

Badania zespolonych słupów stalowo-betonowych poddanych długotrwałym obciążeniom

Dr inż. Elżbieta Szmigiera, Politechnika Warszawska

1. Wprowadzenie

W referacie przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych, przeprowadzonych na modelach zespolonych słupów stalowo-betonowych, poddanych działaniu obciążeń długotrwałych. Powstające od tych obciążeń odkształcenia nie są najważniejszym czynnikiem uwzględnianym przy zniszczeniu konstrukcji zespolonych, jednakże mogą mieć istotny wpływ na użyteczność i trwałość tych konstrukcji.

Skurcz i pęcznienie betonu należą do zjawisk reologicznych, które mają wpływ na pracę konstrukcji zespolonych stalowo-betonowych pod obciążeniem długotrwałym [3]. Pęcznienie może spowodować zmianę sił wewnętrznych w ustrojach statycznie niewyznaczalnych oraz w ustrojach, w których współdziałają ze sobą elementy z różnych materiałów i o różnej wytrzymałości. W konstrukcjach zespolonych złożonych

z materiałów, których właściwości z upływem czasu ulegają zmianom, następuje redystrybucja naprężeń. Z doświadczeń wynika, że pod wpływem działania obciążeń długotrwałych, pęcznienie betonu wywołuje spadek naprężeń w betonie przy jednoczesnym ich wzroście w stali.

Celem przedstawianych badań była próba ustalenia jakościowego wpływu pęcznienia betonu na pracę zespolonych słupów stalowo-betonowych wybranego typu, także w odniesieniu do słupów żelbetonowych.

2. Opis przeprowadzonych badań

2.1. Modele badawcze

Badania przeprowadzono na modelach słupów o wymiarach przekroju poprzecznego 114 x 120 mm i wysokości 1200 mm.

Modele zespolone składały się z częściowo obetonowanego dwuteownika stalowego HE120A (rys. 1).

Dodatkowo w przekroju umieszczono zbrojenie zwykłe, złożone z czterech prętów podłużnych $\varnothing 10$ mm i strzemion o średnicy $\varnothing 5$ mm, przyspawanych do stalowego kształownika.

W celach porównawczych wykonano także modele słupów żelbetonowych o tych samych wymiarach i zbrojeniu zwykłym jak modele zespolone. Zastosowano także beton tej samej klasy wytrzymałości.

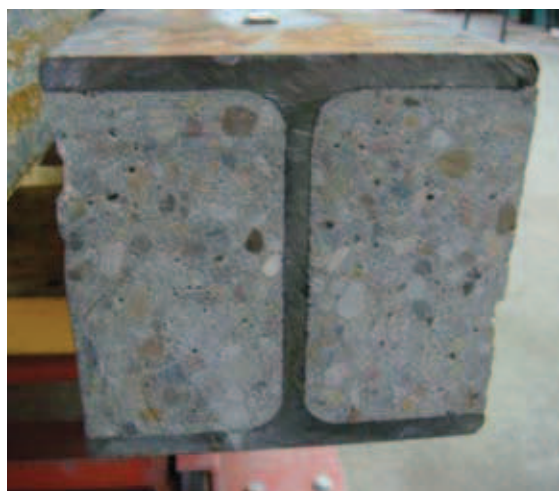
Łącznie wykonano 14 modeli słupów, siedem zespolonych i siedem żelbetonowych.

Do badań cech mechanicznych betonu wykonano próbki sześciennie o wymiarach 150 mm x 150 mm x 150 mm oraz próbki walcowe 150 mm x 300 mm.

2.2. Przebieg badań

Opisywane badania wykonywano w Laboratorium Zakładu Konstrukcji Budowlanych Politechniki Warszawskiej i przebiegały w następujących etapach:

- wykonanie modeli słupów,
- obciążenie aż do zniszczenia trzech modeli słupów zespolonych i trzech żelbetonowych,
- umieszczenie pozostałych elementów w pełzarkach (po trzy z każdego rodzaju, pozostałe dwa z każdego typu pozostawiono nieobciążone, jako świadki),
- utrzymywanie obciążenia przez 500 dni,
- zakończenie badań długotrwałych,
- obciążenie aż do zniszczenia elementów, obciążonych wcześniej w pełzarkach.



Rys. 1.
Przekrój poprzeczny modelu słupa zespolonego



Rys. 2. Model słupa żelbetowego podczas badań w prasie hydraulicznej

Cechy mechaniczne betonu badano po 28 dniach od betonowania oraz podczas prowadzenia kolejnych etapów obciążania modeli badawczych.

Badania polegające na obciążaniu elementów siłą osiową aż do zniszczenia, prowadzono w prasie hydraulicznej DB 600 (rys. 2). Podczas badań mierzono odkształcenia na powierzchni betonu i stali oraz ugięcia w środku wysokości elementów. Pomiary prowadzono tensometrami elektrooporowymi o bazach: dla betonu – 75 mm oraz dla stali – 20 mm. Ugięcia elementów mierzono natomiast przy pomocy tensometrów indukcyjnych.

Etap badań, obejmujących obciążenie długotrwałe trwał ponad rok. Modele słupów były umieszczone w pełzarkach sprężynowych (rys. 3), a badania polegały na okresowych pomiarach odkształceń stali i betonu w górnym i dolnym przekroju elementów, zarówno obciążanych w pełzarkach oraz nie obciążonych,

znajdujących się w tych samych warunkach temperaturowych i wilgotnościowych.

W ramach tego etapu przeprowadzono także badania pełzania betonu, z którego wykonano modele słupów.

3. Analiza wyników badań

3.1. Odkształcenia elementów poddanych obciążeniu długotrwałemu

Na rysunkach 4 i 5 przedstawiono wykresy odkształceń betonu i stali w czasie prowadzonych badań pod obciążeniem długotrwałym dla wybranych modeli słupów zespolonych i żelbetowych.

Analiza wykresów na rysunkach 4, 5 prowadzi do następujących wniosków:

- w modelach słupów zespolonych odkształcenia betonu rosną szybciej i osiągają znacznie większą wartość niż odkształcenia stali,
- po przekroczeniu 300 dni obciążania, wartość odkształceń stabili-



Rys. 3. Modele słupów podczas badań pod obciążeniem długotrwałym

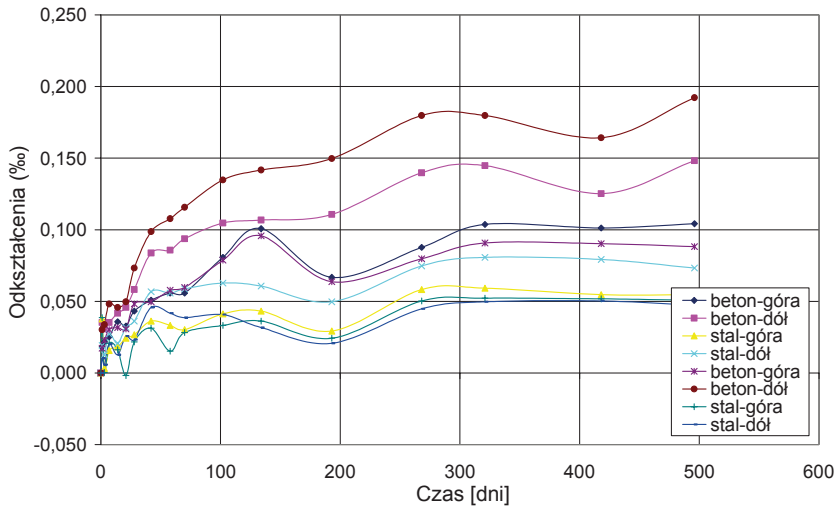
zuje się; zjawisko to jest szczególnie widoczne w przypadku odkształceń stali,

- odkształcenia betonu w modelach słupów żelbetowych osiągają znacznie większą wartość (dwu-, a nawet czterokrotnie), niż odkształcenia betonu w modelach zespolonych;
- w przypadku modeli żelbetowych, pomierzone maksymalne wartości odkształceń są prawie dwukrotnie większe niż wartości minimalne (dla tego samego elementu), natomiast w modelach zespolonych – prawie czterokrotnie.

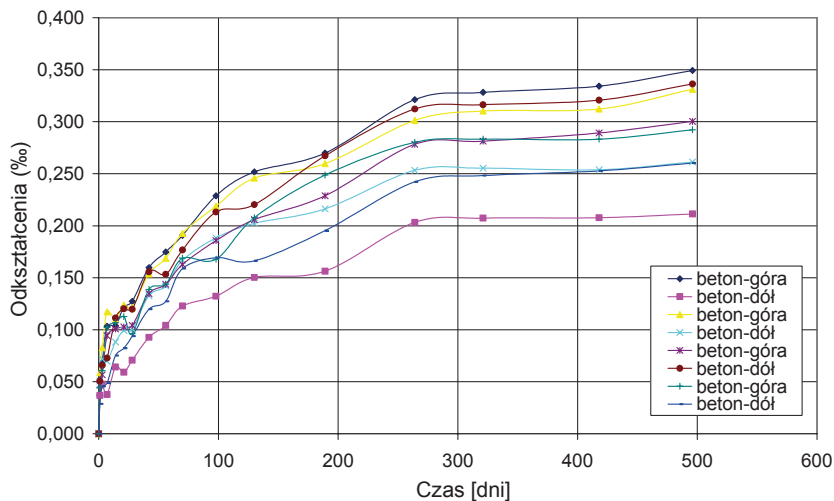
3.2. Analiza modeli słupów pod obciążeniem doraźnym

W tabeli 1 zamieszczono wyniki badań modeli słupów, poddanych obciążeniu doraźnemu, to znaczy obciążaniu w prasie hydraulicznej, aż do zniszczenia.

Etap I dotyczy obciążania w prasie hydraulicznej modeli słupów zespolonych i żelbetowych, które nie były poddane obciążeniom długotrwałym. Etap II natomiast dotyczy ele-



Rys. 4. Przyrost odkształceń podczas badań długotrwałych – model zespolony



Rys. 5. Przyrost odkształceń podczas badań długotrwałych – model żelbetowy

mentów, które wcześniej były obciążane w petzarkach.

Zgodnie z przewidywaniami, wartość siły niszczącej, uzyskana dla elementów zespolonych jest dużo większa, niż w przypadku modeli żelbetowych (wzrost w etapie II o 92 %). Różnica ta jest jeszcze większa dla wyników badań elementów, które nie były obciążone w petzarkach (I etap), gdzie przyrost siły wyniósł 130%.

Można także zauważyć, że w przypadku modeli słupów zespolonych, wartość obciążenia, uzyskanego w etapie II jest nieco mniejsza od otrzymanej podczas badań etapu I.

Na rysunkach 6, 7, 8 przedstawiono porównanie zależności siła – odkształcenia stali i betonu, dla

modeli słupów zespolonych i żelbetowych. Na każdym rysunku zestawiono wykresy odkształceń pionowych

wych i poprzecznych, zarejestrowane w obu opisywanych etapach – przed i po obciążaniu w petzarkach.

Pomiary były prowadzone w trzech przekrojach elementów, natomiast w referacie przedstawiono jedynie wykresy dla przekroju w środku wysokości badanych modeli słupów.

Dla porównania, na rysunkach 6, 7, 8 umieszczono także wykresy odkształceń dla świadków SSZ1 i SS1, czyli modeli umieszczonych obok elementów obciążonych w petzarkach.

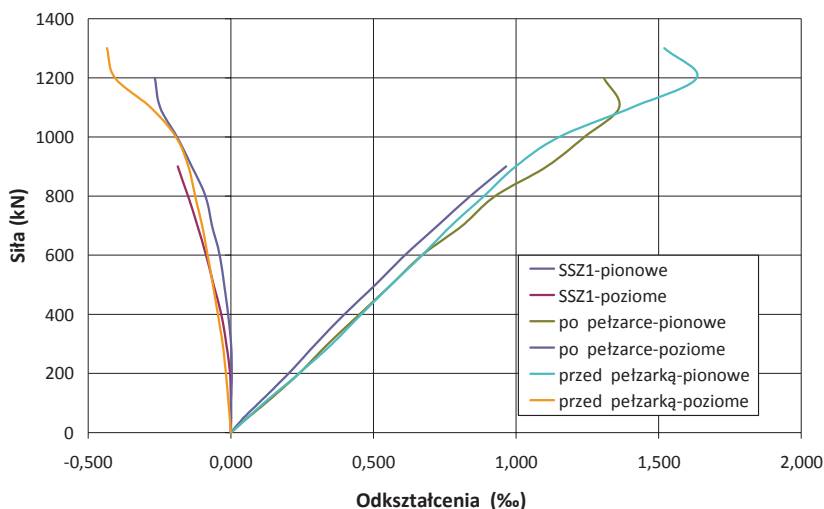
Z wykresów na rysunkach 6, 7 wynika, że odkształcenia pionowe betonu we wszystkich typach badanych modeli słupów zespolonych mają podobny przebieg i wartość, natomiast odkształcenia pionowe stali w modelu nie poddanym działaniu obciążeń długotrwałych (etap I) są wyraźnie mniejsze niż w dwóch pozostałych elementach.

Do wartości siły równej około 400 kN, odkształcenia poprzeczne betonu w elementach zespolonych są bliskie zeru. Dopiero po zwiększeniu obciążenia zaczynają wyraźnie rosnąć. Odkształcenia poprzeczne w części stalowej przekroju rosną od chwili przyłożenia obciążenia i osiągają większą wartość, niż odkształcenia betonu. Można zatem stwierdzić, że odkształcenia poprzeczne stali i betonu, w odróżnieniu od pionowych, nie są sobie równe (przy tym samym poziomie obciążenia).

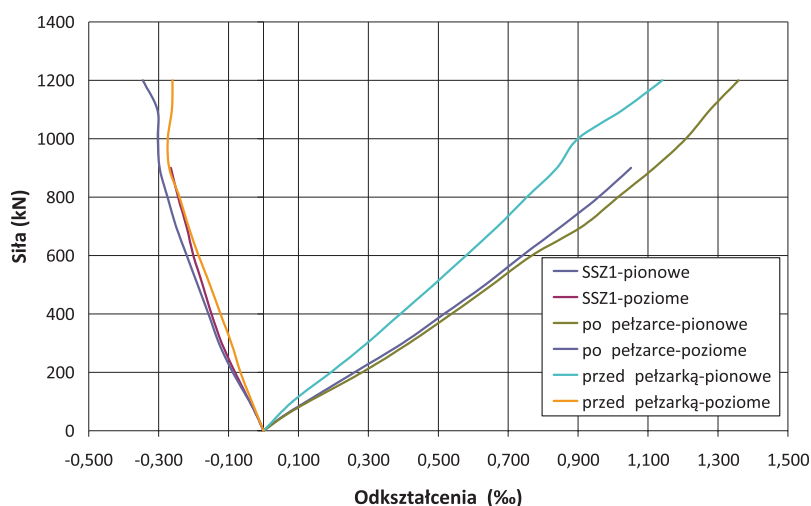
Niezależnie od rozpatrywanego typu elementu odkształcenia poziome mają podobny przebieg i wartość.

Tabela 1. Wyniki badań modeli słupów pod obciążeniem doraźnym

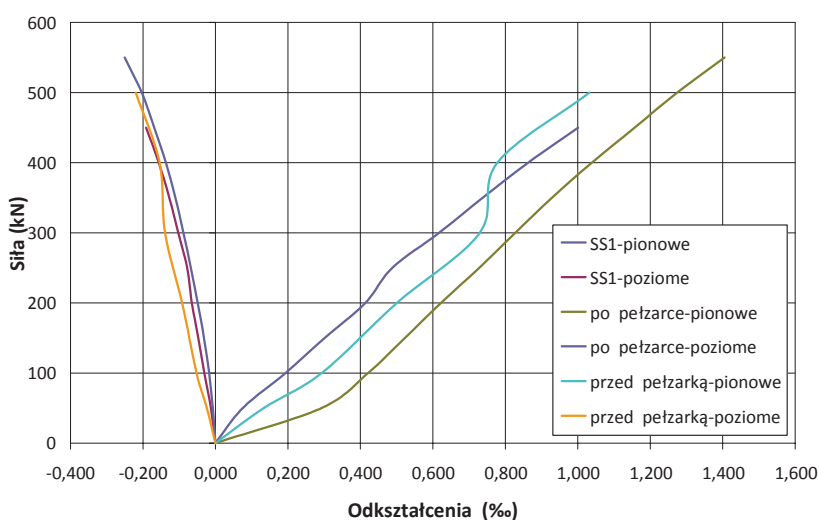
Etap / oznaczenie modeli	Typ modelu	Wytrzymałość na ściskanie betonu [MPa]	Wartość siły niszczącej [kN]	Średnia wartość Nn [kN]
I / SKZ1	zespolony	39	1120	1233
I / SKZ2			1300	
I / SKZ3			1280	
I / SKB4	żelbetowy		580	540
I / SKB5			500	
I / SKB6			540	
II / SZ1	zespolony	42	1178	1137
II / SZ2			1120	
II / SZ3			1112	
II / S1	żelbetowy		595	591
II / S2			350	
II / S3			587	



Rys. 6. Przebieg odkształceń podłużnych (ściskanie) i poprzecznych (rozciąganie) w betonie dla modeli zespolonych



Rys. 7. Przebieg odkształceń podłużnych (ściskanie) i poprzecznych (rozciąganie) w stali dla modeli zespolonych



Rys. 8. Przebieg odkształceń podłużnych (ściskanie) i poprzecznych (rozciąganie) w betonie dla modeli żelbetowych

Analizując wykresy odkształceń dla modeli słupów żelbetowych (rys. 8) można zauważyć, że odkształcenia pionowe dla modeli etapu I, II i świadka różnią się znacznie, co do swojej wartości. Najwyższy przyrost odnotowano dla odkształceń w elementach poddanych wcześniej obciążeniu w pełzarkach. Również wartość odkształceń betonu w elementach żelbetowych dla danego poziomu obciążenia jest ponad dwukrotnie większa w porównaniu z modelami zespolonymi.

Powyzszą zależność odnotowano także w przypadku odkształceń poprzecznych betonu.

3.3. Analiza wyników badań w odniesieniu do EC4

Na podstawie uzyskanych z badań wyników przeprowadzono obliczenia wartości maksymalnych sił N_{Ed} , którymi można obciążyć badane elementy według zaleceń podanych w normie konstrukcji zespolonych [4]. Obliczenia wykonano, podstawiając do zależności normowych wartości rzeczywistych cech mechanicznych betonu, stali konstrukcyjnej oraz zbrojenia zwykłego, pomierzone podczas prowadzonych badań. Analizę przeprowadzono dla modeli słupów zespolonych. Wartość siły N_{Ed} obliczono według wzoru:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi N_{pl,Rd}} \leq 1,0 \quad (3.1.)$$

gdzie:

$N_{pl,Rd}$ – nośność plastyczna przekroju zespolonego, liczona jako suma nośności na ściskanie jego części składowych,

χ – współczynnik redukcyjny.

W obliczeniach w etapie II uwzględniono wpływ efektów długotrwałych na efektywną sprężystą sztywność giętną. Moduł sprężystości betonu E_{cm} został zredukowany do wartości efektywnej $E_{c,eff}$, zgodnie z następującym wyrażeniem:

$$E_{c,eff} = E_{cm} \frac{1}{1 + (N_{G,Ed} / N_{Ed}) \varphi_t} \quad (3.2.)$$

gdzie:

$N_{G,Ed}$ – stała część siły normalnej

N_{Ed} – całkowita siła normalna.

Przyjętą do wzoru (3.2.) wartość współczynnika pełzania betonu, równą $\varphi_t = 1,8$ obliczono na podstawie wyników własnych badań dla betonu, z którego wykonano elementy badawcze.

W tabeli 2 przedstawiono porównanie wartości sił niszczących otrzymanych z badań elementów zespolonych, z obliczonymi według [4].

Wartości sił niszczących otrzymane z badań dla elementów, które wcześniej były obciążane w petzarkach są mniejsze, niż dla modeli etapu I. Może to świadczyć o niewielkim spadku nośności, związanej z wpływami czynników reologicznych na beton. Z tabeli 2 wynika natomiast, że nie uzyskano różnic wartości dla sił N_{Ed} , obliczonych według [4], mimo że w obliczeniach uwzględniono zalecenia dotyczące wpływu obciążeń długotrwałych na nośność elementów ściskanych. Należy podkreślić, że we wzorach przyjęto wytrzymałość betonu na ściskanie, pomierzoną w trakcie prowadzonych w obu etapach badań (patrz tab. 1). Niewielki przyrost wytrzymałości mógł zatem spowodować wzrost obliczonej dla etapu II nośności plastycznej przekroju $N_{pl,Rd}$. Uwzględniony w etapie II wpływ pełzania (dla $\varphi_t = 1,8$) na wartość modułu sprężystości betonu $E_{c,eff}$ spowodował zmniejszenie obliczonej sztywności przekroju. Miało to jednak tylko nieznaczny wpływ na ostateczną wartość współczynnika redukcyjnego χ , który posłużył do obliczenia siły normalnej N_{Ed} . Dla pierwszego i drugiego etapu badań (przed i po obciążeniu długotrwałym) obliczona wartość χ wyniosła, odpowiednio: 0,95 i 0,94.

Należy dodać, że przedstawioną w tabeli 2 wartość N_{Ed} otrzymano,

niezależnie od przyjętego we wzorze (3.2) stosunku sił $N_{G,Ed} / N_{Ed}$.

4. Podsumowanie

Przedstawione w referacie badania posłużyły do przeprowadzenia analizy wpływu obciążeń długotrwałych na pracę słupów zespolonych, również w odniesieniu do ściskanych elementów żelbetowych. Wyniki badań porównano z zaleceniami podanymi w normie konstrukcji zespolonych [4].

Na podstawie przeprowadzonej analizy można stwierdzić, że w przypadku obciążeń długotrwałych, zastosowanie elementów zespolonych ma korzystny wpływ na przebieg i wartość odkształceń betonu, w stosunku do modeli żelbetowych. Do sformułowania tego wniosku skłaniają autorkę następujące obserwacje z badań:

- rejestrowane podczas obciążeń długotrwałych wartości odkształceń betonu w modelach żelbetowych były znacznie większe niż w przypadku modeli słupów zespolonych,
- w elementach zespolonych obciążenie długotrwałe nie wpłynęło na przebieg i wartość odkształceń poprzecznych,
- długotrwałe obciążenie nie spowodowało także zmian wartości odkształceń pionowych betonu w elementach zespolonych; istotne różnice zaobserwowano natomiast w przypadku odkształceń betonu w modelach żelbetowych.

Przeprowadzone badania pod obciążeniem doraźnym wykazały także, że aż o 34% wzrosły odkształcenia stali w elementach zespolonych, poddanych wcześniej obciążeniu w petzarkach. Natomiast dla tych samych modeli zarejestrowano wzrost odkształceń betonu jedynie o 8% (dopiero przy obciążeniu równym 1000 kN). Należy dodać, że dla

elementów zespolonych otrzymano także o 8% mniejszą wartość siły niszczącej, w stosunku do modeli, które nie były wcześniej poddane obciążeniu długotrwałemu.

Obliczenia przeprowadzone według [4] wykazały, że zamieszczone w normie zalecenia dla słupów zespolonych, dotyczące zarówno ich nośności pod obciążeniem doraźnym, jak również przy uwzględnieniu wpływu zjawisk reologicznych mogą być niewystarczająco bezpieczne. W obu przypadkach obliczone wartości sił N_{Ed} są większe, niż siły niszczące, otrzymane z badań (tab. 2). Porównanie wyników doświadczeń z obliczeniami jest jeszcze bardziej niekorzystne dla elementów poddanych obciążeniu długotrwałemu. Należy dodać, że obliczenia prowadzono podstawiając do wzorów normowych średnie wartości cech mechanicznych stali i betonu uzyskanych podczas badań. Zatem w tym przypadku cały wymagany zapas bezpieczeństwa zależy jedynie od wartości zastosowanych współczynników.

Przedstawione wnioski potwierdzają wyniki wcześniejszych badań przeprowadzonych przez autorkę na całkowicie obetonowanych słupach zespolonych, poddanych obciążeniom doraźnym.

Należy pamiętać, że przedstawiona analiza dotyczy jedynie wybranych typów elementów, które były przedmiotem badań. Również liczba zbadanych modeli wymaga zachowania ostrożności, co do ostatecznych wniosków na tym etapie analizy.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Bodnar A., Chrzanowski M., Latus P., Reologia konstrukcji prętowych, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, 2006
- [2] Mazzotti C., Savoie M., Nonlinear creep damage model for concrete under uniaxial compression, Journal Engineering Mech., 129(9), 2003, 1065–1075
- [3] Mirza O., UY B., Finite element model for the long-term behaviour of composite steel-concrete push tests, Steel and Composite Structures, 10, 1, 2010, 45–67
- [4] PN-EN 1994-1-1 Eurokod 4: Projektowanie zespolonych konstrukcji stalowo-betonowych, Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków

Tabela 2. Porównanie wyników badań modeli słupów zespolonych z obliczonymi dla nich wartościami sił N_{Ed} według [4]

Etap / oznaczenie modelu	Średnia wartość siły niszczącej N_n [kN]	Obliczona siła N_{Ed} [kN]	Stosunek N_n / N_{Ed}
I / SKZ	1233	1296	0,95
II / SZ	1137	1309	0,87