ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2002
Seria: BUDOWNICTWO z. 95 Nr kol.1559

Szymon DAWCZYŃSKI *
Politechnika Śląska

PRZEBICIE W UJĘCIU NORMALIZACJI ŚWIATOWEJ

Streszczenie. Problem przebicia w ustrojach płytowo – słupowych znany jest od dziesięcioleci. Pomimo to, do tej pory nie istnieje ani jeden uniwersalny i w pełni wiarygodny algorytm obliczeń nośności na przebicie w płytach żelbetowych. W pracy przedstawiono charakterystykę modeli obliczeniowych zawartych w normach: polskich, niemieckich, brytyjskich, hiszpańskich, portugalskich, norweskich, amerykańskich oraz w Eurokodzie 2 i zaleceniach CEB–FIP. Wykonano także – na wybranym przykładzie – obliczenia porównawcze nośności na przebicie według tych norm i zaleceń.

PUNCHING SHEAR EFFECT IN THE CONTEXT OF WORLD NORMALISATION

Summary. Punching shear effect in slab–column structures has been known for a couple of decades. In spite of that, until now there are no universal and fully reliable algorithms for calculating punching shear resistance in reinforced concrete slabs. The paper presents the characteristic of the punching shear models according to: Polish, German, British, Spanish, Portuguese, Norwegian and American Standards, as well Eurocode-2 and CEB–FIP Model Code. Also, according to those standards and codes, calculations for comparison of the punching shear resistance were made (on one particular example).

1. Wprowadzenie

Obserwując wznoszone na przestrzeni ostatnich kilkudziesięciu lat obiekty budowlane, łatwo można dostrzec powszechność zastosowań konstrukcji płytowo – słupowych. Dotyczy to zarówno budownictwa miejskiego (obiekty mieszkalne, biurowce, budynki użyteczności publicznej), jak i budownictwa przemysłowego (hale produkcyjne, magazyny, parkingi wielokondygnacyjne itp.). Dzieje się tak głównie ze względu na wyraźne zalety użytkowe, jakimi charakteryzują się ustroje płytowo – słupowe.

---

* Opiekun naukowy: Prof. dr inż. Andrzej Ajdukiewicz

Do podstawowych zalet można zaliczyć:

- stosunkowo dużą dowolność kształtowania siatki słupów nośnych, a zatem możliwość uzyskiwania ciekawych form architektonicznych,
- funkcjonalność wnętrza – uzyskiwanie dużych, otwartych powierzchni oraz możliwość zmiany funkcji obiektu w trakcie jego użytkowania,
- wizualne i estetyczne korzyści – łatwiejsze i lepsze doświetlenie pomieszczeń,
- łatwość i szybkość wykonania – brak belek stropowych ułatwia np. deskowanie konstrukcji i układanie w tym deskowaniu zbrojenia, a także roboty wykończeniowe (tynkowanie, malowanie),
- obniżenie kubatury budynku przy zachowaniu założonej wysokości kondygnacji w świetle stropów,
- duży rozstaw siatki słupów nośnych przy równoczesnym małym ciężarze własnym całej konstrukcji.

Powszechność stosowania ustrojów szkieletowych ze stropami płaskimi zrodziła konieczność udoskonalenia algorytmów obliczeniowych i projektowych. Prace takie (dotyczące głównie zjawiska przebicia), poparte badaniami doświadczalnymi i analizami numerycznymi, prowadzone były m.in. w Katedrze Inżynierii Budowlanej Politechniki Śląskiej [1] i [2]. Powszechne obecnie zastosowanie w budownictwie mniej lub bardziej skomplikowanych programów komputerowych do obliczeń statycznych spowodowało duże ułatwienia w projektowaniu. Dzięki takim programom można z dużą dokładnością wyznaczyć miarodajne wartości sił wewnętrznych – praktycznie w dowolnym miejscu w konstrukcji. Wykonując obliczenia statyczne, nietrudno zauważyć, że przy prawidłowym zamodelowaniu, największe wartości momentów zginających oraz sił poprzecznych występują zawsze w strefie przypodporowej. I to właśnie pod wpływem takiego spiętrzenia sił wewnętrznych może dojść do zniszczenia konstrukcji przez przebicie.

2. Modele obliczeniowe przebicia

Po raz pierwszy problematyka przebicia pojawiła się w 1913 r. w pracy [3] autorstwa Arthura Talbota. Naukowiec ten na Uniwersytecie w Illinois (USA) przeprowadził badania połączeń słupów ze stopami i ławami fundamentowymi, w których zaobserwował zjawisko przebicia, później opisane za pomocą uproszczonego mechanizmu powstawania tego

zjawiska. Największy jednak postęp w tej dziedzinie zanotowano w drugiej połowie XX wieku. W wielu ośrodkach na świecie prowadzono na bardzo szeroką skalę badania doświadczalne, które przyczyniły się do lepszego rozpoznania i dokładniejszego, fizycznego opisu tego zjawiska. Niestety, pomimo usilnych prób i starań, do tej pory nie udało się stworzyć jednego, uniwersalnego i niezawodnego algorytmu obliczeń nośności na przebicie. Analizując dostępną literaturę, można zauważyć, iż obecnie wyodrębniły się dwie drogi prowadzenia obliczeń nośności na przebicie.

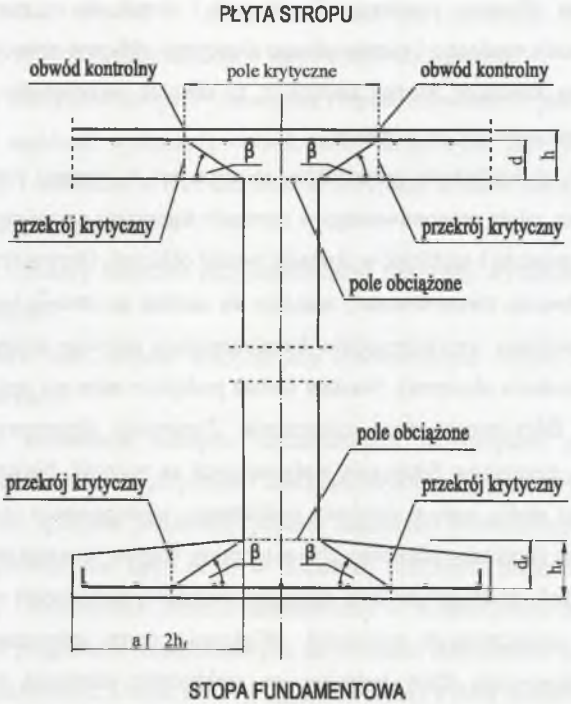
Pierwsza z nich, w większości przypadków zawarta jest w różnego rodzaju przepisach normowych. Główną zaletą proponowanego w normach algorytmu wyznaczania nośności na przebicie jest duża prostota i szybkość wykonania tychże obliczeń. Oczywiście wyniki, mimo iż są tylko przybliżeniem rzeczywistości, znajdują się zawsze po stronie bezpiecznej (m.in. wynika to z zastosowania współczynników bezpieczeństwa zarówno materiałowych, jak i przy ustalaniu zestawienia obciążeń). Niestety jednak podejście takie nie jest zbyt dokładne i nie odwzorowuje faktycznego stanu zniszczenia. Zazwyczaj algorytmy normowe nie uwzględniają wielu czynników faktycznie wpływających na nośność. Należą do nich m.in.: grubość płyty (efekt skali), wpływ zbrojenia podłużnego, występowanie otworów w strefie przypodporowej, czy chociażby odmienny charakter pracy słupów wewnętrznych, skrajnych i narożnych. Ze względu na długoletni cykl edycyjny przepisów normowych nie uwzględniają one także wielu nowoczesnych rozwiązań. Większość norm jednoznacznie ogranicza dopuszczone do stosowania klasy betonów, co praktycznie eliminuje z użycia betony wysokiej wytrzymałości (BWW) i betony bardzo wysokiej wytrzymałości (BBWW).

Druga grupa sposobów prowadzenia obliczeń na przebicie związana jest z autorskimi modelami obliczeniowymi. Zazwyczaj modele te powstały na podstawie własnych badań autorów i bardziej wiernie odzwierciedlają one przebieg zjawiska przebicia. Niestety (mimo dokładności wyników), są one stosunkowo mało uniwersalne, gdyż zazwyczaj dotyczą szczególnych przypadków przebicia. Poważną wadą takich opracowań również jest fakt, iż często algorytmy takie są bardzo skomplikowane i wymagają wielokrotnych obliczeń iteracyjnych (tak jak jest to m.in. w algorytmie Bromsa [4]).

3. Europejskie i amerykańskie przepisy normowe

Na rysunku 1 przedstawiono geometryczny model przebicia zawarty w Eurokodzie 2 [5]. Model ten dotyczy zarówno połączenia słupa z płytą stropu, jak i słupa ze stopą

fundamentową i w dużej mierze zgodny jest także z pozostałymi, omawianymi poniżej przepisami normowymi.



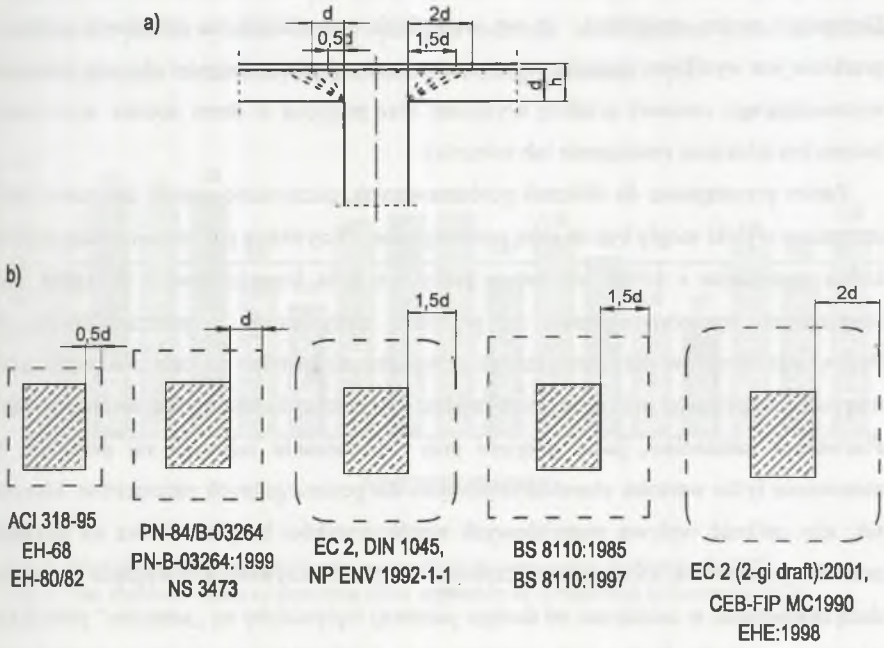
STOPA FUNDAMENTOWA

Rys.1. Model przebicia
Fig. 1. Model of punching shear

Szczegółowej analizie poddano algorytmy obliczeniowe nośności na przebicie zawarte w wybranych normach: polskich [7], [8], amerykańskiej [9], brytyjskich [10], [11], niemieckich [13], [14], [15], hiszpańskich [16], [17], [18], portugalskich [19], [20], norweskiej [21] oraz w Eurokodzie 2 [5], [6] i zaleceniach CEB – FIP [12]. Oprócz norm obecnie obowiązujących w poszczególnych państwach brano pod uwagę (w miarę możliwości) także przepisy już wycofane z użycia. Uczyniono tak ze względu na to, że w zdecydowanej większości państw w latach 1997 – 2001 zasadniczo zmieniono treści norm dotyczących konstrukcji żelbetowych (a w tym i przepisów regulujących obliczanie przebicia). I jak wynika to z przeprowadzonych dla konkretnego przykładu obliczeń, których wyniki zamieszczono w dalszej części tekstu, różnice, jakie osiągnięto stosując „stare" i „nowe" procedury normowe,

częstokroć sięgają kilkudziesięciu procent. A przecież nikt nie kwestionuje i nie domaga się weryfikacji projektów istniejących już obiektów, które w znacznej liczbie przypadków nie spełniają wymagań normowych obecnie obowiązujących w poszczególnych państwach.

Skalę i charakter omawianych różnic pomiędzy danymi normami najlepiej obrazuje rysunek 2, gdzie przedstawiono sposób przyjmowania obwodu kontrolnego dla słupa wewnętrznego:



Rys.2. Typowe obwody kontrolne: a) przekrój pionowy, b) widoki z góry
Fig. 2. Typical control perimeters: a) vertical secion, b) top views

Zgodnie z powyższym rysunkiem odległość obwodu kontrolnego od krawędzi podpory może wynosić od $d/2$ do $2 \cdot d$ (gdzie d jest wysokością użyteczną płyty). Dodatkowo jeszcze, gdy mamy do czynienia ze słupami o przekroju innym niż kołowy, różnica w długości obwodu kontrolnego (mimo takiej samej odległości od obszaru obciążonego) może wynikać ze sposobu poprowadzenia takiego obwodu w narożach. Konsekwencją sposobu przyjęcia teoretycznego, geometrycznego modelu przebicia jest założenie kąta nachylenia rysy ukośnej w stosunku do rozciąganej powierzchni płyty. W zależności od przypadku (rys.2) kąt ten może wynosić od $26{,}6°$ (przy przekroju krytycznym w odległości $2 \cdot d$, np. w [6] i [12]) do

63,4° (przy przekroju krytycznym w odległości *d/2*, np. w [9] i [17]). Warto tu także zwrócić uwagę na fakt, iż w przypadku dwóch ostatnich wydań norm hiszpańskich [16] i [18] odległość obwodu kontrolnego od podpory zmieniła się diametralnie (od jednej skrajnej wartości do drugiej).

Oprócz wymienionych tutaj różnic pomiędzy poszczególnymi przepisami normowymi dotyczącymi zjawiska przebicia, istnieje również pewna wspólna dla wszystkich tych przepisów cecha, która spowodowała próbę dokonania ilościowego porównania tych norm. Generalnie można stwierdzić, iż we wszystkich omawianych tu przepisach nośność na przebicie jest wynikiem iloczynu wysokości użytecznej płyty, długości obwodu kontrolnego wyznaczającego umowny przekrój krytyczny oraz przyjętej w danej normie wytrzymałości betonu (na ściskanie, rozciąganie lub ścinanie).

Zanim przystąpiono do obliczeń porównawczych, poczyniono pewne założenia, tak aby otrzymane wyniki mogły być ze sobą porównywane. Oczywiście porównanie takie nie jest do końca miarodajne i ścisłe, ale celem pracy nie była kompleksowa i dokładna analiza statystyczna wyników nośności na przebicie otrzymanych z poszczególnych norm. Porównanie wyników dla teoretycznego przypadku miało tylko na celu zwrócenie uwagi i uwypuklenie pewnego problemu, który prędzej czy później będzie musiał zostać rozwiązany. Pierwszym założeniem, jakie przyjęto przy wyznaczaniu nośności na przebicie, było stosowanie tylko wartości charakterystycznych dla poszczególnych parametrów. Uczyniono tak, aby uniknąć wpływu materiałowych współczynników bezpieczeństwa na teoretyczną nośność na przebicie, które to współczynniki w sposób oczywisty (ze względu na ich dosyć dużą rozbieżność w zależności od danego państwa) wpływałyby na „sztuczne" powiększanie różnic w wynikach. Oprócz tego, założono także, że charakterystyczna wytrzymałość betonu na ściskanie wyznaczona została na próbkach walcowych. Praktycznie jedynie tylko w polskiej normie [8] podstawową próbką do badań wytrzymałościowych betonu jest próbka o kształcie sześcianu. W tym przypadku zastosowano normowe wzory łączące wytrzymałości walcową i kostkową.

Obliczenia, których wyniki zaprezentowano poniżej, wykonano dla najczęściej spotykanego (a zarazem najłatwiejszego) przypadku osiowego przebicia. Węzeł płyty ze słupem (gdzie słup ma przekrój prostokątny) przyjęto jako wewnętrzny. W płycie stropu założono główne zbrojenie ortogonalne bez dodatkowego zbrojenia poprzecznego na przebicie.

Obliczenia analizowanego przykładu wykonano dla następujących danych liczbowych:

- grubość płyty: $h = 0,25\ m$,

- odległość środka ciężkości zbrojenia górnego płyty od krawędzi rozciąganej (uśredniona dla dwóch kierunków): $a_{sl} = 0,035\ m$,
- wymiary boków słupa prostokątnego: $c_1 = 0,3\ m$ i $c_2 = 0,4\ m$,
- stopień zbrojenia podłużnego (uśredniony dla dwóch prostopadłych do siebie kierunków): $\rho = 0,9\ \%$,
- charakterystyczna wytrzymałość walcowa betonu na ściskanie: $f_{ck} = 20\ MPa$.

Aby zobrazować rozbieżności pomiędzy wynikami otrzymanymi z poszczególnych norm, przedstawiono je na wykresie słupkowym jako wartości bezwzględne, gdzie za poziom odniesienia przyjęto wynik otrzymany z obliczeń według Eurokodu 2 [5].

Rys.3. Wartości bezwzględne nośności na przebicie w odniesieniu do Eurokodu 2 [5]
Fig. 3. The absolute values of punching shear resistance in comparison to Eurocode 2 [5]

4. Podsumowanie

Na podstawie przedstawionego powyżej diagramu (rys.3), uzyskanego z obliczeń nośności na przebicie według poszczególnych procedur normowych, można stwierdzić bardzo duże rozbieżności w wynikach tych obliczeń dla analizowanego przypadku. Biorąc pod uwagę wszystkie omawiane w tej pracy normy krajowe i przyjmując za punkt odniesienia wynik zgodny z procedurą Eurokodu 2 [5], różnice te sięgają prawie 70%. Trudno więc jednoznacznie określić, który z algorytmów normowych najlepiej przybliża rzeczywistość, a tym samym jest najbardziej wiarygodny i uniwersalny. Aby dokonać takiej jednoznacznej

oceny, należałoby przeprowadzić podobną analizę obliczeniową dla znacznej liczby przypadków, porównując uzyskane wartości z wynikami z badań laboratoryjnych.

Zdecydowanie najniższe nośności na przebicie uzyskano z obliczeń według zaleceń norm portugalskich [19] i [20]. Wynik liczbowy otrzymany z tej normy jest niemalże dwukrotnie mniejszy od wyniku obliczeń wg algorytmu normy polskiej [8]. Następne w kolejności "najbezpieczniejsze" normy (pod względem uzyskiwanych wyników dotyczących nośności na przebicie) to normy niemieckie [14] i [15], norma hiszpańska [18] i przepisy CEB–FIP [12]. W tym miejscu należy podkreślić, iż wymienione powyżej normy prezentują bardzo „ostrożne" podejście do projektowania monolitycznych połączeń płyty ze słupem, a co za tym idzie, algorytmy obliczeniowe zastosowane w tych normach mogą prowadzić do przewymiarowania przekrojów.

Najwyższe wartości nośności na przebicie w rozważanym przykładzie otrzymano z obliczeń według drugiego draftu Eurokodu 2 z 2001r. [6], normy polskiej [8] oraz norm brytyjskich [10] i [11]. Mimo to nie notowano awarii ustrojów projektowanych zgodnie z tymi normami, zatem algorytmy te spełniają warunki bezpiecznego projektowania.

Zaznaczyć należy, że wobec prowadzenia obliczeń z pominięciem normowych współczynników materiałowych (to jest dla charakterystycznych wartości wytrzymałości betonu) oraz braku ustosunkowania się do obowiązujących w poszczególnych krajach współczynników obciążenia, wartości uzyskane przy rzeczywistym projektowaniu mogą nie wykazywać aż tak ogromnych różnic, jednakże i tak rozbieżność wyników będzie znaczna. Wskazane zatem wydaje się wykonanie pełniejszej analizy powyższych przepisów na podstawie większej liczby przypadków, zwłaszcza że coraz więcej krajów „odchodzi" od norm jako przepisów bezwzględnie obowiązujących, traktując je jako materiały pomocnicze przy projektowaniu.

LITERATURA

1. Hulimka J.: Analiza teoretyczno-doświadczalna zjawiska przebicia w zespolonym węźle żelbetowej płyty ze słupem. Praca doktorska, Gliwice 1998.
2. Wandzik G.: Numeryczna symulacja przebicia płyty żelbetowej. Praca doktorska, Gliwice 1999.
3. Talbot A.N.: Reinforced Concrete Wall Footings and Column Footings. Bulletin 67, University of Illinois Engineering Experiment Station, Illinois 1913.

4. Broms C.E.: Punching of Flat Plates – A Question of Concrete Properties in Biaxial Compression and Size Effect. ACI Structural Journal, Vol.87, No.3 May-June 1990.
5. EUROCODE 2: Design of Concrete Structures – Part 1: General Rules and Rules for Buildings. European Prestandard ENV 1992-1-1:1991, Comité Européen de Normalisation, Brussels 1991.
6. prEUROCODE 2: Design of Concrete Structures – Part 1: General Rules and Rules for Buildings. European Standard prEN 1992-1 (2nd draft), European Committee for Standardization, Brussels 2001.
7. PN-84/B-03264. Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Obliczenia statyczne i projektowanie. Wydawnictwa Normalizacyjne ALFA, Warszawa 1984.
8. PN-B-03264:1999. Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Obliczenia statyczne i projektowanie. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 1999.
9. ACI 318-95. ACI Committee 318: Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-95) and Commentary (ACI 318R-95). American Concrete Institute, Farmington Hills, Second Printing – 1996.
10. BS 8110:1985 : Structural use of concrete: Part 1. Code of practice for design and construction: 1985 British Standards Institution, August 1985.
11. BS 8110: Part 1: 1997 : Structural use of concrete. Part 1. Code of practice for design and construction. British Standards Institution, London 1997.
12. CEB – FIP Model Code 1990. Comité Euro – International Du Béton, Bulletin d'Information No. 213/214. London 1993.
13. DIN 1045: Beton und Stahlbeton. Bemessung und Ausführung. DIN Deutsches Institut für Normung e.V. , Berlin, Juli 1988.
14. DIN 1045-1:1997 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton. Teil 1: Bemessung und Konstruktion. DIN Deutsches Institut für Normung e.V. , Berlin, Entwurf Februar 1997.
15. DIN 1045-1:2001. Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton. Teil 1: Bemessung und Konstruktion. DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin 2001.
16. Aroca Hernandez-Ros R., Avila Jalvo J.M., Miguel Rodriguez J.L., Mas-Guindal Lafarga A.-J., Paniagua Caparros J.L.: Curso de Forjados Armados. Servicio de Publicaciones del Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid.
17. Cuvillo R., Arenas de Pablo J.J., Ripoll Gomez J.B.: Forjados. Editores Técnicos Asociados, S.A., Barcelona 1980.

18. EHE: 1998. Instrucción de Hormigón Estructural. Con comentarios de los miembros de la Comisión Permanente de Hormigón. Centro de Publicaciones, Secretaría General Têcnica, Ministerio de Fomento. Madrid 2000.
19. Regulamento de estruturas de betão armado e pré-esforçado. Aprovado pelo Decreto-Lei n.° 349-C/83, de 30 de Julho. Porto Editora, LDA.; Porto, Julho de 1983.
20. NP ENV 1992-1-1 :1998. Norma Portuguesa. Eurocódigo 2: Projecto de estruturas de betão. Parte 1.1: Regras gerais e regras para edificios. Instituto Português da Qualidade. Monte de Caparica 1998.
21. NS 3473 E. Norwegian Standard. Concrete Structures. Design Rules. Norwegian Council for Building Standardization (NBR). Oslo 1992.

Recenzent: Dr hab. inż. Artem Czkwianianc, prof. Politechniki Łódzkiej

Abstract

Nowadays, the slab–column structures are more and more popular, because of their numerous advantages. However, the rules of calculations of the punching shear resistance in support zones are equivocal. The paper indicates the differences in approach to punching shear models according to: Polish, German, British, Spanish, Portuguese, Norwegian, American Standards, Eurocode-2 and CEB–FIP Model Code. In order to emphasize the divergences between these standards and codes, some calculations of the punching shear resistance were made and presented. The results of the calculations are given in absolute values and compared with results obtained according to Eurocode-2. Considering all algorithms in mentioned standards and codes, it is hard to determine which one is the most accurate, because the differences in results are significant and reach up to 70% (in comparison with Eurocode-2). The lowest values of the punching shear resistance have been obtained according to algorithms given in Portuguese Standards [19], [20], while the highest ones, according to the British Standards [10], [11], the Polish Standard [8] and the second draft of Eurocode-2 [6].