Załącznik do:
„Opracowanie ogólnych wskazówek i rekomendacji w zakresie bezpieczeństwa bombowego do konkursu architektonicznego na rozbudowę Muzeum Powstania Warszawskiego (MPW)”

Mechanizm niszczenia belek i słupów ze zbrojonego betonu za pomocą materiału wybuchowego oraz sposoby zwiększenia odporności na wybuch za pomocą różnego rodzaju materiałów włóknistych

(wyniki testów praktycznych)

Dane wyjściowe:

1.1. Jako materiał wybuchowy stosowano dynamit E4G4H o masach ładunku od 100 g do 800 g. Ładunek materiału wybuchowego był umieszczany na przekładce stalowej o grubości 50 mm i wymiarach dostosowanych do szerokości przekroju poprzecznego belki/słupa, tj. 150 mm/200 mm, lub był bezpośrednio przyłożony do badanego elementu albo ułożony w zadanej odległości od powierzchni elementu.

1.2. Rejestrowaniu podlegały zmiany w czasie reakcji podporowej, przemieszczenie w środku rozpiętości, przemieszczenie w 1/3 rozpiętości i przyspieszenie w 1/4 lub 1/3 rozpiętości belki/słupa. Rejestrowano również trwałe przemieszczenia elementów. Ponadto wykonano szczegółową rejestrację graficzną i fotograficzną mechanizmu zniszczenia elementów.
W zależności od rodzaju elementu, sposobu jego wzmocnienia, wielkości ładunku materiału wybuchowego oraz odległości jego usytuowania względem powierzchni badanego elementu zaobserwowano występowanie następujących efektów składających się na mechanizm zniszczenia: (1) zmiażdżenie strefy ściskanej betonu; (2) wykruszenie betonu w obszarze zmiażdżenia strefy ściskanej; (3) wykruszenie betonu w obszarze strefy rozciąganej; (4) wykruszenie bocznych powierzchni betonu; (5) pęknięcia strefy ściskanej betonu; (6) wgniecenie obciążonej powierzchni betonu; (7) spęcznienie betonu pod laminatem wzmacniającym w obszarze strefy ściskanej; (8) odłam bocznych powierzchni betonu; (9) odłam betonu w strefie rozciąganej; (10) zarysowanie betonu; (11) wybicie betonu; (12) poprzeczne wyboczenie prętów zbrojenia w obszarze zmiażdżenia strefy ściskanej; (13) bardzo duże ugięcia; (14) wypalenie laminatu; (15) powierzchniowe

odspojenia laminatu; (16) pasmowe lub liniowe odspojenia laminatu; (17) rozerwanie laminatu; (18) powierzchniowe lub liniowe obszary zniszczonego laminatu.

1.3. Zestawienie wyników badań belek i słupów żelbetowych w komorze wybuchowej przedstawiono w tabeli 1.

Wprowadzono następujące oznaczenia dotyczące rodzaju elementów i sposobu przyłożenia obciążenia:

SI - pierwsza seria badań (długość podparcia belki 180 cm),
SII - druga seria badań (długość podparcia belki 150 cm),
BZ - belka żelbetowa bez wzmocnienia,
SZ- słup żelbetowy bez wzmocnienia,
BWnA/S/W - belka żelbetowa ze wzmocnieniem,
SWnA/S/W - słup żelbetowy ze wzmocnieniem: *n* - liczba warstw wzmocnienia laminatami z włókien odpowiednio typu A, S, W; wzmocnienie taśmami - t; układ włókien: jednokierunkowy - 1k, dwukierunkowy - 2k,
BPS - bezpośrednie przyłożenie obciążenia bez przekładki stalowej,
D*x* - przyłożenie obciążenia bez przekładki stalowej w odległości *x* mm.
Zkolei, oznaczenia rejestrowanych parametrów ruchu,

R1, R2 — reakcje podporowe,
P3 - przemieszczenie w środku rozpiętości,
P2, P4 — przemieszczenia w 1/3 rozpiętości,
A1 - przyspieszenie w 1/4 rozpiętości,
A2 - przyspieszenie w 1/3 rozpiętości.

Natomiast w celu oznaczenia efektów mechanizmu zniszczenia przyjęto opisy:
WSS - wykruszenie w obszarze zmiażdżenia strefy ściskanej,
WSR - wykruszenie w obszarze strefy rozciąganej,
WB - wykruszenie bocznych powierzchni betonu,
ZSS - zmiażdżenie strefy ściskanej,
PS - pęknięcia strefy ściskanej,
WP - wgniecenie obciążonej powierzchni betonu,
SB - spęcznienie betonu pod laminatem w obszarze strefy ściskanej,
WL - wypalony laminat,
POL - powierzchniowe odspojenia laminatu,
LOL - pasmowe/liniowe odspojenia laminatu,
RL - rozerwanie laminatu,
ZL - powierzchniowe obszary zniszczonego laminatu,
Z(*x*) - zarysowanie o maksymalnej szerokości *x* w mm,

OB - bryła odłamu bocznych powierzchni betonu,
OR - bryła odłamu betonu w strefie rozciąganej,
WyB - wybicie betonu w całym przekroju poprzecznym,
PWZ - poprzeczne wyboczenie prętów zbrojenia w obszarze zmiażdżenia strefy ściskanej.

Każda sekwencja wyników zawiera schemat mechanizmu zniszczenia dla słupów. W przypadku słupów wzmocnionych przedstawiono również wyniki po odsłonięciu warstwy laminatu.

Zestawienie wyników badań belek i słupów

Nr eksp.	Oznaczenie eksperymentu	Rodzaj elementu	Masa ładunku dynamitu E4G4H [g]	Ugięcie trwałe w środku rozpiętości [mm]	Opis efektów (mechanizm zniszczenia)	Rejestracja zmienności w czasie
1	E1 SI	BZ	100	0	ZSS	
2	E2 SI	BZ	200	0	ZSS, Z(0,2)	
3	E3 SI Powtórne badanie belki E2	BZ	200	2	ZSS, Z(2)	
4	E4 SI	BZ	300	17	WSS, ZSS, Z(4)	R1, R2
5	**E5 SI**	BZ	300	16	WSS, ZSS, Z(3)	R1, R2
6	**E6 SI**	BW2S	300	4	WB, SB, POL, LOL	R1, R2
7	E7 SI	BW2S	300	6	SB, POL	R1, R2
8	E8 SI	BW1A	300	5	WSS, ZSS, Z(0,5)	R2, P3,
9	**E9 SI**	BW2A	300	–	WSS, ZSS, Z(0,5)	R2, P3,
10	E10 SI	BW2W-1k	300	–	WSS, OR, Z(5)	R2, P3, A2
11	E11 SI	BW2W-2k	300	–	WP, WB, POL	R2, A2
12	E12 SI	BW2W-1k	300	–	WB, POL	R2, P3, A2
13	**E13 SI**	BW2W	300	–	WB, POL	R2, P3, A2
14	B1 SII	BW1tW	300	14	WSS, WB, POL, Z(5)	
15	B2 SII	BW1tW	300	23	WSS, WB, Z(3)	
16	B3 SII	BW2W-1k	250 BPS	400	WyB, RL, ZL	
17	B4 SII	BW2W-1k	200 BPS	0	WSS, WB, OR, RL, ZL	
18	B5 SII	BW2W-1k	200 BPS	265	WSS, WyB, OR, RL, ZL	
19	B6 SII	BW2W-1k	100 BPS	0	WSS, ZSS, RL, POL	
20	B7 SII	BW1S-2k	100 BPS	0	WSS, ZSS, POL	
21	B8 SII	BW2A-2k	150 BPS	3	WSS, RL, POL	

22	B9 SII	BW2A-2k	150 BPS	5	WSS, RL, POL	
23	B10 SII	BW1A-2k	150 BPS	5	WSS, RL	
24	B11 SII	BW1A-2k	150 BPS	5	WSS, RL, POL	
24	E14 SI	SZ	300	–	PS, Z(1,5)	R2, P3, A2
25	**E15 SI**	SZ	450	–	WSS, WB, PWZ, ZSS, Z(0,5)	R2, P3, A1
26	E16 SI	SW2A	450	–	RL, POL, Z(10)	R2, P3, A1
27	**E17 SI**	SW2A	450	–	WSS, SB, RL, OR, Z(10)	R2, A1
28	**E18 SI**	SW2W	450	–	WSS, SB, POL	R2, P3, A1
29	E19 SI	SW2W	450	–	SB, POL	R2, P3, A1
30	E20 SI	SW2S	450	–	SB, POL, LOL	R2, P3, A1
31	**E21 SI**	SW2S	450	–	SB, POL, LOL	R2, P3
32	E22 SI	SW2S	450	–	SB, RL, POL, LOL	R2, P3, A1
33	E23 SI	SW1A	450	–	WSS, SB, RL, Z(10)	
34	E24 SI	SW1A	450	–	WSS, SB, POL, RL, Z(17)	R2, P4, A1
35	E25 SI	SW1W	450	–	WSS, SB, POL, WSR	
36	E26 SI	SW1W	450	–	ZSS, POL, LOL	R2, P4, A1
37	S1 SII	SW4tW	450	42	WSS, OB, OR, Z(3)	
38	S2 SII	SW4tW	450	46	WSS, OB, OR, Z(4)	
39	S3 SII	SW1W-2k	450	17	WSS, POL, WSR	
40	S4 SII	SW2A	450	47	WyB, POL	
41	S5 SII	SW1A	300 D20	11	WSS, OB, WL, POL, RL	
42	S6 SII	SW1A	300 BPS	74	WSS, OB, WyB, POL, RL, OR	
43	S7 SII	SW1A	800 D125	–	WSS, WL, WSR	
44	S8 SII	SW1W-1k	300	–	WSS, POL, RL	
45	S9 SII	SW1S-2k (0/90°)	600 D195	–	WSS, WL, RL	

2.1. Wyniki badań modeli belek żelbetowych

Poniżej przedstawiono najbardziej charakterystyczne wyniki (wyróżnione pogrubioną czcionką w tabeli 1) ilustrujące zachowanie belek żelbetowych badanych w serii I.

Na rysunkach 1-3 przedstawiono wyniki dla belki niewzmocnionej oznaczonej E5. Na kolejnych rysunkach przedstawiono wyniki dla belek wzmocnionych dwiema warstwami laminatów: typu S — dla belki E6 (rys. 4-6), typu A — dla belki E9 (rys. 7-9), typu W — dla belki E13 (rys. 10-12).

Każda sekwencja wyników zawiera schemat mechanizmu zniszczenia oraz zarejestrowane zmiany w czasie podstawowych parametrów ruchu w określonych punktach pomiarowych.

Na rysunku 1 przedstawiono uszkodzenia belki żelbetowej E5 bez wzmocnienia po wykonaniu badania. W miejscu przyłożenia ładunku beton uległ wykruszeniu, a w głębi przekroju — zmiażdżeniu. Powierzchnie boczne belki uległy zarysowaniu z charakterystycznym, promieniowym przebiegiem rys od miejsca przyłożenia ładunku. Badany przebieg zmienności sił R1 i R2 na podporach ilustrują rysunki 2 i 3.

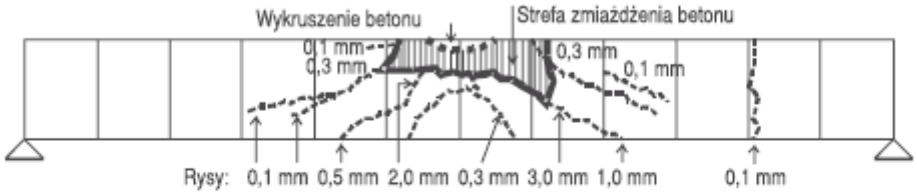
Wzmocnioną dwiema warstwami włókien typu S belkę E6 po przeprowadzonym badaniu zaprezentowano na rysunku 4. W wyniku oddziaływania energii wybuchu w miejscu przyłożenia ładunku beton podobnie jak w poprzednim przypadku uległ wykruszeniu, w niższych warstwach przekroju widzimy wyraźne boczne spęcznienie przekroju. W środkowej części elementu laminat został odspojony od powierzchni betonu. Przebieg zmienności sił R1 i R2 w czasie badania na podporach przedstawiono na rysunkach 5 i 6.

Przy badaniu belki E9 wzmocnionej dwiema warstwami włókna typu A zakres zniszczeń był widoczny tylko w miejscu bezpośredniego zetknięcia z ładunkiem, gdzie beton uległ wykruszeniu i zmiażdżeniu (rys. 7). Przebieg zmienności siły podporowej R2 przedstawiono na rysunku 8. Przeprowadzono również pomiar przebiegu ugięcia belki w punkcie P3 (rys. 9).

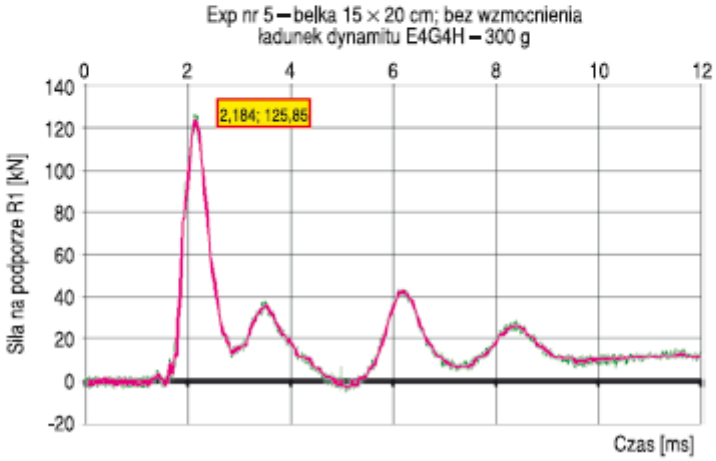
Belkę E13 wzmocnioną dwiema warstwami włókna typu W po badaniu zaprezentowano na rysunku 10. Beton w miejscu przyłożenia ładunku przy krawędziach bocznych przekroju został wykruszony. Na znacznej części powierzchni ścian bocznych laminat uległ obustronnemu odspojeniu od elementu. Na rysunku 11 przedstawiono przebieg zmiany w czasie siły podporowej R2, a na rysunku 12 zobrazowano przebieg zmienności ugięcia w punkcie P3.

Zestawienie rozkładu maksymalnych przemieszczeń belek w różnych konfiguracjach elementów wzmacniających przedstawiono na rysunku 13. Pomiaru dokonano w pięciu punktach wzdłuż belki. Największą podatnością charakteryzowała się belka bez wzmocnienia, nieco mniejsze ugięcie wystąpiło przy belce wzmocnionej pojedynczą warstwą włókna typu A. W pozostałych przypadkach wzmocnienia zarejestrowano mniejsze i mało zróżnicowane wartości przemieszczeń.

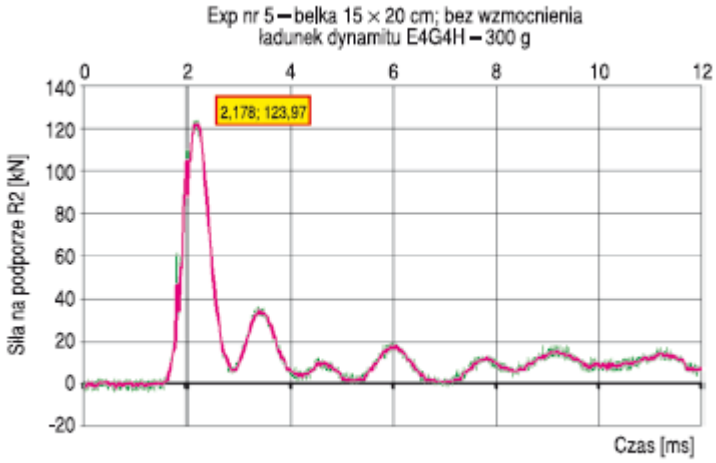
Eksp. 5.
Belka bez wzmocnienia
Ładunek dynamitu E4G4H m=300 g
Ugięcie trwałe w środku rozpiętości v= 16 mm



Rys. 1. Schemat mechanizmu zniszczenia belki E5

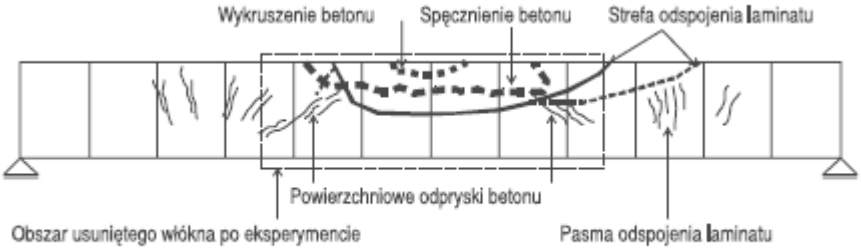


Rys. 2. Zmiana w czasie reakcji R1 na podporze belki E5



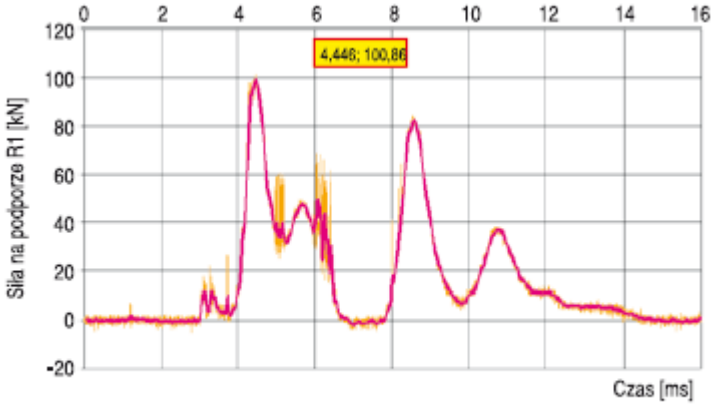
Rys. 3. Zmiana w czasie reakcji R2 na podporze belki E5

Eksp. 6.
Belka ze wzmocnieniem 2 x włókno typu „S”
Ładunek dynamitu E4G4H m=300 g
Ugięcie trwałe w środku rozpiętości v= 4 mm



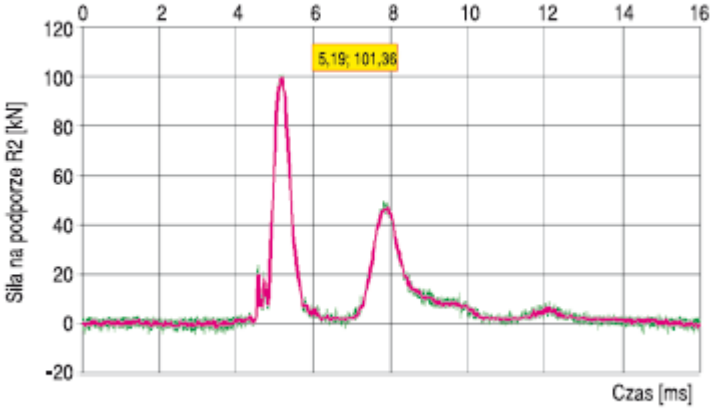
Rys. 4. Schemat mechanizmu zniszczenia belki E6

Eksp. 6 – belka 15 x 20 cm; 2 x włókno typu „S”
Ładunek dynamitu E4G4H m=300 g



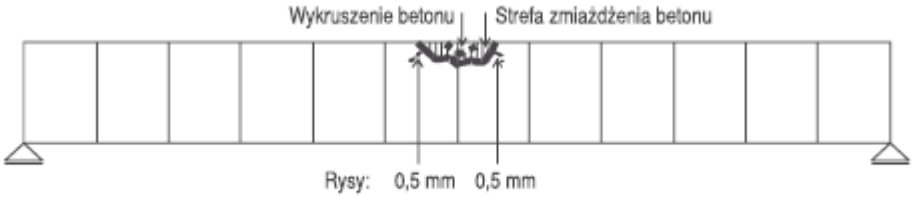
Rys. 5. Zmiana w czasie reakcji R1 na podporze belki E6

Eksp. 6 – belka 15 x 20 cm; 2 x włókno typu „S”
Ładunek dynamitu E4G4H m=300 g



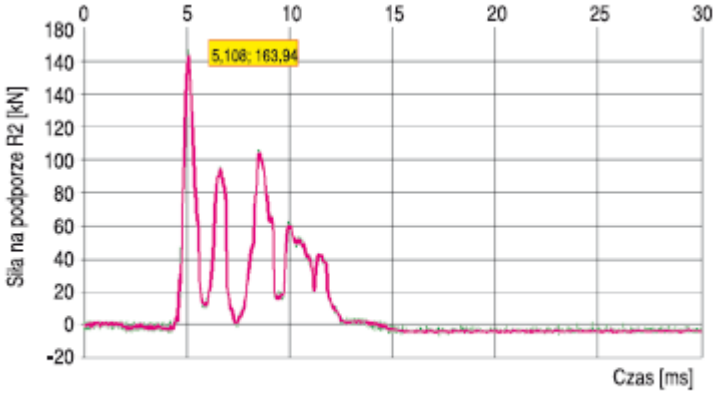
Rys. 6. Zmiana w czasie reakcji R2 na podporze belki E6

Eksp. 9.
Belka ze wzmocnieniem 2 x włókno typu „A”
Ładunek dynamitu E4G4H m=300 g
Ugięcie trwałe w środku rozpiętości v= 4 mm



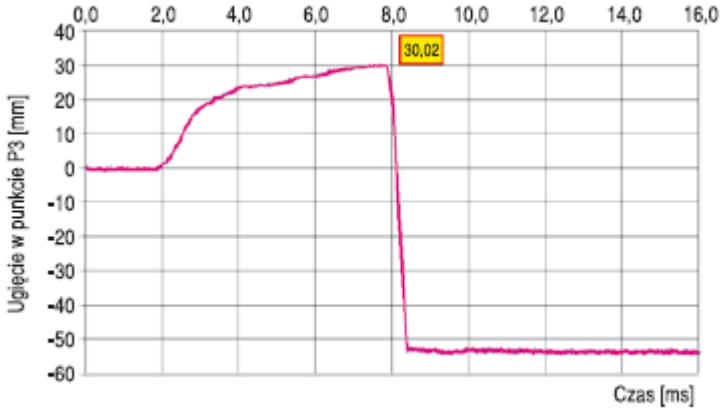
Rys. 7. Schemat mechanizmu zniszczenia belki E9

Eksp. 9 – belka 15 x 20 cm; 2 x włókno typu „A”
Ładunek dynamitu E4G4H m=300 g



Rys. 8. Zmiana w czasie reakcji R2 na podporze belki E9

Eksp. 9 – belka 15 x 20 cm; 2 x włókno typu „A”
Ładunek dynamitu E4G4H m=300 g

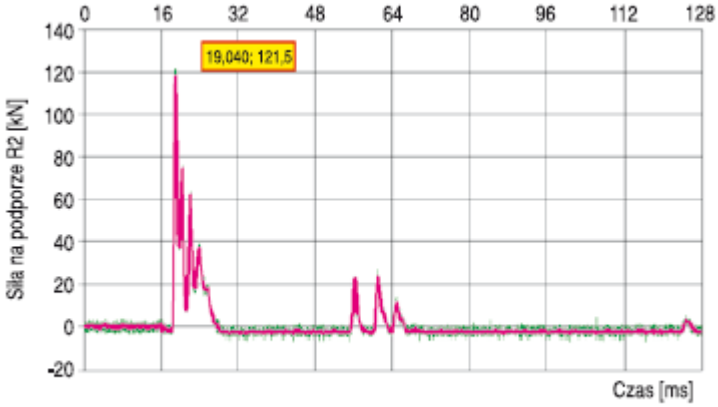


Rys. 9. Zmiana w czasie ugięcia punktu P3 belki E9

Eksp. 13 – belka ze wzmocnieniem ; 2 x włókno typu „W”
Ładunek dynamitu E4G4H m=300 g

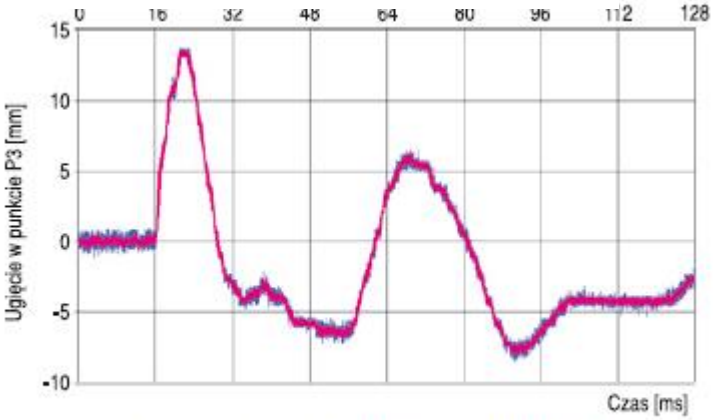
Rys. 10. Schemat mechanizmu zniszczenia belki E13

Eksp. 13 – belka 15 x 20 cm; 2 x włókno typu „W”
Ładunek dynamitu E4G4H m=300 g



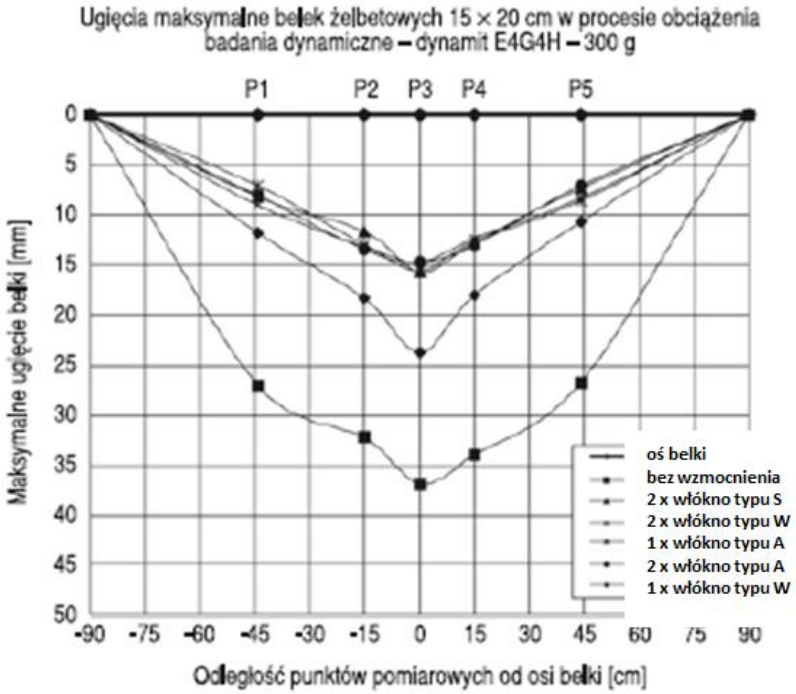
Rys. 11. Zmiana w czasie reakcji R2 na podporze belki E13

Eksp. 13 – belka 15 x 20 cm; 2 x włókno typu „W”
Ładunek dynamitu E4G4H m=300 g



Rys. 12. Zmiana w czasie ugięcia punktu P3 belki E13

Dla belek żelbetowych w I serii badań na rysunku 13 przedstawiono zestawienie rozkładu maksymalnych przemieszczeń na długości belek.



Rys 13. Rozkład maksymalnych przemieszczeń na długości belek

2.2. Wyniki badań modeli słupów żelbetowych

Poniżej przedstawiono przykładowe wyniki ilustrujące zachowanie słupów żelbetowych badanych w serii I.

Na rysunkach 14 - 17 przedstawiono wyniki dla słupa niewzmocnionego oznaczonego E15. Na następnych rysunkach przedstawiono wyniki dla słupów wzmocnionych dwiema warstwami laminatów: typu A - dla słupa E17 (rys. 18-20), typu W - dla belki E18 (rys. 21-24), typu S - dla słupa E21 (rys. 25-27).

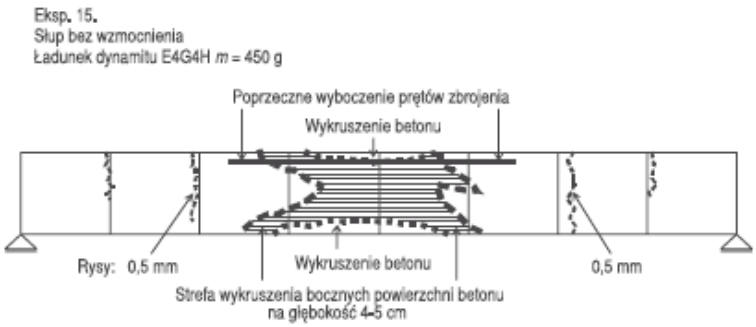
Każda sekwencja wyników zawiera schemat mechanizmu zniszczenia oraz zarejestrowane zmiany w czasie podstawowych parametrów ruchu w określonych punktach pomiarowych.

Na rysunku 14 przedstawiono obraz uszkodzenia słupa żelbetowego E15 bez wzmocnienia po wykonaniu badania. W miejscu przyłożenia ładunku, po obwodzie przekroju, beton uległ wykruszeniu na głębokości 5 cm. Zarejestrowano również przebieg zmienności siły podporowej R2 (rys. 15). Wykonano pomiar zmiany ugięcia w punkcie P3 zaprezentowany na rysunku

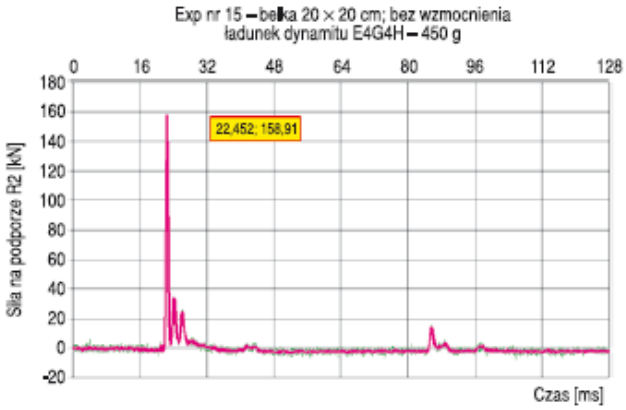
16. Pomiary wartości przyspieszenia punktu P1 zlokalizowanego na spodzie słupa zilustrowano na rysunku 17.

Wzmocniony dwiema warstwami włókna typu A słup E17 po przeprowadzonym badaniu zaprezentowano na rysunku 18. W wyniku oddziaływania wybuchu beton w miejscu przyłożenia ładunku uległ wykruszeniu, na bocznych powierzchniach widoczne jest spęcznienie przekroju. W środkowej części elementu laminat został rozerwany. Przebieg zmienności siły podporowej R2 w czasie badania przedstawiono na rysunku 19, a pomiar zmienności przyspieszenia w punkcie P1 na powierzchni dolnego brzegu elementu na rysunku 20.

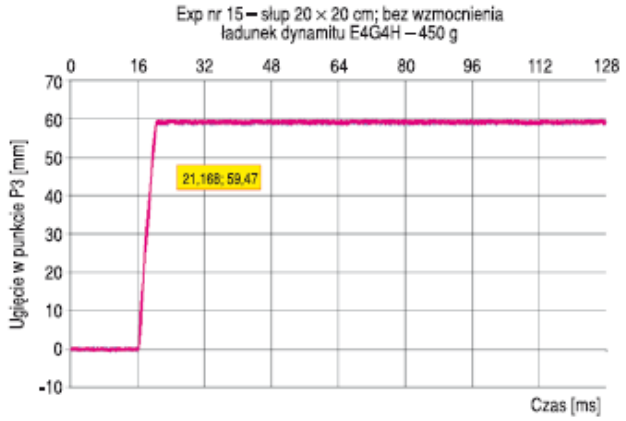
Po badaniu słupa E18 wzmocnionego dwiema warstwami włókna typu W zakres zniszczeń był widoczny tylko w bezpośrednim zetknięciu z ładunkiem, gdzie beton uległ wykruszeniu, a powłoka laminatu odspoiła się (rys. 21). Przebieg zmienności siły podporowej R2 przedstawiono na rysunku 22. Przeprowadzono również pomiar przebiegu ugięcia słupa w punkcie P3 (rys. 23) oraz pomiar zmiany przyspieszenia w czasie w punkcie P1 (rys. 24). Słup E21 wzmocniony dwiema warstwami włókna typu S po badaniu zaprezentowano na rysunku 25. Górna i boczne części przekroju w miejscu przyłożenia ładunku uległy spęcznieniu. Na znacznej powierzchni ścian bocznych laminat uległ obustronnie odspojeniu powierzchniowemu i liniowemu od elementu. Na rysunku 26 przedstawiono przebieg zmiany w czasie siły podporowej R2, a na rysunku 27 przebieg zmienności ugięcia w punkcie P3.



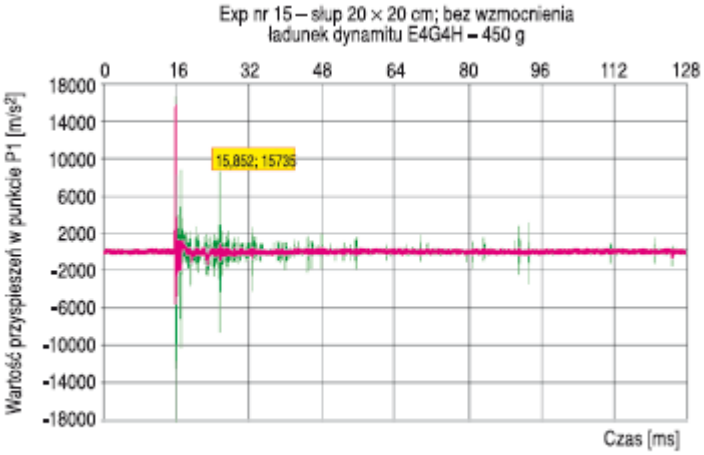
Rys. 14. Schemat mechanizmu zniszczenia słupa E15



Rys. 15. Zmiana w czasie reakcji R2 na podporze słupa E15

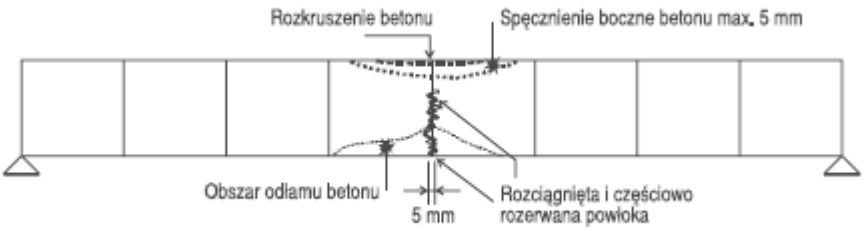


Rys. 16. Zmiana w czasie ugięcia punktu P3 słupa E15



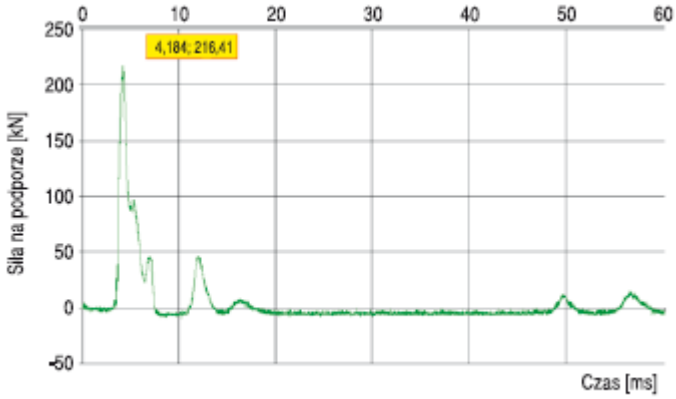
Rys. 17. Zmiana w czasie przyspieszenia punktu P1 słupa E15

Eksp. 17 – słup ze wzmocnieniem: 2 x włókno typu „A”
Ładunek dynamitu E4G4H m=450 g



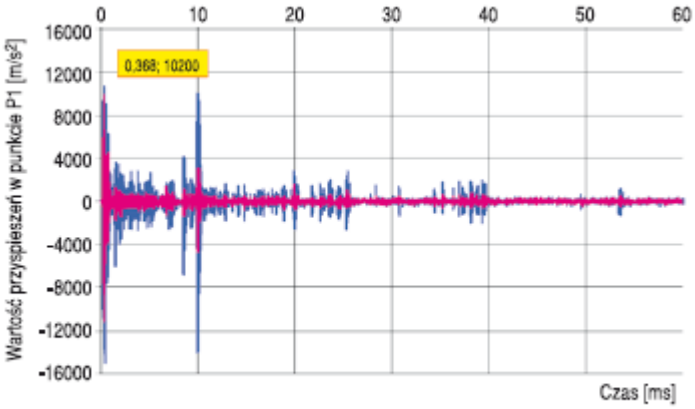
Rys. 18. Schemat mechanizmu zniszczenia słupa E17

Eksp. 17 – słup 20 x 20 cm; 2 x włókno typu „A” obwodowo
Ładunek dynamitu E4G4H m=450 g



Rys. 19. Zmiana w czasie reakcji R2 na podporze słupa E17

Eksp. 17 – słup 20 x 20 cm; 2 x włókno typu „A” obwodowo
Ładunek dynamitu E4G4H m=450 g

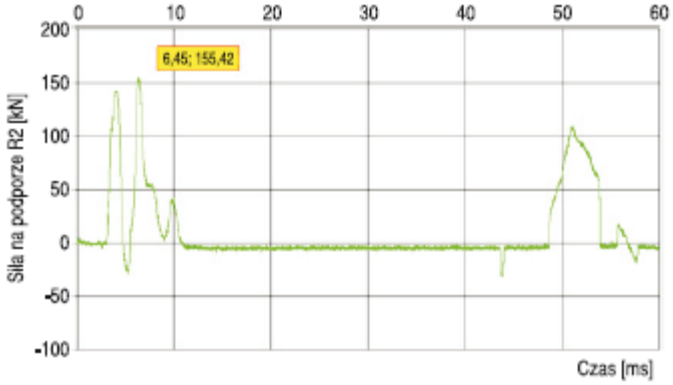


Rys. 20. Zmiana w czasie przyspieszenia punktu P1 słupa E17

Eksp. 18 – słup ze wzmocnieniem: 2 x włókno typu „W”
Ładunek dynamitu E4G4H m=450 g

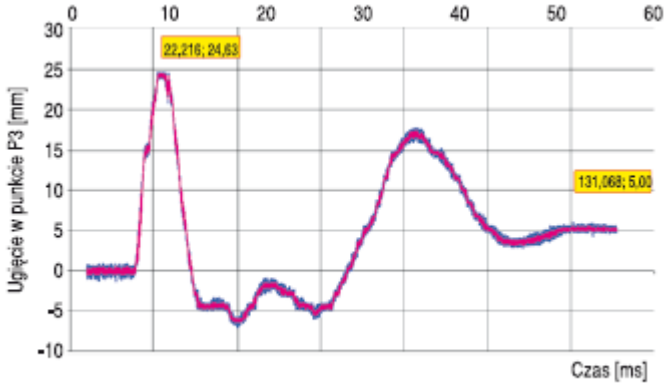
Rys. 21. Schemat mechanizmu zniszczenia słupa E18

Eksp. 18 – słup 20 x 20 cm; 2 x włókno typu „W” obwodowo
Ładunek dynamitu E4G4H m=450 g



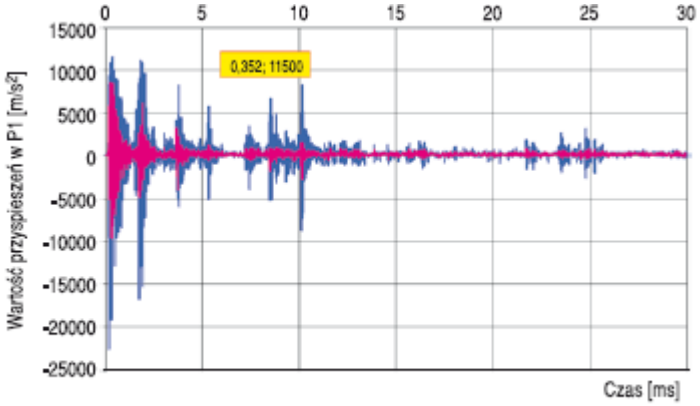
Rys. 22. Zmiana w czasie reakcji R2 na podporze słupa E18

Eksp. 18 – słup 20 x 20 cm; 2 x włókno typu „W” obwodowo
Ładunek dynamitu E4G4H m=450 g



Rys. 23. Zmiana w czasie ugięcia punktu P3 słupa E18

Eksp. 18 – słup 20 x 20 cm; 2 x włókno typu „W" obwodowo
Ładunek dynamitu E4G4H m=450 g

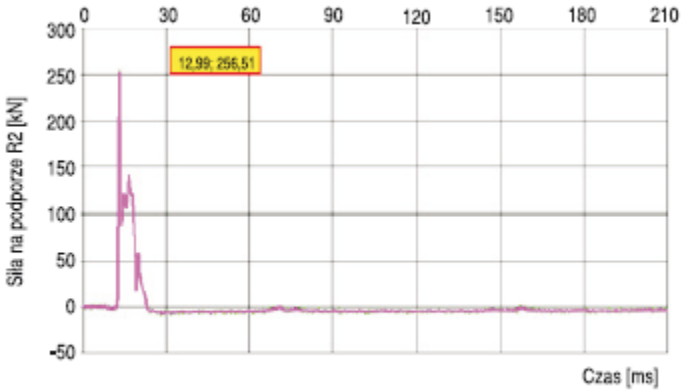


Rys. 24. Zmiana w czasie przyspieszenia punktu P1 słupa E18

Eksp. 21 – słup ze wzmocnieniem: 2 x włókno typu „S" obwodowo
Ładunek dynamitu E4G4H m=450 g

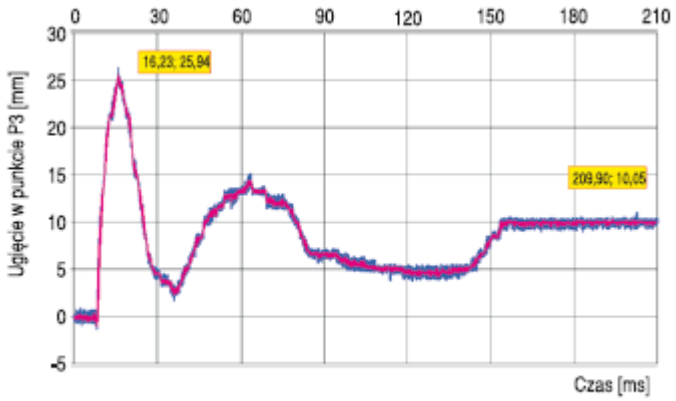
Rys. 25. Schemat mechanizmu zniszczenia słupa E21

Eksp. 21 – słup 20 x 20 cm; 2 x włókno typu „S" obwodowo
Ładunek dynamitu E4G4H m=450 g



Rys. 26. Zmiana w czasie reakcji R2 na podporze słupa E21

Eksp. 21 – słup 20 x 20 cm; 2 x włókno typu „S" obwodowo
Ładunek dynamitu E4G4H m=450 g



Rys. 27. Zmiana w czasie ugięcia punktu P3 słupa E21

3. Badania słupów w budynku doświadczalnym

3.1. Zestawienie wyników badań słupów żelbetowych

Przeprowadzono pięć eksperymentów. Słupy żelbetowe obciążano ładunkiem skupionym dynamitu E4G4H o masie 1600 g. Wymiary ładunku materiału wybuchowego wynosiły 22 × 11 × 5,5 cm. Ładunek w każdym eksperymencie był bezpośrednio przyłożony do badanego słupa na wysokości 85 cm od poziomu posadzki (utwierdzenia słupa).

W trakcie eksperymentów prowadzono pomiar nadciśnienia na czole fali uderzeniowej za pomocą mechanicznych czujników ciśnienia (MCC). Po eksperymencie wybuchowym mierzono trwałe przemieszczenia na płaszczyźnie przeciwległej do powierzchni obciążonej względem położenia słupa przed wybuchem. Rejestrowano również szczegóły efektów oddziaływania wybuchu i mechanizm zniszczenia słupów.

W tabeli 2 przedstawiono zarejestrowane za pomocą MCC wartości nadciśnienia na czole fali uderzeniowej w oznaczonych punktach pomiaru, na rysunkach 10 i 11. Oznaczenie rodzaju elementu przyjęto zgodnie z opisem do tabeli 1.

W tabeli 3 przedstawiono trwałe przemieszczenia słupów mierzone na płaszczyźnie przeciwległej do powierzchni obciążonej, w punktach pomiarowych usytuowanych na wysokości rzędnej *Y* od położenia utwierdzenia słupów w konstrukcji płyty żelbetowej posadzki niższej kondygnacji (*Y* = 0,0).

Przemieszczenia trwałe określono jako różnicę położenia odpowiednich punktów pomiarowych zarejestrowanych po wybuchu i wyznaczonych przed wybuchem.

Pomiary geometrii słupów przed badaniem i przemieszczeń słupów po badaniu wykonywano za pomocą instrumentów geodezyjnych.

TABELA 2

Wartości nadciśnienia na czole fali uderzeniowej

Lp.	Nr eksp.	Oznaczenie słupa	Punkt pomiarowy MCC/Odległość od osi ładunku w [m]				
			A/0,6	B/0,6	C/0,8	D/0,9	E/0,99
			Nadciśnienie [MPa]				
1	S1	SZ	3,20	2,80	3,10	1,90	8,0
2	S2	SW2A	4,04	3,92	2,80	2,30	2,50
3	S3	SW1A	4,08	4,28	3,12	2,28	7,28
4	S4	SW2W	3,52	4,02	3,60	2,16	7,95
5	S5	SW1W	3,45	2,78	2,85	2,25	6,20

TABELA 3

Przemieszczenia trwałe

Lp.	Nr eksp.	Oznaczenie słupa	Odległość od poziomu utwierdzenia *Y* w [m]								
			0,2	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
			Przemieszczenia trwałe w [mm]								
1	S1	SZ	0,0	0,5	1,5	2,5	2,0	2,5	2,5	0,5	1,0
2	S2	SW2A	0,0	0,5	0,0	0,0	1,0	1,0	0,5	0.0	1,0
3	S3	SW1A	0,5	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	**2,0**	**3,0**	1,0
4	S4	SW2W	0,0	2,5	3,0	1,0	2,5	2,5	3,0		
5	S5	SW1W	0,0	6,0	2,0	1,0	0,0	1,0	1,5	0,5	0,0

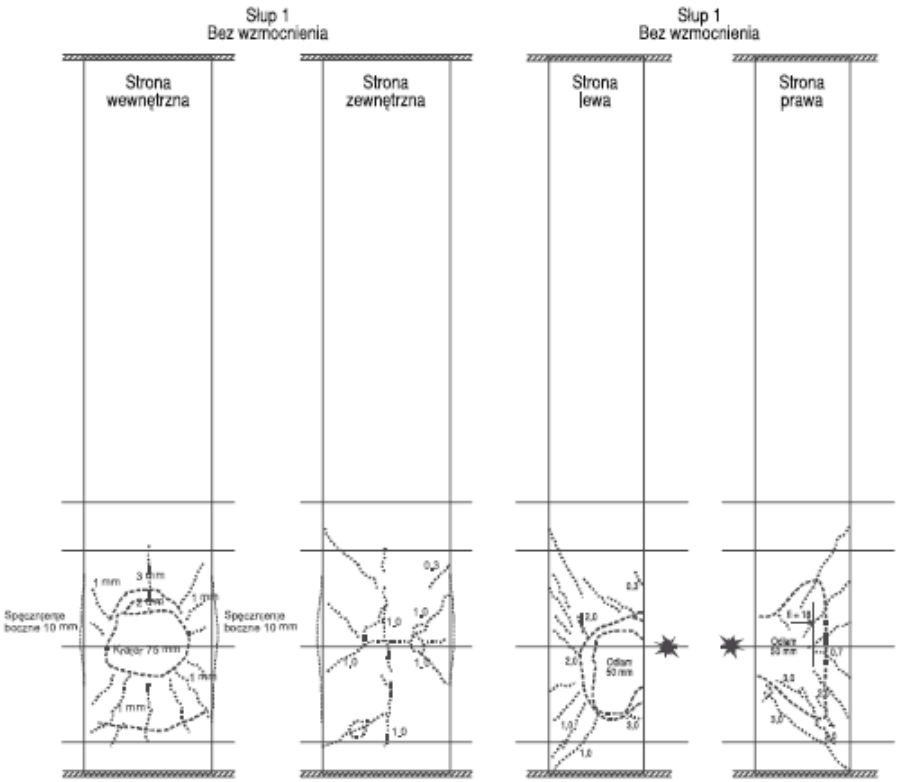
W tabeli 3 pogrubione wartości oznaczają „**ujemne**” przemieszczenia trwałe, co oznacza, że zwrot wektora przemieszczenia trwałego punktów pomiarowych słupa nie był zgodny ze zwrotem wektora ciśnienia wywołanego wybuchem. Taki efekt mógł być wywołany odchyleniem słupa od pionu stwierdzony pomiarem lub imperfekcjami geometrycznymi i wewnętrznymi uszkodzeniami materiałowymi wywołanymi eksperymentami wybuchowymi na poprzednich słupach, z których oddziaływania przenosiły się przez konstrukcje podporowe na następne badane elementy. Te same czynniki mogły być przyczyną nieco większych przemieszczeń trwałych zaobserwowanych w słupach S4 i S5.

3.2. Opis mechanizmu zniszczenia słupów

Poniżej przedstawiono wyniki ilustrujące zachowanie słupów żelbetowych badanych w budynku doświadczalnym.

Na rysunkach 28-30 przedstawiono wyniki dla słupa niewzmocnionego oznaczonego S1. Na kolejnych rysunkach przedstawiono wyniki dla słupów wzmocnionych dwiema lub jedną warstwą laminatów: typu A - dla słupów S2 (rys. 31-33) i S3 (rys. 34-37); typu W - dla słupów S4 (rys. 38-41) i S5 (rys. 42-44).

Na rysunku 29 (i na fotografiach rys. 29-30) przedstawiono widok uszkodzenia słupa S1 bez wzmocnienia z czterech stron po przeprowadzeniu badania. W wyniku obciążenia w miejscu przyłożenia ładunku beton został wykruszony, a w głębszych partiach struktura materiału została zmiażdżona. W kraterze na czołowej powierzchni słupa zostało odsłonięte zbrojenie główne. Powierzchnie boczne słupa uległy spęcznieniu, a po dość łatwym usunięciu betonu widoczne było odkształcone zbrojenie główne. Cały obszar powierzchni betonu słupa w rejonie oddziaływania wybuchu został pokryty siatką rys o różnej szerokości rozwarcia.



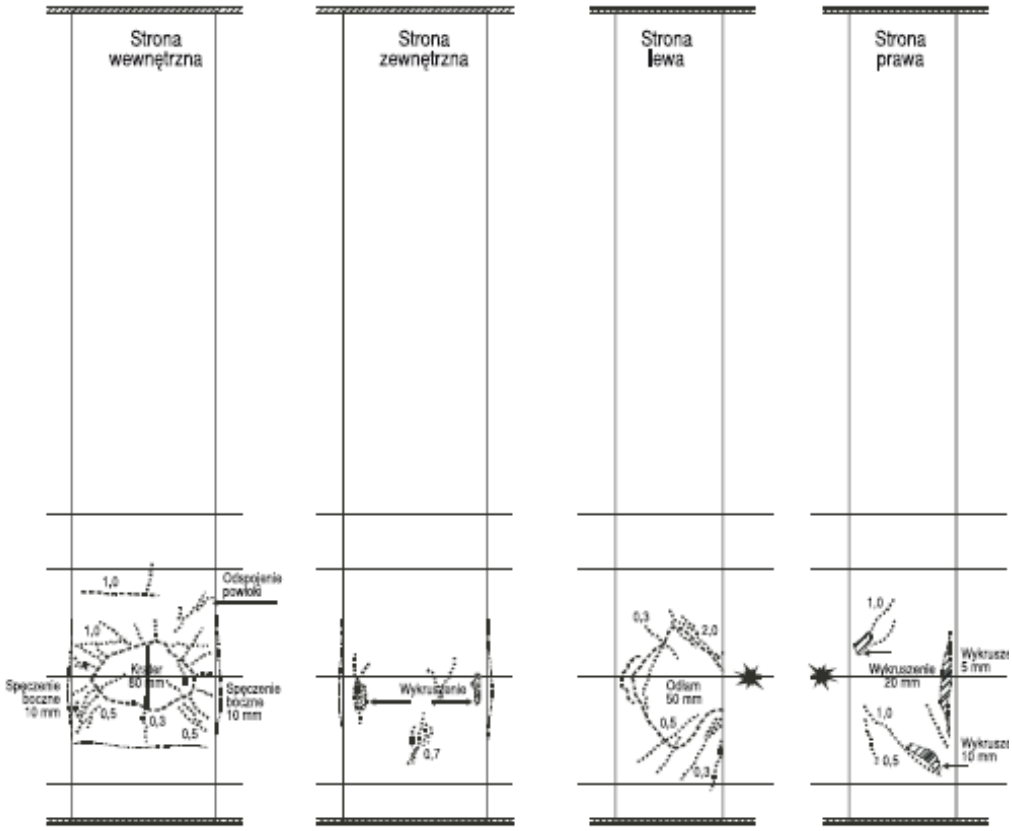
Rys. 28. Schemat mechanizmu zniszczenia słupa S1

Rys. 29. Słup S1 po wybuchu od strony przyłożenia ładunku

Rys. 30. Słup S1 po wybuchu od strony przeciwległej przyłożenia ładunku

Kolejny słup S2 wzmocniony dwiema warstwami włókna typu A został zaprezentowany na rysunku 31 (i na fotografii rys. 32). Na powierzchni czołowej od strony ładunku powstał krater o głębokości 80 mm, powierzchnie boczne uległy wyboczeniu bez widocznych uszkodzeń laminatu. Po usunięciu laminatu uwidoczniły się miejscowe wykruszenia i siatka rys (rys. 33).

Rys. 32. Słup S2 po wybuchu od strony przyłożenia ładunku



Rys. 33. Schemat mechanizmu zniszczenia słupa S2 pod powłoką

4. Podsumowanie

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań doświadczalnych belek i słupów żelbetowych obciążonych wybuchowo. Badania przeprowadzono dla dwu rodzajów elementów żelbetowych zwykłych bez dodatkowego wzmocnienia oraz dla elementów wzmocnionych wysokowytrzymałościowymi powłokowymi laminatami. Prezentowano wyniki eksperymentów dla belek i słupów na stanowisku badawczym oraz dla słupów w budynku doświadczalnym. Zaprezentowano wyniki badań, na które składają się schematy mechanizmów zniszczenia, zmiana w czasie siły na podporze, zmiana w czasie przemieszczenia i zmiana w czasie przyspieszenia. Omówiono zasadnicze efekty charakteryzujące zachowanie badanych elementów pod działaniem wybuchu.

Stwierdzono fakt, że zastosowanie powłoki laminatowej powoduje zmniejszenie przemieszczeń trwałych, zmniejszenie zasięgu uszkodzenia elementu i **prawie całkowite wyeliminowanie rozrzutu uszkodzonych fragmentów betonu**.