

Sylwia SCHOENOWITZ-ŻURADZKA*
Politechnika Krakowska

BETON ZWYKŁY I BETON WYSOKICH WYTRZYMAŁOŚCI POD OBCIĄŻENIAMI ZMĘCZENIOWYMI

Streszczenie. Poniższy artykuł prezentuje zagadnienia związane ze zjawiskiem zmęczenia betonu w ujęciu normy polskiej, jak i norm międzynarodowych. Przedstawiono również wybrane modele betonu pod obciążeniem cyklicznym z uwzględnieniem betonów wysokiej wytrzymałości. Analizowane modele stworzono zarówno w oparciu o badania doświadczalne, jak i zastosowanie teorii mechaniki pękania i mechaniki zniszczenia.

HIGH PERFORMANCE AND NORMAL CONCRETE UNDER FATIGUE LOADING

Summary. This paper focuses on problems connected with the fatigue of concrete in the aspect of polish and international codes. Various models of normal and high-strength concrete under cycling loading has been presented. Those models has been developed on the basics of experimental researches and theory of fracture and damage mechanics.

1. Wprowadzenie

Zmęczenie betonu jest zjawiskiem złożonym, zależnym od parametrów, takich jak historia obciążenia, poziom i amplituda naprężeń, początkowe uszkodzenie materiału, jego cechy mechaniczne lub czynniki środowiskowe. Wiąże się ono z postępującą destrukcją przyczepności pomiędzy zaczynem cementowym a kruszywem grubym, obecnością (jeszcze przed przyłożeniem obciążenia) w zaczynie mikrorys i powstawaniem nowych. Pierwsze badania eksperymentalne i próby opisu teoretycznego tego zjawiska podjęto na początku XX wieku. Wiele istniejących modeli, opisujących zachowanie się betonu obciążonego cyklicznie, powstało w oparciu o badania eksperymentalne. Są to w większości algorytmy

* Opiekun naukowy: Prof. dr hab. inż. Krzysztof Dyduch.

matematyczne porządkujące uzyskane wyniki badań lub modele bazujące na fizycznym opisie zmęczenia betonu w ujęciu np. mechaniki pękania.

Istotnym problemem jest zagadnienie zachowania zmęczeniowego betonów wysokiej wytrzymałości. Betony te znajdują coraz szersze zastosowanie w konstrukcjach, takich jak mosty, platformy wiertnicze czy też nawierzchnie drogowe i lotniska. Urządzenia tego typu narażone są na oddziaływanie wysokocyklowych (od 10^3 do 10^7 , a w przypadku konstrukcji morskich nawet do 5×10^8 cykli) obciążeń zmęczeniowych. Ze względu na wysoką wytrzymałość betonu i coraz bardziej udoskonalane procedury wymiarowania konstrukcji uzyskuje się coraz smuklejsze przekroje. Wiąże się to z koniecznością dobrego zrozumienia pracy tego materiału w warunkach obciążeń cyklicznie zmiennych, tym bardziej że mogą one zwiększyć szerokość rys i ugięcia, a w konsekwencji doprowadzić do niebezpiecznego zredukowania sztywności elementu pod obciążeniem eksploatacyjnym, nawet jeśli nie dojdzie do zniszczenia zmęczeniowego.

2. Zagadnienia zmęczenia betonu w ujęciu normowym

Aktualnie obowiązująca Polska Norma [1] nie podaje procedur dotyczących analizy konstrukcji obciążonych cyklicznie. Wymaga jedynie, aby uszkodzenia zmęczeniowe betonu w miarodajnych przekrojach elementu (wywołane przez charakterystyczne obciążenia wielokrotnie zmiennie) nie przekroczyły wartości dopuszczalnych σ_{cR} . Prawdopodobieństwo zniszczenia zmęczeniowego betonu należy sprawdzić z warunku:

$$\max \sigma_c \leq \sigma_{cR} \quad (1)$$

gdzie: $\sigma_{cR} = 0,25 \cdot f_{ck}$ - naprężenie dopuszczalne – ściskanie,

$\sigma_{cR} = 0,18 \cdot f_{ck}$ - naprężenie dopuszczalne – ściskanie-rozciąganie przy maksymalnych naprężeniach rozciągających $\leq 0,02 \cdot \max \sigma_c$,

$\sigma_{cR} = 0,25 \cdot f_{ck}$ - naprężenie dopuszczalne – rozciąganie,

$\max \sigma_c$ – maksymalne naprężenie normalne w betonie (liniowy rozkład naprężeń).

Norma PN-B-03264 dopuszcza też sprawdzanie stanu granicznego wywołanego zmęczeniem w oparciu o analizę liczby cykli do zniszczenia lub analizę uszkodzeń. Bardziej szczegółową procedurę weryfikacji wytrzymałości zmęczeniowej betonu przy użyciu zastępczego naprężenia niszczonego podaje Eurokod 2 [2]. Stosując się do jego wytycznych, można przyjąć, że zostanie zagwarantowana wystarczająca żywotność zmęczeniowa betonu ściskanego, jeśli spełniony będzie warunek:

$$S_{cd,max,ecu} + 0,43 \cdot \sqrt{(1 - R_{equ})} \leq 1 \quad (2)$$

gdzie:

$$R_{equ} = \frac{S_{cd,min,ecu}}{S_{cd,max,ecu}} \quad S_{cd,min,ecu} = \frac{\sigma_{cd,min,ecu}}{f_{cd,fat}} \quad S_{cd,max,ecu} = \frac{\sigma_{cd,max,ecu}}{f_{cd,fat}}$$

$$f_{cd,fat} = 0,85 \cdot \beta_{cc}(t_0) \cdot f_{cd} \left(1 - \frac{f_{ck}}{250} \right) \quad (3)$$

$$\beta_{cc}(t_0) = \exp \left\{ s \left[1 - \left(\frac{28}{t_0} \right)^{0,5} \right] \right\}$$

$f_{cd,fat}$ – obliczeniowa wytrzymałość betonu na zmęczenie,

$\sigma_{cd,max,ecu}$, $\sigma_{cd,min,ecu}$ – górne i dolne naprężenie przy granicznej amplitudzie dla $N = 10^6$ cykli,

$\beta_{cc}(t_0)$ – współczynnik wytrzymałości betonu przy przyłożeniu pierwszego obciążenia,

s – współczynnik zależny od rodzaju cementu

oraz gdy:

$$\frac{\sigma_{c,max}}{f_{cd,fat}} \leq \begin{cases} 0,5 + 0,45 \cdot \frac{\sigma_{c,min}}{f_{cd,fat}} \\ 0,9 \text{ dla } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} & 0,8 \text{ dla } f_{ck} > 50 \text{ MPa} \end{cases}$$

gdzie:

$\sigma_{c,min}$, $\sigma_{c,max}$ – najmniejsze i największe naprężenia ściskające w tym samym włóknie.

Jeśli $\sigma_{c,min}$ są naprężeniami rozciągającymi, należy przyjąć je równe 0.

Code Model [3] wprowadza dwie metody: uproszczoną (przy założeniu że liczba cykli obciążeń konstrukcji nie przekroczy 10^8) i metodę maksymalnego naprężenia. Metoda uproszczona określa warunki, dla których szczegółowa analiza elementu obciążonego cyklicznie jest zbędna. Są to:

$$\text{dla ściskania} \quad \gamma_{Sd} \cdot \sigma_{c,max} \cdot \eta_c \leq 0,45 \cdot f_{cd,fat} \quad (4)$$

$$\text{dla rozciągania} \quad \gamma_{Sd} \cdot \sigma_{ct,max} \leq 0,33 \cdot f_{ctd,fat} \quad (5)$$

gdzie:

$$f_{ctd,fat} = \frac{f_{ctk0,05}}{\gamma_c}$$

Metoda maksymalnego obciążenia (bazująca na krzywych zależności S-N) uzależnia żywotność betonu od poziomu wyężenia oraz uwzględnia wpływ naprężeń minimalnych w cyklu w przypadku elementu poddanego osiowym naprężeniom ściskającym. Wymagania żywotności zmęczeniowej betonu będą spełnione, jeśli liczba cykli obciążeń nie przekroczy liczby cykli do zniszczenia N . Dla betonu ściskanego:

$$\log N \leq 6 \quad 0 < S_{c,min} < 0,8$$

$$\log N = \log N_1 = (12 - 16 \cdot S_{c,min} + 8 \cdot S_{c,min}^2) (1 - S_{c,max}) \quad (6)$$

$$\log N > 6 \quad 0 < S_{c,\min} < 0,8$$

$$\log N = \log N_2 = 2 \cdot \log N_1 (\log N_1 - 1) \quad (7)$$

$$\log N > 6 \quad \Delta S_c < 0,3 - \frac{3}{8} S_{c,\min} \quad 0 < S_{c,\min} < 0,8$$

$$\log N = \log N_3 = \log N_2 \left(0,3 - \frac{3}{8} S_{c,\min} \right) \cdot \frac{1}{\Delta S_c} \quad (8)$$

$$\Delta S_c = S_{c,\max} - S_{c,\min} \quad S_{c,\min} = \gamma_{sd} \cdot \eta_c \cdot \frac{\sigma_{c,\min}}{f_{cd, \text{fat}}} \quad S_{c,\max} = \gamma_{sd} \cdot \eta_c \cdot \frac{\sigma_{c,\max}}{f_{cd, \text{fat}}}$$

gdzie: η_c – uwzględnia gradient naprężeń w strefie ściskanej przekroju zarysowanego.

3. Wybrane modele betonu poddanego obciążeniom zmęczeniowym

Jeden z wcześniejszych modeli betonu obciążonego cyklicznie uzależnia wytrzymałość zmęczeniową betonu od ilości cykli N . Stosując dla liczby cykli skalę logarytmiczną i wprowadzając bezwymiarowy stosunek maksymalnych naprężeń zmęczeniowych do wytrzymałości statycznej betonu na ściskanie (σ_{\max}/f_c'), otrzymano wykres w przybliżeniu prostoliniowy, tzw. krzywą S-N (Wöhlera). Ten model został pierwotnie zmodyfikowany przez Aas-Jakobsena [4] poprzez wprowadzenie współczynnika asymetrii cyklu $R = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$. Otrzymał on zależność w postaci:

$$\frac{\sigma_{\max}}{f_c'} = 1 - \beta(1 - R) \cdot \log N \quad (9)$$

Późniejsza weryfikacja doświadczalna doprowadziła do wyznaczenia współczynnika $\beta = 0,0685$ dla betonu ściskanego. Powyższa zależność jest ważna tylko w zakresie $0 \leq R \leq 1$. Ma pewne wady – dla $R=1$ otrzymujemy stałą wartość σ_{\max} , co jest błędne, gdyż dla $R = 1$, obciążenie cykliczne przechodzi w obciążenie długotrwałe. Nie uwzględnia ona również częstości obciążenia, która ma znaczny wpływ, zwłaszcza na obciążenia niskocyklowe. Aby wyeliminować te niedoskonałości, Hsu [8] wprowadził dodatkowy parametr T – czas trwania jednego cyklu. Jego badania objęły zarówno beton zwykły, jak i kruszywo lekkie, poddane ściskaniu i zginaniu. Otrzymał on następujące zależności dla obciążeń niskocyklowych ($N < 10^3$) i wysokocyklowych ($N > 10^3$):

$$\frac{\sigma_{\max}}{f_c'} = 1 - 0.0662(1 - 0.556R) \cdot \log N - 0.0294 \cdot \log T \quad N \leq 10^3 \quad (10)$$

$$\frac{\sigma_{\max}}{f_c'} = 1.20 - 0.20R - 0.133(1 - 0.779R) \cdot \log N - 0.0530 \cdot (1 - 0.445R) \cdot \log T \quad N \leq 10^3 \quad (11)$$

Krzywe zależności S-N można stosować z powodzeniem jedynie w przypadku elementu poddanego obciążeniom zmęczeniowym o stałej amplitudzie. Przy zmiennej amplitudzie znalazła zastosowanie hipoteza Palmgrena-Minera. Zakłada ona, że cząstkowe zniszczenie D_i na danym poziomie naprężeń S_i jest liniowo proporcjonalne do stosunku liczby cykli n_i zadanych na tym poziomie, do odpowiadającej mu liczby cykli do zniszczenia N_{Fi} . Zniszczenie zmęczeniowe nastąpi, gdy suma cząstkowych zniszczeń dla wszystkich poziomów naprężeń w ustroju osiągnie wartość krytyczną (=1)

$$\sum_i D_i = \sum_i \frac{n_i}{N_{Fi}} \geq 1 \quad (12)$$

Hipoteza ta nie uwzględnia różnej sekwencji występowania i czasu trwania obciążeń oraz poziomów naprężeń. Oh [9] zaproponował teorię nieliniowego zniszczenia zmęczeniowego betonu. Analizując kształt krzywych kumulacji odkształceń i uszkodzeń w betonie (wyznaczonych dla poziomów naprężeń $S_{max} = 0.75$ i 0.675 oraz $S_{min} = 0.05$), Holmen wyodrębnił trzy fazy: I - szybki przyrost uszkodzeń, II - uszkodzenia praktycznie ustabilizowane i III przed zniszczeniem, w której następuje gwałtowny wzrost szybkości pojawiania się nowych uszkodzeń aż do zniszczenia. Oh opisał tę krzywą kumulacji zniszczenia równaniem:

$$D = a_1 \cdot x^3 + a_2 \cdot x^2 + a_3 \cdot x, \quad x = n/N_F \quad (13)$$

Zaproponowana metoda posiada tę wadę, iż aby modelować kolejność występowania obciążeń cyklicznych, trzeba dla każdego stworzyć osobną krzywą zniszczenia. Prościej jest zatem ekwiwalentna teoria kumulacji zniszczeń, bazująca na koncepcji, że zniszczenie powstałe po n_i cyklach dla danego poziomu naprężeń S_i jest równoważne n_i cyklom na poziomie naprężeń S_1 . Można znaleźć zatem ekwiwalentną liczbę cykli n_{ie} dla zakresu S_1 , która spowoduje to samo zniszczenie co n_i cykli dla zakresu S_i :

$$n_{ie} = n_i \cdot \left(\frac{S_i}{S_1} \right)^p \quad (14)$$

gdzie stopień zniszczenia:

$$D_i = \frac{n_{ie}}{N_1}$$

p – wykładnik wyliczony na podstawie badań eksperymentalnych.

Ta teoria, chociaż bardzo prosta, daje dobrą zgodność z wynikami doświadczalnymi. Zaobserwowano też, że gdy wielkości amplitud maleją w trakcie trwania obciążenia – suma skumulowanych zniszczeń $D < 1,0$; gdy rosną – $D > 1,0$.

4. Zmęczenie betonu wysokiej wytrzymałości w ujęciu mechaniki pękania

Pęknięcie zmęczeniowe to proces, w którym można wyodrębnić trzy etapy: inicjacja rysy, jej propagacja i ostateczne zniszczenie. W swoich badaniach Paris i Erdogan pokazali, iż mechanika pęknięcia jest wygodnym narzędziem służącym do opisu propagacji rysy pod obciążeniem zmęczeniowym (w drugim etapie). Zaproponowali oni model oparty na liniowo-sprężystej mechanice pęknięcia, który stosowany był dla metali obciążonych cyklicznie, znany jako prawo Parisa (przyrost długości rysy na cykl w funkcji amplitudy współczynnika intensywności naprężeń). Przystosowując to prawo dla betonu pominięto ważny aspekt – efekt skali. Wprowadzając niezbędne modyfikacje Bazant, Schell i Xu [5] [6] otrzymali model opisujący pęknięcie zmęczeniowe betonu wysokiej wytrzymałości. Badania były przeprowadzone na próbkach trzypunktowo zginanych, o stałej szerokości $b=38,1$ mm oraz zmiennej wysokości i rozpiętości (stosunek wymiarów $1:\sqrt{8}:8$) wytrzymałości na ściskanie większej niż 80 MPa, z zainicjowaną rysą o długości $a_0 = D/6$. Badania przeprowadzono dla zakresu naprężeń od $S=0,75$ i $0,80$ do $S=0,07$ i częstotliwości 10 Hz. Na podstawie badań, dla betonów zwykłych, [5] zastąpiono K_{Ic} – stałą odporność na kruche pęknięcie K_{Ic} – ekwiwalentną odpornością na kruche pęknięcie uwzględniającą efekt skali. Otrzymano:

$$\frac{\Delta a}{\Delta N} = \kappa \cdot \left(\frac{\Delta K_I}{K_{Ic}} \right)^n \quad (15)$$

$$K_I = \frac{P \cdot f(\alpha)}{b \cdot \sqrt{D}}, \quad \alpha = \frac{a}{D} \quad K_{Ic} = K_{Ic} \sqrt{\frac{\beta}{1+\beta}}$$

gdzie: ΔK_I – amplituda współczynnika intensywności naprężeń dla długości rysy a ,
i przyłożonego obciążenia P ,

$f(\alpha)$ – funkcja zależna do geometrii próbki (α – względna długość rysy),

$\beta = D/D_0$ – względna wysokość próbki (κ, n, D_0 – stałe doświadczalne).

Na podstawie wyników badań [6] wykazano, że powyższą formułę (15) można również stosować dla betonów wysokiej wytrzymałości, pod warunkiem że rozmiary próbek nie będą różniły się w znaczny sposób. Wykazano też, że zachowanie BWW pod obciążeniami

zmęczeniowymi jest znacznie bliższe liniowo-sprężystej mechanice pękania, niż ma to miejsce w przypadku betonów zwykłych, co wynika z ich większej kruchości.

Gao i Hsu [7] analizowali zachowanie betonu osiowo ściskanego pod obciążeniem zmęczeniowym w aspekcie kumulacji odkształceń nieodwracalnych oraz degradacji modułu sprężystości betonu z mikrozarysowaniami. Zaproponowali model oparty na badaniach doświadczalnych i mechanice zniszczenia, pozwalający określić zależność naprężenie-odkształcenie oraz stopień zniszczenia zmęczeniowego. Badania przeprowadzono na próbkach pryzmatycznych o wymiarach 100x100x100 mm i wytrzymałości na ściskanie 35, 45 i 76 MPa. Zniszczenie zmęczeniowe zdefiniowano jako:

$$D = 1 - \left(\frac{E_{fa}}{E_0} \right) = D_c \cdot \exp \left[s \left(\frac{\Delta f}{f_c} - n \right) \right] N^{ms} \quad (16)$$

gdzie: E_{fa} i E_0 – moduł zmęczeniowy dla N-tego cyklu i moduł początkowy,

D_c – krytyczna wartość zniszczenia, dla której beton ulega uszkodzeniu.

Akumulacja nieodwracalnych odkształceń betonu może być wyrażona jako:

$$\varepsilon_{ir} = \varepsilon_{cr} + \varepsilon_{fa} \quad (17)$$

gdzie: ε_{cr} – nieodwracalne odkształcenie na skutek pełzania pod obciążeniem cyklicznym,

ε_{fa} – nieodwracalne odkształcenie na skutek propagacji rys zmęczeniowych.

Ostatecznie podano następujące równania do opisu rozwoju odkształceń zmęczeniowych:

$$\varepsilon = \Delta\varepsilon + \varepsilon_{ir} = \frac{\Delta f}{E_0} + \varepsilon_{cr}^0 \cdot \left(\frac{N}{N_{cr}} \right)^{1+\alpha} \quad (18)$$

$$\text{lub } \varepsilon = \Delta\varepsilon + \varepsilon_{ir} = \frac{\Delta f}{E_0} \cdot (1 - D) + \varepsilon_{cr}^0 + \varepsilon_{fa}^0 \cdot \left(\frac{N - N_{cr}}{N_f - N_{cr}} \right)^\omega \quad \text{dla } N \leq N_{cr} \quad (19)$$

gdzie: $\Delta\varepsilon$ i Δf – zakres odkształceń i naprężeń zmęczeniowych,

ε_{cr}^0 – końcowe odkształcenie na skutek pełzania pod obciążeniem cyklicznym,

ε_{fa}^0 – końcowe odkształcenie na skutek propagacji rys zmęczeniowych,

N_f i N_{cr} – liczba cykli do zmęczenia i do inicjacji rys zmęczeniowych (dla której przestaje wzrastać odkształcenie skurczowe),

s, n, m, α, ω – stałe materiałowe.

5. Podsumowanie

Problem zmęczenia betonów wysokiej wytrzymałości jest tematem mało rozpoznany. Pomimo wielu badań prowadzonych w różnych ośrodkach naukowych wciąż brak uniwersalnego, prostego w zastosowaniu modelu obliczeniowego czy też uniwersalnej procedury badawczej, pozwalającej na korelację wyników otrzymanych z różnych badań.

Przedstawione modele z dużą dokładnością opisują zmianę naprężeń zmęczeniowych, rozwój uszkodzeń i żywotność zmęczeniową betonu obciążonego cyklicznie, osiowo ściskanego przy stałej wielkości amplitudy obciążenia.

LITERATURA

1. PN-B-03264: Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Obliczenia statyczne i projektowanie.
2. Eurocode 2: Design of Concrete Structures - Part 1: prEN: 1992-1-1, April 2002.
3. CEB-FIB Model Code 1990.
4. Aas-Jakobsen K.: "Fatigue of Concrete Beams and Columns". Bulletin No.70-1, NHT Institutt for Betonkonstruksjoner, Trondheim, Sept. 1970.
5. Bazant Z., Xu K.: "Size Effect in Fatigue Fracture of Concrete". ACI Materials Journal, V.88, No. 4, Jul-Aug. 1991.
6. Bazant Z., Schell W.: "Fatigue Fracture of High-Strength Concrete and Size Effect". ACI Materials Journal, V.90, No. 5, Sept-Oct. 1993.
7. Gao L., Hsu T. T. C.: "Fatigue of Concrete Under Uniaxial Compression Cyclic Loading". ACI Materials Journal, V.95, No. 5, Sept-Oct. 1998.
8. Hsu T. T. C.: "Fatigue of Plain Concrete", ACI Journal, No. 4, Jul-Aug. 1981.
9. Oh B. H.: "Cumulative Theory of Concrete under Variable-Amplitude Fatigue Loadings". ACI Materials Journal, V.88, No. 1, Jan-Feb. 1991.

Recenzent: Prof. dr. hab. inż. Grzegorz Prokopski

Abstract

Fatigue of concrete is a very complex problem, and there is still not enough knowledge available concerning various aspects of concrete behaviour under cyclic loading. Recent experimental researches allowed for developing new, elaborated models and some of them are presented in this paper.

ANALIZA WYNIKÓW DOŚWIADCZEŃ NA PRZYKŁADZIE WYKONANYCH DOŚWIADCZEŃ W OBLASTY WYTRZYMAŁOŚCI WYTRZYMAŁOŚCI

W artykule przedstawiono wyniki badań nad zmęczeniem betonu pod obciążeniami cyklicznymi. Zostały one przeprowadzone w celu wypracowania nowych modeli i ich weryfikacji.

EXPERIMENTAL STUDY ON FLEXURE OF REINFORCED CONCRETE BEAMS WITH STUD BOLAS REINFORCEMENT

The paper presents the results of experiments concerning flexure and load-carrying capacity of reinforced concrete beams with stud bolts reinforcement.

1. Wstęp

W artykule przedstawiono wyniki badań nad zmęczeniem betonu pod obciążeniami cyklicznymi.

W artykule przedstawiono wyniki badań nad zmęczeniem betonu pod obciążeniami cyklicznymi. Zostały one przeprowadzone w celu wypracowania nowych modeli i ich weryfikacji.