsequently, the photographs are analyzed using specialized software – GOM Correlate [13].

The process of image processing involves digital image correlation. This involves a comparative analysis of images in the initial state (state 0) and in the current state (state i). One of the images – most often it is a photo of the object before loading – is selected as a reference image. On this

na fotografii 1. Stanowisko to składa się z dwóch sztywnych ramion, które w górnej części połączone badanym węzłem narożnym. Połączenie naroża z ramionami stanowiska zrealizowano za pomocą blach czołowych grubości 20 mm oraz 14 zestawów śrub M20 klasy 10.9 HV na jedną stronę. Scalone elementy osadzono na dwóch podporach: z lewej strony na podporze przegubowo nieprzesuwanej (w zasadniczej części badania z blokadą przesuwu poziomego), a z prawej strony na podporze przegubowo przesuwanej. Obciążenie działające na badane naroże ramy uzyskano przy użyciu siłowników hydraulicznych, które wywierały siłę poziomą w miejscu podparcia prawego ramienia.

Zapis danych podczas badań odbywał się przy użyciu dwóch niezależnie działających systemów: SAD 256 z zestawem zintegrowanych czujników oraz Pontos/Aramis wraz z dwiema kamerami. Ten nowoczesny system pomiarowy jest obecnie powszechnie stosowany, m.in. w medycynie, przemyśle lotniczym, samochodowym, w energetyce, a także w badaniach nowoczesnych materiałów [11÷12]. Pierwszy z wymienionych systemów jest wielokanałowym rejestratorem wielkości nieelektrycznych, który współpracuje z czujnikami do pomiarów odkształceń, przemieszczeń, sił, temperatury i ciśnienia. Podczas przeprowadzania badań naroży wykorzystano tę aparaturę do zapisu danych z czujników sił (zamontowanych na siłownikach hydraulicznych) oraz czujników rejestrujących przemieszczenia, m.in. na kierunku zadawanego obciążenia.

Drugi sposób rejestracji danych bazował na metodach optyczno-elektrycznych. Podczas badania aparatura wykonuje serię zdjęć o dużej rozdzielczości. Ich rejestracja odbywa się z zadaną przez użytkownika częstotliwością. Następnie fotografie są analizowane przy użyciu specjalistycznego oprogramowania – GOM Correlate [13].

Proces związany z przetwarzaniem zdjęć polega na cyfrowej korelacji obrazu. Sprowadza się to do analizy porównawczej zdjęć w stanie początkowym (stan 0) i w stanie aktualnym (stan

image, an area (contour) is defined on which the program places a grid of regular points. Each point defines the center of a square or rectangular area (so-called facet) with a side dimension of several to several dozen pixels. Each facet is assigned coordinates in the adopted reference system (this may be the system adopted during calibration). During the analysis, the software compares the image in the current state with the reference image, thus determining the deformations of the facets. The obtained information can be used to create a displacement vector of selected points, an image of strains intensity, or the actual deformation of the surface of the tested object [13].

Notes on conducting the research. After conducting the initial test to verify the test stand and measuring equipment, certain changes were introduced which, in the author's opinion, positively influenced the course of subsequent tests. The most important changes that had a significant impact on the quality of the results obtained include:

- the use of paints (background and contrasting pattern) on the surface of the tested elements with the lowest possible gloss. This contributed to a significant reduction of reflections on the surface of the photographed elements,
- the correction of the camera setup relative to the tested joint and appropriate illumination of the object – this procedure allowed, in the GOM Correlate software, to apply a grid of points with a higher density over the entire surface of the specimen; as a result, a more complete information about displacements in this area was obtained,
- changing the design of the lateral stiffeners that determine the position of the corner in the vertical plane and ensure stability during the test (tension members – Photo 2a) were replaced with rollers rolling on defined planes (Photo 2b),

i-ty). Jeden z obrazów – najczęściej jest to zdjęcie obiektu przed jego obciążeniem – wybierane jest jako obraz referencyjny. Na nim definiuje się obszar (kontur), na którym program umieszczana siatkę regularnych punktów. Każdy z punktów wyznacza środek kwadratowego bądź prostokątnego obszaru (tzw. fasetka) o wymiarach boku od kilkunastu do kilkudziesięciu pikseli. Każdej fasetce przyporządkowane są współrzędne w przyjętym układzie odniesienia (może to być układ przyjęty podczas kalibracji systemu). W trakcie analizy oprogramowanie porównuje zdjęcie w stanie aktualnym z obrazem referencyjnym, określając w ten sposób deformacje fasetek. Uzyskanych informacji można użyć do stworzenia wektora przemieszczeń wybranych punktów, obrazu intensywności odkształceń czy rzeczywistej deformacji powierzchni badanego obiektu [13].

Uwagi dotyczące prowadzenia badań. Po przeprowadzeniu pierwszego badania, którego celem było sprawdzenie stanowiska badawczego wraz z aparaturą pomiarową, wprowadzono pewne zmiany, które moim zdaniem, korzystnie wpłynęły na przebieg kolejnych badań. Do najważniejszych zmian, które miały istotny wpływ na jakość otrzymanych wyników, można zaliczyć:

- użycie farb na powierzchni badanych elementów o możliwie małej połyskliwości, co przyczyniło się do znacznej redukcji refleksów na powierzchni fotografowanych elementów;
- korektę ustawienia zestawu kamer względem badanego naroża oraz odpowiednie doświetlenie obiektu – zabieg ten pozwolił nałożyć w oprogramowaniu GOM Correlate siatkę punktów o dużym zagęszczeniu na całej powierzchni środnika; w efekcie uzyskano pełniejszą informację o przemieszczeniach w tym obszarze;
- zmianę rozwiązania konstrukcyjnego stężeń bocznych, które ustalają położenie naroża w płaszczyźnie pionowej oraz zapewniają stabilizację w trakcie badania (elementy ciągnowe – fotografia 2a zastąpiono rolkami toczącymi się po wyznaczonych płaszczyznach – fotografia 2b);

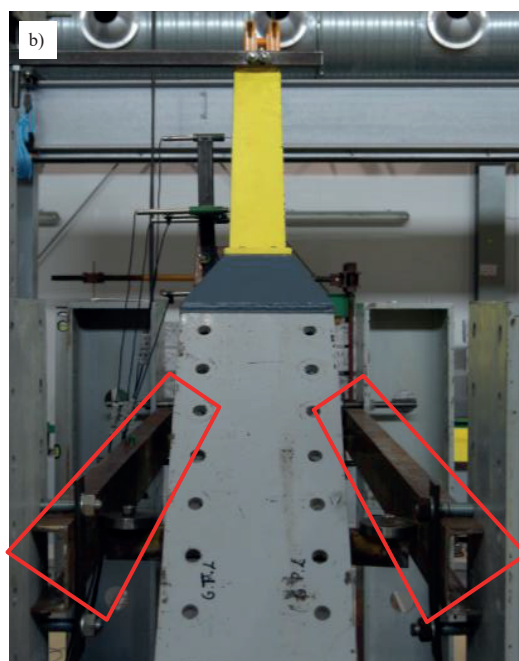


Photo 2. Bracing system of the testing stand: a) bracing implemented with tension rods; b) stabilisation implemented with rollers
Fot. 2. Układ stężeń stanowiska badawczego: a) stężenia realizowane za pomocą cięgien; b) stabilizacja realizowana za pomocą rolek

• changing the support conditions of the stand in such a way that at the initial moment of loading the left support worked as a roller (using shims to minimize the friction force), while in the key stage as a non-movable hinge (this allowed for an accurate determination of the forces acting on the system in the initial and main phase of the test).

• zmianę warunków podparcia stanowiska w taki sposób, aby w początkowym momencie obciążania lewa podpora pracowała jako przegubowo przesuwna (zastosowano przekładki minimalizujące siłę tarcia), natomiast w kluczowym etapie jako przegubowo nieprzesuwana, co pozwoliło na dokładne ustalenie wartości sił działających na układ w początkowej oraz zasadniczej fazie badania).

Analysis of the test results for the joints

The first stage of the analysis of the test results consisted in determining the internal forces (in particular, the bending moment M) in the corners. These forces were determined based on the measurement data from the SAD 256 system. Considering the system of forces acting on the test stand (Figure 3b), it is easy to determine the values of the internal forces in the tested corner (Figure 3a). It should be noted, however, that under load, certain changes occur in the geometry of the test stand. This effect is schematically presented in Figure 4, with the initial state of the system (state 0) indicated in blue and the current state (i -th) in green. It should be noted that significant changes in geometry will appear when the individual zones of the joint undergo significant deformations. These changes have some impact on the forces in the joint. For this reason, based on the geometric relationships between the two distinguished states, the value of the bending moment M_i in the corner was determined according to the formula:

Analiza wyników badań naroży

Pierwszy etap analizy wyników badań polegał na określeniu sił wewnętrznych w narożach (przede wszystkim momentu zginającego M). Siły te określono na podstawie danych pomiarowych z systemu SAD 256. Rozpatrując układ sił działających na stanowisko badawcze (rysunek 3b), łatwo jest określić wartości sił wewnętrznych w badanym narożu (rysunek 3a). Należy jednak podkreślić, że pod wpływem obciążenia dochodzi do pewnych zmian w geometrii stanowiska. Efekt ten przedstawiono schematycznie na rysunku 4 – kolorem niebieskim stan początkowy układu (stan 0), natomiast kolorem zielonym stan aktualny (i -ty). Istotne zmiany geometrii pojawiają się wówczas, gdy poszczególne strefy węzła ulegną znacznym deformacjom. Zmiany te w pewnym stopniu wpływają na wartości sił w węzle. Z tego względu, na podstawie geometrycznych zależności pomiędzy dwoma wyróżnionymi stanami, wartość momentu zginającego M_i w narożu określono wg wzoru:

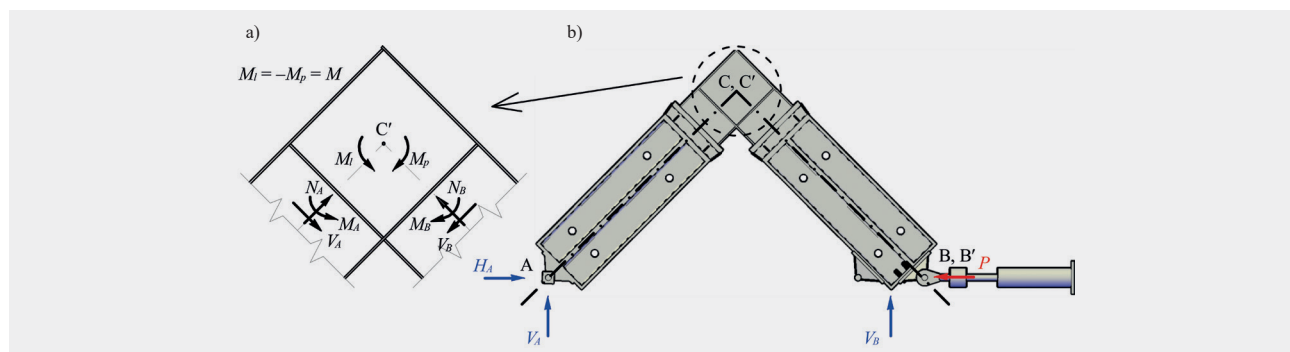


Fig. 3. The knee under the load: a) internal forces system; b) external forces system

Rys. 3. Naroże pod wpływem obciążenia: a) układ sił wewnętrznych; b) układ sił zewnętrznych

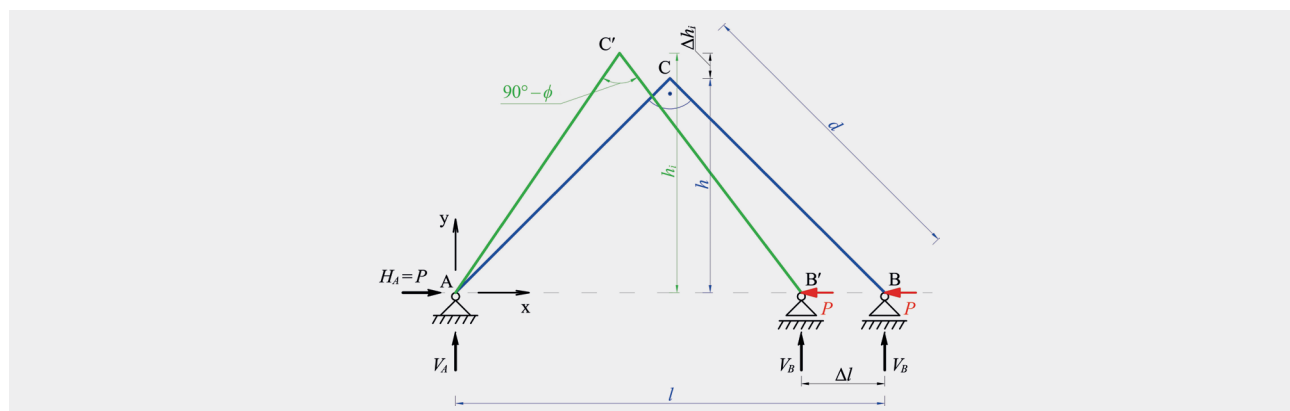


Fig. 4. Change in geometry of stand elements under the influence of applied load

Rys. 4. Zmiana geometrii elementów stanowiska pod wpływem działającego obciążenia

$$M_i = P_i \cdot h_i = P_i \cdot \sqrt{d^2 - \left(\frac{l - \Delta l_i}{2}\right)^2} - V_A \cdot \frac{l - \Delta l_i}{2}, \quad (1)$$

where: Δl_i is the average displacement, measured using 2 displacement sensors in the axes of the actuators, and P_i is the sum of the horizontal forces determined using actuators.

The second stage of data analysis involved determining the deformations of the tested knee joints based on the data collected using the Pontos/Aramis system. The main geometric quantity sought was the change in the angle between the arms of the joint. Photo 3 show images of the corner with the values of angles α_i determined using the GOM Correlate software. The reference lines, between which the angle was read, were assumed in the areas of the corners where no significant deformations were observed. The first photograph (Photo 3a) was chosen as a reference – the state before applying the load, the second (Photo 3b) is a randomly selected shot showing the corner in a loaded state, and the third (Photo 3c) is the last of the recorded photographs in the test.

$$M_i = P_i \cdot h_i = P_i \cdot \sqrt{d^2 - \left(\frac{l - \Delta l_i}{2}\right)^2} - V_A \cdot \frac{l - \Delta l_i}{2}, \quad (1)$$

gdzie: Δl_i – średnie przemieszczenie, zmierzone za pomocą dwóch czujników przemieszczeń w osiach siłowników; P_i – suma poziomych sił określonych za pomocą siłomierzy.

Drugi etap analizy danych polegał na określeniu deformacji badanych naroży na podstawie zebranych danych przy użyciu systemu Pontos/Aramis. Główną poszukiwaną wielkością geometryczną była zmiana kąta pomiędzy ramionami naroży. Na fotografii 3 przedstawiono obrazy naroża z określonymi wartościami kątów α_i , za pomocą oprogramowania GOM Correlate. Linie referencyjne, pomiędzy którymi dokonano odczytu kąta, przyjęto w obszarach naroży, gdzie nie odnotowano istotnych wartości odkształceń. Fotografia 3a została wybrana jako referencyjna – stan przed przyłożeniem obciążenia, fotografia 3b jest losowo wybranym ujęciem przedstawiającym naroże w stanie obciążenia, natomiast fotografia 3c to ostatnia z zarejestrowanych w badaniu.

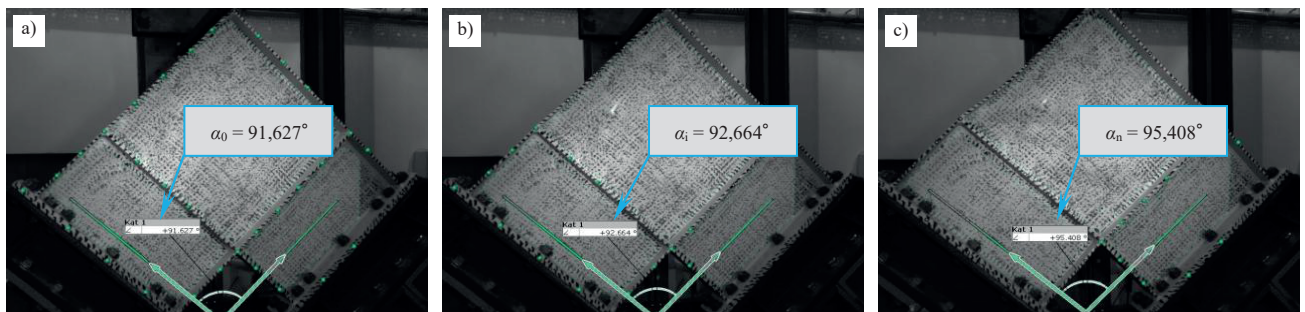


Photo 7. Photos of the knees: a) knee before loading; b) randomly selected view of the knee under load; c) condition of knee after the test
Fot. 3. Zdjęcia naroży: a) naroże przed obciążeniem; b) losowo wybrane ujęcie naroża pod obciążeniem; c) stan naroża po badaniu

Based on the collected and processed information, a set of values of the angle ϕ was determined for each tested joint, according to the relationship:

$$\Phi_i = \alpha_i - \alpha_0, \Rightarrow i = 1, 2, \dots, n. \quad (2)$$

Integration of data from the first two, basic stages of the analysis of the test results allowed to determine the moment-rotation characteristic ($M_i - \phi_i$) of the joints, which was approximated (using the least squares method) by a four-parameter Richard-Abbott power model [14]:

$$M(\Phi) = \frac{(S - S_p) \cdot \Phi}{\left[1 + \left(\frac{S - S_p}{M_u} \cdot \Phi\right)^c\right]^{\frac{1}{c}}} + S_p \cdot \Phi \quad (3)$$

where: S is the initial rotational stiffness of the joint, S_p is the rotational hardening stiffness of the joint, M_u is the ultimate bending moment of the joint, and c is the curve fitting parameter.

A linear characteristic of the tested corners was also created, describing the behavior of the joints in the initial loading phase, in the form of the relationship:

$$M'(\Phi) = S \cdot \Phi. \quad (4)$$

Na podstawie zebranych oraz przetworzonych informacji ustalono zbiór wartości kąta ϕ w przypadku każdego badanego naroża, wg zależności:

$$\Phi_i = \alpha_i - \alpha_0, \text{ dla } i = 1, 2, \dots, n. \quad (2)$$

Integracja danych z dwóch pierwszych, zasadniczych etapów analizy wyników badań pozwoliła określić charakterystykę moment – obrót naroży ($M_i - \phi_i$), które aproksymowano (przy użyciu metody najmniejszych różnic kwadratów) czteroparametrowym modelem potęgowym Richarda-Abbotta [14]:

$$M(\Phi) = \frac{(S - S_p) \cdot \Phi}{\left[1 + \left(\frac{S - S_p}{M_u} \cdot \Phi\right)^c\right]^{\frac{1}{c}}} + S_p \cdot \Phi \quad (3)$$

gdzie: S – początkowa sztywność węzła na obrót; S_p – sztywność wzmocnienia węzła na obrót; M_u – nośność graniczna węzła na zginanie, c – parametr dopasowania krzywej.

Utworzono również liniową charakterystykę badanych naroży, opisującą zachowanie węzłów w początkowej fazie obciążenia, w postaci zależności:

$$M'(\Phi) = S \cdot \Phi. \quad (4)$$

A summary of the values of the parameters of the tested joints is presented in Table 3, while a graphical representation of the moment – rotation relationship for all the corners examined is shown in Figure 5.

Wartości parametrów badanych węzłów przedstawiono w tabeli 3, natomiast graficzny przebieg zależności moment – obrót w przypadku wszystkich zbadanych naroży na rysunku 5.

Table 3. Parameters of the tested knees
Tabela 3. Parametry badanych węzłów

Corner / Naroże	Initial rotational stiffness / Początkowa sztywność węzła na obrót S_j [kN·m/rad]	Hardening stiffness / Sztywność wzmocnienia S_p [kN·m/rad]	Ultimate bending moment / Nośność obliczeniowa węzła na obrót M_u [kN·m]	Fitting parameter / Parametr dopasowania krzywej c	Convergence / Zbieżność R
Corner no 1 Naroże nr 1	31 673	231,6	151,01	3,28	0,999
Corner no 2 Naroże nr 2	28 107	550,0	146,35	3,81	0,999
Corner no 3 Naroże nr 3	31 186	115,9	147,67	4,20	1,000

The adoption of slender webs had a significant impact on the $M - \phi$ relationship of the tested corners. Therefore, the bending moments M_{el} at which the web panels buckled were additionally determined. The identification of M_{el} was based on the results of the photogrammetric analysis of the corner images, which was performed using the GOM Correlate program [13]. Based on the data of the increasing deformations of the corners with increasing load, the value of the angle ϕ_{el} was identified, which corresponded to the appearance of displacements perpendicular to the plane of the webs (Figure 6).

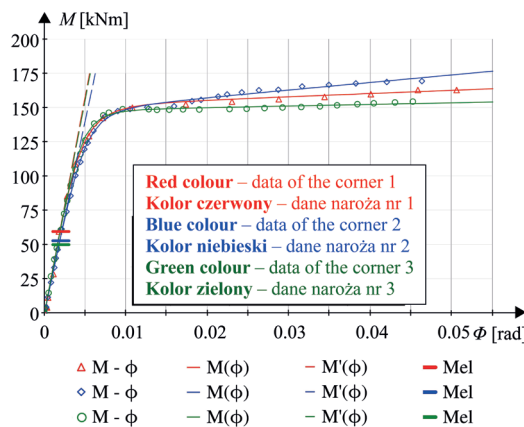


Fig. 5. Moment – rotation of the all tested knees
Rys. 5. Zależność moment – obrót wszystkich badanych naroży

Bardzo istotny wpływ na przebieg zależności $M - \phi$ badanych naroży miało przyjęcie smukłych środków. Z tego względu wyznaczono dodatkowo momenty zginające M_{el} w narożach, po przekroczeniu których panele środków ulegały wyboczeniu. Identyfikację M_{el} wykonano, opierając się na wynikach z analizy fotogrametrycznej zdjęć naroży, którą wykonano przy użyciu programu GOM Correlate [13]. Na podstawie danych o narastających deformacjach naroży od obciążeń zidentyfikowano wartość kąta ϕ_{el} , który odpowiadał

pojawianiu się prostopadłych przemieszczeń do płaszczyzny środka (rysunek 6).

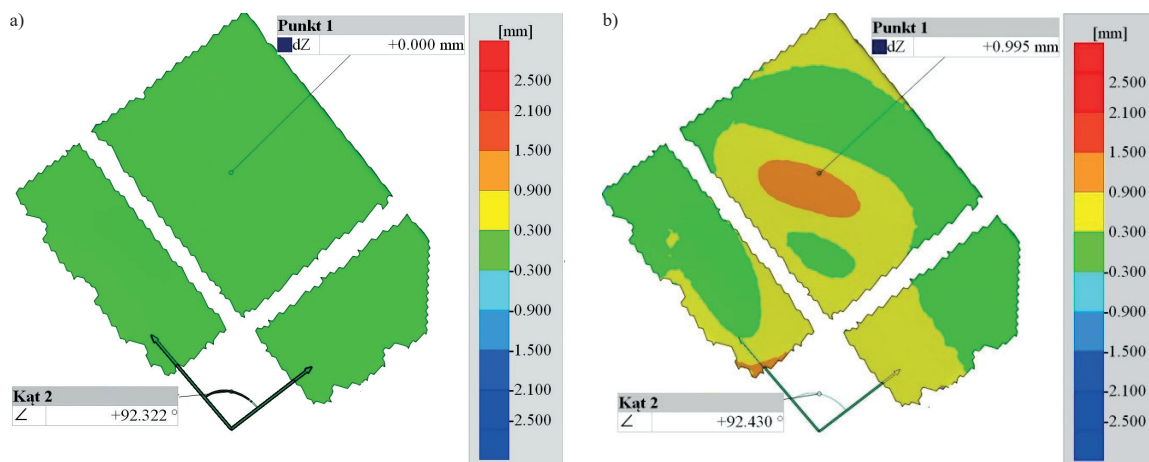


Fig. 6. Displacements perpendicular to the web plane: a) image showing state 0 – before loading the knee; b) image of displacements from the load “inducing” web buckling

Rys. 6. Przemieszczenia prostopadłe do płaszczyzny środka: a) obraz przedstawiający stan 0 – przed obciążeniem naroża; b) obraz przemieszczeń od obciążenia „wywołującego” wyboczenie środka

The values of angles ϕ_{el} and the analytical characteristics $M(\phi)$ were then used to determine the values of the moments M_{el} . The results are presented in Table 4 and plotted on the $M - \phi$ diagrams (Figure 6). In addition, using the capabilities of the GOM Correlate program, the main deformations in the web panels of the corners were determined for the load corresponding to the load initiating the loss of stability (Figure 7). The strains reached values significantly below 0.2%. This means that the appearance of transverse deformations of the web panels occurred in the elastic state, i.e., at stresses below the yield strength of steel. Additionally, Figure 8 shows the deformation of the web panel in the final phase of the test, in which significant deformations of the web panel and permanent strains occurred.

Table 4. Summary of angles ϕ_{el} and corresponding moments M_{el}
 Tabela 4. Zestawienie kątów ϕ_{el} i odpowiadających im momentów M_{el}

Corner / Naroże	Angle value / Wartość kąta ϕ_{el} [rad]	Bending moment / Moment zginający M_{el} [kN·m]
Corner no 1 / Naroże nr 1	0.0019	59.34
Corner no 2 / Naroże nr 2	0.0019	52.58
Corner no 3 / Naroże nr 3	0.0016	49.78

Wartość kątów ϕ_{el} oraz analityczne charakterystyki $M(\phi)$ użyto następnie do wyznaczenia liczbowych wartości momentów M_{el} . Wyniki przedstawiono w tabeli 4 oraz naniesiono na wykresy zależności $M - \phi$ (rysunek 6). Ponadto, wykorzystując możliwości programu GOM Correlate, określono główne odkształcenia w środnikach naroży od obciążenia, które odpowiadało obciążeniu inicjującemu utratę stateczności (rysunek 7). Odkształcenia osiągnęły wartości znacznie

mniejsze niż 0,2%. Oznacza to, że pojawienie się deformacji poprzecznych środników miało miejsce w stanie sprężystym, a więc przy naprężeniach niższych niż granica plastyczności stali. Dodatkowo na rysunku 8 przedstawiono dużą deformację oraz trwałe odkształcenia panelu środnika w końcowej fazie badania.

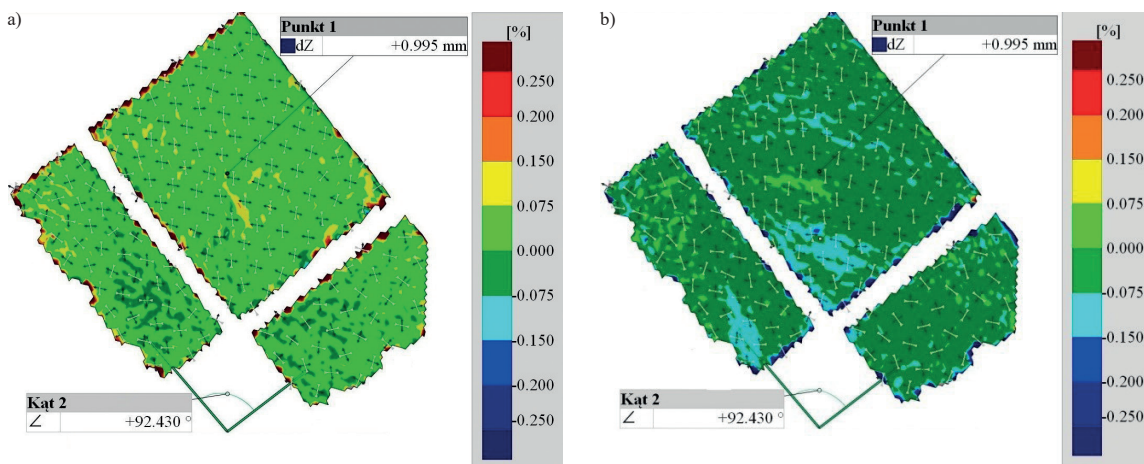


Fig. 7. Strains in the web panel for the load condition (compare Fig. 5b): a) principal strains I (under tension); b) principal strains II (under compression)
 Rys. 7. Odkształcenia panelu środnika w stanie obciążenia (por. rysunek 5b): a) odkształcenia główne I (przy rozciąganiu); b) odkształcenia główne II (przy ściskaniu)

Conclusions

The aim of the presented experimental research was to determine the behavior of steel frame corners with slender webs under static load. The tests were carried out on three identical corners. In each of the tested corners, the failure mode was very similar – under increasing load, buckling of the webs occurred.

Despite some differences between the preliminary test (performed on corner I) and the tests of the remaining two corners, very similar $M - \phi$ characteristics

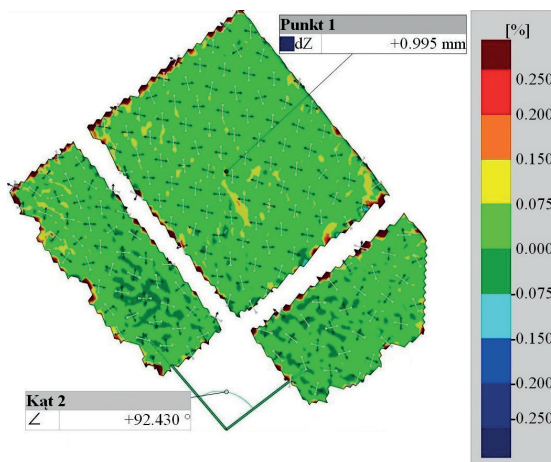


Fig. 8. The deformation of the web panel in the final phase of the test
 Rys. 8. Deformacja panelu środnika w końcowej fazie badania

Wnioski

Celem prezentowanych badań eksperymentalnych było określenie zachowania się stalowych naroży ram o smukłym środniku pod obciążeniem statycznym. Badanie przeprowadzono na trzech jednakowych narożach spawanych. W każdym z badanych naroży model zniszczenia był bardzo podobny – pod wpływem narastającego obciążenia dochodziło do wyboczenia środników naroży.

Pomimo pewnych różnic, które miały miejsce pomiędzy badaniem próbnym (wykonanym na narożu nr 1) a badania-

can be observed. It can be assumed that it was due to the high accuracy of the manufacturing of the test elements, as well as the repeatability of the test conditions.

The presented method of testing joints, data recording, and adopted methods of result analysis allow for a precise determination of the behavior of the corner, both in the initial and final stages of loading. This is possible even when the tested joints are sensitive to the loss of stability of individual components (e.g., web panels). In addition, the prepared test stand allows for testing corners of different geometries.

The aim of this research is to better understand the behavior of welded frame knees under load, which will allow for the development of more rational design methods in the future.

Received: 02.09.2024

Revised: 07.10.2024

Published: 25.11.2024

mi pozostałych dwóch naroży, stwierdzono bardzo duże podobieństwa charakterystyk $M - \phi$. Należy sądzić, że było to spowodowane dużą dokładnością wykonania elementów badawczych oraz powtarzalnością warunków wykonania badań.

Przedstawiony sposób badania węzłów, rejestracji danych oraz przyjęte metody analizy wyników umożliwiają dokładne określenie zachowanie się naroża, zarówno w początkowej, jak i w końcowej fazie obciążenia. Jest to możliwe nawet wtedy, gdy badane węzły odznaczają się wrażliwością na utratę stateczności poszczególnych składników (np. paneli środnika). Ponadto, przygotowane stanowisko badawcze daje możliwość badania naroży o różnej geometrii.

Przedstawione w artykule badania mają na celu poznanie zachowania się spawanych naroży ram pod obciążeniem, co w przyszłości pozwoli opracować bardziej racjonalne metody ich projektowania.

Wpłynął do redakcji: 02.09.2024 r.

Otrzymano poprawiony po recenzjach: 07.10.2024 r.

Opublikowano: 25.11.2024 r.

Literatura

- [1] PN-EN 1993-1-8:2005. Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 1-8: Projektowanie węzłów.
- [2] Bródka J, Kozłowski A, Ligocki I, Łąguna J, Ślęczka L. Projektowanie i obliczanie połączeń i węzłów konstrukcji stalowych. Tom 2. Rzeszów: Polskie Wydawnictwo Techniczne, 2009.
- [3] Faella C, Piluso V, Rizzano G. Structural steel semirigid connections. Theory, Design and Software. CRC Press, Hanover 1999.
- [4] The Steel Construction Institute. Publication P398: Joints in Steel Construction: Moment-resisting Joints to Eurocode 3, London: Taylor & Francis, 2013.
- [5] Kozłowski A, Pisarek Z. End-plate steel joint with four bolts in the row. XIth International Conference on Metal Structures, (ICMS-2006), Rzeszów, Polska, 21-23 czerwiec 2006.
- [6] Ślęczka L. Shaping and analysis of selected steel frame joints subjected to variable actions, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej. Rzeszów 2013.

- [7] Krystosik P. Design resistance of welded knees in steel frames, Czasopismo Inżynierii Łądowej, Środowiska i Architektury, JCEEA, t. 65, Art. nr 2, 2018, doi: 10.7862/rb.2018.29.
- [8] EN 1090-2. Wykonanie konstrukcji stalowych i aluminiowych. Część 2: Wymagania techniczne dotyczące konstrukcji stalowych.
- [9] EN ISO 6892-1:2019. Metale. Próba rozciągania – Część 1: Metoda badania w temperaturze pokojowej.
- [10] Twardowski K, Traple J. Uwagi dotyczące wątpliwych wyników pomiarów Czasopismo Wiertnictwo nafta gaz, Tom 23/2, AGH, Kraków 2006.
- [11] Mguil-Touchal S, Morestin F, Brunet M. Various experimental applications of digital image correlation method. Computer Methods and Experimental Measurements. Trans. Model. Simul. 16, 45–58, 1997.
- [12] Lu H, Cary PD. Deformation measurements by digital image correlation: Implementation of a second-order displacement gradient. Exp. Mech. 40, 393-400, 2000.
- [13] GOM Correlate V8 SR1 Manual Basic, Braunschweig, Niemcy, 2015.
- [14] Chen WF, Kishi N, Komuro M. Semi-rigid connection. Handbook. J. Ross Publishing, 2011.