



Odporność belek żelbetowych na obciążenia wybuchowe

ROMAN KRZEWIŃSKI, MARLENA NIEDZIAŁEK

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Inżynierii Lądowej i Geodezji,
Katedra Budownictwa, 00-908 Warszawa, ul. gen S. Kaliskiego 2,
roman.krzewinski@wat.edu.pl, marlena.niedzialek@wat.edu.pl

Streszczenie. W pracy przedstawiono analizę oddziaływania dynamicznego na belki żelbetowe, wywołanego wybuchem niekontaktującym się bezpośrednio z konstrukcją. W zależności od odległości źródła wybuchu, konstrukcja może zostać obciążona strumieniem gazów powybuchowych albo powietrzną falą uderzeniową. Oceniono oddziaływanie tego typu obciążeń na belki żelbetowe o stałym przekroju i niewielkich wymiarach poprzecznych w porównaniu z ich długością. Dla belek zlokalizowanych w strefie bliższej dokonano oceny parametrów destrukcyjnego działania wybuchu dla przypadku granicznego, w którym wykruszanie betonu nastąpi na odcinku równym co najmniej długości wyboconieniowej prętów stalowych. W przypadku obciążania belek powietrzną falą uderzeniową, wykorzystując dane literaturowe, określono sposób oceny ekwiwalentnego obciążenia statycznego, przy którym następuje graniczne sprężyste ugięcie belek. Powyższą analizę przedstawiono za pomocą przykładu obliczeniowego, w którym określono minimalną długość wyboconieniową prętów stalowych w belce zginanej.

Słowa kluczowe: budownictwo, dynamika wybuchu, ładunki niekontaktowe, obciążenia dynamiczne, współczynnik odbicia

DOI: 10.5604/12345865.1228969

1. Wstęp

Elementy konstrukcji budowlanych mogą, w wyniku działań wojennych lub terrorystycznych, zostać poddane obciążeniom generowanym wybuchem. Należy również mieć na uwadze oddziaływanie powstałe w wyniku awarii instalacji przewodzących produkty palne, zwłaszcza gazowe, w wyniku których powstają wybuchowe mieszaniny paliwowo-powietrzne.

Oddziaływanie wybuchu ładunków materiałów wybuchowych (MW) może mieć charakter kontaktowy, gdy przylegają bezpośrednio do konstrukcji, lub niekontaktowy. Ładunki kontaktowe stosowane są głównie w celu przecięcia belki lub słupa. Natomiast ładunki niekontaktowe, działając na konstrukcję jako całość, mają za zadanie głównie wykruszenie betonu w pewnej części konstrukcji.

Oddziaływania niekontaktowych ładunków wybuchowych mogą mieć charakter celowy, w przypadkach gdy istnieje możliwość zniszczenia lub uszkodzenia równocześnie kilku elementów konstrukcji, albo przypadkowy — na przykład w wyniku awarii przewodów gazowych i powstania wybuchowej mieszaniny gazowo-powietrznej. Mogą wystąpić dwa zasadnicze przypadki:

- 1) Wybicie betonu z elementu żelbetowego i obnażenie zbrojenia na pewnym odcinku; zniszczenie konstrukcji nastąpi w wyniku działania sił wewnętrznych, a w szczególności ciężaru własnego. Na skutek wybitcia betonu mogą zaistnieć następujące rodzaje odkształcenia elementu konstrukcji:
 - osiowe ściskanie,
 - zginanie,
 - rozciąganie,
 - działanie złożone.
- 2) Wybicie betonu z elementu żelbetowego z góry założonym odkształceniem obliczonym na wyłączenie tego elementu z pracy całej konstrukcji. Ten sposób stosuje się do zniszczenia elementów obciążonych nieznacznymi siłami zewnętrznymi, w szczególności pracujących na zginanie, obciążonych tylko ciężarem własnym. Aby osiągnąć założone odkształcenie, należy zapewnić wybicie betonu na określonym odcinku, aby naprężenia w ścisanej stali zbrojeniowej przekroczyły wartość krytyczną przy zginaniu oraz niezniszczona część belki otrzymała niezbędną energię kinetyczną potrzebną do odkształcenia zbrojenia.

W szczególnych przypadkach zakłada się przebicie elementu żelbetowego, z wykruszeniem betonu i przebicciem stali zbrojeniowej w założonym przekroju.

2. Charakterystyka obciążeń

Przedmiotem opracowania są oddziaływania dynamiczne na belki żelbetowe wywołane wybuchem niekontaktującym się bezpośrednio z konstrukcją. Źródłem energii mogą być:

- wybuchy chemiczne materiałów wybuchowych (MW) lub mieszanin paliwowo-powietrznych (MPP),
- wybuchy jądrowe,
- wybuchy fizyczne.

Rozważono przypadki wybuchów ładunków MW usytuowanych w pewnej odległości od konstrukcji. Najbardziej niekorzystnym przypadkiem będzie sytuacja, gdy ładunek znajdzie się w odległości nie większej niż $15 r_0$ od obciążanej belki [1, 3]. Symbol r_0 oznacza promień ładunku sprowadzonego do kształtu kulistego:

$$r_0 = \sqrt[3]{\frac{3C}{4\pi\rho_0}}, \quad (1)$$

gdzie: C — masa ładunku MW wyrażona w równoważniku trotylowym [kg];
 ρ_0 — gęstość ładunku, dla TNT $\rho = 1560 \text{ kg/m}^3$.

Konstrukcja zostanie wówczas obciążona strumieniem gazów powybuchowych o nadciśnieniu p szybko zmniejszającym się w funkcji czasu t . Ten charakter obciążenia najkorzystniej jest scharakteryzować impulsem nadciśnienia zapisanym zależnością całkową:

$$i = \int_0^{\tau} p dt. \quad (2)$$

Na dalszych odległościach wystąpi zjawisko fali uderzeniowej. Zmianę wartości nadciśnienia na czole fali uderzeniowej w funkcji odległości można określić zależnościami:

$$\Delta p_c = 0,084A + 0,27A^2 + 0,7A^3, \quad (3)$$

gdzie: $A = \frac{\sqrt[3]{C}}{r}$;

r — odległość od środka wybuchu [m].

Czas trwania fazy nadciśnienia fali uderzeniowej można oszacować według zależności [2]:

$$\frac{a_1 \tau_+}{r_0} = \begin{cases} 9 & \text{dla } \frac{r}{r_0} < 25 \\ 1,8 \sqrt{\frac{r}{r_0}} & \text{dla } 25 \leq \frac{r}{r_0} \leq 150 \\ 4,2 \sqrt{\frac{r}{r_0}} & \text{dla } \frac{r}{r_0} > 150, \end{cases} \quad (4)$$

gdzie: a_1 — prędkość rozchodzenia się dźwięku w założonym ośrodku [m/s].

Alternatywnie do wyznaczania czasu trwania fazy można posłużyć się wzorem Sadowskiego [2]:

$$\tau = 1,5 \cdot 10^{-3} \sqrt[6]{C} \cdot \sqrt{r}. \quad (5)$$

Do celów praktycznych wprowadza się pojęcie czasu efektywnego τ_e , którego wartość wyznacza się z wzoru

$$\tau_e = \frac{2}{n+1} \tau_+, \quad (6)$$

gdzie: n — wykładnik potęgowy zaokrąglany do najbliższej liczby całkowitej według zależności [2]:

$$n = 1,9 \sqrt{\frac{\Delta p_c}{p_1}}, \quad (7)$$

gdzie: p_1 — wartość ciśnienia atmosferycznego, $p_1 = 0,1$ MPa.

Wartość impulsu nadciśnienia i w tym przedziale odległości można określić wzorem:

$$i = \frac{\Delta p_c \tau_e}{2}. \quad (8)$$

Fala uderzeniowa, padając na przegrodę, ulega odbiciu. Maksymalną wartość nadciśnienia na czole fali odbitej można określić ze związku [2]:

$$\Delta p_{od} = 2\Delta p_c + \frac{6\Delta p_c^2}{\Delta p_c + 7p_1}. \quad (9)$$

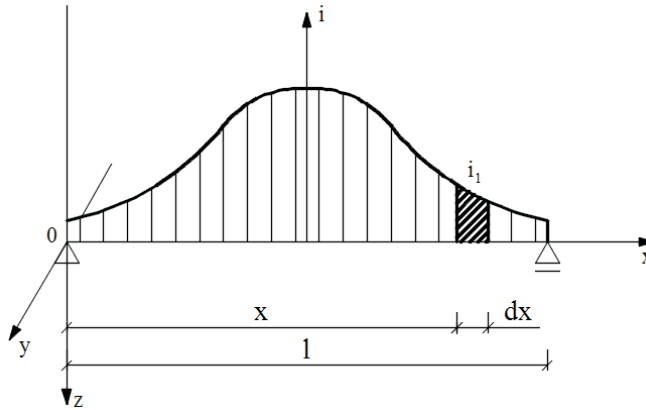
Zatem uogólniając, elementy konstrukcji znajdujące się w zasięgu oddziaływania wybuchu mogą doznać obciążeń:

- a) o charakterze impulsowym:
 - w strefie działania gazów powybuchowych — zakres odległości mniejszych od $15 r_0$,
 - w strefie bliższej oddziaływania fali uderzeniowej, w której czas działania fali uderzeniowej jest relatywnie krótki;
- b) o charakterze ciśnieniowym — w dalszej strefie oddziaływania fali uderzeniowej.

Zasadniczym parametrem charakteryzującym zachowanie elementu konstrukcji pod wpływem obciążeń dynamicznych wywołanych wybuchem jest [4] iloczyn podstawowej kołowej częstości drgań i efektywnego czasu trwania obciążenia $\varpi_{11} \tau_e$.

3. Obciążenia impulsowe

Rozpatrzono najbardziej niekorzystne dla konstrukcji oddziaływanie wybuchu ładunku MW [2, 3] znajdującego się w odległości nie większej niż $15 r_0$, umieszczonego symetrycznie względem podpór belki (rys. 1).



Rys. 1. Schemat obciążenia belki impulsami gazowymi powybuchowych

Dokonano oceny parametrów destrukcyjnego oddziaływania wybuchu dla przypadku granicznego, w którym zniszczenie belki nastąpi w wyniku wykruszenia betonu i obnażenia zbrojenia na odcinku $2x$ równym co najmniej długości wybozeniowej prętów stalowych l_w (rys. 2). W wyniku działania sił wewnętrznych nastąpi odkształcenie prętów. Belka zostanie wyłączona z pracy danej konstrukcji.

Dla przedstawionego schematu wartość impulsu gazów powybuchowych można określić ze związku [1]:

$$i = \frac{A_0 C}{a^2} \cos^4 \alpha, \quad (10)$$

gdzie: α — kąt zawarty między styczną do trajektorii w punkcie uderzenia i normą do przegrody;

a — odległość od środka ładunku do najbliższej powierzchni belki;

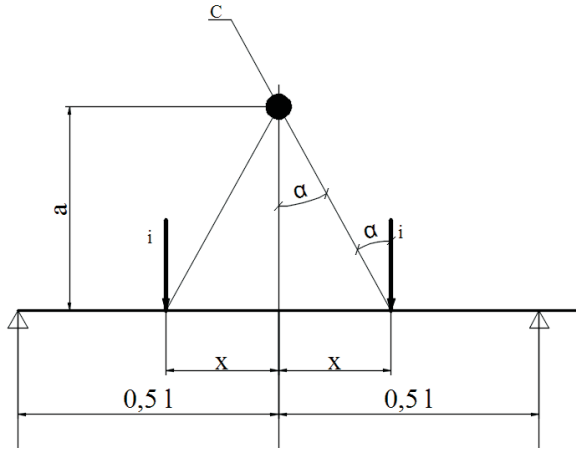
A_0 — wielkość charakteryzująca dany MW, według wzoru:

$$A_0 = \frac{u_0 + \varpi_0}{4\pi};$$

u_0 — średnia prędkość produktów wybuchu;

ϖ_0 — prędkość przemieszczania powierzchni rozlotu.

Praca potrzebna do wybicia betonu z jednostki objętości elementu żelbetowego A_m^w zależy zarówno od klasy betonu, jak i od ilości i jakości stali zbrojeniowej



Rys. 2. Schemat oddziaływania ładunku MW o masie C w odległości a od belki żelbetowej

oraz jej układu w konstrukcji. Do orientacyjnych obliczeń można wykorzystać wzór empiryczny [2, 3]:

$$A_m^w = 7,12 \frac{R_m^2}{E}, \quad (11)$$

gdzie: R_m — wytrzymałość betonu na ściskanie przy rozciąganiu;
 E — moduł sprężystości betonu.

Warunek wybicia betonu: uzyskanie przez cząstki żelbetu (betonu i stali) prędkości większej od wartości krytycznej, wartość impulsu jednostkowego nadciśnienia wywołanego wybuchem można oszacować z nierówności:

$$i \geq \frac{F}{k_f b} \sqrt{2\rho A_m^w}, \quad (12)$$

gdzie: F — powierzchnia przekroju belki;
 ρ — gęstość betonu;
 k_f — współczynnik kształtu przekroju poprzecznego belki; gdy strumień gazów powybuchowych pada prostopadłe na powierzchnię belki $k_f = 1$;
 b — szerokość belki.

Wykorzystując zależność (10), otrzymuje się wzór na masę ładunku niezbędną do wybicia betonu:

$$C \geq \frac{Fa^2}{k_f b A_0} \sqrt{2\rho A_m^w} \left[1 + \left(\frac{x}{a_1} \right)^2 \right]^2. \quad (13)$$

Przed wybuchem w przekroju belki przedstawionym na schemacie (rys. 3a) działał moment zginający:

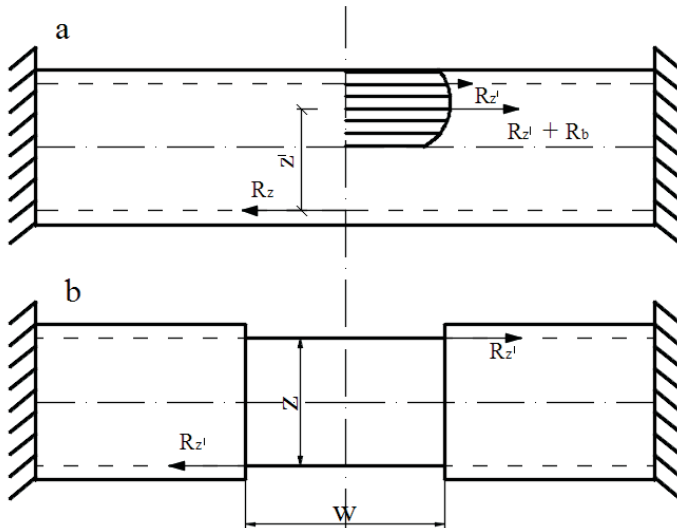
$$M = R_z z^I = (R_z^I + R_b) z^I, \quad (14)$$

gdzie: R_z i R_z^I — siły działające w prętach zbrojenia w strefie rozciąganej i ściskanej;

R_b — siła działająca w strefie ściskanej betonu;

z^I — ramię pary sił;

z — ramię pary sił po wybiciu betonu.



Rys. 3. Schemat pracy belki żelbetowej obciążonej impulsem gazów powybuchowych:
a — przed wykruszeniem betonu; b — po wykruszeniu betonu

Po wybiciu betonu moment ten może być przenoszony tylko przez stal zbrojeniową, przy czym siły działające w rozciąganych i ściskanych prętach będą sobie równe (rys. 3b):

$$R_z^{II} = \frac{M}{z} = R_z \frac{z^I}{z} = (R_z^I + R_b) \frac{z^I}{z}. \quad (15)$$

Ponieważ $\frac{z^I}{z} < 1$, to $R_z^{II} < R_z$.

W większości przypadków przed wybiciem betonu nie ma informacji, jaka część zbrojenia znajduje się w strefie ściskanej, wiadomo tylko, że nie może ona przekraczać połowy całości zbrojenia, dlatego do obliczeń można przyjąć:

$$F_z^{II} = F_z = \mu_z \frac{F}{2}, \quad (16)$$

gdzie: μ_z — stopień zbrojenia.

Aby wyłączyć belkę pracy konstrukcji jako całości, naprężenia w stali zbrojeniowej powinny przekroczyć wartość naprężeń krytycznych [2, 3], co można przedstawić nierównością:

$$\frac{R_z^{II}}{F} \geq \frac{E_z d_{pr}^2}{4l_w^2}. \quad (17)$$

Przekształcając (17), można znaleźć zależność na określenie minimalnej długości wyboyczeniowej prętów zbrojenia:

$$l_w = \frac{\pi d_{pr}}{2} \sqrt{\frac{E_z}{k_{oz} Q_r \left(1 + \frac{k_{ob} R_m}{\mu_z k_{oz} Q_r}\right)} \frac{z}{z^I}}, \quad (18)$$

gdzie: E_z — moduł sprężystości stali;
 Q_r — granica plastyczności stali;
 k_{oz} — współczynnik jednorodności stali;
 k_o — współczynnik jednorodności betonu;
 d_{pr} — średnica prętów zbrojenia.

Przykład liczbowy: określić minimalną długość wyboyczeniową prętów stalowych w belce zginanej, przyjmując następujące wartości parametrów wytrzymałościowych:

- beton C12/15, $R_m = 12$ MPa, $k_o = 0,6$;
- stal St 3, $Q_r = 240$ MPa, $E_z = 200$ GPa, $k_o = 0,9$, $d_{pr} = 0,01$ m, $\mu_z = 0,01$.

Przyjmując najmniejszy możliwy stosunek

$\frac{z^I}{z} = 0,7$ — odpowiadający największej wartości długości wyboyczeniowej,

otrzymano wynik $l_w = 0,27$ m. Dla $\frac{z^I}{z} = 1$ długość wyboyczeniowa prętów wyniesie $l_w = 0,23$ m.

4. Obciążenia ciśnieniowe

Obciążenie belki równomiernie rozłożonym ciśnieniem dynamicznym może w skrajnym przypadku prowadzić do wytworzenia tak zwanego przegubu

plastycznego w środkowej części belki (rys. 4), w którym działa stały moment sił wewnętrznych M_0 [5]:

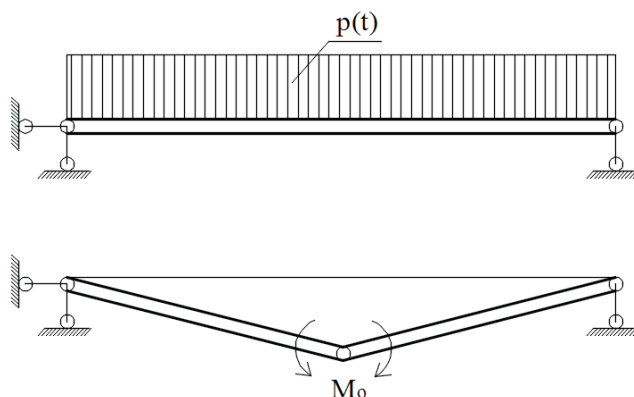
$$M_0 = bh^2 \frac{\sigma_T}{4}, \quad (19)$$

gdzie: h — szerokość i wysokość belki;
 σ_T — statyczna granica plastyczności.

Równanie ruchu belki można zapisać w postaci:

$$J \frac{d^2 \omega}{dt^2} + M_0 = \frac{1}{8} p(t) l^2, \quad (20)$$

gdzie: J — biegunowy moment bezwładności odcinka podporowego belki;
 ω — kołowa częstość drgań własnych belki.



Rys. 4. Schemat oddziaływania fali uderzeniowej na żelbetową belkę swobodnie podpartą

Rozwiązania równania (20) dokonano w pracy [5], wprowadzając pojęcie ekwiwalentnego obciążenia statycznego — analogicznie jak przy ocenie odkształcenia belki w zakresie odkształceń sprężystych.

Wartość ekwiwalentnego obciążenia statycznego, przy którym w belce żelbetowej powstaje graniczne sprężyste ugięcie — początkujące plastyczne stadium odkształcenia — wynosi:

$$p_{elw}^{pl} = p_{od} k_d^{pl}, \quad (21)$$

gdzie: k_d^{pl} — współczynnik dynamiczny dla plastycznego stadium odkształcenia.

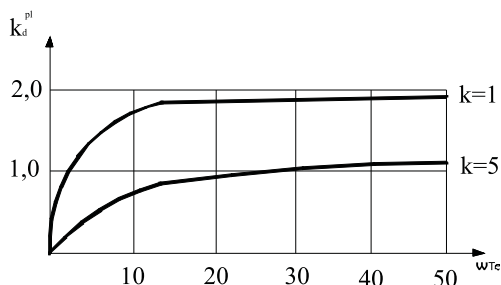
Wartości dynamicznych współczynników (rys. 5) określa się na podstawie zadanego ugięcia w stadium plastycznej pracy konstrukcji, w zależności od klasy stali i betonu.

Praca konstrukcji żelbetowych w stadium plastycznym charakteryzuje się powstaniem szczelin w strefie rozciąganej przekroju, związanych z odkształceniem zbrojenia i w jego efekcie — kruszeniem betonu w strefie ściskanej. Różne stopnie rozwoju szczelin, aż do granicznego stanu konstrukcji, można określić w trakcie obliczeń, zależnie od warunków technologicznych eksploatacji konstrukcji.

Dokonując obliczeń odporności odkształcanych elementów, stan graniczny określa się na podstawie przyjętej względnej wartości ugięcia plastycznego k (rys. 5) zgodnie z zależnością:

$$k = \frac{y_m}{y_0}, \quad (22)$$

gdzie: y_m — maksymalne ugięcie w stanie plastycznym;
 y_0 — graniczne ugięcie sprężyste.



Rys. 5. Zależność wartości współczynnika dynamicznego k_d^{pl} od parametru $\omega\tau_e$ i względnej wartości ugięcia plastycznego k

Ekwiwalentne obciążenie statyczne belki żelbetowej można zatem określić według zależności (21), wyznaczając wartość współczynnika dynamicznego k_d^{pl} z wykresu (rys. 5) w funkcji podstawowego parametru obciążenia dynamicznego $\omega\tau_e$, przy określonej wartości parametru k zgodnie z (22).

Przy projektowaniu konstrukcji żelbetowych narażonych na obciążenia wybuchowe należy uwzględnić wzrost parametrów wytrzymałościowych stali i betonu przy obciążeniach dynamicznych.

Zgodnie z [2, 3] granica plastyczności stali może wzrosnąć 1,2-1,9 razy, a wytrzymałość betonu na ściskanie 1,35-2,0 razy. Wartość współczynnika wzrostu η zależy od rodzaju materiału konstrukcyjnego i czasu trwania obciążenia. Przykładowe wartości współczynnika η dla czasów trwania obciążenia od 0,001 s do 1 s według [6] podano w tabeli 1.

TABELA 1

Wartość współczynnika η dla różnych materiałów w zależności od czasu obciążenia

Czas trwania obciążenia [s]	1	0,5	0,1	0,05	0,01	0,05	0,001
Beton η_b	1,08	1,12	1,2	1,25	1,35	1,5	1,6
Stal η_s	1,1	1,18	1,3	1,37	1,5	1,53	1,65

5. Wnioski

Elementy konstrukcji żelbetowych znajdujące się w zasięgu oddziaływania wybuchów ładunków MW usytuowanych w pewnej odległości od konstrukcji mogą doznać obciążeń:

- a) o charakterze impulsowym w strefie działania gazów powybuchowych (zakres odległości mniejszych od $15 r_0$) i w strefie bliższej oddziaływania fali uderzeniowej,
- b) o charakterze ciśnieniowym — w dalszej strefie oddziaływania fali uderzeniowej.

Zasadniczym parametrem charakteryzującym zachowanie się elementu konstrukcji pod wpływem obciążeń dynamicznych wywołanych wybuchem jest [4] iloczyn podstawowej kołowej częstości drgań ϖ_{11} i efektywnego czasu trwania obciążenia τ_e .

Wyłączenie belki z pracy danej konstrukcji może nastąpić w wyniku wybicia betonu na odcinku równym minimalnej długości wybojeniowej prętów stalowych lub przez wytworzenie tak zwanego przegubu plastycznego w środkowej części belki.

Dokonując obliczeń odporności odkształcanych elementów, stan graniczny określa się na podstawie przyjętej względnej wartości ugięcia plastycznego k , będącego stosunkiem maksymalnego ugięcia w stanie plastycznym do granicznego ugięcia sprężystego. Zakres zmienności wartości współczynnika k zawarty jest w przedziale od $k = 5$ — przy przyjęciu wartości dynamicznego współczynnika $k_d^{pl} = 1$ — do $k = 1$ — przy przyjęciu wartości dynamicznego współczynnika $k_d^{pl} = 2$. Praca konstrukcji żelbetowych w stadium plastycznym charakteryzuje się powstaniem szczelin w strefie rozciąganej przekroju, związanych z odkształceniem zbrojenia i w jego efekcie — kruszeniem betonu w strefie ściskanej.

Praca zrealizowana w ramach PBS 934 pt. „Nowe ujęcie zasad projektowania specjalnych obiektów infrastruktury wojskowej”.

Artykuł wpłynął do redakcji 12.10.2016 r. Zweryfikowaną wersję po recenzjach otrzymano 17.11.2016 r.

LITERATURA

- [1] KRZEWIŃSKI R., *Dynamika wybuchu, cz. 1. Metody określania obciążeń*, WAT, Warszawa, 1982.
- [2] KRZEWIŃSKI R., *Dynamika wybuchu, cz. 2. Działanie wybuchu w ośrodkach inercyjnych*, WAT, Warszawa, 1983.
- [3] SAŁAMACHIN T., *Fizyceskije osnovy mechaniczeskogo diejstwija wzrywa i metody opredielenia wzrywnych nagruzok*, WIA, Moskwa, 1974.
- [4] KALISKI S., *Drgania i fale, część 1. Drgania układów dyskretnych*, WAT, Warszawa, 1981.
- [5] SZAMIN W.M., *Rascziet zaszczytnych soorurzenij na diejstwije wzrywnych nagruzok*, Strojizdat, Moskwa, 1989.
- [6] ROGALSKI M., *Przykłady obliczeń konstrukcji schronów na działanie klasycznych środków rażenia*, WAT, Warszawa, 1982.

R. KRZEWIŃSKI, M. NIEDZIAŁEK

Resistance of reinforced concrete beams in explosive charges

Abstract. The paper presents an analysis of the dynamic interaction on reinforced concrete beams, caused by the outbreak of not-direct contact with the design. Depending on the distance of the source of the outbreak, the structure may be loaded with gas stream postexplosion or air shock wave. The impact of such influence on the reinforced concrete beam of a constant cross-section and small transverse dimensions compared with their length was assessed. For the beams located in the closer zone, there were evaluated the parameters of the destructive action of explosions limit case, in which the concrete chipping occurs at a length of at least the length of the buckling of steel rods. In case of loading of beams with air shock wave, using literature data, they determined the way of evaluating equivalent static load at which the boundary elastic deflection of beams occurs. The above analysis is shown by the example calculation, which sets the minimum length of the buckling of steel bars in the beam bending.

Keywords: civil engineering, the dynamics of the explosion, the noncontact loads, dynamic loads, reflectance

DOI: 10.5604/12345865.1228969