



## **Badania elementów żelbetowych wzmocnionych laminatami obciążonych wybuchowo. Część I. Opis programu badań i badania materiałów konstrukcyjnych**

PAWEŁ PONETA<sup>1</sup>, AGNIESZKA GILUŃ<sup>1</sup>, JERZY JURCZUK<sup>1</sup>,  
PIOTR ŚWIEŻEWSKI<sup>1</sup>, ADAM STOLARSKI, GRZEGORZ BĄK,  
TADEUSZ BŁAŻEJEWICZ, ROMAN KRZEWIŃSKI,  
SŁAWOMIR ONOPIUK, RYSZARD REKUCKI,  
ZBIGNIEW SZCZEŚNIAK

<sup>1</sup>Mostostal Warszawa S.A., Biuro Analiz i Rozwoju,  
02-673 Warszawa, ul. Konstruktorska 11a,  
p.poneta@mostostal.waw.pl

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Inżynierii Lądowej i Geodezji,  
00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2,  
astolarski@wat.edu.pl

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono motywację podjęcia oraz koncepcję realizacji zamierzenia badawczego. W pierwszej części pracy przedstawiono opis programu badań doświadczalnych elementów żelbetowych. Badania przeprowadzono dla trzech rodzajów elementów żelbetowych zwykłych bez dodatkowego wzmocnienia oraz dla elementów wzmocnionych wysokowytrzymałościowymi powłokowymi laminatami z włókien aramidowych, szklanych i węglowych. Opisano stanowiska do badania elementów obciążonych wybuchowo. Przedstawiono charakterystykę oddziaływania wybuchu na badane elementy wraz z metodą szacowania obciążenia wybuchowego. Zaprezentowano wyniki badań materiałów konstrukcyjnych: betonu, stali zbrojeniowej i laminatów wykorzystanych do wykonania belek, słupów i płyt żelbetowych będących przedmiotem badań w pracy.

**Słowa kluczowe:** badania doświadczalne, obciążenie wybuchowe, elementy żelbetowe (belki, słupy, płyty), materiały konstrukcyjne (beton, stal zbrojeniowa, laminaty)

## 1. Wprowadzenie

### 1.1. Problematyka badań oddziaływania wybuchu na elementy konstrukcyjne

Badanie doświadczalne nośności, przemieszczeń i mechanizmu zniszczenia budowlanych elementów konstrukcyjnych obciążonych wybuchowo jest ważnym zagadnieniem mechaniki konstrukcji i stanowi wyzwanie badawcze ze względu na złożoność i szczególne cechy oraz nietypowość występujących zjawisk fizycznych [1].

W polskim piśmiennictwie z zakresu mechaniki konstrukcji inżynierskich opisy zagadnień z tego zakresu nie są szeroko reprezentowane. Głównym ośrodkiem w kraju podejmującym badania z zakresu oddziaływań wybuchowych na konstrukcje budowlane jest Wojskowa Akademia Techniczna. Istotną część tych badań dotyczy budownictwa wojskowego, obronnego i ochronnego, a jej wyniki nie są powszechnie znane.

Potencjalne zagrożenie terroryzmem posługującego się najnowszymi rodzajami broni, w tym także nietypowymi i niekonwencjonalnymi ładunkami wybuchowymi, wskazuje na potrzebę badań możliwego zakresu zniszczeń i uszkodzeń elementów konstrukcyjnych w obiektach budowlanych. Świadomość wystąpienia zagrożeń pozwala na odpowiednie zabezpieczenie konstrukcji budowlanych narażonych na celowe zniszczenie i w konsekwencji zminimalizowanie uszkodzeń konstrukcji.

Zespół Katedry Budownictwa WAT od lat realizuje prace badawcze zarówno teoretyczne i doświadczalne dotyczące problematyki oddziaływania wybuchu na konstrukcje budowlane, jak i z zakresu praktycznego wdrażania efektów badań do praktyki projektowej w budownictwie obronnym.

Podbudowę teoretyczną rozważanych zagadnień stanowią prace z zakresu:

- modelowania dynamicznego zachowania materiałów konstrukcyjnych: stali [2], betonu [3, 5]; przekrojów żelbetowych [4]; elementów konstrukcyjnych [6-3];
- modelowania procesów falowych w ośrodku posadowienia i w materiałach konstrukcyjnych [14-22];
- modelowania dynamicznej interakcji grunt–konstrukcja [23-28].

Jednocześnie tym rozważaniom zagadnień szczegółowych towarzyszyły prace nad analizą i modelowaniem dynamicznego zachowania obiektów budowlanych, w tym szczególnie obiektów schronowych. W tym obszarze uzyskano rozwiązania, które ilustrują prace z zakresu:

- wyznaczania obciążeń typu wybuchowego generowanych różnymi czynnikami [29-33];
- analizy specyficznego zjawiska wstrząsu obiektów budowlanych wywołanego obciążeniami impulsowymi [34, 35];

- modelowania dynamicznego zachowania obiektów schronowych i specjalnych konstrukcji budowlanych [36-45].

Przeprowadzono również wiele prac doświadczalnych. Wyniki badań eksperymentalnych ilustrują prace dotyczące:

- metodyki pomiarów parametrów obciążeń wybuchowych [46, 47];
- zachowania materiałów konstrukcyjnych pod obciążeniami dynamicznymi [48];
- dynamicznego zachowania różnych elementów konstrukcyjnych, wyposażenia i instalacji specjalnych [49];
- dynamicznego zachowania modeli obiektów schronowych i schronów w skali naturalnej [50-52].

Oddzielną kategorię stanowią prace koncepcyjne z zakresu projektowania specjalnych obiektów schronowych lub budowli ochronnych [53-58] oraz opracowania o charakterze wdrożenia w praktyce projektowej budownictwa specjalnego [59-61].

Przegląd ten wskazuje na złożoność i specyfikę problematyki badania dynamicznego zachowania specjalnych obiektów budowlanych, odróżniającej się od problematyki badania obiektów standardowych.

## 1.2. Cel, przedmiot i zakres pracy

Głównym celem pracy są porównawcze badania doświadczalne poziomu odporności prostych elementów konstrukcyjnych, takich jak belki, słupy i płyty żelbetowe, na oddziaływanie typu wybuchowego.

Badania przeprowadzono dla trzech rodzajów elementów żelbetowych zwykłych bez dodatkowego wzmocnienia oraz dla elementów wzmocnionych wysokowytrzymałościowymi powłokowymi laminatami z włókien aramidowych, szklanych i węglowych. Sposób wzmocnienia elementów za pomocą laminatów jest obecnie powszechnie stosowany [62, 63]. Doświadczalna weryfikacja efektywności wzmocnienia laminatami w przypadku działania obciążeń wybuchowych wynika również z realizacji celu pracy.

Praca składa się z trzech części. Część I zawiera opis programu badań doświadczalnych belek i płyt żelbetowych. W tej części pracy zaprezentowano opis stanowisk do badania elementów obciążonych wybuchowo. Przedstawiono charakterystykę oddziaływania wybuchu na badane elementy. W celu weryfikacji parametrów wytrzymałościowych materiałów konstrukcyjnych, z których wykonane zostały badane elementy żelbetowe, przeprowadzono badania doświadczalne tych materiałów. Przedstawiono wyniki badania materiałów konstrukcyjnych betonu i stali zbrojeniowej oraz materiałów wzmacniających, tj. laminatów żywicznych. Badania wytrzymałości betonu na ściskanie przeprowadzono zarówno w odniesieniu do elementów modelowych jak i do słupów żelbetowych w budynku doświadczalnym.

W następnych częściach pracy zostaną przedstawione wyniki badań elementów konstrukcyjnych obciążonych wybuchowo — belek i słupów w części II i płyt żelbetowych w części III.

## 2. Opis programu badań

Program badań obejmował trzy główne zadania: (1) badania wstępne składowych materiałów konstrukcyjnych, (2) badania elementów żelbetowych na stanowiskach badawczych, (3) badania elementów konstrukcyjnych w skali naturalnej w budynku przeznaczonym do rozbiórki.

Celem pierwszego zadania była weryfikacja statycznych właściwości materiałów konstrukcyjnych: betonu, stali zbrojeniowej i laminatów stanowiących materiały składowe badanych elementów konstrukcyjnych. W ramach drugiego zadania wykonano badania modeli elementów żelbetowych: belek, słupów i płyt w specjalnej komorze wybuchowej. Trzecie zadanie obejmowało badania słupów żelbetowych w budynku halowym pod działaniem obciążenia wybuchowego. Przeprowadzono badania elementów konstrukcyjnych bez dodatkowego wzmocnienia oraz z zastosowaniem dodatkowego wzmocnienia trzema rodzajami laminatów.

## 3. Rodzaje badanych elementów

### 3.1. Dane geometryczne i materiałowe

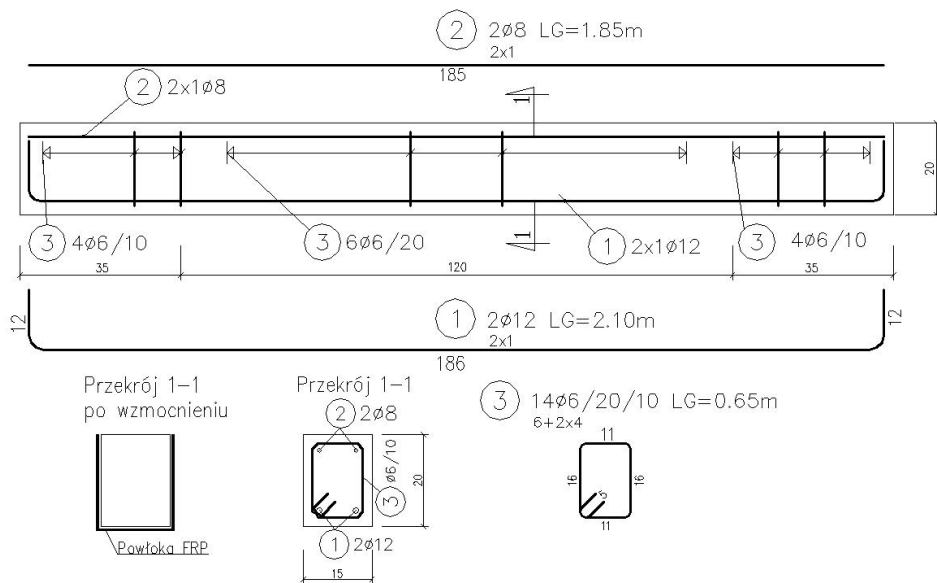
Przedmiotem badań są trzy rodzaje elementów żelbetowych, tj. belki, słupy i płyty wykonane zgodnie z rysunkami konstrukcyjnymi przedstawionymi na rysunkach 1-3.

Ze względu na sposób przyłożenia obciążenia wybuchowego oddziałującego w kierunku prostopadłym do osi podłużnej belek i słupów żelbetowych obydwie te rodzaje elementów będą traktowane jako elementy belkowe, przy czym różnica pomiędzy tymi elementami polegała na sposobie wzmocnienia laminatami.

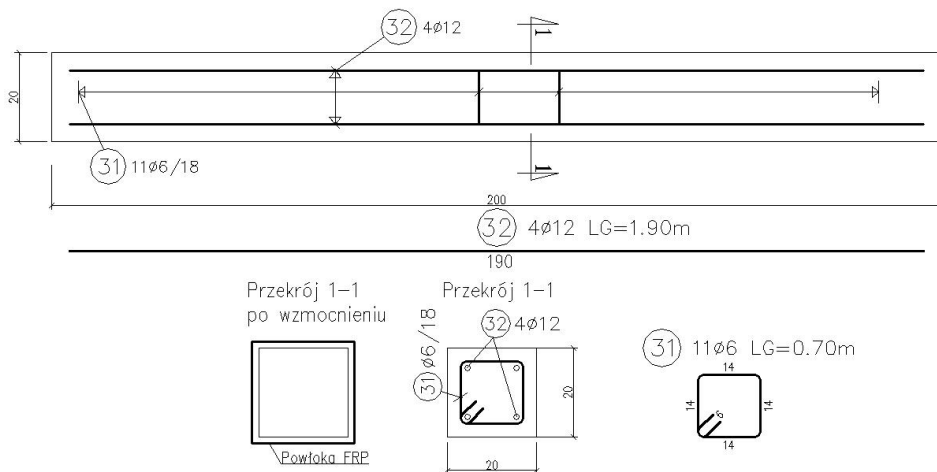
Wszystkie elementy żelbetowe wykonano z betonu klasy C20/25, ze zbrojeniem głównym B500SP i pomocniczym (strzemiona lub pręty rozdzielcze) St3S-b-500.

Badania przeprowadzono dla elementów bez dodatkowego wzmocnienia oraz dla elementów żelbetowych wzmocnionych wysokowytrzymałościami taśmowymi lub powłokowymi laminatami z włókien aramidowych, szklanych i węglowych. Badaniu podlegały po trzy elementy każdego rodzaju.

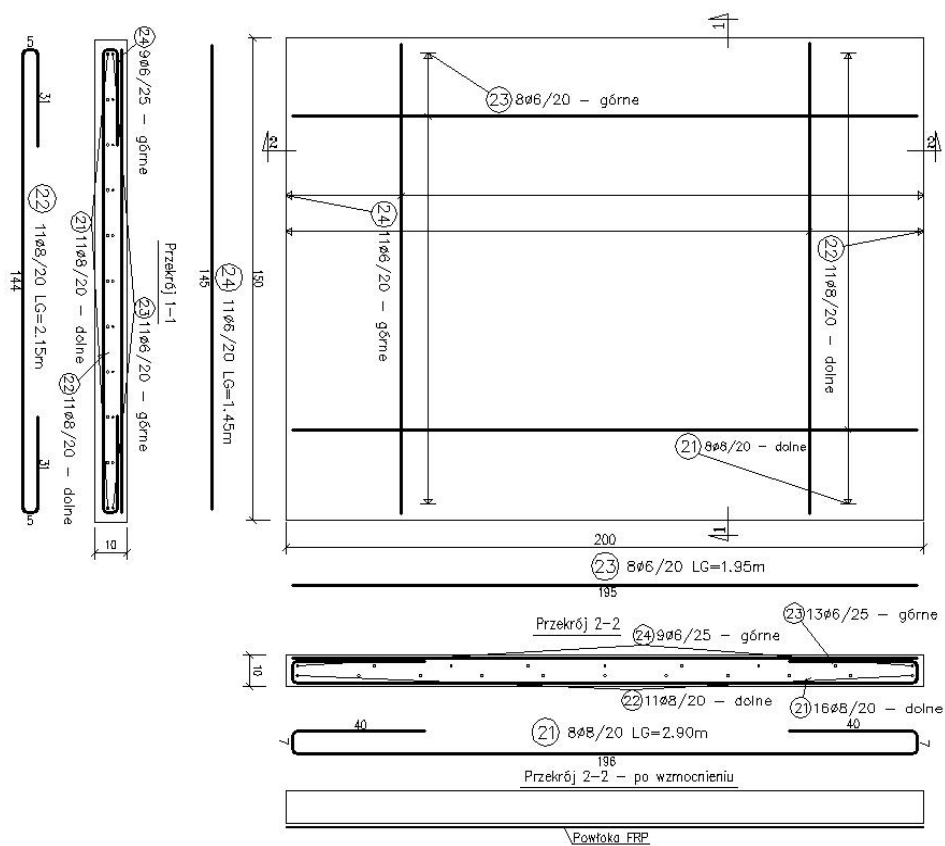
Parametry statyczno-wytrzymałościowe włókien aramidowych, szklanych i węglowych oraz żywicy epoksydowej przedstawiono w tabeli 1.



Rys. 1. Belka żelbetowa



Rys. 2. Słup żelbetowy



Rys. 3. Płyta żelbetowa

TABELA 1

Parametry statyczno-wytrzymałościowe materiałów wzmacniających

Rodzaj włókna/materiału	Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	Moduł sprężystości [GPa]	Wydłużenie [%]
Włókna szklane	3500	75	5,0
Włókna węglowe	4560	392	1,2
Włókna aramidowe	2851	98	3,0
Żywica epoksydowa (utwardzona)	85	3,5	6,5

### 3.2. Opis procesu technologicznego wzmocnienia elementów

Elementy oznaczone jako belki wzmocniono powłokami powierzchniowymi z trzech stron przekroju poprzecznego, tj. spód i powierzchnie boczne, natomiast oznaczone jako słupy wzmocniono na całym obwodzie przekroju poprzecznego. Płyty żelbetowe wzmocniono na całej dolnej powierzchni płyty lub krzyżującymi się pasmami wykonanymi z taśm o szerokości 10 cm lub 20 cm.

Wzmocnienie elementów powłokami laminatowymi przeprowadzone zostało metodą „wet-lay-up” zgodnie z następującym procesem technologicznym.

Warunkiem wykonania skutecznego wzmocnienia i wykorzystania w pełni właściwości materiałów wzmacniających jest osiągnięcie przez podłoże wytrzymałości na odrywanie wynoszącej co najmniej 2,0 MPa. Wymagane jest również zachowanie co najwyżej 4% wilgotności podłoża, a w czasie nakładania warstw wzmacniających temperatura otoczenia musi być o co najmniej 3°C wyższa od punktu rosy. Zakres temperatury, przy której twardnienie żywicy przebiega prawidłowo, a jej skurcz ma małą wartość, wynosi 15-20°C.

Przed przystąpieniem do realizacji wzmocnienia powierzchnie wzmacnianego elementu zostały starannie przygotowane. Usunięto luźne elementy podłoża, przeprowadzono naprawę ubytków przy użyciu zaprawy żywicznej na warstwie szczepnej żywicznej. Powierzchnia, na którą nakładane są elementy wzmocnienia, powinna być sucha i równa, maksymalna nierówność podłoża nie przekraczała 5 mm na odcinku 2 m.

Tak przygotowaną powierzchnię zagruntowano żywicą epoksydową z dodatkiem utwardzacza w proporcjach zalecanych przez producenta żywicy. Jednocześnie na innym stanowisku nasączono tkaninę kompozytową identyczną żywicą. Następnie, po odczekaniu około 5 minut, aby rozpoczął się proces sieciowania (twardnienia) żywicy, zaimpregnowaną tkaninę układano na powierzchni wzmacnianego elementu i dociskano przy użyciu specjalnych aluminiowych wałków. Usuwano w ten sposób nadmiar żywicy z przestrzeni między tkaniną a elementem. Wykonane wzmocnienie zabezpieczano przed wilgocią i ewentualnymi zanieczyszczeniami przez nałożenie folii ochronnej. Całkowity czas sieciowania żywicy w temperaturze 20°C wynosił 12 godzin.

## 4. Opis stanowiska badawczego do badań wybuchowych

Badania przeprowadzono na mikropoligonie doświadczalnym Wydziału Inżynierii Lądowej i Geodezji WAT, w komorze wybuchowej RKP-2000.

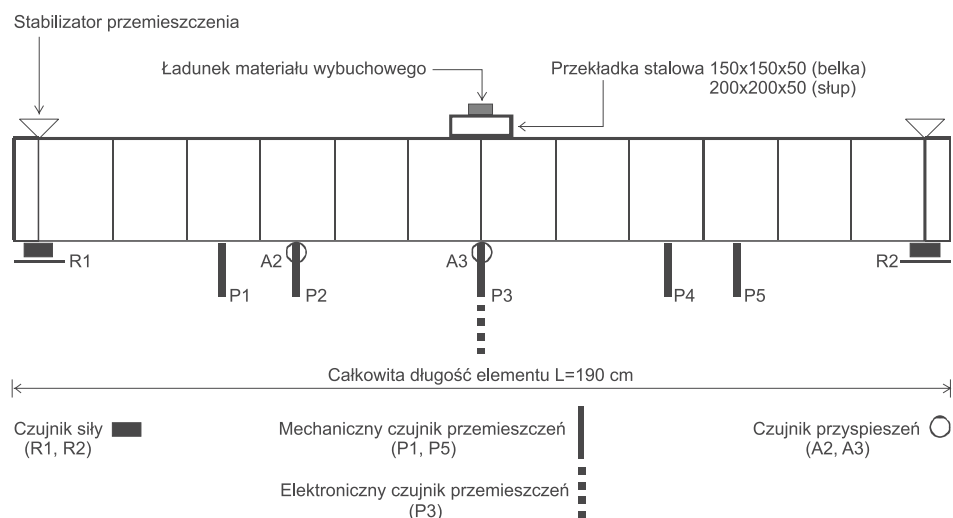
Jest to stanowisko do badania różnych elementów konstrukcyjnych, o wymiarach zbliżonych do  $1,8 \times 4,0 \times 0,5$  m lub  $1,2 \times 1,2 \times 2,0$  m.

W komorze badano również elementy wyposażenia obiektów schronowych, między innymi drzwi ochronne, urządzenia filtrowentylacyjne, zawory przeciw-wybuchowe.

W komorze można badać oddziaływanie fal uderzeniowych kulistych, cylindrycznych i płaskich generowanych skondensowanym materiałem wybuchowym, ale także mieszaniną gazów wybuchowych.

Maksymalne nadciśnienie, jakie można bezpiecznie wygenerować w komorze wybuchowej, wynosi 6,0 MPa na czole fali uderzeniowej.

W komorze umieszczono konstrukcję wsporczą do ustawienia i stabilizowania badanych belek i słupów oraz czujników pomiarowych służących do rejestracji wyników badań, zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 4. Na schemacie tym przedstawiono umiejscowienie czujników pomiarowych stanowiących składniki toru pomiarowego.



Rys. 4. Schemat stanowiska badawczego belek i słupów żelbetowych

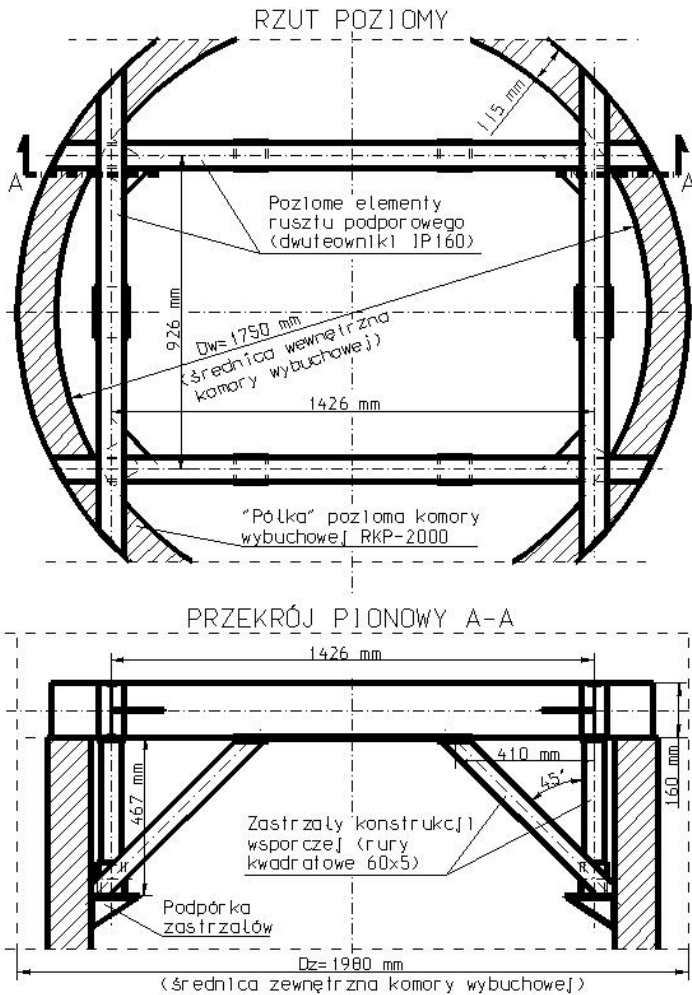
Na rysunku 5 przedstawiono konstrukcję wsporczą do ustawienia i stabilizowania płyt, a na rysunku 6 schemat stanowiska badawczego płyt żelbetowych.

Tor pomiarowy składa się z następujących elementów:

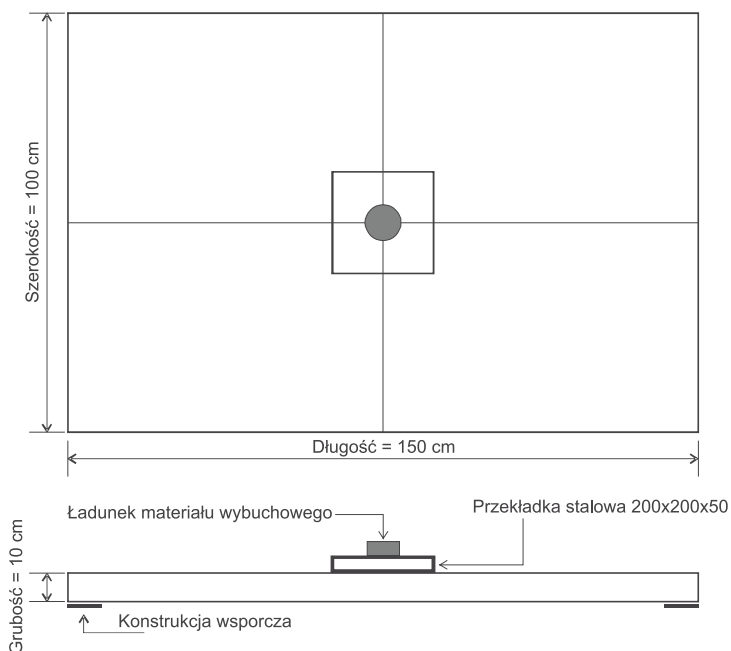
1. Pomiar przemieszczeń:
  - a) mechaniczne czujniki przemieszczeń,
  - b) transformatorowy przetwornik przemieszczeń  $PT_x-100$  o zakresie pomiarowym 50 mm,
  - c) przyrząd z falą nośną o częstotliwości 5 kHz.



2. Pomiar przyspieszeń:
  - a) akcelerometr JM353 B15, zakres pomiarowy 1000 g, zakres częstotliwości 1-8000 Hz,
  - b) zasilacz 48 A16 firmy PCB.
3. Pomiar reakcji podporowej:
  - a) czujnik siły firmy PCB model 200 C50, zakres pomiarowy 222 kN.
4. Rejestracja sygnałów:
  - a) czterokanałowy oscyloskop cyfrowy HP Infinium, częstotliwość próbkowania do 2 GS/s.



Rys. 5. Konstrukcja wsporcza płyt żelbetowych



Rys. 6. Schemat stanowiska badawczego płyt żelbetowych

## 5. Opis stanowiska badawczego w budynku doświadczalnym

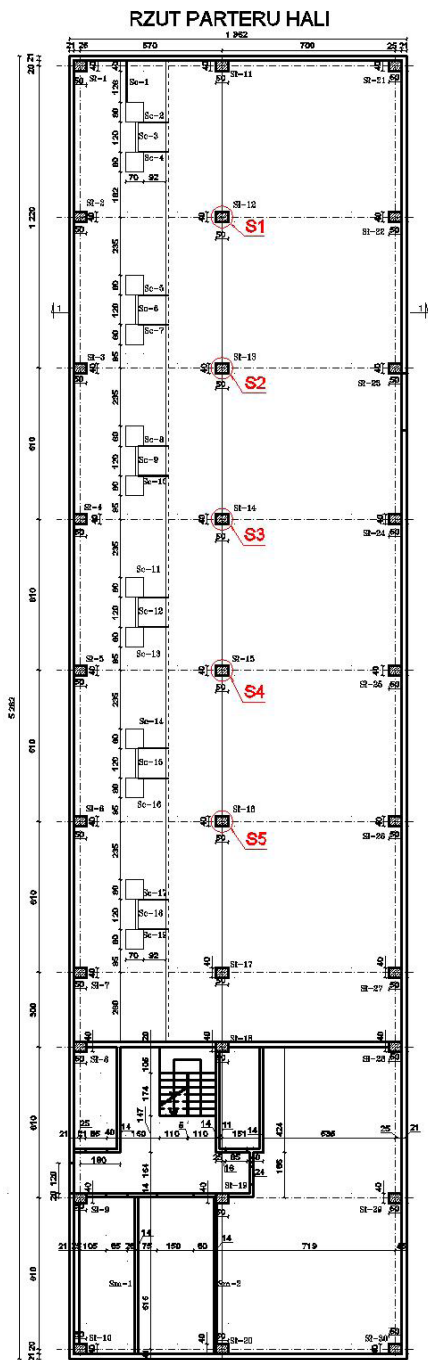
Przedmiotem badań są słupy żelbetowe w budynku halowym o konstrukcji nośnej płytowo-belkowo-słupowej. Płyty stropowe są wykonane jako układy zespolone, w których płyta betonowa współpracuje z blachą fałdową.

Obiekt budowlany przeznaczony do rozbiórki (rys. 7), na którym przeprowadzono badania, został wybrany przez zespół wykonawców pracy jako spełniający wymagania do prowadzenia eksperymentów z materiałami wybuchowymi.



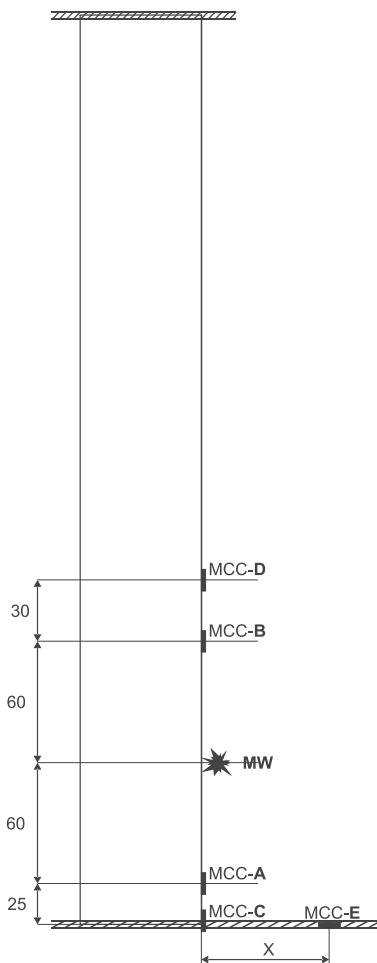
Rys. 7. Budynek wybrany do przeprowadzenia badań (Brwinów)





Rys. 9. Rzut budynku

22 × 11 × 5,5 cm. W trakcie eksperymentów prowadzono pomiar nadciśnienia na froncie padającej fali uderzeniowej za pomocą czujników MCC w punktach A, B, C, D i odbitej fali uderzeniowej za pomocą czujnika MCC w punkcie E (rys. 10 i 11). Po wybuchu mierzono trwałe przemieszczenia za pomocą mechanicznych czujników przemieszczeń MCP, na płaszczyźnie przeciwległej do powierzchni obciążonej, na poziomach odpowiadających poziomom usytuowania czujników MCC (rys. 12).



Rys. 10. Schemat słupa żelbetowego oraz usytuowanie ładunku wybuchowego (MW) i czujników ciśnienia (MCC)



Rys. 11. Usytuowanie czujników MCC rejestrujących ciśnienie



Rys. 12. Usytuowanie mierników MCP rejestrujących przemieszczenia trwałe

## 6. Charakterystyka oddziaływania ładunku materiału wybuchowego na elementy konstrukcyjne

### 6.1. Obciążenie elementów konstrukcji wybuchem ładunku niekontaktowego

W prezentowanych badaniach stosowano ładunki skondensowanego materiału wybuchowego. Analizowano dwa przypadki usytuowania ładunków względem elementu konstrukcyjnego. Pierwszy przypadek dotyczy ładunków kontaktowych, niezagłębionych w materiale konstrukcyjnym. Drugi przypadek — to ładunki niekontaktowe.

W działaniu wymienionych ładunków wyróżnia się następujące charakterystyczne strefy:

- detonacji,
- strumienia gazów powybuchowych,
- powietrznej fali uderzeniowej.

Strefa detonacji obejmuje objętość danego ładunku, w której występują największe nadciśnienia. Strumień gazów powybuchowych oddziałuje do granicy, przy której jego gęstość zbliża się do gęstości otaczającego ośrodka. Wartości maksymalnych nadciśnień zależą od ukształtowania ładunku i zmniejszają się w miarę oddalania się od jego środka.

Przy oddziaływaniu na element konstrukcyjny ważny jest także kąt uderzenia strumienia. Powietrzna fala uderzeniowa rozprzestrzenia się do granicy, na której zrównuje się prędkość frontu fali z prędkością dźwięku w powietrzu.

Nadciśnienia w wymienionych strefach mają charakter uderzeniowy. W strefie drugiej i trzeciej ich intensywność znacznie zmniejsza się wraz z odległością. Do podstawowych parametrów opisujących stan ośrodka podlegającego omawianym

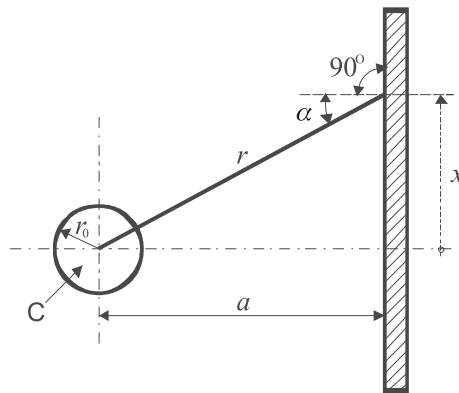
oddziaływaniom należą: prędkość fali detonacyjnej lub uderzeniowej, prędkość masowa cząstek ośrodka, gęstość, nadciśnienie i temperatura. Wzajemne relacje wymienionych parametrów regulują zasady zachowania masy, pędu i energii oraz odpowiednie prawa fizyczne [64].

Z uwagi na stosunkowo krótki czas trwania wybuchu w strefie pierwszej i drugiej, oddziaływania wybuchowe można traktować jako impulsowe względem elementów konstrukcyjnych budowli. Oddziaływanie kontaktowego ładunku charakteryzuje się małym zasięgiem i bardzo dużym nadciśnieniem odpowiednim dla strefy pierwszej i drugiej. Oddziaływanie niekontaktowe obejmuje cały element konstrukcyjny o intensywnościach odpowiednich dla strefy drugiej i trzeciej.

Wybuch niekontaktowych ładunków materiału wybuchowego charakteryzuje się działaniem na całą powierzchnię elementu konstrukcyjnego (działanie ogólne) w odróżnieniu od działania ładunków przylegających do konstrukcji (działanie miejscowe). Najniekorzystniejsze dla konstrukcji przypadki działania ogólnego występują, gdy ładunek znajduje się w odległości do  $15r_0$ . Symbol  $r_0$  oznacza promień ładunku sprowadzonego do kształtu kulistego. Konstrukcja zostaje wówczas obciążona strumieniem gazów powybuchowych (rys. 13), których nadciśnienie zmienia się w funkcji czasu  $t$  według zależności:

$$\Delta p(t) = \Delta p_m \left(1 - \frac{t}{\tau}\right)^{\nu-1}, \quad (1)$$

gdzie:  $\Delta p_m$  — maksymalna wartość nadciśnienia w danym punkcie przegrody;  
 $\tau$  — czas trwania nadciśnienia;  
 $\nu$  — wskaźnik symetrii wybuchu (kulista symetria wybuchu  $\nu = 3$ ).



Rys. 13. Schemat działania gazów powybuchowych na konstrukcję

Maksymalna wartość nadciśnienia może być określona z zależności:

$$\Delta p_m = p_0 \left(\frac{r_0}{r}\right)^{\nu-1} \cos^2 \alpha, \quad (2)$$

gdzie:  $p_0$  — ciśnienie początkowe gazów powybuchowych;

$r_0$  — promień ładunku;

$r$  — odległość od środka ładunku do danego punktu na przegrodzie;

$\alpha$  — kąt między normalną do przegrody a kierunkiem strumienia gazów.

Reakcja dynamiczna elementu konstrukcyjnego zależy nie tylko od wartości maksymalnego nadciśnienia, lecz także od jego zmienności w czasie.

W określonych warunkach oddziaływanie nadciśnienia gazów powybuchowych może być traktowane jako quasi-impulsowe. Wówczas można posługiwać się całkową charakterystyką obciążenia zwaną impulsem. Odpowiedni dla rozważanej sytuacji jest impuls jednostkowy, który można wyrazić w postaci:

$$i = \int_0^{\tau} \Delta p(t) \cdot dt. \quad (3)$$

Dla schematu przedstawionego na rysunku 13 wartość impulsu, po scałkowaniu i przekształceniach, można określić ze związku:

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

w którym  $A_0$  jest wielkością charakteryzującą dany materiał wybuchowy (przykładowo dla trotylu  $A_0 \cong 400$  m/s), a  $C$  jest masą ładunku.

## 6.2. Obciążenie elementów konstrukcji wybuchem ładunku kontaktowego

W tym przypadku sposób oddziaływania wybuchu może być dla celów praktycznych przedstawiony jak na rysunku 14.

Powyższy schemat przedstawia działanie ładunku o kształcie walca o średnicy  $B$  i wysokości  $H$ . Przyjmuje się, że na element konstrukcji działają gazy powybuchowe o ciśnieniu  $p_0$ . Wysokość bryły rozkładu impulsów jednostkowych wynosi:

$$i = H \rho_0 u_0, \quad (5)$$

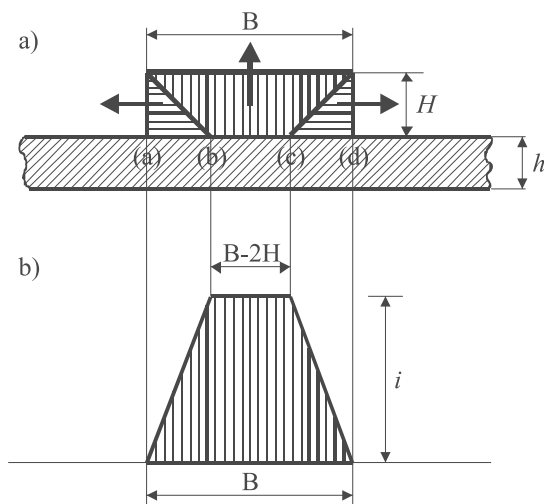
gdzie:  $\rho_0$  — gęstość materiału wybuchowego,  $u_0$  — prędkość początkowa rozlotu gazów powybuchowych.

Impuls całkowity gazów powybuchowych wynosi:

$$J = \int_F i dF, \quad (6)$$

gdzie:  $F$  — powierzchnia elementu konstrukcji, na którą działają gazy powybuchowe.





Rys. 14. Schemat oddziaływania ładunku kontaktowego na przegrodę: a) schemat rozmieszczenia ładunku; b) wykres impulsów jednostkowych

Po scałkowaniu i przekształceniach otrzymuje się prostą zależność:

$$J = u_0 C \mu, \quad (7)$$

gdzie:  $\mu = \mu(H/B)$  jest współczynnikiem kształtu ładunku.

### 6.3. Szacowanie wielkości ładunku wybuchowego

Poniżej przedstawiamy zasady, jakimi posługiwano się w celu oszacowania wielkości ładunku materiału wybuchowego dla określonego eksperymentu.

W przypadku belek lub słupów schemat obciążenia impulsem gazów powybuchowych przedstawiono na rysunku 15.

W celu oszacowania wielkości ładunku wybuchowego przyjęto następujące założenia:

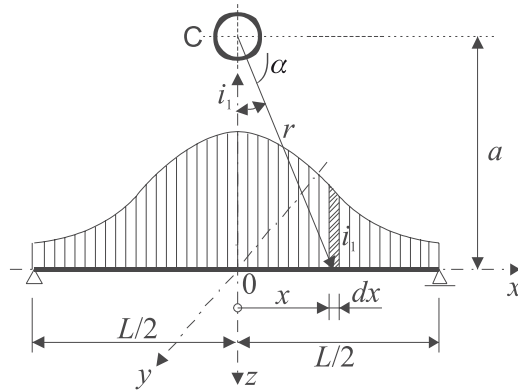
1. odległość ładunku do belki znajduje się w strefie działania gazów powybuchowych,
2. obciążenie ma dużą intensywność i charakter quasi-impulsowy,
3. materiał konstrukcyjny jest sprężysto-kruchy na rozciąganie,
4. związek fizyczny materiału belki naprężenie-odkształcenie jest liniowy.

Rozkład intensywności impulsu wzdłuż osi belki  $i(x)$  ustala się według wzoru:

$$i_1 = k_f b i(x), \quad (8)$$

gdzie:  $k_f$  — współczynnik opływu belki zależny od kształtu przekroju poprzecznego;  
 $b$  — szerokość belki;

$i(x)$  — intensywność impulsu gazów powybuchowych określona według zależności (4);  
współrzędna  $x$  jest jednoznacznie określona przez kąt  $\alpha$ .



Rys. 15. Schemat obciążenia belki wybuchem ładunku niekontaktowego usytuowanego w osi symetrii belki

Moment zginający  $M(x)$  w środkowych przekrojach przęsłowych można oszacować z zależności:

$$M = i_1 \sqrt{\frac{B_y}{m_1}}, \quad (9)$$

gdzie:  $B_y = EJ_y$  — sztywność przekroju żelbetowego na zginanie;  
 $E$  — moduł sprężystości materiału belki;  
 $J_y$  — moment bezwładności przekroju poprzecznego belki względem osi  $y$ ;  
 $m_1$  — masa jednostkowa belki.

W przypadku płyt, obciążenie wybuchem może być określone na podstawie ogólnych zależności (1)-(4).

W przypadku ładunku kontaktowego do szacowania momentu zginającego można zastosować wzór (9), przy czym stałą intensywność  $i_1(x) = i_1 = \text{const.}$  określa się wówczas według zależności:

$$i_1 = 1,13 J/B, \quad (10)$$

gdzie:  $J$  — impuls całkowity według zależności wzoru (7);  
 $B$  — średnica ładunku walcowego według rysunku 14.

W omawianym przypadku stosowania ładunku kontaktowego dodatkowo analizuje się możliwość powstania odłamu w materiale elementu konstrukcyjnego po przeciwległej stronie przyłożenia ładunku [65].

## 7. Wyniki badań betonu w elementach modelowych

### 7.1. Badanie wytrzymałości betonu na ściskanie

#### 7.1.1. Próbki do badań

Badano próbki sześciennie o krawędzi 15 cm, wykonane w formach. Próbki wykonano z betonu zwykłego na żwirze o średnicy ziaren do 32 mm. Wiek betonu w momencie badania wynosił od około 2 do 4 miesięcy.

#### 7.1.2. Metoda badania

Badanie wykonano według PN-EN 12390-3: 2002. Badano beton w stanie powietrzno-suchym. Badania wykonano na maszynie wytrzymałościowej do prób statycznych, typ WK-2, nr fabryczny 308, na zakresie do 1500 kN.

#### 7.1.3. Wyniki badań

Badania wykonano w dniach od 3.12 do 7.12.2007 r. Wszystkie próbki zniszczyły się prawidłowo, a zniszczenie przebiegało przez spoiwo i kruszywo. W tabeli 2 przedstawiono wyniki badań wytrzymałości na ściskanie.

TABELA 2

Wyniki badań wytrzymałości betonu na ściskanie

Nr serii próbek	Wytrzymałość próbek na ściskanie [MPa]			Średnia wytrzymałość na ściskanie [MPa]
14.08.2007	44,3;	46,6;	44,0	45,0
16.08.2007	37,0;	36,0;	42,4	38,4
17.08.2007	29,0;	32,2;	28,9	30,0
18.08.2007	28,3;	28,6;	28,4	28,4
4.09.2007	37,0;	33,5;	32,0	34,1
5.09.2007	32,1;	33,8;	38,7	34,8
6.09.2007	28,3;	29,0;	29,0	28,7
14.09.2007	40,3;	43,0		41,6
26.09.2007	36,5;	36,2;	32,1	34,9
27.09.2007	30,5;	29,5;	28,8	28,6
28.09.2007	34,9;	28,8;	32,7	32,1
1.10.2007	32,2;	28,5;	28,4	29,7
2.10.2007	32,6;	30,8;	34,9	32,7

Średnia wytrzymałość wszystkich zbadanych próbek wynosiła  $f_{cm} = 33,7$  MPa, a odchylenie standardowe wytrzymałości 5,26 MPa.

Współczynnik zmienności wytrzymałości betonu wynosi 15,6% (jednorodność betonu średnia).

#### 7.1.4. Określenie klasy betonu

Klasa wytrzymałościowa betonu według PN-EN 206-1:2003, określona wg kryteriów dla produkcji ciągłej ( $n = 38$ ) wynosi C20/25.

Klasa betonu określona według kryteriów poprzedniej normy PN-88/B-06250 wynosi B25.

## 7.2. Wyniki badań modułu sprężystości betonu

### 7.2.1. Próbkki do badań

Badano próbki walcowe o średnicy 150 mm i wysokości 300 mm, wykonane z betonu zwykłego na żwirze o uziarnieniu do 32 mm. Wiek betonu w momencie badania wynosił około trzech miesięcy.

### 7.2.2. Metoda badania

Pomiaru odkształceń względnych wzdłużnych próbki dokonywano przy pomocy tensometrów elektrooporowych naklejonych w środku wysokości próbki, wzdłuż próbki, na przeciwległych pobocznicach walca. Zastosowano tensometry o bazie pomiarowej 70 mm i stałej czułości tensometru  $k = 2,23$ . Odkształcenia wzdłużne próbki mierzono przy naprężeniu początkowym  $\sigma_1 = 0,5$  MPa i końcowym  $\sigma_2 \cong \frac{1}{3} f_{cm} = 10$  MPa.

Próbki obciążono w maszynie wytrzymałościowej typ WK-2, nr fabryczny 308, na zakresie do 1500 kN. Dla każdej próbki wykonano co najmniej 15 cykli obciążania i odciążania w sposób zgodny z Instrukcją Instytutu Techniki Budowlanej nr 194 „Badania cech mechanicznych betonu na próbkach wykonanych w formach”. Badania wykonano na dwóch próbkach.

### 7.2.3. Wyniki badań

Średnie odkształcenie względne wzdłużne próbki nr 1 wynosiło  $\varepsilon_{c1} = 0,297 \times 10^{-3}$ , a próbki nr 2  $\varepsilon_{c2} = 0,305 \times 10^{-3}$ .

Moduł sprężystości próbki nr 1 wynosił  $E_{c1} = 32\ 000$  MPa, a próbki 2 wynosił  $E_{c2} = 31\ 100$  MPa. Średni moduł sprężystości betonu w zakresie naprężeń  $\sigma_1 = 0,5$ -10 MPa wynosił  $E_{cm} = 31\ 600$  MPa.

## 8. Wyniki badań wytrzymałości betonu na ściskanie w słupach żelbetonowych budynku doświadczalnego

### 8.1. Przedmiot badań

Do badań wykorzystano rdzenie o średnicy 92 mm, wywiercone ze słupów budynku przy pomocy wiertnicy do betonu, bezudarowo, na mokro (rys. 16-18).



Rys. 16. Wykonywanie odwiertów w słupach



Rys. 17. Otwór w słupie po wykonanym odwiercie



Rys. 18. Próbkki uzyskane z odwiertów

Wiek betonu w konstrukcji wynosił około 20 lat. Beton w poszczególnych rdzeniach różnił się uziarnieniem kruszywa. Rdzenie te charakteryzowały się następującą strukturą.

1. Rdzeń nr 1 wykonano z betonu na kruszywie łamanym wapiennym, o uziarnieniu do 32 mm. Beton miał strukturę porfirową (bez frakcji pośrednich

- kruszywa). W rdzeniu występowały pręty zbrojeniowe o średnicy 6 mm, ze stali okrągłej gładkiej, biegnące równoległe do płaszczyzn roboczych oraz pod kątem 45°.
2. Rdzeń nr 2 wykonano na kruszywie łamanym wapiennym (barwy biało-żółtej), o uziarnieniu do 16 mm (bez frakcji pośrednich kruszywa).
  3. Rdzeń nr 3 wykonano na mieszance kruszywa łamanego wapiennego i grysu granitowego barwy szarej, o prawidłowym uziarnieniu. W rdzeniu występowały pręty zbrojeniowe o średnicy 6 mm ze stali okrągłej gładkiej, biegnące równoległe do płaszczyzn roboczych oraz pod kątem 45°.
  4. Rdzeń nr 4 wykonano na kruszywie łamanym wapiennym do 16 mm, prawidłowo uziarnionym. W rdzeniu występowały gniazda rakowatego betonu, o wyraźnie rozrzedzonej, niezagęszczonej strukturze.
  5. Rdzeń nr 5 wykonano z betonu na żwirze do 16 mm, z dodatkiem kruszywa wapiennego łamanego frakcji 16/32.
  6. Rdzeń nr 6 wykonano z betonu na kruszywie łamanym wapiennym, o uziarnieniu do 32 mm, o strukturze porfirowej (przy niewielkiej ilości frakcji pośrednich 2/16 mm).
  7. Rdzeń nr 7 wykonano z betonu na kruszywie łamanym wapiennym do 32 mm, prawidłowo uziarnionym. W rdzeniu występowały pręty zbrojeniowe o średnicy 6 mm, ze stali okrągłej gładkiej, biegnące równoległe do płaszczyzn roboczych oraz pod kątem 45°.
  8. Rdzeń nr 8 wykonano z betonu na kruszywie łamanym wapiennym do 16 mm, prawidłowo uziarnionym.

## 8.2. Metoda badania

Z rdzeni wycięto na stacjonarnej pile do kamienia próbki do badań wytrzymałości na ściskanie o wysokości równej średnicy i równej 92 mm. Powierzchnie robocze próbek przeszlifowano. Beton badano w stanie powietrzno-suchym.

Z rdzenia nr 1 uzyskano próbki nr 1A i 1B, z rdzenia nr 2 próbki 2A i 2B, z rdzenia nr 3 próbki 3A i 3B, z rdzenia nr 4 próbki 4A i 4B, z rdzenia nr 5 próbki 5A i 5B, z rdzenia nr 6 próbkę 6, z rdzenia nr 7 próbki 7A i 7B i z rdzenia nr 8 próbki 8A i 8B. Próbki 4A i 4B zawierały gniazda rakowatego betonu. W próbkach 1A, 1B, 3A, 3B i 8B występował 1 pręt  $\varnothing 6$  mm, prostopadły do osi próbki lub biegnący skosem pod kątem 45°.

Wytrzymałość betonu na ściskanie zbadano według PN-EN 12504-1: 2001, na maszynie wytrzymałościowej do prób statycznych, typ WK-2, nr fabryczny 308, na zakresie do 1500 kN. Maszyna posiada świadectwo wzorcowania nr W1/1303-3/04, wydane przez Okręgowy Urząd Miar nr 1 w Warszawie.

Gęstość pozorną betonu wyznaczano na podstawie wymiarów i masy próbki.

### 8.3. Wyniki badań

Wszystkie próbki niszczyły się prawidłowo według schematu dwóch stożków złączonych wierzchołkami. Zniszczenie przebiegało przez kruszywo i zaprawę.

Wyniki badania wytrzymałości na ściskanie i gęstości pozornej betonu przedstawiono w tabeli 3.

TABELA 3

Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie gęstości pozornej betonu

Nr próbki	Wytrzymałość próbek na ściskanie [MPa]	Gęstość pozorna [kg/m <sup>3</sup> ]
1A	31,5	2320
1B	30,5	2300
2A	28,5	2300
2B	27,5	2280
3A	34,0	2330
3B	35,5	2330
4A	10,5	2100
4B	12,0	2200
5A	40,0	2360
5B	38,0	2360
6	36,0	2340
7A	42,0	2350
7B	42,5	2350
8A	36,0	2330
8B	36,5	2330

### 8.4. Ocena wytrzymałości na ściskanie betonu w konstrukcji

Ocenę przeprowadzono według zasad PN-EN 13791: 2007. W oszacowaniu klasy wytrzymałościowej betonu w konstrukcji nie wzięto pod uwagę wyników badania próbek nr 4A i 4B o nieprawidłowej, porowatej strukturze.

W celu przeliczenia wytrzymałości betonu oznaczonej na próbkach wyciętych z rdzeni na wytrzymałość normowej próbki sześcienniej o krawędzi 15 cm zastosowano następujące współczynniki:

- współczynnik 0,86 ze względu na wymiary próbek (wg [66], str. 641);
- współczynnik  $\frac{1}{0,85}$  ze względu na proces wywiercania rdzeni (zgodnie z PN-EN 13791: 2007).

Wytrzymałości betonu w konstrukcji przeliczone na wytrzymałość próbek normowych sześciennych o krawędzi 15 cm przedstawiono w tabeli 4.

TABELA 4  
Wyniki przeliczonej wytrzymałości betonu na ściskanie

Nr próbki	Wytrzymałość próbek na ściskanie [MPa]
1A	31,8
1B	30,8
2A	28,8
2B	27,7
3A	34,3
3B	35,8
4A	x
4B	x
5A	40,4
5B	38,4
6	36,3
7A	42,4
7B	42,9
8A	36,3
8B	36,8

Aktualna wytrzymałość na ściskanie betonu w konstrukcji odpowiada klasie wytrzymałościowej C 20/25 przy oszacowaniu wytrzymałości wg PN-EN 13791: 2007 lub klasie B25 wg archiwalnej normy PN-88/B-06250. Jednorodność betonu jest średnia, współczynnik zmienności wytrzymałości 13,6%.

## 9. Wyniki badań prętów zbrojeniowych ze stali B500SP

### 9.1. Próbki do badań

Badano pręty zbrojeniowe ze stali B500SP według PN-H-93220:2006 o nachyleniu żeber poprzecznych jednej serii 75° i drugiej 45°. Badano pręty o średnicy nominalnej 8 mm, 10 mm i 12 mm.

Według PN-H-93220 właściwości mechaniczne stali B500SP powinny być następujące:

- górna granica plastyczności co najmniej 500 MPa i nie więcej niż 625 MPa;



- stosunek  $R_m/R_e$  ( $f_t/f_y$ ) co najmniej 1,15 i nie więcej niż 1,35;
- wydłużenie przy zerwaniu  $A_5$  co najmniej 16%;
- wydłużenie przy maksymalnej sile co najmniej 8%.

## 9.2. Metoda badania

Granice plastyczności, wytrzymałość na zerwanie i wydłużenie  $A_5$  przy zerwaniu określono w próbie rozciągania wykonanej według PN-EN 10002-1: 2004, w temperaturze otoczenia  $+20^\circ\text{C}$ . Badania wykonano na próbkach prętów nieobrobionych mechanicznie, pięciokrotnych, o długości części pomiarowej  $L_0 = 5,65\sqrt{S_0}$ , gdzie  $S_0$  jest polem nominalnej powierzchni przekroju prętów.

Badania wykonano na maszynie wytrzymałościowej do prób statycznych typ ZD-40, nr fabryczny 282/3, na zakresie do 200 kN. Maszyna posiada Świadectwo wzorcowania nr W1/1303-1/04, wydane przez Okręgowy Urząd Miar nr 1 w Warszawie. Szybkość przyrostu naprężeń wynosiła 9 MPa/s.

Do obliczenia właściwości wytrzymałościowych stosowano nominalne powierzchnie przekroju według tabeli 6 normy PN-H-93220, to jest:

- dla średnicy 8 mm  $S_0 = 50,3 \text{ mm}^2$ ;
- dla średnicy 10 mm  $S_0 = 78,5 \text{ mm}^2$ ;
- dla średnicy 12 mm  $S_0 = 113,0 \text{ mm}^2$ .

## 9.3. Wyniki badań

W tabeli 5 przedstawiono wyniki badań stali na rozciąganie.

TABELA 5

Wyniki badań stali B500SP na rozciąganie

Nr próbki	Górna granica plastyczności $f_y$ [MPa]	Wytrzymałość na zerwanie $f_t$ [MPa]	Wydłużenie przy zerwaniu $A_5$ [%]	Naprężenie przy zerwaniu [MPa]	$\frac{f_t}{f_y}$
Średnica nominalna 8 mm					
1	566	656	27,5	477	1,16
2	546	646	22,5	477	1,18
3	554	660	25,0	516	1,19
4	548	636	25,0	536	1,16
5	574	660	25,0	516	1,15
6	570	662	22,5	536	1,16
7	548	636	27,5	516	1,16

cd. tabeli 5

Średnica nominalna 10 mm					
8	531	611	26,0	509	1,15
9	549	634	26,0	535	1,16
10	541	650	27,0	520	1,20
11	561	656	26,0	522	1,17
12	549	637	27,5	512	1,16
13	554	637	27,5	522	1,15
14	557	648	27,5	522	1,16
15	564	654	25,0	540	1,16
16	541	650	27,5	530	1,20
17	556	650	27,5	520	1,17
Średnica nominalna 12 mm					
18	548	664	26,0	531	1,21
19	558	664	28,0	531	1,19

Dodatkowo zbadano właściwości mechaniczne dwóch próbek o średnicy nominalnej 10 mm i jednej o średnicy 12 mm przy szybkości obciążania 90 MPa/s, uzyskując wyniki podane w tabeli 6.

TABELA 6

Wyniki badań stali B500SP na rozciąganie przy prędkości obciążenia 90 MPa/s

Nr próbki	Górna granica plastyczności $f_y$ [MPa]	Wytrzymałość na zerwanie $f_t$ [MPa]	Wydłużenie przy zerwaniu $A_5$ [%]	Napężenie przy zerwaniu [MPa]	$\frac{f_t}{f_y}$
Średnica nominalna 10 mm					
A	557	648	27,5	522	1,16
B	556	650	27,5	520	1,17
Średnica nominalna 12 mm					
C	558	664	28,0	531	1,19

Zmiana szybkości obciążania w granicach od 9 MPa/s do 90 MPa/s nie wpłynęła na zmianę właściwości mechanicznych stali B500SP.

Średnia wartość granicy plastyczności stali B500SP wynosiła  $f_y = 553$  MPa, średnia wytrzymałość na zerwanie  $f_t = 648$  MPa, a średnie wydłużenie przy zerwaniu  $A_5 = 26\%$ . Badane pręty zbrojeniowe ze stali B500SP o średnicach 8, 10 i 12 mm miały właściwości mechaniczne zgodne z wymaganiami normy PN-H-93220.

## 10. Wyniki badań prętów zbrojonych ze stali St3S-b-500

### 10.1. Próbkki do badań

Badano pręty zbrojone ze stali St3S-b-500 według Aprobaty Technicznej AT-15-2498/2007 (z trzema żeberkami wzdłużnymi), o średnicy nominalnej 6 mm.

Według AT-15-2498/2007 właściwości mechaniczne stali St3S-b-500 powinny być następujące:

- klasa AIII-N;
- granica plastyczności co najmniej 500 MPa;
- wytrzymałość na zerwanie co najmniej 550 MPa;
- $R_m/R_e$ , ( $f_t/f_y$ ) dla prętów o średnicy od 6 do 12 mm co najmniej 1,05;
- wydłużenie przy zerwaniu  $A_5$  co najmniej 2,5%.

### 10.2. Metoda badania

Granice plastyczności, wytrzymałość na zerwanie i wydłużenie  $A_5$  przy zerwaniu określono w próbie rozciągania wykonanej według PN-EN 10002-1:2004, w temperaturze otoczenia +20°C. Badania wykonano na próbkach prętów nieobrobionych mechanicznie, pięciokrotnych.

Badania wykonano na maszynie wytrzymałościowej do prób statycznych typ ZD-40, nr fabryczny 282/3, na zakresie do 40 kN. Maszyna posiada Świadectwo wzorcowania nr W1/1303-1/04, wydane przez Okręgowy Urząd Miar nr 1 w Warszawie. Szybkość przyrostu naprężeń wynosiła 9 MPa/s.

### 10.3. Wyniki badań

W tabeli 7 przedstawiono wyniki badań stali na rozciąganie.

TABELA 7

Wyniki badań stali St3S-b-500 na rozciąganie

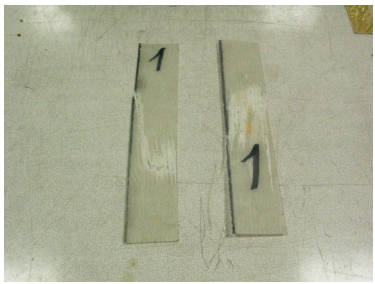
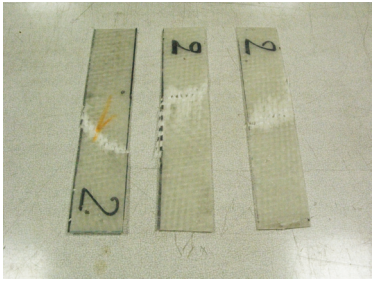
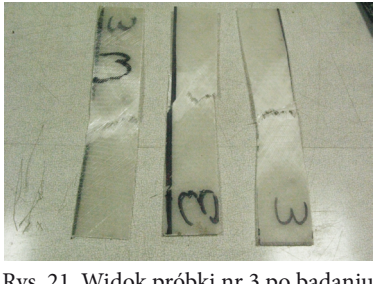
Nr próbki	Górna granica plastyczności $f_y$ [MPa]	Wytrzymałość na zerwanie $f_t$ [MPa]	Wydłużenie przy zerwaniu $A_5$ [%]	Naprężenie przy zerwaniu [MPa]	$\frac{f_t}{f_y}$
20	629	667	16,0	407	1,06
21	600	637	13,5	463	1,06
22	629	667	16,0	420	1,06
23	621	659	16,0	420	1,05
24	613	644	16,0	420	1,05
25	620	659	13,5	426	1,06
26	620	652	13,5	440	1,06


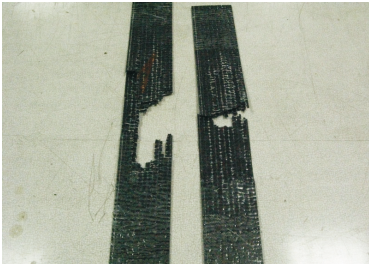


Średnia granica plastyczności stali St-3S-b-500 wynosiła  $f_y = 619$  MPa, średnia wytrzymałość na zerwanie  $f_t = 655$  MPa, a średnie wydłużenie przy zerwaniu  $A_5 = 15\%$ . Właściwości mechaniczne stali St3S-b-500 były zgodne z wymaganiami AT-15-2498/2007.

## 11. Wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie laminatów żywicznych

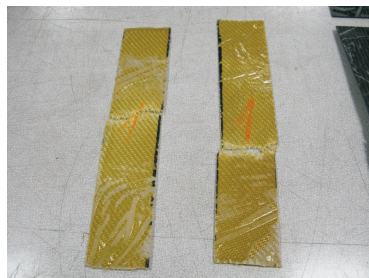
### 11.1. Próbkki do badań

Badano następujące wersje materiałowe laminatów.

<p>a) Próbkki nr 1: laminat szklano-epoksydowy; układ włókien jednokierunkowy (<math>0^\circ</math>); gramatura tkaniny szklanej <math>600 \text{ g/m}^2</math>; dwie warstwy tkaniny po <math>600 \text{ g/m}^2</math>; metoda układania: na mokro (wet-lay-up); gramatura laminatu <math>2530 \text{ g/m}^2</math>; orientacyjny udział wagowy włókien <math>47,4\% \text{ m/m}</math>; orientacyjny udział objętościowy <math>29,8\%</math>; grubość laminatu <math>1,7 \text{ mm}</math>; wytrzymałość na zerwanie włókien szklanych <math>3500 \text{ MPa}</math>.</p>	 <p>Rys. 19. Widok próbki nr 1 po badaniu</p>
<p>b) Próbkki nr 2: laminat szklano-epoksydowy; układ włókien dwukierunkowy (<math>0/90^\circ</math>); gramatura tkaniny szklanej <math>800 \text{ g/m}^2</math>; dwie warstwy tkaniny po <math>800 \text{ g/m}^2</math>; metoda układania: na mokro (wet-lay-up); gramatura laminatu <math>3360 \text{ g/m}^2</math>; orientacyjny udział wagowy włókien <math>47,6\% \text{ m/m}</math>; orientacyjny udział objętościowy <math>30\%</math>; grubość laminatu <math>2,2 \text{ mm}</math>.</p>	 <p>Rys. 20. Widok próbki nr 2 po badaniu</p>
<p>c) Próbkki nr 3: laminat szklano-epoksydowy; układ włókien <math>\pm 45^\circ</math>; gramatura tkaniny szklanej <math>300 \text{ g/m}^2</math>; cztery warstwy tkaniny po <math>300 \text{ g/m}^2</math>; metoda układania: na mokro; gramatura laminatu <math>2930 \text{ g/m}^2</math>; orientacyjny udział wagowy włókien <math>41\% \text{ m/m}</math>; orientacyjny udział objętościowy <math>24,6\%</math>; grubość laminatu <math>2 \text{ mm}</math>.</p>	 <p>Rys. 21. Widok próbki nr 3 po badaniu</p>

<p>d) Próbkę nr 4a:  laminat węglowo-epoksydowy;  układ włókien węglowych jednokierunkowy (<math>0^\circ</math>);  gramatura tkaniny z włókien węglowych <math>300 \text{ g/m}^2</math>;  cztery warstwy tkaniny po <math>300 \text{ g/m}^2</math>;  metoda układania: na mokro;  gramatura laminatu <math>3660 \text{ g/m}^2</math>;  orientacyjny udział wagowy włókien <math>32,8\% \text{ m/m}</math>;  orientacyjny udział objętościowy <math>25,1\%</math>;  grubość laminatu <math>2 \text{ mm}</math>.  wytrzymałość na zerwanie włókien węglowych <math>4560 \text{ MPa}</math>;  wydłużenie włókien przy zerwaniu <math>1,2\%</math>.</p>	 <p>Rys. 22. Widok próbki nr 4A po badaniu</p>
<p>e) Próbkę nr 4b:  laminat węglowo-epoksydowy;  układ włókien jednokierunkowy (<math>0^\circ</math>);  gramatura tkaniny węglowej <math>300 \text{ g/m}^2</math>;  cztery warstwy tkaniny po <math>300 \text{ g/m}^2</math>;  metoda układania: nośnik wstępnie nasycony żywicą (pre-preg);  gramatura laminatu <math>3173 \text{ g/m}^2</math>;  orientacyjny udział wagowy włókien <math>37,8\% \text{ m/m}</math>;  orientacyjny udział objętościowy <math>29,4\%</math>;  grubość laminatu <math>2,7 \text{ mm}</math>.</p>	 <p>Rys. 23. Widok próbki nr 4B po badaniu</p>
<p>f) Próbkę nr 5:  laminat węglowo-epoksydowy;  układ włókien dwukierunkowy (<math>0/90^\circ</math>);  gramatura tkaniny węglowej <math>980 \text{ g/m}^2</math>;  dwie warstwy tkaniny po <math>980 \text{ g/m}^2</math>;  metoda układania: na mokro (wet-lay-up);  gramatura laminatu <math>6580 \text{ g/m}^2</math>;  orientacyjny udział wagowy włókien <math>29,8\% \text{ m/m}</math>;  orientacyjny udział objętościowy <math>22,6\%</math>;  grubość laminatu <math>5,8 \text{ mm}</math>.</p>	 <p>Rys. 24. Widok próbki nr 5 po badaniu</p>
<p>g) Próbkę nr 6:  laminat węglowo-epoksydowy;  układ włókien <math>\pm 45^\circ</math>;  gramatura tkaniny węglowej <math>900 \text{ g/m}^2</math>;  dwie warstwy tkaniny po <math>900 \text{ g/m}^2</math>;  metoda układania: na mokro;  gramatura laminatu <math>2540 \text{ g/m}^2</math>;  orientacyjny udział wagowy włókien <math>70,9\% \text{ m/m}</math>;  orientacyjny udział objętościowy <math>62,6\%</math>;  grubość laminatu <math>2 \text{ mm}</math>.</p>	 <p>Rys. 25. Widok próbki nr 6 po badaniu</p>

h) Próbki nr 7:  
 laminat aramidowo-epoksydowy;  
 układ włókien: splot skośny twill 2/2;  
 gramatura tkaniny aramidowej 470 g/m<sup>2</sup>;  
 jedna warstwa tkaniny;  
 metoda układania: na mokro;  
 gramatura laminatu 1220 g/m<sup>2</sup>;  
 orientacyjny udział wagowy włókien 38,5% m/m;  
 orientacyjny udział objętościowy 34,1%;  
 grubość laminatu 1 mm;  
 wytrzymałość włókien aramidowych na zerwanie  
 2851 MPa;  
 wydłużenie przy zerwaniu 3%.



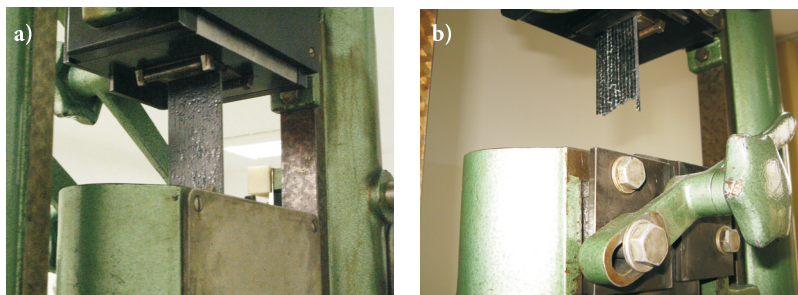
Rys. 26. Widok próbki nr 7 po badaniu

Wszystkie laminaty wykonano, stosując jako spoiwo żywicę epoksydową LG 385 z utwardzaczem HG 386 w stosunku wagowym (100:40). Wytrzymałość na zerwanie żywicy wynosi 75-85 MPa, a wydłużenie przy zerwaniu 5-6,5%.

## 11.2. Metoda badania

Wytrzymałość na zerwanie laminatów badano w próbie rozciągania pasków laminatu o szerokości 50 mm. Długość części pomiarowej wynosiła 100 mm.

Badanie wykonano w temperaturze otoczenia (+20°C), na maszynie wytrzymałościowej do prób statycznych typ ZDM-10/91, nr fabryczny 2214/33, na zakresie do 100 kN (rys. 27). Maszyna posiada Świadectwo wzorcowania nr W1/1303-2/04, wydane przez Okręgowy Urząd Miar nr 1 w Warszawie.



Rys. 27. Próbka w maszynie do badań wytrzymałościowych: a) przed badaniem; b) po badaniu

Wykonano dwie serie badań:

- serię A przy szybkości odkształcania 5 mm/min;
- serię B przy szybkości odkształcania 25 mm/min.

W każdej serii zbadano po 6 próbek danego typu laminatu. Przykładowe oznaczenie 3/A/5 oznacza próbkę laminatu o receptce 3 (szklano-epoksydowy,  $\pm 45^\circ$ ), zbadaną przy szybkości odkształcania 5 mm/min, piątą próbkę w serii.

### 11.3. Wyniki badań

W tabeli 8 przedstawiono wyniki badań wytrzymałości laminatów na zerwanie.

TABELA 8

Wyniki badań laminatów na zerwanie

Seria/Nr próbki	Wytrzymałość próbek na zerwanie [MPa]	Średnia wytrzymałość na zerwanie [MPa]
1/A/1;2;3;4;5;6	282; 341; 280; 316; 320; 330	311
1/B/1;2;3;4;5;6	357; 353; 310; 346; 340; 330	339
2/A/1;2;3;4;5;6	192; 209; 195; 232; 210; 202;	206
2/B/1;2;3;4;5;6	237; 202; 209; 229; 235; 230	223
3/A/1;2;3;4;5;6	131; 137; 129; 142; 138; 140	136
3/B/1;2;3;4;5;6	134; 140; 137; 140; 150; 128	138
4a/A/1;2;3;4;5;6	356; 380; 421; 383; 395; 370	384
4a/B/1;2;3;4;5;6	356; 325; 415; 318; 402; 355	361
4b/A/1;2;3;4;5;6	449; 505; 477; 490; 420; 440	463
4b/B/1;2;3;4;5;6	434; 470; 471; 475; 480; 445	462
5/A/1;2;3;4;5;6	195; 189; 207; 175; 220; 200	197
5/B/1;2;3;4;5;6	162; 218; 210; 200; 178; 182	191
6/A/1;2;3;4;5;6	105; 112; 118; 110; 120; 116	113
6/B/1;2;3;4;5;6	113; 120; 110; 100; 135; 116	115
7/A/1;2;3;4;5;6	358; 357; 331; 360; 402; 386	365
7/B/1;2;3;4;5;6	389; 372; 349; 419; 360; 372	376

### 11.3. Ocena wyników badań laminatów

Próbki z laminatu szklano-epoksydowego o jednokierunkowym i dwukierunkowym (0/90°) układzie włókien wykazywały zerwanie w przekroju prostym do kierunku obciążania. Efekty dźwiękowe podczas rozciągania (pojawiające się od naprężeń rzędu 50% wytrzymałości uzyskanej) świadczyły o stopniowym zrywaniu kolejnych pasm włókien. W momencie zniszczenia nie wszystkie pasma osnowy (tzw. *rowingu*) uległy zerwaniu (próbka zachowuje postać). Delaminacja (rozdzielenie laminatu) obejmowała około 70% powierzchni części pomiarowej.

Próbki z laminatu szklano-epoksydowego o układzie włókien  $\pm 45^\circ$  w stosunku do kierunku obciążania wykazywały w każdej z dwóch warstw zniszczenie w kierunku wzdłuż włókien (pod kątami  $\pm 45^\circ$  w stosunku do długości próbki). Podczas rozciągania próbki wykazywały przewężenie w części pomiarowej, a ich wydłużenie przy zerwaniu było największe.

Próbki laminatu węglowo-epoksydowego o jednokierunkowym układzie włókien, wykonane metodą wet-lay-up, niszczyły się krucho, z efektem dźwiękowym, w przekroju prostopadłym do kierunku obciążania, a zerwaniu uległy wszystkie włókna (pełne rozerwanie próbki).

Próbki laminatu węglowo-epoksydowego o jednokierunkowym układzie włókien, wykonane metodą pre-preg uległy delaminacji w części pomiarowej na 4 warstwy, a poszczególne warstwy zrywały się w przekrojach prostopadłych do kierunku obciążania, lecz przesuniętych względem siebie. Taki mechanizm świadczy o słabej przyczepności międzywarstwowej warstw pre-pregów. Zerwaniu uległy wszystkie włókna.

Próbki laminatu węglowo-epoksydowego o dwukierunkowym układzie włókien (0/90°) i dużej gramaturze tkaniny podczas rozciągania wykazywały w początkowej fazie długi okres powolnego narastania naprężeń związany z prostowaniem się splotów grubych pasm włókien. Zniszczenie próbek występowało w przekroju prostopadłym do kierunku obciążania, z efektem dźwiękowym. Zniszczeniu uległy wszystkie włókna (fragmentacja próbki).

Próbki laminatu węglowo-epoksydowego o układzie włókien  $\pm 45^\circ$  w stosunku do kierunku obciążania wykazywały w każdej z dwóch warstw laminatu zniszczenie wzdłuż kierunku włókien (pod kątami  $\pm 45^\circ$  w stosunku do długości próbki). Podczas rozciągania próbki wykazywały przewężenie w części pomiarowej, a ich wydłużenie przy zerwaniu było duże (około 7-10%).

Próbki laminatu z tkaniny aramidowej zrywały się w przekroju prostopadłym do długości paska, z efektem dźwiękowym, bez delaminacji. Zerwaniu uległy wszystkie włókna.

Najmniejszą wytrzymałość na zerwanie wykazywały laminaty o układzie włókien  $\pm 45^\circ$  w stosunku do kierunku obciążania, zarówno przy włóknach węglowych, jak i szklanych.

Najwyższe wytrzymałości na zerwanie wykazały laminaty w układzie włókien jednokierunkowym i kierunku włókien zgodnym z kierunkiem obciążania. Wyższe wytrzymałości wystąpiły dla laminatu wykonanego z wstępnie nasyczonego nośnika (pre-preg) ze względu na mniejszą ilość wad struktury laminatu wynikających z błędów formowania. Próbki wykazywały rozrzuty wytrzymałości rzędu  $\pm 10\%$  wartości średniej, wynikające z wad w postaci różnic grubości laminatu, pęcherzyków powietrza, skrzywień przebiegu włókien, miejscowych rozlaminowań itp.

Zmiana szybkości odkształcania próbek w zakresie od 5 mm/min do 25 mm/min nie wpłynęła na wyniki badań wytrzymałości na zerwanie. Wyższe wytrzymałości



można uzyskać przy stosowaniu większej liczby warstw tkaniny o mniejszej gramaturze. Przy tej samej metodzie układania (wet-lay-up) włókna węglowe i aramidowe umożliwiają uzyskanie wytrzymałości na zerwanie o około 20% wyższej niż włókna szklane.

## 12. Podsumowanie

W niniejszej części pracy przedstawiono opis programu badań doświadczalnych elementów żelbetowych. Opisano stanowiska badawcze oraz sposób prowadzenia badań, w których obciążenie impulsowe generowano ładunkiem skondensowanego materiału wybuchowego. Przedstawiono charakterystykę oddziaływania wybuchu i podano metodykę oszacowania wartości obciążeń na badane elementy. Przedstawiono szczegółowe wyniki badań wytrzymałościowych materiałów konstrukcyjnych, z których wykonane zostały elementy żelbetowe badane w następnych częściach pracy. Badania dotyczyły betonu, stali zbrojeniowej i laminatów z włókien aramidowych, szklanych i węglowych.

Praca jest rezultatem projektu badawczego MNiSzW nr WKP\_1/1.4.1/1/2006/85/85/640/2007/U pt. „Technologia wzmocnień obiektów budowlanych na wypadek ataku terrorystycznego”, Mostostal Warszawa–WAT, 2007-2008.

Artykuł wpłynął do redakcji 30.07.2010 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w maju 2011 r.

### LITERATURA

- [1] T. KRAUTHAMER, R. K. OTANI, *Assessment of reinforcing details for blast containment structures*, Structural Journal, ACI, 94, 2, 1994, 124-132.
- [2] G. BĄK, A. STOLARSKI, *Delayed yield effect in dynamic flow of elastic/visco-perfectly plastic material*, Archives of Mechanics, 37, 4-5, 1985, 285-302.
- [3] A. STOLARSKI, *Model dynamicznego odkształcania betonu*, Archiwum Inżynierii Lądowej, 37, 3-4, 1991, 405-447.
- [4] G. BĄK, Z. SZCZEŚNIAK, *Uogólnione związki fizyczne dla przekrojów żelbetowych mimośrodowo ściskanych*, Arch. Inż. Lądowej, 37, 3-4, 1991, 317-343.
- [5] A. STOLARSKI, *Dynamic strength criterion for concrete*, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 130, 12, 2004, 1428-1435.
- [6] G. BĄK, A. STOLARSKI, *Analiza nieliniowa prętowych ustrojów żelbetowych obciążonych impulsowo*, Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN, Studia z Zakresu Inżynierii, 30, Warszawa, 1990, 137.
- [7] Z. SZCZEŚNIAK, *Interaction of longitudinal and transverse vibrations of elastic-plastic bars subjected to eccentric compression*, J. of Techn. Phys., 31, 2, 1990, 181-201.
- [8] S. ONOPIUK, A. STOLARSKI, *Dynamika niesprężystych płyt prostokątnych z uwzględnieniem efektu opóźnienia plastycznego*, Biul. WAT, 2, 1998, *Metoda rozwiązania*, 56-71; *Wyniki analizy numerycznej*, 73-94.

- [9] S. ONOPIUK, A. STOLARSKI, *Dynamic analysis of elastic-viscoplastic stiffened rectangular plates*, Building Research Journal, Slovak Academy of Sciences, 48, 3, 2000, 155-173.
- [10] A. STOLARSKI, W. CICHORSKI, *Modelowanie statycznego i dynamicznego zachowania niesprężystych tarcz żelbetowych*, Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN, Studia z Zakresu Inżynierii, 51, Warszawa, 2002, 209.
- [11] B. PIEŃKO, Z. SZCZEŚNIAK, *Jednolity algorytm analizy statycznej i dynamicznej belkowych konstrukcji schronowych*, VIII Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Ekomilitaris 2004”, Zakopane, 2004, 343-352.
- [12] A. STOLARSKI, W. CICHORSKI, *Numerical analysis of reinforced concrete beam and deep beam under impulsive loading*, Computer Assisted Mechanics and Engineering Sciences, 12, 2005, 299-328.
- [13] B. PIEŃKO, Z. SZCZEŚNIAK, *Odpowiedź dynamiczna jednorodnych belek ciągłych na działanie napływającej fali uderzeniowej*, XXI Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Ekologiczne i energooszczędne budownictwo”, „Ekomilitaris 2007”, Zakopane, 2007, 309-317.
- [14] G. BĄK, Z. SZCZEŚNIAK, *Metoda modelowania dyskretnego jednowymiarowych procesów falowych w sprężystych warstwowych prętach niepryzmatycznych*, Engineering Transactions, 35, 2, IFTR PAS, Warsaw, 1987, 309-325.
- [15] G. BĄK, Z. SZCZEŚNIAK, *Modelowanie powstawania odłamów i zderzeń wielokrotnych w prętach sprężysto-kruchych na rozciąganie*, Engineering Transactions, 37, 1, IFTR PAS, Warsaw, 1989, 151-174.
- [16] Z. SZCZEŚNIAK, *Discrete modelling of wave propagation in bars with piecewise-linear characteristics*, Engineering Transactions, 40, 4, IFTR PAS, Warsaw, 1992, 483-500.
- [17] Z. SZCZEŚNIAK, *Discrete model of wave propagation in a non-prismatic bar with rigid unloading characteristic*, Engineering Transactions, 41, 1, Warszawa, 1993, 77-96.
- [18] Z. SZCZEŚNIAK, *Symulacja numeryczna drgań powierzchni swobodnej ośrodka*, IX Sympozjum „Wpływy sejsmiczne i parasejsmiczne na budowle”, Wyd. Politechniki Krakowskiej, Kraków, 2000, 67-76.
- [19] Z. SZCZEŚNIAK, *Spatial discrete structure model for simulation of wave propagation in solids*, „33 Solid Mechanics Conference”, Zakopane, Wyd. IPPT PAN, Warszawa, 2000, 381-382.
- [20] Z. SZCZEŚNIAK, *Modelowanie rozprzestrzeniania fal sprężystych w ośrodku izotropowym*, XXIII Zimowa Szkoła Mechaniki Górniczej „Geotechnika i budownictwo specjalne”, Wyd. Katedry Geomechaniki Górniczej i Geotechniki AGH, Kraków, 2000, 427-436.
- [21] Z. SZCZEŚNIAK, *Symulacja numeryczna rozprzestrzeniania się fal sprężystych w warstwowym ośrodku izotropowym*, Prace Naukowe Instytutu Geotechniki i Hydrotechniki Politechniki Wrocławskiej, nr 73, seria 40, Wrocław, 2001, 487-494.
- [22] Z. SZCZEŚNIAK, *Modelowanie dynamicznego rozrywania w ośrodku sprężysto-kruchym w zakresie rozciągania*, Wyd. Katedry Geomechaniki Górniczej i Geotechniki AGH, Kraków, 2002, 681-688.
- [23] G. BĄK, Z. SZCZEŚNIAK, *Współdziałanie ramy żelbetowej z ośrodkiem gruntowym wywołane powietrzną falą uderzeniową*, Biul. WAT, 30, 6, Warszawa, 1981, 65-79.
- [24] Z. SZCZEŚNIAK, *Wpływ odkształcalności konstrukcji wykopowej na parametry ruchu wywołanego falą podmuchu wybuchu jądrowego*, Biul. WAT, 38, 1, Warszawa, 1989, 99-114.
- [25] Z. SZCZEŚNIAK, *Modelling of wave processes in problems of the dynamic soil-structure interaction*, I Conference on Structure Impact Resistance, Polish Academy of Sciences, Military University of Technology, Naval Forces Academy, Gdynia, 23-24 November, 1993, 299-312.

- [26] Z. SZCZEŚNIAK, *Modelowanie ośrodka gruntowego w zagadnieniach dynamicznej interakcji z konstrukcją*, VII Sympozjum „Wpływy sejsmiczne na budowle”, Kraków, 1994, Wyd. Polit. Krakowskiej, Kraków, 1994, 163-169.
- [27] Z. SZCZEŚNIAK, *Modelowanie dyskretnie dynamicznej interakcji belki żelbetowej z obsypką gruntową*, XIX ZSMG „Zjawiska dynamiczne w górotworze ze szczególnym uwzględnieniem wstrząsów i tąpnięć”, Ustroń Zawodzie, 1996, Wyd. Katedry Geomechaniki Górniczej i Geotechniki AGH, Kraków, 1996, 301-306.
- [28] Z. SZCZEŚNIAK, *Modelling of behaviour of runway plate-soil foundation set under air shock wave*, Proceedings of 11<sup>th</sup> Int. Scient. And Techn. Military Engng Conf., Rynia-Warsaw, 2000, 307-314.
- [29] R. KRZEWIŃSKI, *Dynamika wybuchu*, Część I. *Metody określania obciążeń*, WAT, Warszawa 1982; Część II. *Działanie wybuchu w ośrodkach inercyjnych*, WAT, Warszawa, 1983.
- [30] R. KRZEWIŃSKI, *Wnikanie bomb i pocisków w konstrukcje osłonowe schronów*, II Krajowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Problemy badawcze i techniczne związane z projektowaniem, wykonawstwem i eksploatacją budowli obronnych i ochronnych”, Gdynia, 1997, 120-124.
- [31] G. URBANOWICZ, *Obciążenia wyjątkowe — wybuch mieszanin gazowo-powietrznych*, II Krajowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Problemy badawcze i techniczne związane z projektowaniem, wykonawstwem i eksploatacją budowli obronnych i ochronnych”, Gdynia, 1997, 125-129.
- [32] R. KRZEWIŃSKI, *Obciążenia elementów konstrukcyjnych schronów generowane działaniem bomb i pocisków*, Konferencja Naukowo-Techniczna „Problemy badawcze i techniczne związane z projektowaniem, wykonawstwem i eksploatacją budowli obronnych”, Tarnowskie Góry, 1998, 124-133.
- [33] R. KRZEWIŃSKI, *Działanie pocisków wielostopniowych na elementy konstrukcyjne schronów*, IV Krajowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Problemy badawcze i techniczne związane z projektowaniem, wykonawstwem i eksploatacją budowli obronnych i ochronnych”, Szklarska Poręba, 1999, 106-111.
- [34] G. BĄK, Z. SZCZEŚNIAK, *Obliczanie parametrów wstrząsu schronu metodą modelowania dyskretnego*. II Krajowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Problemy badawcze i techniczne związane z projektowaniem, wykonawstwem i eksploatacją budowli obronnych i ochronnych”, Gdynia, 5-6 czerwca 1997, 142-147.
- [35] L. TISCHNER, Z. SZCZEŚNIAK, *Sposoby obliczania parametrów wstrząsu schronów wykopowych*, XIII Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Eksploatacja infrastruktury w sytuacjach kryzysowych”, Rynia, 2, 2004, 289-298.
- [36] E. ACHREMIEŃ, R. KRZEWIŃSKI, M. ROGALSKI, A. SPYCHAŁA, *Metodyka oceny odporności obiektów na działanie obciążeń wybuchowych*, WAT, Warszawa, 1987.
- [37] M. ROGALSKI, *Fortyfikacja. Podstawy projektowania schronów*, WAT, Warszawa, 1989.
- [38] Z. SZCZEŚNIAK, *Metoda modelowania dyskretnego w programowaniu badań konstrukcji schronowych*, Konferencja Naukowo-Techniczna „Nauka i praktyka w rozwoju uzbrojenia i sprzętu inżynierskiego”, WITI, OBRUM, Politechnika Wrocławska — Zamek Czocho, Wyd. WITI, Wrocław, 1993, 29-45.
- [39] M. ZABOROWSKI, *Budownictwo Podziemne, Cz. II. Konstrukcja i obciążenia obudowy schronów drążonych pod ziemią*, Wyd. WAT, Warszawa, 1994.
- [40] Z. SZCZEŚNIAK, *Wybrane problemy oceny odporności budowli obronnych na działanie współczesnych środków rażenia*, Krajowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Problemy Badawcze i Techniczne Związane z Projektowaniem, Wykonawstwem i Eksploatacją Budowli Obronnych”, Bystra Śląska, 1996, 112-121.
- [41] Z. SZCZEŚNIAK, *Modelowanie zachowania dynamicznego konstrukcji podziemnych w warunkach działania powietrznej fali uderzeniowej*, Wyd. WAT, Warszawa, 1999.

- [42] W. DORNOŃSKI, *Numeryczna symulacja procesów deformacji i zniszczenia metalowych elementów konstrukcji schronowych*, IV Krajowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Problemy badawcze i techniczne związane z projektowaniem, wykonawstwem i eksploatacją budowli obronnych i ochronnych”, Szklarska Poręba, 1999, 64-72.
- [43] Z. SZCZEŚNIAK, *Odpornościowe aspekty w formule klasyfikacji schronów*, IV Krajowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Problemy badawcze i techniczne związane z projektowaniem, wykonawstwem i eksploatacją budowli obronnych i ochronnych”, Szklarska Poręba, 1999, 175-181.
- [44] G. BĄK, Z. SZCZEŚNIAK, *Schrony Obrony Cywilnej w budynkach użyteczności publicznej*, 49 Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB, Krynica, 2003, 1-17.
- [45] Z. SZCZEŚNIAK, *Wybrane elementy analizy dynamicznej konstrukcji magazynów przedmiotów i materiałów wybuchowych*, VIII Ogólnopolskie Seminarium „Problemy techniczno-prawne utrzymywania obiektów budowlanych na terenach zamkniętych”, GUNB, Warszawa, 2007, 267-276.
- [46] R. REKUCKI, *Pomiar parametrów powietrznej fali uderzeniowej wybuchu*, III Krajowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Problemy badawcze i techniczne związane z projektowaniem, wykonawstwem i eksploatacją budowli obronnych i ochronnych”, Tarnowskie Góry, 1998, 171-178.
- [47] B. ZYGMUNT, J. PASZULA, R. REKUCKI, *Metody generowania impulsu ciśnienia w powietrzu do oceny odporności wybuchowej elementów konstrukcji*, Biul. WAT, 55, 2, 2006, 133-143.
- [48] R. REKUCKI, *Badania doświadczalne materiałów konstrukcyjnych obiektów fortyfikacyjnych*, II Krajowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Problemy badawcze i techniczne związane z projektowaniem, wykonawstwem i eksploatacją budowli obronnych i ochronnych”, Gdynia, 1997, 185-192.
- [49] R. REKUCKI, *Badanie dynamiczne zaworów przeciwybuchowych*, III Krajowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Problemy badawcze i techniczne związane z projektowaniem, wykonawstwem i eksploatacją budowli obronnych i ochronnych”, Tarnowskie Góry, 1998, 179-187.
- [50] A. SPYCHAŁA, G. BĄK, W. CUDNY, R. KRZEWIŃSKI, B. KOPYŚCIŃSKI, A. STOLARSKI, Z. SZCZEŚNIAK, M. ZIELIŃSKI, *System fortyfikacyjnych obiektów schronowych*, WAT, Warszawa, 1984.
- [51] A. SPYCHAŁA, R. KRZEWIŃSKI, R. REKUCKI, *Schrony prefabrykowane dla obrony cywilnej. Badania doświadczalne obiektów fortyfikacyjnych*, WAT, Warszawa, 1989.
- [52] R. REKUCKI, G. URBANOWICZ, *Badania poligonowe konstrukcji schronu obciążonego falą ciśnienia w gruncie*, Krajowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Problemy badawcze i techniczne związane z projektowaniem, wykonawstwem i eksploatacją budowli obronnych”, Bystra Śląska, 1996, 144-149.
- [53] G. BĄK, Z. SZCZEŚNIAK, *Komputerowe projektowanie konstrukcji schronów wykopowych*, Krajowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Problemy badawcze i techniczne związane z projektowaniem, wykonawstwem i eksploatacją budowli obronnych”, Bystra Śląska, 1996, 132-136.
- [54] Z. SZCZEŚNIAK, *Zagadnienie projektowania układu funkcjonalnego budowli ochronnych OC*, II Krajowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Problemy badawcze i techniczne związane z projektowaniem, wykonawstwem i eksploatacją budowli obronnych i ochronnych”, Gdynia, 1997, 130-136.
- [55] G. BĄK, T. BŁAŻEJOWICZ, Z. SZCZEŚNIAK, *Koncepcja typowego małego ukrycia spełniającego jednocześnie wymogi schronu OC*, II Krajowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Problemy badawcze i techniczne związane z projektowaniem, wykonawstwem i eksploatacją budowli obronnych i ochronnych”, Gdynia, 1997, 148-50.

- [56] A. STOLARSKI, L. TISCHNER, *Konstruowanie przewoźnych schronów kontenerowych*, IV Krajowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Problemy badawcze i techniczne związane z projektowaniem, wykonawstwem i eksploatacją budowli obronnych i ochronnych”, Szklarska Poręba, 1999, 164-174.
- [57] A. STOLARSKI, L. TISCHNER, *Przewoźne schrony kontenerowe*, Przegląd Wojsk Lądowych, 4, 1999, 81-82.
- [58] Z. SZCZEŚNIAK, *Techniczne aspekty projektowania schronów na terenach zamkniętych*, V Ogólnopolskie Seminarium „Problemy techniczno-prawne utrzymywania obiektów budowlanych na terenach zamkniętych”, Wyd. GUNB, Warszawa, 2004, 136-145.
- [59] E. WŁODARCZYK, D. NIEPOSTYN, E. ACHREMIEŃ, G. BĄK, F. CHWALCZYK, B. GÓRECKI, A. PAPIŃSKI, J. RAFA, M. ROGALSKI, A. STAŃCZYK, A. STOLARSKI, M. ZABOROWSKI, *Poradnik projektanta konstrukcji schronów wykopowych*, SSZiB Gł. Kwat. WP, Warszawa, 1982.
- [60] J. BZDĘGA, M. SOBIECH, Z. SZCZEŚNIAK, E. ŚWIĄTEK, W. WOJCIECHOWSKI, *Ogólne zasady projektowania konstrukcji schronów Obrony Cywilnej*, [w:] *Przygotowanie schronów Obrony Cywilnej dla ludzi w budynkach miejskich i obiektach użyteczności publicznej*, Wyd. COIB PP, Warszawa, 2000.
- [61] Z. SZCZEŚNIAK, *Prototyp konstrukcji komory rozbrajania pocisków artyleryjskich, przeznaczony do badań poligonowych*, WITU Zielonka-WAT Warszawa, 2002.
- [62] L. CZARNECKI, P. H. EMMONS, *Naprawa i ochrona konstrukcji betonowych*, Polski Cement, Kraków, 2002.
- [63] E. MASŁOWSKI, D. SPIŻEWSKA, *Wzmacnianie konstrukcji budowlanych*, Arkady, Warszawa, 2000.
- [64] E. WŁODARCZYK, *Wstęp do mechaniki wybuchu*, PWN, Warszawa, 1994.
- [65] R. KRZEWIŃSKI, R. REKUCKI, *Roboty budowlane przy użyciu materiałów wybuchowych*, POLCEN, Warszawa, 2005.
- [66] A. M. NEVILLE, *Właściwości betonu*, Polski Cement, Kraków, 2000.

P. PONETA, A. GILUŃ, J. JURCZUK, P. ŚWIEŻEWSKI,  
A. STOLARSKI, G. BĄK, T. BŁAŻEJEWICZ, R. KRZEWIŃSKI,  
S. ONOPIUK, R. REKUCKI, Z. SZCZEŚNIAK

**Investigations of reinforced concrete elements strengthened by laminates under explosive loading. Part I. Description of investigation programme and investigations of structural materials**

**Abstract.** The justification of undertaking and a conception of realization of the investigations of reinforced concrete elements under the explosive load were presented in the paper. The description of the experimental investigations programme of reinforced concrete elements was introduced in the present part of the paper. The investigative stands and the method of the investigations in which impulsive loading was generated by the explosive material were described. The characteristics of influence of explosion on investigative elements were introduced and the method of estimation of the loading values on the considered elements was given. The results of the investigations of the structural materials of which studied reinforced concrete elements were made were introduced in the present part of the paper. Investigations concerned to the concrete, reinforcing steel, and laminates from aramide, glass, and carbon fibres.

**Keywords:** experimental investigations, explosive loading, reinforced concrete elements (beams, columns, plates), structural materials (concrete, reinforcing steel, lamina)

