

Michał Knauff

OBLICZANIE KONSTRUKCJI ŻELBETOWYCH WEDŁUG EUROKODU 2

WYDANIE III POSZERZONE



PWN

**OBLICZANIE
KONSTRUKCJI ŻELBETOWYCH
WEDŁUG EUROKODU 2**

Michał Knauff

OBLICZANIE KONSTRUKCJI ŻELBETOWYCH WEDŁUG EUROKODU 2

WYDANIE III POSZERZONE



PWN

Projekt okładki i stron tytułowych **Ireneusz Gawliński**

Ilustracja na okładce **Michał Knauff**

Wydawca **Karol Zawadzki**

Koordynator ds. redakcji **Adam Kowalski**

Redaktor **Agnieszka Grabarczyk**

Produkcja **Mariola Grzywacka**

Lamanie **ScanSystem.pl Ewa Szelatyńska**

Książka, którą nabyłeś, jest dziełem twórcy i wydawcy. Prosimy, abyś przestrzegał praw, jakie im przysługują. Jej zawartość możesz udostępnić nieodpłatnie osobom bliskim lub osobiście znanym. Ale nie publikuj jej w internecie. Jeśli cytujesz jej fragmenty, nie zmieniaj ich treści i koniecznie zaznacz, czyje to dzieło. A kopiując jej część, rób to jedynie na użytek osobisty.

Szanujmy cudzą własność i prawo.
Więcej na www.legalnakultura.pl
Polska Izba Książki

Copyright © by Wydawnictwo Naukowe PWN SA
Warszawa 2012, 2015, 2018

ISBN 978-83-01-19987-6

Wydanie III
Warszawa 2019

Wydawnictwo Naukowe PWN SA
02-460 Warszawa, ul. Gottlieba Daimlera 2
tel. 22 69 54 321; faks 22 69 54 288; infolinia 801 33 33 88
e-mail: pwn@pwn.com.pl; reklama@pwn.pl
www.pwn.pl

Druk i oprawa: OSDW Azymut Sp. z o.o

Spis treści

Podstawowe oznaczenia	XVII
Spis tablic	XXIX
1. Wstęp	1
2. Właściwości betonu	5
2.1. Uwagi wstępne, struktura a właściwości mechaniczne betonu	5
2.2. Doświadczalne wyznaczanie wytrzymałości betonu	9
2.2.1. Wytrzymałość na ściskanie	9
2.2.2. Wytrzymałość na rozciąganie	12
2.3. Wytrzymałość na ściskanie jako zmienna losowa o rozkładzie normalnym ..	14
2.4. Wytrzymałość charakterystyczna na ściskanie	16
2.4.1. Definicja wytrzymałości charakterystycznej	16
2.4.2. Kontrola jakości i wyznaczanie wytrzymałości betonu	17
2.5. Klasy wytrzymałości i wytrzymałość obliczeniowa betonu	21
2.5.1. Klasy wytrzymałości i cechy mechaniczne betonu	21
2.5.2. Wytrzymałość obliczeniowa	23
2.6. Zależność naprężenie-odkształcenie przy obciążeniu krótkotrwałym	24
2.6.1. Zależność naprężenie-odkształcenie zalecana do analizy konstrukcji	24
2.6.2. Zależności stosowane do analizy nośności granicznej	26
2.7. Wpływ wieku betonu na jego wytrzymałość i moduł sprężystości	29
2.8. Wytrzymałość w trójosiowym stanie naprężenia i wytrzymałość betonu skrzepowanego	31
2.8.1. Uwagi ogólne	31
2.8.2. Wpływ wyężenia w dwu- i trójosiowych stanach naprężenia według normy [N1]	33
2.9. Skurcz	35
2.9.1. Skurcz swobodny, wpływ skurczu na konstrukcję, rodzaje skurczu	35

2.9.2.	Miarodajny wymiar h_0 i współczynnik k_h	38
2.9.3.	Odkształcenia skurczowe – końcowe wartości i zależność od wieku betonu	39
2.10.	Pełzanie	41
2.10.1.	Definicja, pełzanie liniowe przy stałym naprężeniu	41
2.10.2.	Pełzanie nieliniowe	43
2.10.3.	Wyznaczanie wartości współczynnika pełzania	44
2.10.4.	Zmodyfikowany wiek betonu t_0	44
2.10.5.	Końcowy współczynnik pełzania $\varphi(\infty, t_0)$	46
2.10.6.	Współczynnik pełzania jako funkcja wieku betonu	48
2.10.7.	Uwagi o wpływie pełzania na konstrukcje z betonu	49
2.11.	Przykłady	51
3.	Zbrojenie – właściwości i ogólne zasady konstruowania	54
3.1.	Ogólna charakterystyka zbrojenia i wymagania norm projektowania	54
3.2.	Właściwości stali zbrojeniowej	55
3.2.1.	Podstawowe cechy zbrojenia i norma PN-EN 10080	55
3.2.2.	Granica plastyczności i wytrzymałość stali zbrojeniowej	57
3.2.3.	Zależność naprężenie-odkształcenie	57
3.2.4.	Ciągliwość	58
3.2.5.	Obliczeniowa granica plastyczności i uproszczony wykres σ - ε	59
3.2.6.	Uźbrowanie i średnica nominalna	61
3.2.7.	Inne właściwości stali zbrojeniowej	62
3.3.	Przykładowe rodzaje stali zbrojeniowej	62
3.3.1.	Stal według polskiej normy projektowania PN 2002	63
3.3.2.	Przykłady wyrobów dziś oferowanych na rynku	64
3.4.	Ogólne zasady konstruowania i kotwienia zbrojenia	65
3.4.1.	Uwagi wstępne	65
3.4.2.	Odstępy pomiędzy prętami	67
3.4.3.	Krzywizna prętów	67
3.4.4.	Przyczepność i podstawowa, wymagana długość zakotwienia $l_{b,rqd}$	71
3.4.5.	Wyznaczanie i odmierzanie obliczeniowej długości zakotwienia ...	75
3.5.	Połączenia prętów na zakład	79
3.5.1.	Rozmieszczanie połączeń na zakład i prętów w połączeniach	79
3.5.2.	Obliczeniowa długość zakładu	82
3.5.3.	Zbrojenie poprzeczne w strefie zakładu	83
3.6.	Połączenia na zakład siatek spajanych z prętów zebrowanych	85
3.6.1.	Połączenia zbrojenia głównego	85
3.6.2.	Zakłady zbrojenia drugorzędowego i rozdzielczego	86
3.7.	Dodatkowe wymagania dotyczące grubych prętów i wiązek prętów	86
3.7.1.	Pręty o dużych średnicach	86
3.7.2.	Wiązki prętów	87
3.7.3.	Zbrojenie przypowierzchniowe	88

4. Siły i naprężenia w przekrojach elementów żelbetowych	89
4.1. Uwagi wstępne	89
4.2. Fazowy opis stanu przekrojów żelbetowych	91
4.2.1. Osiowe rozciąganie	91
4.2.2. Zginanie	93
4.2.3. Przekroje z niezerową siłą podłużną i moment M_{s1}	94
4.3. Klasyczna teoria liniowa	97
4.3.1. Założenia, przekroje sprowadzone	97
4.3.2. Krzywizna i naprężenia	98
4.3.3. Faza I	101
4.3.4. Czyste zginanie w fazie II	101
4.3.5. Faza II przy $N \neq 0$	102
4.3.6. Faza II – rozciąganie z małym mimośrodem	104
4.3.7. Algorytmy teorii liniowej	105
4.3.8. Przykłady	107
5. Podstawy projektowania	115
5.1. Podstawowe wymagania	115
5.1.1. Uwagi wstępne i zastosowanie teorii niezawodności	115
5.1.2. Wymagania ogólne	118
5.2. Norma projektowania konstrukcji z betonu na tle systemu norm europejskich	120
5.3. Metoda współczynników częściowych (stanów granicznych)	123
5.3.1. Uwagi wstępne	123
5.3.2. Stany graniczne	123
5.3.3. Sytuacje obliczeniowe, oddziaływania charakterystyczne i reprezentatywne	125
5.3.4. Kombinacje oddziaływań i ogólne zasady sprawdzania stanów granicznych	127
5.3.5. Metoda współczynników częściowych – krótkie podsumowanie ...	130
5.4. Trwałość konstrukcji i otulenie zbrojenia	132
5.4.1. Podstawowe czynniki i zjawiska wpływające na trwałość	132
5.4.2. Środowisko – klasy ekspozycji i wymagane klasy wytrzymałości betonu	133
5.4.3. Ogólne zasady określania otulenia zbrojenia	137
5.4.4. Dodatkowe wymagania dotyczące otulenia	140
5.4.5. Odchyłki otulenia	140
5.4.6. Wyznaczanie otulenia – ujęcie algorytmiczne i przykład	141
5.5. Uwzględnianie pożaru w projektowaniu konstrukcji	143
5.5.1. Uwagi wstępne	143
5.5.2. Ogólne zasady projektowania i wpływ temperatur pożarowych na właściwości betonu i zbrojenia	144
5.5.3. Pożar nominalny i kryteria R, E, I	146

5.5.4.	Stosowanie metody częściowych współczynników do sprawdzania kryterium R	147
5.5.5.	Projektowanie tabelaryczne	149
5.5.6.	Odpryskiwanie i odpadanie betonu oraz konstrukcja połączeń	161
5.5.7.	Beton wysokiej wytrzymałości	162
5.5.8.	Obliczanie nośności w warunkach pożaru metodą izotermy 500 ...	163
5.5.9.	Zasady konstruowania zwiększające bezpieczeństwo pożarowe konstrukcji	166
6.	Nośność graniczna przekrojów normalnych – podstawy teorii	169
6.1.	Uwagi wstępne	169
6.2.	Nośność graniczna według Eurokodu	170
6.2.1.	Założenia Eurokodu	170
6.2.2.	Wybrane założenia Eurokodu zastosowane w książce	173
6.3.	Naprężenia i siły w stanie granicznym nośności	175
6.4.	Obliczanie nośności przekrojów o dowolnym kształcie	177
6.5.	Graniczny zasięg strefy ściskanej i racjonalne zbrojenie belek	180
7.	Zginanie	183
7.1.	Przekroje prostokątne	183
7.1.1.	Podstawowe zależności	183
7.1.2.	Podstawowe zależności w funkcji zmiennych bezwymiarowych	186
7.1.3.	Obliczanie przekrojów pojedynczo zbrojonych	189
7.1.4.	Algorytmy, wykresy, tablice	190
7.1.5.	Przekroje podwójnie zbrojone	199
7.2.	Przekroje teowe i inne obliczane jako teowe	202
7.2.1.	Uwagi wstępne	202
7.2.2.	Stosowanie prostokątnego wykresu naprężeń w betonie	202
7.2.3.	Obliczanie zbrojenia i nośności przekrojów teowych	205
7.2.4.	Przekroje skrzynkowe i inne obliczane jako teowe	208
7.3.	Minimalne i maksymalne zbrojenie podłużne elementów zginanych	210
7.3.1.	Zbrojenie minimalne	210
7.3.2.	Zbrojenie maksymalne	213
7.4.	Przykłady	214
8.	Obliczanie przekrojów, na które działa moment zginający i siła podłużna	221
8.1.	Uwagi wstępne	221
8.2.	Przekrój prostokątny – siły wewnętrzne i odkształcenia w stanie granicznym	222
8.3.	Obliczanie momentu granicznego	225
8.4.	Obliczanie przekrojów symetrycznie zbrojonych za pomocą krzywych granicznych	231
8.4.1.	Stosowanie przekrojów symetrycznie zbrojonych	231

8.4.2.	Krzywa graniczna przekroju	231
8.4.3.	Obliczanie przekrojów prostokątnych i kołowych	233
8.5.	Obliczanie zbrojenia niesymetrycznego	240
8.5.1.	Podstawowe zależności – przypadki CT i CC	240
8.5.2.	Obliczanie zbrojenia w przypadku CT	244
8.5.3.	Obliczanie zbrojenia w przypadku CC	246
8.5.4.	Algorytmy UU	247
8.6.	Ukośne zginanie	249
8.7.	Elementy rozciągane	251
8.8.	Obliczanie zbrojenia za pomocą komputerów	254
8.9.	Przykłady	256
9.	Analiza konstrukcji	264
9.1.	Zakres i zadania analizy konstrukcji	264
9.2.	Idealizacja kształtu konstrukcji i obliczanie ustrojów jednokierunkowo zginanych	268
9.2.1.	Uwagi wstępne	268
9.2.2.	Płyty, belki, słupy, ściany, tarcze – podstawowe definicje	269
9.2.3.	Schematy statyczne, rozpiętości efektywne i kombinacje obciążeń	271
9.2.4.	Obliczanie belek ciągłych	278
9.2.5.	Wymagania dotyczące minimalnych momentów w przęsłach i na podporach	285
9.2.6.	Efektywna szerokość pólek przekrojów teowych	286
9.3.	Elementy usztywniające i usztywnione	287
9.4.	Imperfekcje geometryczne konstrukcji i elementów wydzielonych	289
9.4.1.	Definicja elementów wydzielonych	289
9.4.2.	Rodzaje imperfekcji	289
9.4.3.	Wpływ nachylenia konstrukcji na siły wewnętrzne	290
9.4.4.	Trzy podstawowe zagadnienia związane z wpływem imperfekcji ...	292
9.4.5.	Przykłady zastosowania przepisów normy do analizy wpływu imperfekcji	295
9.5.	Wpływ efektów drugiego rzędu na elementy ściskane	302
9.5.1.	Ogólne zasady uwzględniania efektów drugiego rzędu	302
9.5.2.	Efektywna długość elementów wydzielonych	305
9.5.3.	Wspólne zasady metod polegających na analizie wydzielonych elementów	309
9.5.4.	Metoda nominalnej sztywności i współczynnik powiększenia momentu	310
9.5.5.	Metoda nominalnej krzywizny	314
9.5.6.	Pomijanie wpływu efektów drugiego rzędu na elementy wydzielone	316
9.5.7.	Krytyczne przekroje w słupach, algorytmy i postępowanie iteracyjne	319
9.5.8.	Wpływ efektów drugiego rzędu na słupy w niektórych typach budynków	322

9.5.9.	Globalne efekty drugiego rzędu	324
9.5.10.	Przykłady	328
10.	Ścinanie	336
10.1.	Uwagi wstępne	336
10.2.	Ogólne zasady sprawdzania nośności na ścinanie	342
10.3.	Zasady konstruowania zbrojenia na ścinanie	344
10.4.	Minimalne zbrojenie poprzeczne	347
10.5.	Przypadki, w których obliczanie zbrojenia na ścinanie jest zbędne	349
10.5.1.	Siła graniczna $V_{Rd,c}$	349
10.5.2.	Obliczeniowa wartość siły poprzecznej V_{Ed}	352
10.5.3.	Przykłady	353
10.6.	Przypadki, w których należy obliczyć zbrojenie na ścinanie	356
10.6.1.	Model kratownicowy i warunki równowagi	356
10.6.2.	Pionowe zbrojenie na ścinanie	358
10.6.3.	Ukośne strzemiona i pręty odgięte	363
10.6.4.	Obliczeniowa wartość siły poprzecznej V_{Ed}	364
10.6.5.	Optymalne projektowanie strzemion pionowych	365
10.6.6.	Nośność jako funkcja zbrojenia i maksymalne zbrojenie na ścinanie	370
10.6.7.	Elementy z nierównoległymi krawędziami	372
10.6.8.	Projektowanie zbrojenia na ścinanie – podsumowanie	372
10.6.9.	Przykłady	375
10.7.	Ścinanie między półkami i środkiem w elementach teowych	381
10.7.1.	Naprężenia styczne w styku i graniczne wartości tych naprężeń	381
10.7.2.	Miarodajne wartości siły F_d i naprężeń stycznych v_{Ed}	384
10.7.3.	Rola zbrojenia na zginanie płyty i łączne zbrojenie poprzeczne w styku	388
10.7.4.	Przykład	389
10.7.5.	Uwagi o zbrojeniu układów płyta-żebro-podciąg	392
10.8.	Przebiecie	393
10.8.1.	Uwagi wstępne	393
10.8.2.	Podstawy teorii według [N1]	395
10.8.3.	Sprawdzanie przebiecia w ustrojach usztywnionych	400
10.8.4.	Szczegółowe zasady wyznaczania obwodów kontrolnych	401
10.8.5.	Wyznaczanie krytycznego obwodu kontrolnego w fundamentach ..	404
10.8.6.	Współczynniki β i k w najważniejszych szczególnych przypadkach ..	405
10.8.7.	Zbrojenie na przebiecie	407
10.8.8.	Algorytmy	415
10.8.9.	Przykłady	419
10.8.10.	Komentarz	423
11.	Skręcanie	424
11.1.	Uwagi wstępne	424

11.1.1.	Przykłady skręcania i pomijanie skręcania w obliczeniach	424
11.1.2.	Naprężenia styczne wywołane skręcaniem	426
11.2.	Cienkościenny przekrój zamknięty jako model przekroju żelbetowego	427
11.3.	Wymagania konstrukcyjne	429
11.4.	Warunki równowagi w stanie granicznym nośności na skręcanie	430
11.5.	Wymiarowanie przekrojów prostokątnych na jednoczesne skręcanie i ścinanie	433
11.5.1.	Maksymalna nośność ze względu na beton	433
11.5.2.	Przypadki, w których obliczanie zbrojenia poprzecznego jest zbędne	434
11.5.3.	Obliczanie zbrojenia	434
11.6.	Przykłady	434
12.	Ogólne zasady analizy konstrukcji	438
12.1.	Ogólna charakterystyka metod analizy zalecanych w normie	438
12.2.	Działy mechaniki a modele do analizy konstrukcji z betonu	440
12.3.	Stosowanie teorii plastyczności	441
12.3.1.	Uwagi wstępne	441
12.3.2.	Przeguby plastyczne, redystrybucja momentów zginających, przykład	442
12.3.3.	Graniczny kąt obrotu w strefie przegubu plastycznego	445
12.3.4.	Ograniczenia zastępujące sprawdzanie kątów obrotu	446
12.4.	Liniowe i nieliniowe metody obliczeń i efekty drugiego rzędu	448
12.4.1.	Zasady ogólne	448
12.4.2.	Klasyfikacja metod obliczeń	450
13.	Stany graniczne użyteczności – wymagania ogólne, obliczanie naprężeń	454
13.1.	Podstawowe wymagania i zasady	454
13.2.	Ograniczenia naprężeń	456
13.2.1.	Ograniczenia naprężeń ściskających w betonie	456
13.2.2.	Ograniczenia naprężeń rozciągających w zbrojeniu	458
13.3.	Siła rysująca i moment rysujący	459
13.4.	Obliczanie naprężeń	462
13.4.1.	Zastosowanie teorii klasycznej	462
13.4.2.	Uprozczone obliczanie naprężeń	463
13.4.3.	Przykłady	465
14.	Zarysowanie	467
14.1.	Zarysowanie jako zjawisko i wymagania normy	467
14.1.1.	Rysy wywołane oddziaływaniami bezpośrednimi	468
14.1.2.	Rysy spowodowane ograniczeniem swobody odkształceń	468
14.1.3.	Przeciwdziałanie zarysowaniu spowodowanemu skrępowaniem odkształceń	472
14.2.	Wymagania dotyczące zarysowania konstrukcji	473

14.3.	Obliczanie rozstawu i szerokości rys	475
14.3.1.	Założenia teorii	475
14.3.2.	Wpływ przyczepności na rozstaw rys	478
14.3.3.	Efektywne pole rozciągane	479
14.3.4.	Wpływ otulenia i wymiarów strefy rozciąganej	480
14.3.5.	Obliczanie rozstawu rys	481
14.3.6.	Szerokość rys	482
14.4.	Kontrola zarysowania na podstawie tablicy maksymalnych średnic zbrojenia	488
14.5.	Przykład	490
15.	Minimalne zbrojenie ze względu na zarysowanie	493
15.1.	Do czego służy minimalne zbrojenie ze względu na zarysowanie?	493
15.2.	Doktryna i podstawowy wzór normy [N1] oraz uzupełnienia niemieckie	496
15.2.1.	Doktryna	496
15.2.2.	Sprawdzanie minimalnego zbrojenia, efektywna wytrzymałość $f_{ct,eff}$ i współczynnik k	496
15.2.3.	Uzupełnienia niemieckie do normy europejskiej	499
15.3.	Uproszczone wyznaczanie minimalnego zbrojenia	501
15.4.	Minimalne zbrojenie ze względu na naprężenia termiczno-skurczowe	506
15.4.1.	Naprężenia wywołane odpływem ciepła hydratacji i skurczem betonu	506
15.4.2.	Obliczanie naprężeń wymuszonych	509
15.4.3.	Termin 1 – temperatura i naprężenia wywoływane hydratacją cementu	513
15.4.4.	Termin 2 – odkształcenia i naprężenia wywołane skurczem betonu	515
15.5.	Przykłady	516
15.6.	Podsumowanie	536
16.	Sztywność, krzywizna i ugięcia elementów zginanych	538
16.1.	Uwagi wstępne	538
16.2.	Wymagania dotyczące ugięć	539
16.3.	Sztywność	540
16.3.1.	Sztywność elementów zginanych w fazach I i II	540
16.3.2.	Sztywność elementów ściskanych	542
16.4.	Uśredniona krzywizna i obliczanie ugięć przez całkowanie	542
16.5.	Przybliżone obliczanie ugięć na podstawie najmniejszej sztywności pręśła	547
16.5.1.	Podstawowe wzory	547
16.5.2.	Obliczanie ugięć wywołanych przyrostami obciążenia	549
16.6.	Kontrola ugięć przez ograniczenie smukłości elementów zginanych	550
16.7.	Przykłady	553

17. Dwuosiowy rozkład naprężeń i projektowanie za pomocą modeli ST	559
17.1. Uwagi wstępne	559
17.2. Obliczanie zbrojenia na podstawie naprężeń	560
17.2.1. Obliczanie zbrojenia według Załącznika F do normy [N1]	560
17.3. Projektowanie za pomocą modeli ST	567
17.3.1. Uwagi wstępne	567
17.3.2. Obszary typu B i typu D – schemat projektowania metodą ST	568
17.3.3. Naprężenia graniczne w prętach S i T	570
17.3.4. Węzły i strefy węzłowe	573
17.3.5. Przykład	577
17.4. Krótkie wsporniki	579
17.4.1. Kształt, podstawowe wymagania	579
17.4.2. Obliczanie zbrojenia głównego	581
17.4.3. Obliczanie strzemion	584
17.4.4. Przykład	586
18. Zasady konstruowania	590
18.1. Uwagi wstępne	590
18.2. Wpływ siły poprzecznej na siłę w zbrojeniu podłużnym	591
18.3. Rozciągane zbrojenie podłużne – rozmieszczanie i kotwienie na podporach	596
18.3.1. Rozmieszczanie zbrojenia podłużnego	596
18.3.2. Kotwienie zbrojenia dolnego na podporach skrajnych	596
18.4. Płyty	600
18.4.1. Grubość, głębokość oparcia i zakotwienie zbrojenia na podporach	600
18.4.2. Zbrojenie na zginanie	601
18.4.3. Zbrojenie krawędzi swobodnych i naroży	604
18.4.4. Zbrojenie na ścinanie	605
18.4.5. Wpływ elementów ograniczających ugięcia stropów, obciążenia lokalne i obrzeża otworów	605
18.5. Belki	606
18.5.1. Kształt, wysokość i proporcje belek, zbrojenie minimalne i maksymalne	606
18.5.2. Zakotwienia zbrojenia przeszłowego na podporach	609
18.5.3. Zbrojenie górne nad podporami belek	610
18.5.4. Ściskane zbrojenie podłużne	611
18.5.5. Zbrojenie na ścinanie i na skręcanie	611
18.5.6. Zbrojenie w skrzyżowaniach belek	611
18.5.7. Zbrojenie przypowierzchniowe i zbrojenie wysokich belek	612
18.6. Słupy	613
18.6.1. Zbrojenie podłużne	613
18.6.2. Zbrojenie poprzeczne	613
18.7. Ściany	615
18.8. Systemy wiążące i wieńce	616

18.8.1.	Podstawowe zasady	616
18.8.2.	Wieńce obwodowe	617
18.8.3.	Wieńce wewnętrzne	617
18.8.4.	Powiązania poziome stropów ze słupami i/lub ścianami	618
18.8.5.	Powiązania pionowe	618
18.9.	Fundamenty	619
18.9.1.	Ławy i stopy niezbrojone	619
18.9.2.	Zakotwienie zbrojenia głównego fundamentów	619
18.10.	Zbrojenie elementów załamanych i zakrzywionych	622
19.	Konstrukcje sprężone	624
19.1.	Uwagi wstępne, idea konstrukcji sprężonych	624
19.1.1.	Uwagi wstępne	624
19.1.2.	Oddziaływanie siły sprężającej na beton	625
19.2.	Obliczanie naprężeń w przekrojach elementów sprężonych	632
19.3.	Stal sprężająca – właściwości, naprężenia graniczne	633
19.3.1.	Rodzaje stali sprężającej, wymagania, zależność naprężenie-odkształcenie	633
19.3.2.	Stal sprężająca według normy [N5]	634
19.3.3.	Relaksacja	634
19.3.4.	Naprężenia graniczne	636
19.4.	Straty sprężenia	637
19.4.1.	Rodzaje strat sprężenia	637
19.4.2.	Straty wywołane pielęgnacją cieplną betonu	637
19.4.3.	Straty spowodowane odkształceniem sprężystym betonu	638
19.4.4.	Relaksacja stali sprężającej jako przyczyna strat sprężenia	641
19.4.5.	Tarcie kabli o ścianki kanałów	642
19.4.6.	Straty w zakotwieniu	644
19.4.7.	Straty opóźnione	648
19.5.	Stan graniczny użyteczności – wymagania	652
19.5.1.	Zasady ogólne	652
19.5.2.	Ograniczenia naprężeń w betonie w sytuacji początkowej	653
19.5.3.	Ograniczenia naprężeń w betonie w sytuacji trwałej	654
19.5.4.	Graniczna szerokość rys i warunek dekompresji	655
19.5.5.	Moment rysujący, siła rysująca i minimalne zbrojenie	656
19.5.6.	Graniczne ugięcia	657
19.5.7.	Niejawne wymagania implikowane przez metodę obliczeń	658
19.5.8.	Stosowanie wytrzymałości $f_{ctm,fl}$ w elementach zginanych	658
19.5.9.	Stosowanie wymagań dotyczących naprężeń i zarysowania	659
19.6.	Obliczanie szerokości rys, minimalnego zbrojenia i sprawdzanie wymagania dekompresji	662
19.6.1.	Szerokość rys i minimalne zbrojenie ze względu na zarysowanie ..	662
19.6.2.	Minimalne zbrojenie ze względu na zarysowanie	665
19.6.3.	Sprawdzanie wymagania dekompresji	666

19.7. Obliczanie ugięć	666
19.8. Nośność graniczna przekrojów sprężonych	668
19.8.1. Zasady ogólne	668
19.8.2. Nośność graniczna na zginanie w sytuacji trwałej	670
19.8.3. Nośność graniczna na zginanie w sytuacji początkowej	674
19.9. Ścinanie	677
19.9.1. Uwagi ogólne	677
19.9.2. Ścinanie na odcinkach niezarysowanych	679
19.9.3. Ścinanie na odcinkach zarysowanych	682
19.10. Strefa przypodporowa	683
19.10.1. Strefa zakotwień	683
19.10.2. Strefa zakotwień i zakotwienie cięgien w strunobetonie	687
19.11. Osiowo sprężone słupy o przekroju prostokątnym	691
19.12. Przykłady	695
Załączniki	712
Literatura	723

Podstawowe oznaczenia

Duże litery łacińskie

A	– pole przekroju
A_c	– pole przekroju betonu
$A_{c,eff}$	– efektywne pole rozciągane
A_{cs}, I_{cs}	– pole przekroju, moment bezwładności przekroju sprowadzonego (faza I)
A_{ct}	– pole przekroju betonu strefy rozciąganej, powstającej bezpośrednio przed zarysowaniem
A_d	– obliczeniowe oddziaływanie wyjątkowe (w p. 5.3)
A_I, A_{II}	– pole przekroju sprowadzonego, odpowiednio, w fazie I i II
A_{load}	– pole obciążenia
A_p	– pole przekroju stali sprężającej
$A_s, A_{s1}, A_{s2}, A_{si}$	– pole przekroju zgrupowanego zbrojenia, pole przekroju zbrojenia w pierwszej, drugiej, i -tej grupie
A_{sk}	– efektywne pole skuteczne wyznaczone według [DN4]
$A_{s,single}$	– pole przekroju jednego pręta w połączeniu na zakład
A_{sw}	– pole powierzchni przekroju (w mm^2) zbrojenia na przebicie, leżącego na jednym obwodzie otaczającym słup
A_{sw}	– pole przekroju poprzecznego jednego zestawu zbrojenia na ścinanie (np. dwóch strzemion, gdy zastosowano strzemiona podwójne)
A_{swt}	– pole przekroju zbrojenia poprzecznego, które mieści się w jednej ścianie modelu, stosowanego do obliczania ze względu na skręcanie
$A_{s,min}$	– minimalne pole przekroju zbrojenia
B	– sztywność przekroju elementu zginanego

B_I, B_{II}	– sztywność przekroju elementu zginanego w fazie I, w czystej fazie II
C	– ilość cementu w m ³ betonu
C	– siła równa $\alpha_{cw} \nu f_{cd} b_w z$
C	– stała równa $E_s \varepsilon_{cu2} / f_{yd}$
E_c	– moduł sprężystości betonu, ogólnie (w normach przyjmuje wartości E_{cm} lub $E_{c,eff}$)
E_{cm}	– średni moduł sprężystości betonu
$E_{c,eff}$	– efektywny (zależny od pełzania) moduł sprężystości betonu
E_s	– moduł sprężystości stali
E_p	– moduł sprężystości stali sprężającej
F_s	– siła w zbrojeniu rozciągany
F_{s0}	– siła w zbrojeniu rozciągany wyznaczona bez uwzględnienia wpływu sił poprzecznych
F_t	– siła, która powinna przenosić zbrojenie poprzeczne w styku półki ze środkiem
G, G_k, G_{ki}	– obciążenie stałe, wartość charakterystyczna obciążenia stałego, wartość charakterystyczna i -tego obciążenia stałego
H_i	– siła pozioma wywołana nachyleniem konstrukcji
J (lub I)	– moment bezwładności
J_I, J_{II}	– moment bezwładności przekroju sprowadzonego w fazie I i w czystej fazie II
K	– stała równa $E_s \varepsilon_{ce} / f_{yk}$
M	– moment zginający
M_{char}	– moment wywołany charakterystyczną kombinacją oddziaływań
M_{cr}	– moment rysujący
M_{Ed}	– moment zginający wywołany obciążeniem obliczeniowym
M_{fr}	– moment wywołany częstą (<i>frequent</i>) kombinacją oddziaływań
M_{lim}	– obliczeniowy moment graniczny, który osiąga się w przekroju pojedynczo zbrojonym, gdy $\xi = \xi_{lim}$
M_p	– moment zginający wywołany przez sprężenie
M_{qp}	– moment wywołany <i>quasi</i> -stałą (indeks pochodzi od <i>quasi</i> -permanent) kombinacją oddziaływań
M_{Rd}	– obliczeniowy moment graniczny miarodajny do sprawdzania SGN
M_{Rd1}	– obliczeniowy moment graniczny względem zbrojenia A_{s1} , miarodajny do sprawdzania SGN
M_{s1}, M_{Ed1}	– moment sił wewnętrznych względem zbrojenia A_{s1} (definicja w p. 4.2.3)
N	– siła podłużna
N_{cr}	– siła rysująca
N_{Ed}	– siła podłużna wywołana obciążeniem obliczeniowym

N_{Rd}	– graniczna, obliczeniowa siła podłużna
P	– siła sprężająca (w rozdziale 19)
P	– oddziaływanie sprężenia (w p. 5.3)
P_c	– siła ściskająca wytworzona przez naprężenia w betonie
P_f	– prawdopodobieństwo zniszczenia elementu konstrukcji (w rozdziale 5)
P_0	– siła naciągu
$P_{mt}(x)$	– średnia siła sprężająca w punkcie x rozpatrywana jako funkcja czasu t
P_{m0}	– średnia siła sprężająca po stratach doraźnych ($t = 0$)
Q, Q_k, Q_{ki}	– obciążenie zmienne, wartość charakterystyczna obciążenia zmiennego, wartość charakterystyczna i -tego obciążenia zmiennego
Q_7	– ciepło hydratacji cementu po 7 dniach
RH	– wilgotność względna
S	– moment statyczny
S	– siła w pręcie ściskanym modelu ST
S	– siła styczna na jednostkę długości ścianki modelu w obliczeniach ze względu na skręcanie
S	– stała równa $bd f_{cd}$
S_{cc}	– moment statyczny pola strefy ściskanej o zasięgu λx względem środka ciężkości przekroju
S_p	– moment statyczny pola przekroju sprowadzonego (p oznacza numer fazy)
SGN	– stan graniczny nośności
SGU	– stan graniczny użyteczności
SLS	– od ang. <i>serviceability limit state</i>
T	– moment skręcający
T	– siła w pręcie rozciągającym modelu ST
T_a	– temperatura otoczenia
T_{b0}	– temperatura początkowa betonu
T_{int}	– temperatura we wnętrzu ściany
T_m	– temperatura średnia (w ścianie lub płycie)
T_p	– temperatura na powierzchni ściany
T_{Ed}	– moment skręcający wywołany obciążeniem obliczeniowym
T_{Rd}	– graniczny moment skręcający miarodajny do sprawdzania SGN
$T_{Rd,c}$	– rysujący moment skręcający
ULS	– od ang. <i>ultimate limit state</i>
V	– siła poprzeczna
V_{ccd}, V_{td}	– poprzeczne składowe sił w pasach ściskanym i rozciągającym (w p. 10.6.7)