

УДК 624.016

В.Ф. Пенц, к.т.н., доц.

Ю.О. Кушнір, асп.

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка

М.О. Овсій

ПП "Будекспертиза", м. Полтава

РОЗРАХУНОК МІЦНОСТІ НОРМАЛЬНОГО ПРЯМОКУТНОГО ПРИВЕДЕНОГО ПЕРЕРІЗУ ПОПЕРЕДНЬО-НАПРУЖЕНИХ СТАЛЕБЕТОННИХ БАЛОК ЗАЛЕЖНО ВІД ЙОГО НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ

Запропонована методика розрахунку міцності нормального приведенного перерізу суцільних прямокутних попередньо-напружених сталебетонних балок (ПНСББ) залежно від напружено-деформованого стану (НДС) в момент руйнування їх композитних матеріалів (бетону, конструкційного приведенного сталюого двотаврового профілю (КПСДП) та попередньо-напруженої арматури).

Ключові слова: сталь, бетон, попереднє напруження, арматура, балка, нормальний, переріз, деформації, граничні напруження, міцність.

Постановка проблеми. Зв'язок з науковими і практичними завданнями. Провідні вітчизняні науковці Ю.Г. Аметов, А.М. Бамбура., О.В. Семко, Ю.С. Слюсаренко, Л.І. Стороженко, В.Г. Тарасюк, які є співавторами розробки нині діючих нормативних документів [1], в своїй роботі [2] відзначають необхідність подальшої роботи над редакцією ДБН «Сталезалізобетонні конструкції» [1]. Одним із напрямків удосконалення норм [1] є розробка конкретних практичних методів розрахунку і проектування сталезалізобетонних конструкцій з урахуванням їх основних положень та окремих положень «Єврокоду-4» [3], що діє в країнах ЄС.

Аналіз публікацій. Виділення не вирішених питань. Діючі методи розрахунку сталезалізобетонних (СЗБ) конструкцій (елементів), що згинаються, базуються на розрахунку за граничними напруженнями з використанням прямокутних епюр напружень для обох матеріалів [3, 4]. Запропонована в роботах [2, 5] нова концепція розрахунку, впроваджує в практику метод граничних деформацій, який дозволить наблизитися до реального напружено-деформованого стану (НДС) СЗБ конструкцій (елементів). В той же час запропоновані в роботах [2, 5] і нормах [1] розрахункові положення не враховують загальну деформаційну модель попередньо-напруженого елемента та увесь спектр варіантів його НДС перерізу. Вище викладене визначило актуальність теми дослідження.

Загальна мета дослідження полягає у розробці методики розрахунку міцності нормального приведенного перерізу суцільних прямокутних попередньо-напружених сталебетонних балок (ПНСББ) залежно від НДС в момент руйнування їх композитних матеріалів (бетону, конструкційного приведенного сталюого двотаврового профілю (КПСДП) та попередньо-напруженої арматури).

Викладення основного матеріалу. Обґрунтування отриманих результатів. Метою розрахунку міцності нормального прямокутного перерізу ПНСББ (рис. 1) є визначення граничного значення параметру згинального моменту (M_u), який сприймає переріз при досягненні відносної деформації в крайній фібрі стисненої зони бетону величини $\epsilon_c = \epsilon_{cu}$ (рис. 2), і порівняння його з діючим у ньому моментом (M) від зовнішніх навантажень:

$$M_u \geq M. \quad (1)$$

В результаті узагальнення було виділено шість окремих випадків напружено-деформованого стану (НДС) прямокутного перерізу ПНСББ на стадії її руйнування чи при граничному стані залежно від положення нейтральної вісі по відношенню до сталюого профілю (див. рис. 3 та рис. 4). Так у випадках “а”-“в” в попередньо-напруженій арматурі виникають відносні деформації розтягу, які змінюються у межах $\epsilon_p \geq \epsilon_{pu}$, тобто напруження перевищують розрахункове значення на границі текучості ($f_{p0,1} = f_{pd} = f_{p0,1}/\gamma_s$), а у випадках “г”-“е” – у межах $\epsilon_p < \epsilon_{pu}$, тобто напруження становлять $u_p < f_{p0,1}$. Крім того у перерізі ПНСББ граничні відносні деформації у стисненій (верхній) та у розтягненій (нижній) зонах змінюються у наступних межах:

– випадки “а” і “г”: в крайньому верхньому волокні стиснутої бетонної ділянки перерізу відносні деформації бетону досягають величини граничних деформацій стиску $\epsilon_c = \epsilon_{cu}$, а в крайньому нижньому волокні, що розтягується, відносні деформації КПСДП змінюються у межах $\epsilon_a > \epsilon_{au}$, тобто існує зона пластичних деформацій;

– випадки “б” і “д”: відносні деформації бетону досягають величини $\epsilon_c = \epsilon_{cu}$, а відносні деформації КПСДП - величини $\epsilon_a = \epsilon_{au}$;

– випадки “в” і “е”: відносні деформації бетону досягають величини $\epsilon_c = \epsilon_{cu}$, а відносні деформації КПСДП змінюються у межах $\epsilon_a < \epsilon_{au}$.

Загальні рівняння рівноваги для кожного із випадків НДС нормального прямокутного перерізу ПНСББ становлять:

– у випадках 1а, 2а:

$$M_u = F_c \cdot z_1 + F_a \cdot z_2 + F_{ap1} \cdot z_3 + F_{pp1} \cdot C_p; \quad (2)$$

– у випадках 1б, 1в, 2б, 2в:

$$M_u = F_c \cdot z_1 + F_a \cdot z_2 + F_p^{pl} \cdot C_p; \quad (3)$$

– у випадку 3а:

$$M_u = F_c \cdot z_1 + F_a \cdot z_2 + F_a^{pl} \cdot z_3 + F_a' \cdot z_4 + F_p^{pl} \cdot C_p; \quad (4)$$

– у випадках 3б, 3в:

$$M_u = F_c \cdot z_1 + F_a \cdot z_2 + F_a' \cdot z_4 + F_p^{pl} \cdot C_p; \quad (5)$$

– у випадках 1г, 2г:

$$M_u = F_c \cdot z_1 + F_a \cdot z_2 + F_a^{pl} \cdot z_3 + F_p \cdot C_p; \quad (6)$$

– у випадках 1д, 1е, 2д, 2е:

$$M_u = F_c \cdot z_1 + F_a \cdot z_2 + F_p \cdot C_p; \quad (7)$$

– у випадку 3г:

$$M_u = F_c \cdot z_1 + F_a \cdot z_2 + F_a^{pl} \cdot z_3 + F_a' \cdot z_4 + F_p \cdot C_p; \quad (8)$$

– у випадках 3д, 3е:

$$M_u = F_c \cdot z_1 + F_a \cdot z_2 + F_a' \cdot z_4 + F_p \cdot C_p; \quad (9)$$

де F_c ; F_a' ; F_a ; F_a^{pl} ; F_p ; F_p^{pl} – сумарні нормальні зусилля в перерізі балок відповідно стиснених його ділянки бетону чи перерізу конструкційного сталюого профілю та розтягнених його ділянки конструкційного сталюого профілю чи попередньо-напруженої арматури, які працюють відповідно у пружній і пружно-пластичній стадіях; z_1 ; z_2 ; z_3 ; z_4 ; C_p – відстані по вертикалі від зусиль до нейтральної лінії перерізу (рис. 3, 4).

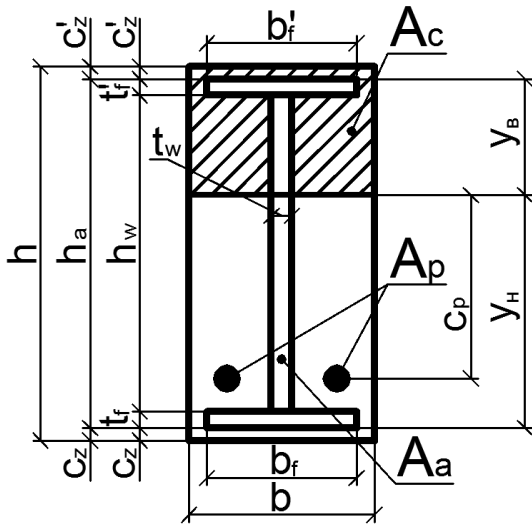


Рисунок 1 - Загальний прямокутний приведений переріз ПНСББ

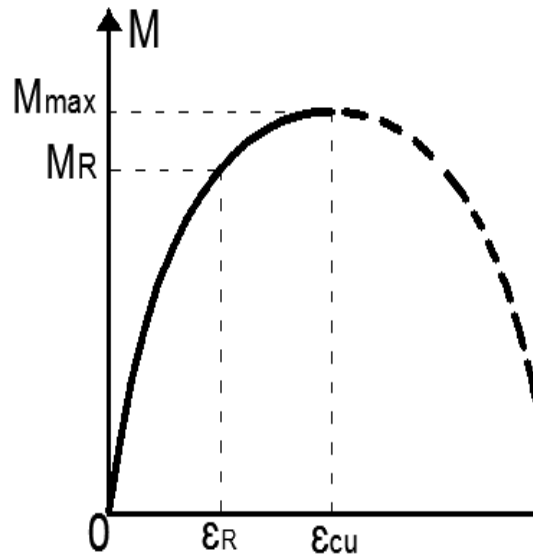


Рисунок 2 - Діаграма стану ПНСББ, яка трансформована з діаграми $\sigma - \epsilon$

На першому етапі розрахунку міцності нормального приведенного прямокутного перерізу ПНСББ при заданих параметрах (ϵ_{cu} ; ϵ_{au} ; $\epsilon_{pu} = \epsilon_{ud}$; E_c ; E_a ; E_p ; f_{cd} ; f_y ; $f_{pd} = f_{p0,1}/\gamma_s$; $A_c = h \cdot C_b$; $A_a = 2 \cdot C_h \cdot C_b \cdot b_f + h_w \cdot C_{tw}$; $h_a = 2 \cdot C_h \cdot f + h_w$; C_z ; A_p ; C_p) перевіряємо умову:

$$b_p m_p + b_a m_a \geq k_c C_b \beta_{sum} M_{opt}, \quad (10)$$

де $m_p = A_p/A_c$, $m_a = A_a/A_c$ – відповідно коефіцієнти армування нормального перерізу ПНСББ попередньо-напруженою арматурою (A_p) та конструктивним сталевим профілем (A_a); $b_a = E_a/E_c$ – коефіцієнт співвідношення модулів пружності конструктивної сталі і бетону; $b_p = E_p/E_c$ – коефіцієнт співвідношення модулів пружності арматурної сталі і бетону; k_c – коефіцієнт, за допомогою якого здійснюється корегування величини добутку $\beta_{sum} M_{opt}$ при $C_z > 0$, $D_c = C_z/h > 0$ залежно від висоти захисного шару бетону C_z , значення якого приведено в табл. 1; $\beta_{sum} M_{opt}$ – добуток оптимальних величин β_{sum} і M_{opt} , при яких відносні деформації в крайній фібрі стисненої зони бетону досягають величини $\epsilon_c = \epsilon_{cu}$, а в крайній фібрі розтягнутої зони КПСДП і попередньо-напруженої арматури досягають величин $\epsilon_a = \epsilon_{au}$; $\epsilon_p = \epsilon_{pu}$.

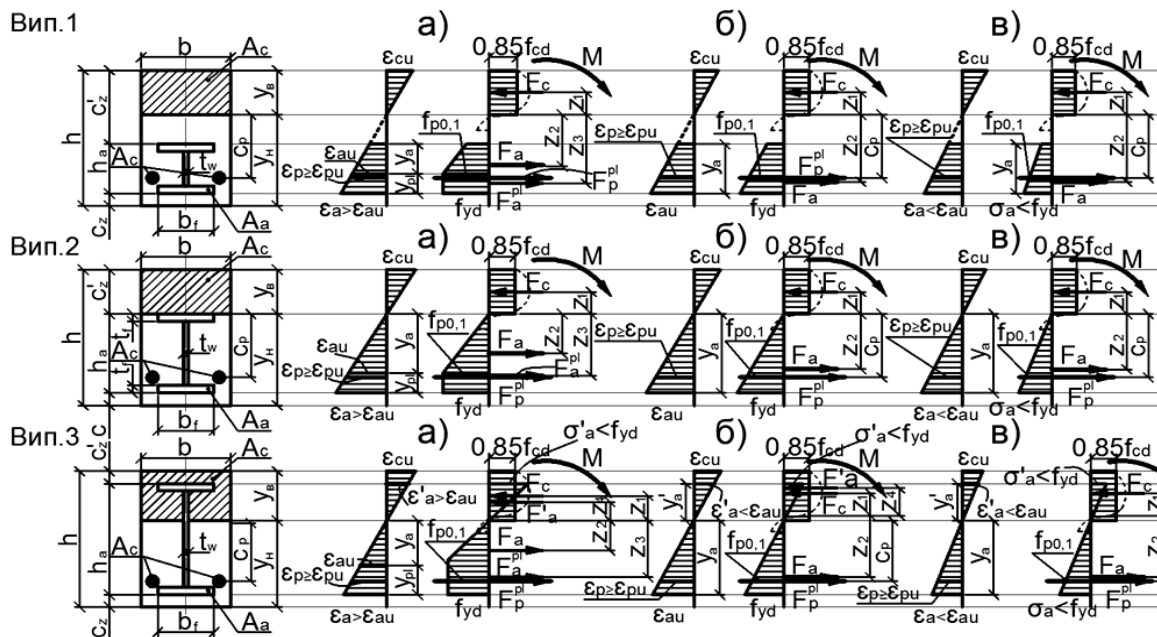


Рисунок 3 - Випадки “а” - “в” напружено-деформованого стану нормального прямокутного перерізу попередньо-напружених сталобетонних балок залежно від положення нейтральної вісі

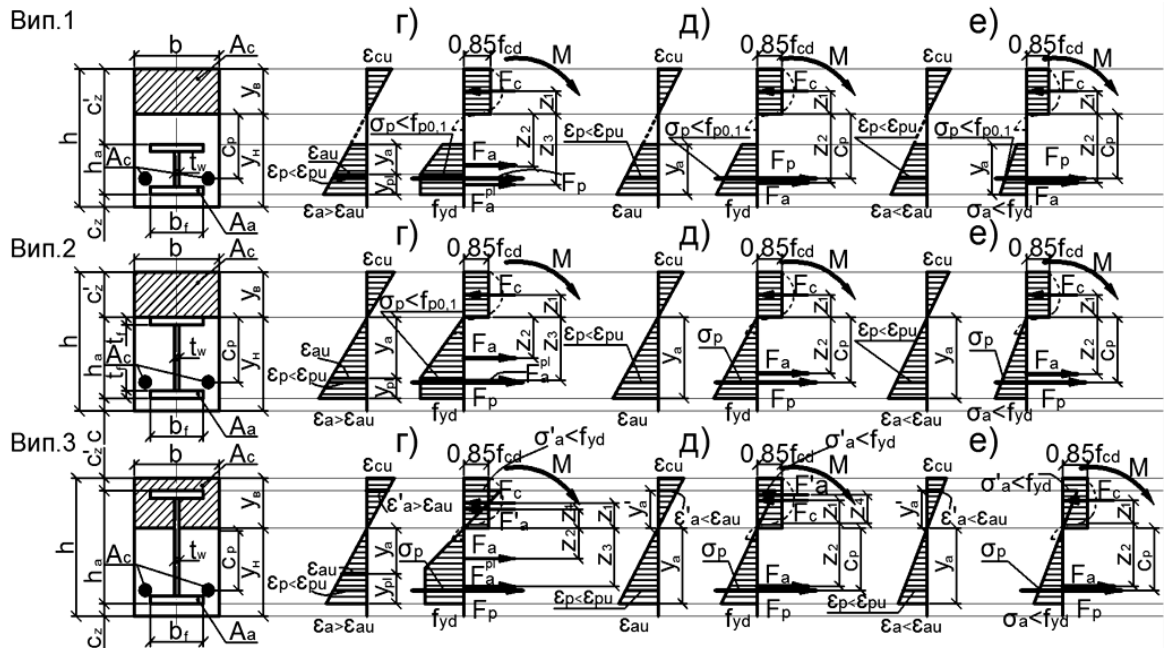


Рисунок 4 - Випадки “г” - “е” напружено-деформованого стану нормального прямокутного перерізу попередньо-напружених сталобетонних балок залежно від положення нейтральної вісі

Значення добутку $b_{\text{сум}} M_{\text{опт}}$ залежно від величин коефіцієнтів співвідношень $D_h = h_a/h$ та $D_e = \epsilon_{cu}/\epsilon_{au}$ для нормального приведеного прямокутного перерізу ПНСББ при відсутності захисного шару бетону в його нижній розтягненій зоні, тобто коли $C_z = 0$ і коефіцієнт $D_c = 0$, приведені в табл. 2.

Граничні відносні деформації стиснення (ϵ_{cu}) в крайньому верхньому волокні стисненої зони бетону нормального перерізу прямокутної ПНСББ приймаємо рівними значенню $\epsilon_{cu} = 0,0035$ (при $f_{cd} = 8 \dots 60$ МПа) або значенням відповідно даних [6, табл.3.1], а значення граничних відносних деформацій розтягу відповідно в крайньому нижньому волокні розтягнутої зони КПСДП (ϵ_{au}) і попередньо-напруженої арматури (ϵ_{pu}), якими армовано нормальний переріз прямокутної ПНСББ, приймаються відповідно положень п.6.3.3 [1] та п.3.3.6.6 [6].

Таблиця 1

Значення коефіцієнта k_c , який корегує значення добутку $b_{\text{сум}} M_{\text{опт}}$ залежно від коефіцієнта співвідношення D_c при коефіцієнтах співвідношень D_h і D_e

D_e	D_c	D_h									
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
0,05	0,03	1,034	1,036	1,039	1,042	1,045	1,048	1,052	1,057	1,064	1,071
	0,06	1,071	1,076	1,081	1,087	1,093	1,101	1,111	1,122	1,136	1,153
	0,1	1,125	1,133	1,142	1,153	1,166	1,181	1,199	1,221	1,249	1,284
	0,16	1,216	1,231	1,249	1,270	1,295	1,325	1,362	1,408	1,467	1,547
	0,2	1,285	1,307	1,332	1,362	1,398	1,442	1,497	1,568	1,661	1,792
0,1	0,03	1,036	1,039	1,041	1,044	1,048	1,052	1,057	1,063	1,070	1,079
	0,06	1,075	1,080	1,086	1,092	1,100	1,109	1,120	1,134	1,150	1,172
	0,1	1,132	1,141	1,152	1,164	1,179	1,196	1,218	1,244	1,278	1,324
	0,16	1,229	1,246	1,267	1,291	1,321	1,356	1,401	1,458	1,535	1,642

	0,2	1,303	1,328	1,358	1,393	1,436	1,489	1,557	1,647	1,772	1,957
0,15	0,03	1,038	1,041	1,044	1,047	1,051	1,056	1,061	1,068	1,077	1,088
	0,06	1,079	1,085	1,091	1,098	1,107	1,118	1,131	1,146	1,167	1,194
	0,1	1,139	1,149	1,161	1,176	1,192	1,213	1,238	1,271	1,313	1,371
	0,16	1,243	1,262	1,286	1,314	1,348	1,391	1,445	1,517	1,616	1,763
	0,2	1,323	1,351	1,385	1,426	1,477	1,541	1,626	1,742	1,911	2,179
0,2	0,03	1,040	1,043	1,046	1,050	1,054	1,060	1,066	1,074	1,085	1,099
	0,06	1,083	1,089	1,096	1,105	1,115	1,127	1,142	1,161	1,186	1,220
	0,1	1,146	1,158	1,171	1,188	1,207	1,231	1,261	1,300	1,353	1,429
	0,16	1,257	1,279	1,306	1,338	1,378	1,429	1,495	1,585	1,716	1,923
	0,2	1,343	1,375	1,414	1,462	1,522	1,600	1,706	1,857	2,091	2,500
0,25	0,03	1,042	1,045	1,048	1,053	1,058	1,064	1,071	1,081	1,094	1,111
	0,06	1,087	1,094	1,102	1,111	1,122	1,136	1,154	1,176	1,207	1,250
	0,1	1,154	1,167	1,182	1,200	1,222	1,250	1,286	1,333	1,400	1,500
	0,16	1,271	1,296	1,327	1,364	1,410	1,471	1,552	1,667	1,842	2,143
	0,2	1,364	1,400	1,444	1,500	1,571	1,667	1,800	2,000	2,333	3,000
0,3	0,03	1,044	1,047	1,051	1,056	1,061	1,068	1,077	1,088	1,104	1,125
	0,06	1,091	1,098	1,107	1,118	1,131	1,147	1,167	1,194	1,231	1,287
	0,1	1,161	1,176	1,193	1,213	1,239	1,271	1,313	1,371	1,456	1,591
	0,16	1,286	1,314	1,348	1,391	1,445	1,517	1,617	1,765	2,005	2,465
	0,2	1,385	1,426	1,477	1,542	1,627	1,743	1,912	2,182	2,677	3,889

Якщо умова (10) задовольняється, то НДС нормального прямокутного перерізу ПНСББ відповідає НДС за випадком “в” чи “е”, а якщо ні – то НДС за випадком “а” чи “г”.

При умові $b_{p,m_p} + b_{a,m_a} = k_C \cdot \chi_{b_{\text{сум}}} \cdot m_{\text{опт}}$ – НДС перерізу ПНСББ відповідає безпосередньо НДС за випадком “б” чи “д”.

На другому етапі розрахунку визначаємо положення нейтральної вісі по відношенню до КПСДП за умовою:

$$h - Y_B \leq h_a + C_z, \quad (11)$$

де величина $h_a = 2\chi_f + h_w$, а величину Y_B знаходимо за залежністю:

$$Y_B = h \chi \{ [1 + b_{\text{сум}} m \chi (2 - D_h - 2D_c)] / [2\chi(1 + b_{\text{сум}} m)] \}, \quad (12)$$

де $b_{\text{сум}} = b_p + b_a$, $m = m_p + m_a$ – відповідно сумарні значення приведенного коефіцієнта співвідношення модулів деформацій арматури і сталюого профілю до бетону та приведенного коефіцієнта армування перерізу.

Таблиця 2

Значення добутку $b_{\text{сум}} m_{\text{опт}}$ при коефіцієнті співвідношення $D_c = 0$ залежно від величин коефіцієнтів співвідношень D_h та D_e

$D_h \backslash D_e$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
0,05	0,501	0,531	0,564	0,601	0,644	0,693	0,751	0,819	0,900	1,00
0,06	0,496	0,526	0,559	0,596	0,639	0,689	0,747	0,816	0,899	1,00
0,07	0,491	0,521	0,554	0,592	0,635	0,685	0,743	0,813	0,897	1,00
0,08	0,486	0,516	0,549	0,587	0,630	0,680	0,740	0,810	0,895	1,00
0,09	0,481	0,511	0,544	0,582	0,625	0,676	0,736	0,807	0,893	1,00
0,10	0,476	0,506	0,539	0,577	0,621	0,672	0,732	0,804	0,891	1,00
0,11	0,471	0,501	0,534	0,572	0,616	0,667	0,728	0,800	0,889	1,00
0,12	0,466	0,495	0,529	0,567	0,611	0,663	0,724	0,797	0,887	1,00
0,13	0,461	0,490	0,524	0,562	0,606	0,658	0,720	0,794	0,885	1,00
0,14	0,456	0,485	0,519	0,557	0,601	0,653	0,715	0,790	0,883	1,00
0,15	0,451	0,480	0,514	0,552	0,596	0,649	0,711	0,787	0,881	1,00

0,16	0,446	0,475	0,508	0,547	0,592	0,644	0,707	0,784	0,879	1,00
0,17	0,441	0,470	0,503	0,542	0,587	0,639	0,703	0,780	0,876	1,00
0,18	0,436	0,465	0,498	0,537	0,582	0,635	0,698	0,777	0,874	1,00
0,19	0,431	0,460	0,493	0,531	0,577	0,630	0,694	0,773	0,872	1,00
0,20	0,426	0,455	0,488	0,526	0,571	0,625	0,690	0,769	0,870	1,00
0,21	0,420	0,449	0,483	0,521	0,566	0,620	0,685	0,766	0,867	1,00
0,22	0,415	0,444	0,477	0,516	0,561	0,615	0,681	0,762	0,865	1,00
0,23	0,410	0,439	0,472	0,511	0,556	0,610	0,676	0,758	0,862	1,00
0,24	0,405	0,434	0,467	0,505	0,551	0,605	0,671	0,754	0,860	1,00
0,25	0,400	0,429	0,462	0,500	0,545	0,600	0,667	0,750	0,857	1,00
0,26	0,395	0,423	0,456	0,495	0,540	0,595	0,662	0,746	0,855	1,00
0,27	0,390	0,418	0,451	0,489	0,535	0,590	0,657	0,742	0,852	1,00
0,28	0,385	0,413	0,446	0,484	0,529	0,584	0,652	0,738	0,849	1,00
0,29	0,379	0,408	0,440	0,478	0,524	0,579	0,647	0,733	0,846	1,00
0,30	0,374	0,402	0,435	0,473	0,519	0,574	0,642	0,729	0,843	1,00

Якщо умова (11) задовольняється, то нейтральна вісь проходить через переріз КПСДП (випадок 3), якщо ні – то нейтральна вісь проходить вище перерізу КПСДП (випадок 1).

При умові $h - Y_B = h_a + C_z$ нейтральна вісь в нормальному перерізі ПНСББ проходить по верхній грані перерізу КПСДП, тобто має місце випадок 2.

На третьому етапі розрахунку визначаємо випадок напруженого-деформованого стану попередньо-напруженої арматури в момент максимальної несучої спроможності нормального перерізу ПНСББ, перевіряючи умову:

$$e_p = e_{cu} \cdot C_{sp} / Y_B \geq e_{pu} = e_{ud} \quad (13)$$

Якщо умова (13) задовольняється, то попередньо-напружена арматура працює в пружно-пластичній стадії, тобто мають місце випадки НДС ПНСББ “а”-“в”, а якщо ні – то попередньо-напружена арматура працює в пружній стадії, тобто мають місце випадки НДС ПНСББ “г”-“е”.

На четвертому етапі розрахунку складаємо рівняння рівноваги згинальних моментів відповідно визначеного випадку НДС нормального перерізу ПНСББ та перевіряємо за залежністю (1) дотримання умови його міцності.

Висновок та перспективи подальших розробок. Викладені основні положення розрахунку міцності нормального приведенного перерізу суцільних прямокутних ПНСББ залежно від НДС бетону, попередньо-напруженої арматури і КПСДП.

Метою подальших досліджень є розробка аналітичних залежностей (рівнянь рівноваги згинальних моментів) розрахунку несучої здатності нормальних прямокутних перерізів ПНСББ, що згинаються, залежно від варіантів його НДС.

Література

1. ДБН В.2.6-160:2010 Сталезалізобетонні конструкції. Основні положення: Затв. Мінрегіонбудом України від 15.11.2010 р №447 та від 30.12.2010 р. №571, чинні з 01.09.2011 р.- К.: ДП "Укрархбудінформ", 2010.- 81 с.
2. Проблеми розробки національного нормативного документа «Сталезалізобетонні конструкції» / Ю.Г. Аметов, А.Н. Бамбура, О.В. Семко, Ю.С. Слюсаренко, Л.І. Стороженко, В.Г. Тарасюк // Будівельні конструкції: Зб. наук. праць.– Київ, 2008. - Вип.70. – С.10-14.
3. Єврокод 4: Проектування комбінованих сталезалізобетонних конструкцій – Частина 1-1: Загальні норми і правила для будівель / Український переклад англомовної версії: НДБК – Київ, 2007.– 118 с.

4. *Руководство по проектированию железобетонных конструкций с жёсткой арматурой: НИИЖБ, ЦНИИПромзданий. – М.: Стройиздат, 1978.- 55 с.*
5. *Бамбура А.М. До оцінки здатності сталобетонних елементів, що згинаються, на основі деформаційного методу і реальних діаграм деформації матеріалів / А.М. Бамбура, Ю.Г. Аметов // Сталезалізобетонні конструкції, Кривий Ріг: КТУ, 2004.- Вип.6.– С.71-76.*
6. *ДБН В.2.6-98:2009 Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення: Затв. Мінрегіонбудом України від 24.12.2009 №680, чинні з 01.07.2011 р.- К.: ДП "Укрархбудінформ", 2011.- 75 с.*

*В.Ф. Пенц, к.т.н., доц. Ю.А. Кушнир, асп.
Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка
Н.А. Овсій
ЧП "Стройекспертиза", г. Полтава*

РАСЧЁТ ПРОЧНОСТИ НОРМАЛЬНОГО ПРЯМОУГОЛЬНОГО ПРИВЕДЕННОГО СЕЧЕНИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО-НАПРЯЖЁННЫХ СТАЛБЕТОННЫХ БАЛОК В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЕГО НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

Предложена методика расчёта прочности нормального приведенного сечения сплошных прямоугольных предварительно-напряжённых сталебетонных балок в зависимости от напряжённо-деформированного состояния в момент разрушения их композитных материалов (бетона, конструкционного приведенного стального двутаврового профиля и предварительно-напряжённой арматуры).

Ключевые слова: *сталь, бетон, предварительное напряжение, арматура, балка, нормальное, сечение, деформации, граничные напряжения, прочность.*

*V.F. Penz, Ph.D., Docent., I.O. Kushnir, Post graduate st.
Poltava National Technical University named after Yuri Kondratyuk
N.A. Ovsiiy
PE "Building expertise", Poltava*

CALCULATION OF STRENGTH NORMAL RECTANGULAR REDUCED SECTION PRESTRESSED REINFORCED CONCRETE BEAMS IN THE DEPENDING ON ITS STRESS-DEFORMATION STATE

The proposed method allows the calculation carrying capacity of the reduced normal section of continuous rectangular prestressed steel-concrete beams depending on the stress-strain state at the time of the destruction of composite materials (concrete, structural steel I-sections and prestressed tendon).

Keywords: *steel, concrete, prestressed, rebar, beam, normal cross section, deformation, boundary tension, strength.*

*Надійшла до редакції 08.09. 2012
© В.Ф. Пенц, Ю.О. Кушнір, М.О. Овсіій*