

BADANIA POSTACI ZNISZCZENIA PŁYT FIBROBETONOWYCH OBCIĄŻANYCH UDERZENIAMI

Michał A. GLINICKI, Wojciech RADOMSKI (Warszawa)

1. WSTĘP

Badania wpływu uderzeń na właściwości betonu i zachowanie elementów konstrukcyjnych z tego tworzywa były do połowy lat siedemdziesiątych podejmowane sporadycznie (por. np. dane w pracach NEVILLE'A [1] lub RADOMSKIEGO [2] i [3]). Wyraźny wzrost zainteresowań tą tematyką nastąpił dopiero w ostatnim dziesięcioleciu, co wynikało ze zwiększenia skali występowania obciążeń uderzeniowych lub zwiększonego prawdopodobieństwa ich wystąpienia oraz związanych z tym zagrożeń bezpieczeństwa zarówno budowli inżynierskich, jak i otaczającego je środowiska. Należy tu wymienić:

- upadki obiektów latających na budowlę, zwłaszcza zaś na konstrukcje osłonowe siłowni jądrowych lub na zbiorniki,
- uderzenia statków w konstrukcje platform wydobywczych ropy naftowej i innych budowli morskich,
- uderzenia statków lub pojazdów w podpory obiektów mostowych,
- uderzenia w budynki i inne obiekty wywołane przedmiotami niesionymi przez huragany,
- skutki wybuchów i działań militarnych.

Ponadto istnieje też potrzeba dokładniejszego niż poprzednio badania, na przykład, efektów uderzeń w fundamenty pod maszyny o działaniu udarowym, uderzeń taboru w przęsła mostów i elementy ich wyposażenia oraz uderzeń podczas wbijania pali.

Wymienionym zjawiskom przypisywane jest już tak duże znaczenie, że w 1982 r. zorganizowano pod auspicjami międzynarodowych stowarzyszeń RILEM¹⁾, CEB²⁾, IABSE³⁾ oraz IASS⁴⁾ konferencję poświęconą wyłącznie efektom działania uderzeń na elementy i konstrukcje z betonu [4]. Również na organizowanych co dwa lata międzynarodowych konferencjach SMiRT⁵⁾ prezentowane są coraz liczniejsze prace z tego zakresu (np. [5] ÷ [7]).

Intensyfikacji badań wpływu obciążeń uderzeniowych na zachowanie elementów betonowych towarzyszy również tendencja do stosowania nowych, bardziej odpornych na

¹⁾ Réunion International des Laboratoires d'Essais et de Recherches sur les Matériaux et les Constructions.

²⁾ Comité Euto-International du Béton.

³⁾ International Association for Bridge and Structural Engineering.

⁴⁾ International Association for Shell and Spatial Structures.

⁵⁾ Structural Mechanics in Reactor Technology.

oddziaływania dynamiczne odmian tego materiału, głównie kompozytów betonopodobnych. Jednym z takich kompozytów, wykazującym znacznie lepsze właściwości od zwykłego betonu, jest fibrobeton. Opisowi sposobu wytwarzania, cech fizykalnych oraz dotychczasowych zastosowań różnych rodzajów fibrobetonu z włóknami stalowymi poświęcono już kilka obszernych publikacji krajowych, na przykład [8], [9]. W publikacjach tych jednak największą uwagę zwrócono na zagadnienia statyczne. Właściwości fibrobetonu pod obciążeniami uderzeniowymi są natomiast przedmiotem pracy RADOMSKIEGO [3], stanowiącej podsumowanie współczesnego stanu wiedzy na ten temat.

Aczkolwiek przydatność fibrobetonu do zastosowań w różnego rodzaju konstrukcjach narażonych na działanie uderzeń jest ogólnie uznawana, to jednak liczba zrealizowanych, z użyciem tego materiału obiektów jest jeszcze ograniczona do rozwiązań prototypowych, wykazujących zresztą duże zalety tego tworzywa [10].

Znamionną cechą badań fibrobetonu pod obciążeniami uderzeniowymi jest brak porównań uzyskanych rezultatów eksperymentalnych z wynikami rozważań teoretycznych lub formułowanie zależności w postaci empirycznej dotyczących tylko badanych przypadków szczególnych. Wynika to ze złożoności występujących zjawisk i wysokiego stopnia niejednorodności materiału.

W niniejszym opracowaniu przedstawiono wyniki badań postaci zniszczenia płyt fibrobetonowych o różnych grubościach, wywołanego uderzeniami.

Główną uwagę zwrócono na efekty pojedynczego uderzenia oraz sformułowanie na podstawie analizy teoretycznej zależności pozwalającej na wyznaczenie tzw. *grubości przebicia* spowodowanego jednokrotnym uderzeniem w płyty, co jest istotne z inżynierskiego punktu widzenia. Analizę tę przeprowadzono na podstawie pojęć mechaniki kompozytów betonopodobnych, korzystając z zależności sformułowanych przez BRANDTA [11] w odniesieniu do obciążeń statycznych fibrobetonu.

Analizę liczby i energii uderzeń potrzebnych do przebicia płyt oraz opis i wyjaśnienie zaobserwowanych postaci zniszczenia tych elementów ograniczono do podania podstawowych tylko stwierdzeń wynikających z badań, przeznaczając na dokładne przedstawienie obu tych zagadnień odrębną publikację.

2. UWAGI O EFEKTACH UDERZEŃ W PŁYTY Z BETONU

W uderzonym elemencie występują dwa podstawowe rodzaje efektów: lokalne oraz propagowane w postaci fal zaburzeń, rozpatrywanych jako fale odkształceń (lub naprężeń).

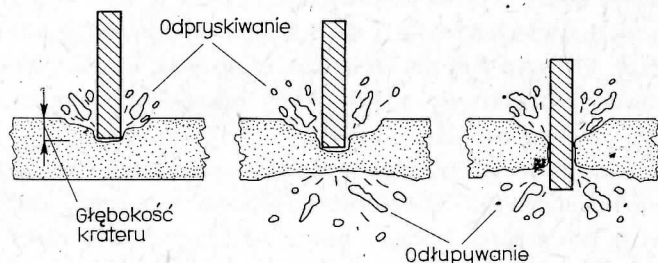
Efekty lokalne występują na stosunkowo małym obszarze, bezpośrednio przylegającym do miejsca uderzenia. Powstają one wskutek działania dużych sił chwilowych, wywierających znaczne naprężenia miejscowe, i zależą głównie od lokalnej podatności elementu oraz ukształtowania powierzchni styku w miejscu uderzenia. Są to na ogół odkształcenia trwałe.

W przypadku płyt wykonanych z betonu mogą (por. np. KENNEDY [12], SLITER [13] lub CHANG [14]) wystąpić następujące efekty lokalne (rys. 1):

- odpryskiwanie betonu od uderzonej strony elementu (ang. *spalling*),
- odłupywanie betonu od nieuderzonej strony elementu (ang. *scabbing*),

- zagłębianie bijaka w element i utworzenie tzw. *krateru* w miejscu uderzenia,
- całkowite przebicie elementu.

Przy określonej grubości elementu decydujący wpływ na postać wystąpienia efektów lokalnych ma głównie prędkość uderzenia; przy bardzo małych prędkościach uderzenie może być całkowicie sprężyste i żadne z wymienionych efektów nie wystąpią, przy prędkościach odpowiednio dużych może nastąpić przebicie łącznie z innymi poprzedzającymi je efektami (por. rys. 1).



Rys. 1. Lokalne efekty uderzeń w płytach betonowych: odpryskiwanie od strony uderzonej i odłupywanie od strony przeciwnej

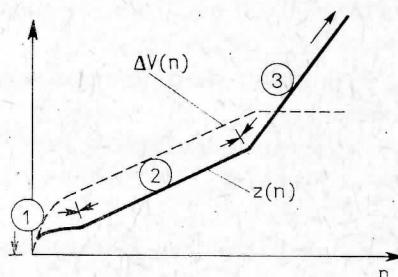
Fig. 1 Local effects of impact on concrete slabs: spalling and scabbing

Badaniom płyt fibrobetonowych pod uderzeniami poświęcono dotychczas niewielką liczbę prac, służących głównie celom użytkowym; na przykład, w wyniku badań STANGENBERGA i BUTTMANNA [15] zdecydowano o zastosowaniu płyt z tego kompozytu jako elementów konstrukcyjnych reaktora jądrowego w Schmehausen (RFN).

KNAB i CLIFTON [16] zaobserwowali, że zniszczenie lokalne płyt betonowych zbrojonych prętami i włóknami stalowymi o zawartości objętościowej 1,0%, uderzanych spadającą masą, powstawało przez utworzenie krateru w miejscu uderzenia i następnie oddzie-

Rys. 2. Schematyczne wykresy zależności głębokości krateru z oraz spadku prędkości impulsu ultradźwiękowego ΔV od liczby uderzeń n w różnych etapach lokalnego zniszczenia płyty

Fig. 2 Schematic diagram of crater depth z and reduction in ultrasonic pulse velocity ΔV versus number of impacts n at different stages of local failure



lenie i przesuwanie stożkowego klina materiału. Otrzymane wykresy zależności między narastaniem liczby uderzeń a głębokością krateru i spadkiem prędkości impulsów ultradźwiękowych w otoczeniu miejsca uderzenia (rys. 2) wskazują, że zniszczenie lokalne przebiegało w trzech etapach:

- lokalne kruszenie materiału pod końcówką bijaka i uformowanie krateru,
- formowanie powierzchni granicznych oddzielających stożkowy klin materiału od pozostałej części płyty przy zachowaniu współpracy tego klina i płyty w przenoszeniu ścinania,

— przesuwanie całkowicie wydzielonego klina względem pozostałej części płyty przy zaobserwowaniu wyraźnego spadku sztywności strefy lokalnej i znacznym osłabieniu przenoszenia ścinania.

W badaniach KNABA i CLIFTONA [16], [17] zaobserwowano wystąpienie opisanego mechanizmu zniszczenia lokalnego w przypadku użycia bijaków o zakończeniu półkolistym, natomiast nie zaobserwowano go w przypadku bijaków zakończonych płasko. Ponadto stwierdzono, że dodatek włókien stalowych w ilości 1,0% (objętościowo) wpływa istotnie na zwiększenie liczby uderzeń powodujących przebicie płyt. W przypadku włókien o długości 30 mm liczba uderzeń wzrosła $4 \div 8$ razy, a w przypadku włókien o długości 50 mm — $9 \div 13$ razy, FATTUHI [18] zaś stwierdził, że dodatek włókien stalowych (również w ilości 1,0%) powoduje trzykrotny wzrost liczby uderzeń wywołujących powstawanie pierwszej widocznej rysy na powierzchni płyty.

We wszystkich zacytowanych badaniach zauważono, że mimo wielu zarysowań spowodowanych uderzeniami, płyty fibrobetonowe zachowały spójność kształtu.

W wymienionych pracach nie podjęto próby zinterpretowania obserwowanych procesów na podstawie rozważań analitycznych.

3. WŁASNE BADANIA DOŚWIADCZALNE

3.1. OPIS BADAŃ

Celem przeprowadzonych doświadczeń było zbadanie postaci zniszczenia płyt fibrobetonowych w zależności od ich parametrów geometrycznych i strukturalnych oraz w zależności od zmian energii wywieranych uderzeń.

Cel ten zrealizowano przez uderzenia bijakami o różnych masach w płyty o stałych wymiarach w planie (0,50 m $\times$ 0,50 m), lecz różnych grubościach (0,005 m, 0,010 m, 0,015 m, 0,020 m i 0,025 m) oraz o różnej zawartości objętościowej włókien stalowych ($V_f = 0,5\%$ i $V_f = 1,0\%$).

Fibrobeton sporządzono z następującej ilości składników przypadających na 10 l mieszanki:

— cement portlandzki „350”	5,50 kg,	
— piasek $\varnothing_{\max} = 2$ mm	16,50 kg	($c/p = 1/3$),
— woda	2,75 l	($w/c = 0,5$),
— gładkie włókna stalowe 0,4 $\times$ 40 mm	393 g	(przy $V_f = 0,5\%$),
cięte ze zwojów	785 g	(przy $V_f = 1,0\%$).

Każdorazowo wykonywano jedną serię płyt o pięciu różnych grubościach, przygotowując składniki matrycy oraz włókna w ilościach dostosowanych do objętości pojedynczej płyty o danych wymiarach. Składniki te mieszano ręcznie, dodając włókna w ostatniej kolejności. Świeży fibrobeton zagęszczano na stole wibracyjnym. Wypełnione formy umieszczano w komorze klimatyzacyjnej i po trzech dniach rozformowywano płyty nadal przechowując je we wspomnianej komorze.

Łącznie wykonano 15 płyt z fibrobetonu o objętościowej zawartości włókien 0,5% oraz 15 płyt o zawartości 1,0%. Zachowując odpowiednie proporcje składników, wykonano

Tablica 1

Wyniki badań płyt fibrobetonowych poddanych uderzeniom
Test results of SFRC slabs subjected to impacts

Symbol płyty	Grubość m	V_f %	f_b MPa	f_{zg} MPa	m kg	U J	n —	U_p J
I0,5A	0,005	0,5	43,2	8,0	4,175	104	1	104
I0,5B	0,010						1	104
I0,5C	0,015						—	—
I0,5D	0,020						—	—
I0,5E	0,025						—	—
II0,5A	0,005	0,5	42,2	6,9	1,495	37	2	74
II0,5B	0,010						3	110
II0,5C	0,015						4	147
II0,5D	0,020						8	294
II0,5E	0,025						8	294
III0,5A	0,005	0,5	32,6	7,1	2,610	65	1	65
III0,5B	0,010						2	130
III0,5C	0,015						3	195
III0,5D	0,020						4	260
III0,5E	0,025						5	325
IV1,0A	0,005	1,0	32,6	7,1	4,175	104	1	104
IV1,0B	0,010						2	208
IV1,0C	0,015						2	208
IV1,0D	0,020						5	520
IV1,0E	0,025						6	624
V1,0A	0,005	1,0	32,6	7,1	1,495	37	2	74
V1,0B	0,010						4	147
V1,0C	0,015						8	294
V1,0D	0,020						9	331
V1,0E	0,025						11	404
VII,0A	0,005	1,0	32,6	7,1	2,610	65	1	65
VII,0C	0,015						4	260
VII,0D	0,020						7	455
VII,0E	0,025						9	585

Oznaczenia:

- V_f — objętościowa zawartość włókien w fibrobetonie,
 f_b — statyczna wytrzymałość betonu na ściskanie określona na kostkach sześciennych o boku 80 mm,
 f_{zg} — statyczna wytrzymałość betonu na zginanie określona na beleczkach $40 \times 40 \times 160$ mm,
 m — masa bijaka,
 U — energia kinetyczna bijaka w chwili uderzenia,
 n — liczba uderzeń potrzebna do przebicia,
 U_p — oszacowanie energii potrzebnej do przebicia.
 Wiek płyt i próbek — ok. 7 miesięcy

również kontrolne próbki z betonu nieuzbrojonego w postaci sześcianów o boku 80 mm oraz beleczek $40 \times 40 \times 160$ mm. Wartości średnie wytrzymałości matrycy betonowej na ściskanie f_b i na zginanie f_{zg} uzyskane z badań statycznych tych próbek podano w tablicy 1.

Centryczne obciążenie uderzeniowe płyt realizowano za pomocą urządzenia typu spadowego (rys. 3 i 4). Badane elementy umieszczano w poziomej kwadratowej ramie wykonanej z kątowników, zapewniającej głębokość podparcia 10 mm. Zastosowano



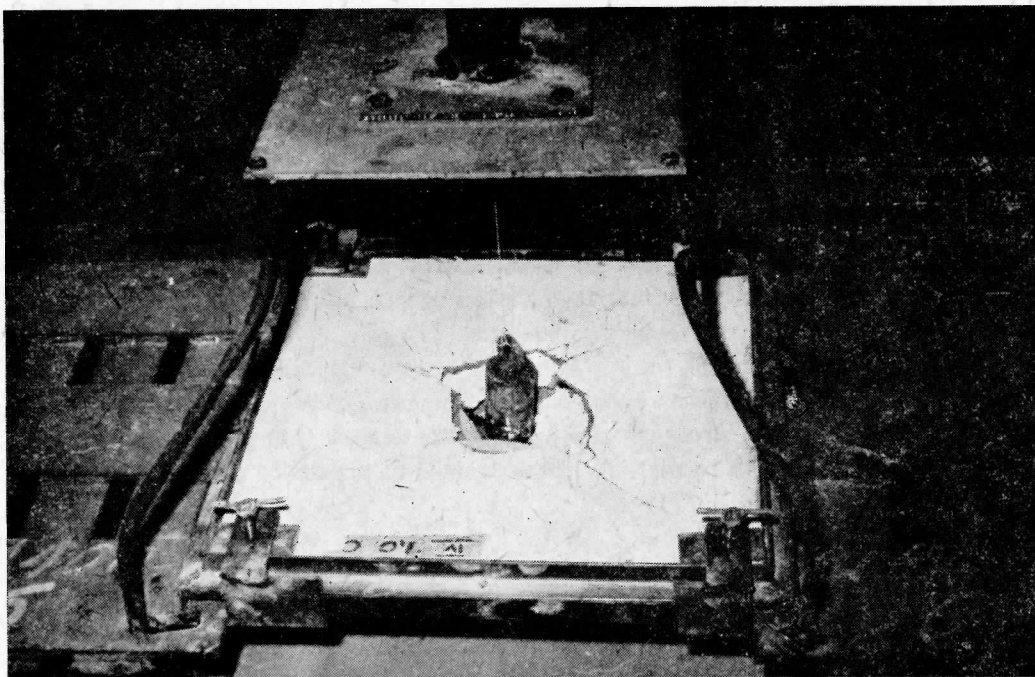
Rys. 3. Stanowisko badawcze do wywierania, uderzeń

Fig. 3 Impact test set-up

cyldryczne bijaki stalowe o średnicy $D = 50$ mm, z kulistym zakończeniem, o masach $m = 1,495$ kg, $2,610$ kg i $4,175$ kg. W każdym przypadku wysokość spadania bijaka wynosiła $2,54$ m. Różna masa bijaków przy jednakowej wysokości spadania umożliwiła zmianę energii uderzenia w płyty, która wynosiła odpowiednio około $37 J$, $65 J$ i $104 J$.

Płyty pierwszej serii — oznaczonej symbolem I — uderzano najcięższym bijakiem tylko jednokrotnie, aby zaobserwować wpływ grubości płyty na postać jej zniszczenia pod wpływem pojedynczego impulsu. Mierzono głębokość krateru w miejscu uderzenia oraz długość i rozwarcie rys na całej powierzchni płyty.

Pozostałe serie płyt uderzano bijakami o wszystkich trzech wymienianych masach, zliczając liczbę uderzeń powodującą całkowite przebicie badanych elementów (por. rys. 4). W kilku przypadkach mierzono też zmianę głębokości krateru po kolejnych uderzeniach. Pomiary głębokości krateru wykonano przy użyciu czujnika zegarowego.



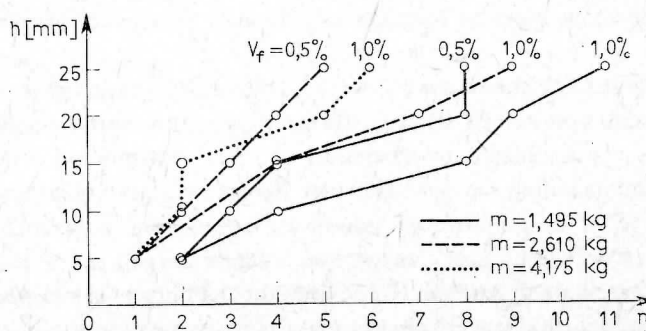
Rys. 4. Przypadek przebicia płyty przez bijak
Fig. 4 The case of slab perforation by missile

3.2. WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

3.2.1. Liczba uderzeń powodujących całkowite przebicie

Dane o liczbie uderzeń powodujących całkowite przebicie płyt zestawiono w tablicy 1 i zilustrowano wykresem zależności tej liczby n od grubości płyt h , pokazanym na rys. 5.

Jak można było przewidywać, wpływ grubości płyty na liczbę uderzeń powodujących ich przebicie okazał się bardzo istotny. Różnice w kształtach wykresów $n-h$ wynikają



Rys. 5. Wykres zależności liczby uderzeń potrzebnych do przebicia płyt n od grubości płyt h
Fig. 5 Relationship between number of impacts to failure n and slab thickness h

głównie z niejednorodności materiału, a w szczególności z nierównomiernej dystrybucji włókien w otoczeniu miejsca uderzenia. Stwierdzono również wyraźny wpływ zawartości włókien w materiale płyt na liczbę n . Dwukrotnemu wzrostowi nominalnej zawartości objętościowej włókien (z 0,5% na 1,0%) nie odpowiadał dwukrotny, lecz mniejszy wzrost liczby n przy stosowaniu bijaka o tej samej masie. Wzrost ten zawarty był w granicach $1,3 \div 1,8$.

Energię potrzebną do przebicia każdej płyty można w przybliżeniu oszacować iloczynem liczby uderzeń i wartości energii pojedynczego uderzenia. Oszacowane wartości energii przebicia płyt U_p podano w tablicy 1, z której widać, jak wyraźny jest wpływ zawartości włókien na energię potrzebną do przebicia.

Dokładniejszą analizę wpływu zawartości objętościowej włókien na liczbę uderzeń i energię, potrzebne do przebicia badanych płyt fibrobetonowych, można przeprowadzić uwzględniając rzeczywistą strukturę uzbrojenia włóknistego w tych płytach na podstawie radiogramów, co stanowić będzie, jak już wspomniano, przedmiot oddzielnego opracowania.

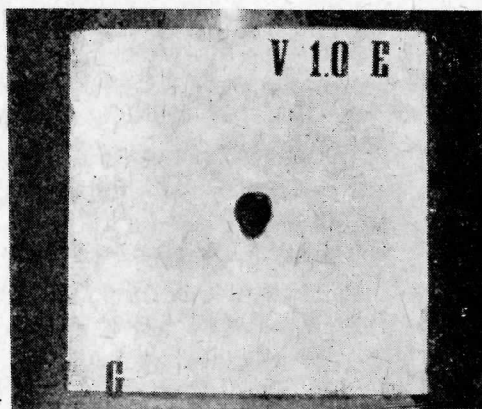
3.2.2. Postać zniszczenia płyt

Zastosowane parametry strukturalne i geometryczne płyt oraz parametry uderzenia pozwoliły na zaobserwowanie różnych postaci zniszczenia: od przebicia bez większych uszkodzeń poza miejscem uderzenia do przebicia z powstaniem wielu rys o znacznej rozwarości, obejmujących swym zasięgiem cały obszar badanych elementów. Kilka charakterystycznych przykładów zniszczenia pokazano na rys. 6 ÷ 9.

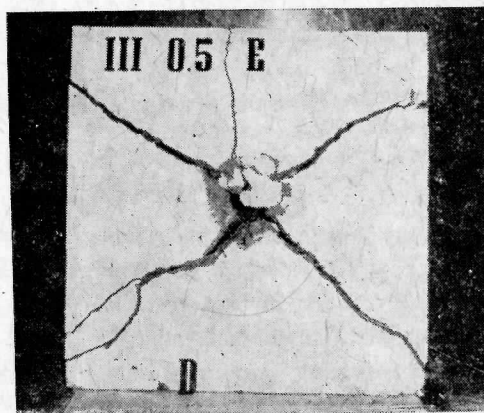
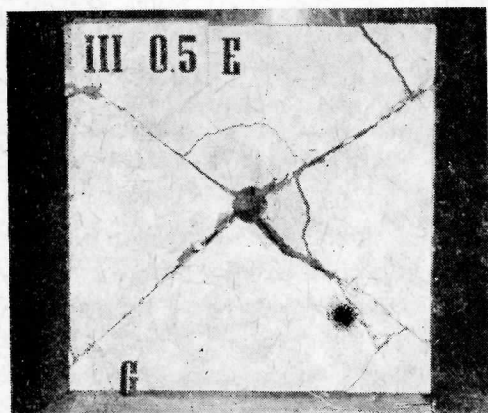
W przypadku płyt o grubości 20 i 25 mm z fibrobetonu o $V_f = 1,0\%$ (por. rys. 6) zniszczenie lokalne następowało wskutek działania sił ścinających. W wyniku kolejnych uderzeń, po wydzieleniu stożkowego klina materiału w otoczeniu miejsca uderzenia ulegał on przesuwaniu i rozkruszaniu przy jednoczesnym wywelekaniu włókien z matrycy. W przypadku płyt o mniejszych grubościach z fibrobetonu o tej samej zawartości włókien zaobserwowano, że powstaniu analogicznego stożka odłamu towarzyszyło występowanie rys na górnych powierzchniach w formie wachlarza wokół miejsca uderzenia (ok. $60 \div 130$ mm od środka płyty); świadczy to o znacznym udziale zginania w mechanizmie lokalnego zniszczenia. Zniszczenie tego rodzaju można określić jako złamanie w otoczeniu miejsca uderzenia wraz ze ścięciem lokalnym w postaci stożkowego klina (por. rys. 8).

W przypadku płyt z fibrobetonu o $V_f = 0,5\%$, niezależnie od ich grubości, stwierdzono zniszczenie w postaci podobnego stożka odłamu przy jednoczesnym zarysowaniu górnej powierzchni w formie wachlarza w odległości ok. $60 \div 180$ mm od środka płyty (por. rys. 7). W miarę zmniejszania się grubości płyt zaobserwowano powstawanie wielokrotnych wachlarzy rys, w coraz większej odległości od miejsca uderzenia. W przypadku najcieńszych płyt ($h = 5$ mm) zasięg zarysowań wachlarzowych był wyraźnie największy, osiągając w niektórych przypadkach $1/3$ rozpiętości badanych elementów (por. rys. 9). Trudno zatem jednoznacznie stwierdzić, czy efekt ten można jeszcze zaliczyć do lokalnych czy raczej będących następstwem propagacji fal zaburzeń.

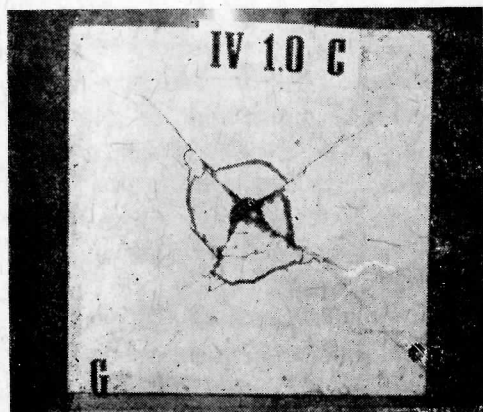
Oddzielenie na drodze analitycznej efektów lokalnych od efektów spowodowanych



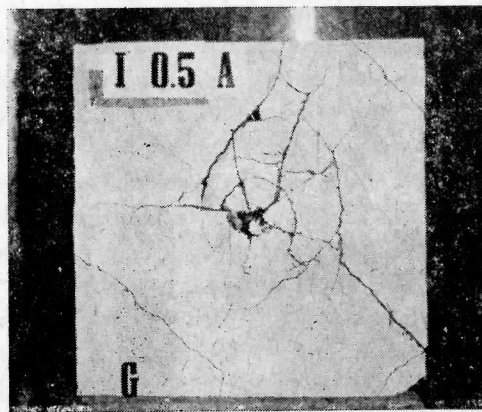
Rys. 6. Postać zniszczenia płyty V 1,0 E; a) górna powierzchnia, b) dolna powierzchnia
Fig. 6 Failure mode of slab V 1.0 E; a) front face, b) back face



Rys. 7. Postać zniszczenia płyty III 0,5 E; a) górna powierzchnia, b) dolna powierzchnia
Fig. 7 Failure mode of slab III 0.5 E; a) front face, b) back face



Rys. 8. Postać zniszczenia płyty IV 1,0 C (pokazano górną powierzchnię)
Fig. 8 Failure mode of slab IV 1.0 C (front face)



Rys. 9. Postać zniszczenia płyty I 0,5 A (pokazano górną powierzchnię)
Fig. 9 Failure mode of slab I 0.5 A (front face)

zjawiskami falowymi należy do najtrudniejszych zagadnień badawczych dynamiki. Wymaga ono rozwinięcia odpowiednich badań i powinno być przedmiotem dalszych prac eksperymentalnych i teoretycznych. Obecnie nie istnieje spójna teoria obejmująca łącznie oba wymienione rodzaje efektów.

Przebiciu towarzyszyło powstanie rys, biegnących od środka płyty ku narożom i krawędziom. W zależności od grubości płyty rysy te były bądź powierzchniowe, uwidaczniające się głównie na spodzie badanych elementów, bądź głębokość ich była większa i w skrajnych przypadkach odpowiadała całej grubości płyt. Zawartość objętościowa włókien wpływała wyraźnie na proces propagacji opisanych rys w miarę kolejnych uderzeń; rozwój rys w przypadku płyt zawierających 1,0% włókien był znacznie wolniejszy niż w płytach o dwukrotnie mniejszej ilości włókien. Stwierdzono także, że wzrostowi grubości płyt odpowiadało zmniejszenie rozwartości i długości tych rys.

Nie zaobserwowano w zasadzie występowania zjawisk *scabbingu* i *spallingu* (por. rozdz. 2). Zauważono jedynie odkruszenie drobnych cząstek materiału o rozmiarach zbliżonych do ziaren kruszywa.

Wszystkie bez wyjątku płyty zachowywały mimo zarysowań spoistość kształtu i nie rozpadały się.

Nie zaobserwowano zrywania włókien, lecz ich wywlekanie z matrycy.

3.2.3. Efekty pojedynczego uderzenia

Efekty pojedynczego uderzenia były obserwowane tylko przy stosowaniu bijaków o masach 4,175 kg i 2,610 kg. Wskutek pojedynczego uderzenia wszystkie płyty o grubości 5 mm oraz jedna płyta o grubości 10 mm zostały przebite. W pozostałych przypadkach stwierdzono następujące efekty:

- utworzenie krateru w miejscu uderzenia w kształcie odpowiadającym kulistemu zakończeniu bijaka,
- zarysowania dolnej powierzchni płyt w formie rys przebiegających w kierunkach przekątnych oraz rysy obwodowej wokół miejsca uderzenia, będącej śladem kształtowania się stożka ścinania.

Ze względu na rozkruszania materiału na dnie krateru dokładny pomiar jego rzeczywistej głębokości był utrudniony. Pomiarów tych dokonano za pomocą czujnika zegarowego o dokładności 0,01 mm. Zaobserwowano tendencję zmniejszania się głębokości krateru wraz ze wzrostem grubości płyt, co zilustrowano na rys. 10. Można ponadto zauważyć, że większej masie bijaka odpowiadała większa głębokość krateru, natomiast nie można jednoznacznie stwierdzić, aby na głębokość tę wpływała zawartość włókien w płycie. Niemniej przy uderzeniu bijakiem cięższym, we wszystkich przypadkach głębokość krateru była mniejsza, gdy zawartość włókien wynosiła 1,0%.

W przypadku płyt serii I zmierzone wielkości trwałego ugięcia w środku płyty (w_0) oraz powierzchni zarysowania płyt (S_r) podano w tablicy 2. Powierzchnia zarysowania płyty, rozumiana jako suma iloczynów długości i rozwartości wszystkich widocznych rys, określona została na podstawie pomiarów rozwarcia każdej rysy przy podziale jej długości na odcinki mniejsze niż 40 mm. Jak można było przypuszczać, stwierdzono istotny wpływ grubości płyt na wielkości w_0 i S_r .

Rys. 10. Wykres zależności głębokości krateru z_c od grubości płyty h

Fig. 10 Relationship between crater depth z_c and slab thickness h

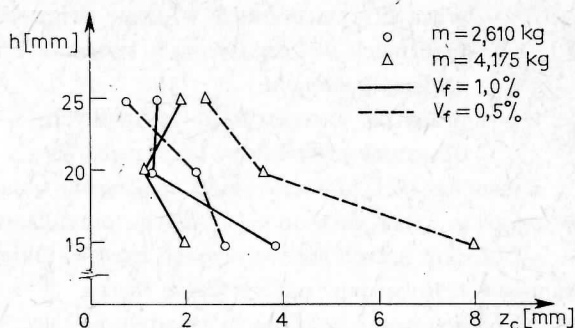


Tabela 2

Efekty pojedynczego uderzenia w płyty fibrobetonowe serii I

($V_f = 0,5\%$, $U = 104$ J)

Effects of a single impact on SFRC slabs of series I

($V_f = 0,5\%$, $U = 104$ J)

Grubość płyty m	z_c mm	w_o mm	S_r $m^2 \cdot 10^{-4}$
0,015	8,0	35,0	41,42
0,020	3,6	18,0	18,79
0,025	2,4	1,4	11,66

4. ANALIZA TEORETYCZNA EFEKTÓW JEDNOKROTNEGO UDERZENIA W PŁYTY FIBROBETONOWE

W praktyce inżynierskiej stosowane są wzory empiryczne pozwalające na określenie minimalnych grubości elementów konstrukcji z uwagi na dopuszczalny stopień uszkodzeń lokalnych spowodowanych działaniem uderzeń. Wzory dotyczące elementów żelbetowych znaleźć można m.in. w pracach KENNEDY'EGO [12], SLITERA [13] lub CHANGA, [14]. W odniesieniu do elementów fibrobetonowych nie sformułowano jednak dotychczas odpowiednich wzorów empirycznych.

W związku z tym dokonano próby zbudowania adekwatnego modelu teoretycznego, dążąc jednocześnie do uzyskania możliwie prostego ujęcia zależności efektów uderzenia od charakteryzujących go parametrów oraz od cech fizycznych materiału płyt. Model ten oparty jest na wielu świadomie przyjętych założeniach upraszczających, co wynika zarówno ze złożoności występujących zjawisk, jak i ze wspomnianej dążności do uzyskania zgodnego z wynikami doświadczeń, lecz prostego ujęcia matematycznego.

Za podstawę przyjęto równanie równowagi energii układu bijak-płyta, zapisane następująco:

$$(4.1) \quad U = W_t + W_g,$$

gdzie:

U — energia uderzenia bijaka przekazana płycie,

W_l — praca sił wewnętrznych w płycie związanych z powstaniem widocznych trwałych deformacji w bezpośrednim sąsiedztwie miejsca uderzenia, zwanych *odkształceniami lokalnymi*,

W_g — praca sił wewnętrznych związanych z widocznym zarysowaniem płyty poza obszarem odkształceń lokalnych.

Równanie (4.1) dotyczy stanu spoczynku układu po zakończeniu ruchu drgającego. W związku z tym jest ono od początku przybliżone, ponieważ nie uwzględniono w nim:

— udziału innych form dysypacji energii, takich jak np. niewidoczne pęknięcie płyty, tłumienie fibrobetonu, odkształcenie bijaka,

— wzajemnego uzależnienia składników pracy sił wewnętrznych w płycie.

Z badań statycznych wynika, że powstawaniu i propagacji rys w fibrobetonie towarzyszą zjawiska, które można sprowadzić do następujących podstawowych procesów (BRANDT [11], JAYATILAKA [19]):

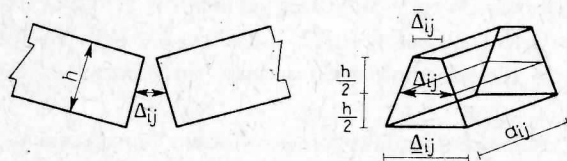
- odkształcenie sprężyste elementu,
- wytworzenie nowej powierzchni w postaci rysy,
- odspajanie włókien od matrycy,
- wywleknięcie włókien z matrycy wzdłuż ich osi,
- przewleknięcie przez rysę włókien ułożonych względem niej ukośnie.

Praca sił wewnętrznych, związanych z powstawaniem i rozwarciem rys w elemencie fibrobetonowym, obliczana jest przez superpozycję składowych odpowiadających poszczególnym procesom.

Wyznaczenie wielkości W_g oparto na następujących założeniach:

— układ i kształt rzeczywistych rys w płycie można aproksymować liniowym układem rys o prostoliniowych krawędziach i o osi prostopadłej do środkowej powierzchni płyty (rys. 11),

— niepełną efektywność włókien w kompozycie w przypadku płaskiego układu włókien, tzn. typu 2D, można uwzględnić liczbowym współczynnikiem $\eta = 0,637$ (zgodnie z propozycją KASPERKIEWICZA [20]).



$$S_r = \sum_{j=1}^r \sum_{i=1}^t \Delta_{ij} \alpha_{ij}$$

$$\Delta_{ij} = \frac{1}{2} (\bar{\Delta}_{ij} + \underline{\Delta}_{ij})$$

Rys. 11. Model rysy w przekroju płyty (r — liczba rys, $j = 1, h, \dots, r$; t — liczba odcinków, na które podzielono każdą rysę, $i = 1, 2, \dots, t$)

Fig. 11 Model of a crack in slab cross-section

Na podstawie pracy BRANDTA [11], otrzymano następujący wzór na pracę sił wewnętrznych związanych z zarysowaniem płyty poza obszarem odkształceń lokalnych

$$(4.2) \quad W_g = \frac{1}{\pi} \eta V_f \left(\frac{2l}{d} \tau_f + \theta f_f' \right) h S_r,$$

w którym uwzględniono jedynie składowe odpowiadające procesom wywleknięcia włókien wzdłuż ich osi oraz przewleknięcia włókien ułożonych ukośnie. Jak wynika z badań, udział

pozostałych składników jest znacznie mniejszy. W powyższym wzorze poszczególne symbole oznaczają:

- η — współczynnik efektywności włókien równy 0,637 w przypadku płaskiego układu włókien uzbrojenia typu 2D,
- V_f — procentowa zawartość objętościowa włókien w fibrobetonie,
- l — długość włókna,
- d — średnica włókna,
- τ_f — średnia przyczepność włókien do matrycy,
- θ — średni kąt nachylenia włókna względem krawędzi rysy,
- f_f — granica plastyczności stali włókien,
- h — grubość płyty,
- S_r — powierzchnia zarysowania płyty czyli iloczyn rozwartości i długości rysy zsumowany dla wszystkich rys w płycie (rys. 11).

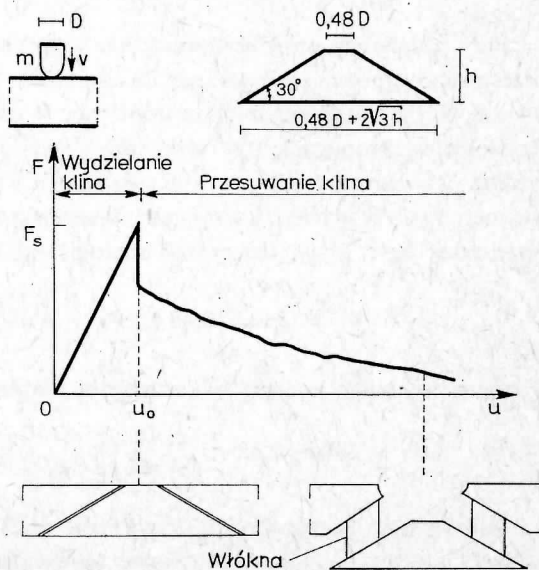
Na podstawie wyników badań własnych założono, że zniszczenia płyty w otoczeniu miejsca uderzenia mogą być rozłożone na dwa podstawowe mechanizmy:

- wydzielenie stożkowego klina materiału, wymagające pracy sił wewnętrznych W_1 ,
- przesuwanie wydzielonego stożkowego klina materiału względem pozostałej części płyty, wymagające pracy W_2 .

W związku z tym

$$(4.3) \quad W_t = W_1 + W_2.$$

Uproszczenia przyjęte przy wyznaczaniu wielkości W_t polegają głównie na traktowaniu wymienionych mechanizmów jako niezależnych i przyjęciu ich superpozycji. Wymienione składowe prace sił wewnętrznych obliczono na podstawie uproszczonego modelu strefy lokalnego zniszczenia płyty, pokazanego na rys. 12. Przyjęta zależność siły F , będącej pionową wypadkową naprężeń działających w obszarze lokalnego zarysowania, od pio-



Rys. 12. Model strefy lokalnego zniszczenia

Fig. 12 Model of local failure zone

nowego przemieszczenia klina materiału u składa się z dwóch części. W pierwszej fazie, odpowiadającej wydzielaniu klina materiału, założono liniową zależność $F(u)$. Maksymalna wartość siły F , odpowiadająca chwili wytworzenia powierzchni granicznej między klinem materiału i pozostałą częścią płyty, określona jest nośnością matrycy betonowej na rozciąganie

$$(4.4) \quad F_s = \frac{2}{\sqrt{3}} f_r S,$$

gdzie:

f_r — wytrzymałość betonu na rozciąganie,

S — powierzchnia boczna wydzielonego klina materiału.

Pracę W_1 oblicza się jako pole pod częścią wykresu $F(u)$ ograniczoną odciętą $u = u_0$

$$(4.5) \quad W_1 = \frac{1}{2} F_s u_0 = \frac{1}{\sqrt{3}} f_r S u_0.$$

Przy pominięciu energii rozproszonej w strefie kontaktowej, można przyjąć, że

$$(4.6) \quad u_0 = z_0,$$

gdzie z_0 oznacza graniczną głębokość krateru, przy której obserwuje się ukośne zarysowanie lokalne płyty przez całą jej grubość. Kształt wydzielonego klina materiału aproksymowano na podstawie obserwacji doświadczalnych kształtem stożka ściętego, pokazanego na rys. 12. Pole powierzchni bocznej stożka wynosi

$$(4.7) \quad S = 2\pi h D \left(0,48 + 1,73 \frac{h}{D} \right),$$

wzór (4.5) zatem przyjmuje postać

$$(4.8) \quad W_1 = \frac{2}{\sqrt{3}} \pi h D \left(0,48 + 1,73 \frac{h}{D} \right) f_r z_0.$$

Przy założonej nieodkształcalności wydzielonego klina zjawiska towarzyszące jego przesuwaniu można sprowadzić do procesów związanych z propagacją ukośnej rysy obwodowej w otoczeniu miejsca uderzenia, wynikających z obecności włókien w matrycy. Rozpatrując propagację tej rysy, uwzględniono jedynie procesy wywlekania włókien wzdłuż ich osi oraz ich przewlekania ukośnie przez rysę. Otrzymany wzór na pracę sił wewnętrznych w płycie, związanych z przesuwaniem stożkowego klina materiału względem pozostałej części płyty, ma postać analogiczną do wzoru (4.2)

$$(4.9) \quad W_2 = 2\pi h D \left(0,48 + 1,73 \frac{h}{D} \right) \eta V_f \left(\frac{2l}{\pi d} \tau_f + 0,5 f_f \right) (z_c - z_0),$$

a zatem całkowita energia odkształcenia lokalnego płyty W_l określona jest następująco

$$(4.10) \quad W_l = 2\pi h D \left(0,48 + 1,73 \frac{h}{D} \right) \left[\frac{1}{\sqrt{3}} f_r z_0 + \eta V_f (z_c - z_0) \left(\frac{2l}{\pi d} \tau_f + 0,5 f_f \right) \right].$$

Niezbędnym komentarzem do wzorów (4.2) i (4.10) jest stwierdzenie, iż występujące w nich parametry wytrzymałościowe materiałów f_r , τ_f oraz f_f powinny być określone

z uwzględnieniem dynamicznego charakteru działania obciążenia. Zgodnie z propozycją HUGHESA [21] wytrzymałość betonu na rozciąganie f_r określono według wzoru:

$$(4.11) \quad f_r = 0,5\lambda f_{zg},$$

gdzie f_{zg} oznacza statyczną wytrzymałość betonu na zginanie, natomiast λ jest współczynnikiem prędkości obciążania (równym 1,0 w przypadku obciążenia statycznego).

Na podstawie wyników badań przyczepności włókien stalowych do betonu przy różnych prędkościach obciążania, przeprowadzonych przez GOKOZA i NAAMANA [22], można stwierdzić, że wielkość sił tarcia między włóknami i matrycą w przypadku włókien gładkich nie zależy od prędkości obciążania. Do podobnego wniosku doszli VOS i REINHARDT [23], badając przyczepność gładkich prętów zbrojeniowych do betonu. Zatem w niniejszej analizie przyjęto wartość średniego naprężenia przyczepności włókien do matrycy betonowej τ_f określoną z badań statycznych. Granicę plastyczności stali włókien f_f aproksymowano wartością otrzymaną z badań statycznych, oczekując, że wielkość popełnionego błędu nie przekroczy kilku procent. Przypuszczenie to opiera się na wynikach badań doświadczalnych stali przy różnych prędkościach obciążania, przytoczonych przez SUARISA i SHAHA [24]. Należy ponadto zauważyć, że w przypadku rozważanej płyty fibrobetonowej trudno ustalić prędkość narastania obciążenia w różnych jej obszarach.

Sprawdzenia adekwatności opisanego modelu obliczeniowego dokonano z uwagi na możliwość wyznaczenia minimalnej grubości płyty fibrobetonowej h_p , która przy danej energii jednokrotnego uderzenia nie ulegnie przebiciu. Założono, że przebiciu płyty odpowiada przesunięcie nieodkształconego stożka odłamu o odcinek $0,25 l$, tj. wywleczeniu wszystkich włókien w otoczeniu miejsca uderzenia. W miejsce $(z_c - z_0)$ we wzorze (4.10) podstawiono więc wielkość $0,25 l$. Po przekształceniu równania (4.1), którego składniki określone są wzorami (4.2), (4.10) i (4.11), otrzymuje się wzór na h_p w postaci pierwiastka równania kwadratowego. Dążąc do uzyskania możliwie prostego, łatwego do stosowania ujęcia tego wzoru, aproksymowano go następującą zależnością liniową:

$$(4.12) \quad h_p = \frac{U}{D \left[\frac{1}{\sqrt{3}} \pi f_{zg} z_0 + \eta V_f l \left(\kappa_1 \frac{l}{D} \tau_f + \kappa_2 f_f \right) \right]},$$

gdzie $U = 0,5 mv^2$ jest nominalną energią uderzenia bijaka o masie m z prędkością v .

We wzorze (4.12) występują bezwymiarowe parametry otrzymane z przekształceń algebraicznych

$$(4.13) \quad \kappa_1 = 1 + \frac{2}{\pi} p, \quad \kappa_2 = \frac{1}{4} (\pi + p),$$

gdzie

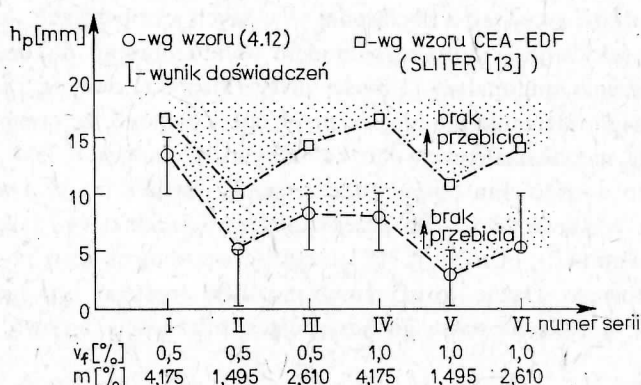
$$(4.14) \quad p = \frac{S_r}{lD}.$$

Wartość parametru p zależy od powierzchni zarysowania płyty poza obszarem lokalnego zniszczenia. W ramach przyjętego modelu obliczeniowego wielkość h_p można zatem określić przy założeniu spodziewanej powierzchni zarysowania płyty.

Obliczenia według wzoru (4.12) przeprowadzono w przypadku wszystkich serii badanych płyt, przyjmując wielkości liczbowe pochodzące z badań własnych, jak również

z innych dostępnych źródeł. Wielkości f_{zg} podane w tablicy 1 wykorzystano do wyznaczenia f_r według wzoru (4.11) przy $\lambda = 1, 2$. Na podstawie tablicy 1 przyjęto również wielkości V_f i U , natomiast na podstawie pomiarów przyjęto: $l = 40 \cdot 10^{-3}$ m, $d = 0,4 \cdot 10^{-3}$ m, $D = 0,05$ m, $f_f = 677$ MPa, $S_r = 25 \cdot 10^{-4}$ m². Założono ponadto: $z_0 = 0,0025$ m oraz $\eta = 0,637$ i $\theta = 0,25$. Z doświadczeń BURAKIEWICZA [25], który badał przyczepność włókien do matrycy betonowej, stosując takie same materiały jak w badaniach opisanych w poprzednim rozdziale, przyjęto $\tau_f = 0,6$ MPa.

Wyniki obliczeń zestawiono na rys. 13, gdzie podano również wartości h określone ze wzoru (4.12) zbudowanego na podstawie zaproponowanego modelu obliczeniowego; jak widać, pozwala on na uzyskanie rezultatów w zupełności zgodnych z obserwacjami doświadczalnymi. Należy dodać, iż w rozważanym zakresie zmienności parametrów wzór ten jest dobrą aproksymacją dokładnego wzoru określającego h_p w postaci pierwiastka równania (4.1). Warto zauważyć, że postać wzoru (4.12) jest ogólniejsza od znanych wzorów dotyczących płyt żelbetowych (por. prace KENNEDY'EGO [12], ŚLITERA [13] i CHANGA [14]), uwzględnia bowiem efekty występujące poza strefą lokalną, będące następstwem propagacji fal zaburzeń.



Rys. 13. Zestawienie teoretycznych i doświadczalnych wielkości h_p uzyskanych w przypadku badanych serii płyt (wzór CEA-EDF: $h = 0,82 f_b^{-0,375} q^{-0,125} (m/D)^{0,5} v^{0,75}$, gdzie q oznacza gęstość żelbetu w kg/m³; zakres stosowania: $20 \text{ kg} < m < 300 \text{ kg}$, $0,34 < h/D < 4,20$, stopień zbrojenia głównego $0,8 \div 1,5 \%$ w każdą stronę)

Fig. 13. Comparison of theoretical and experimental values of perforation thickness h_p for all series of tested slabs.

Z rezultatów obliczeń zestawionych na rys. 13 wynika ważne, choć wymagające dalszych uściśleń spostrzeżenie, że płyty fibrobetonowe poddane jednokrotnemu uderzeniu mogą ze względu na niebezpieczeństwo ich przebicia być cieńsze od płyt żelbetowych o stopniu uzbrojenia odpowiadającego zakresowi empirycznego wzoru CEA-EDF⁵⁾ cytowanego przez ŚLITERA [13].

Dyskusyjne jest przyjęcie wielkości współczynnika dynamicznego $\lambda = 1, 2$ (ze względu na brak danych doświadczalnych w tym zakresie). Z dotychczasowych prac dotyczących badania betonu i fibrobetonu pod uderzeniami (por. np. HUGHES, WATSON [26] i HUGHES,

⁵⁾ CEA — Commissariat à l'Energie Atomique. EDF — Electricité de France.

BEEBY [28]) wynika, że w przypadku prędkości uderzenia stosowanej w opisywanych tu badaniach uzasadnione jest przyjęcie $\lambda = 1,2 \div 1,3$. Jak wykazano, podstawienie do wzoru (4.12) wartości $\lambda = 1,2$ dobrze opisuje rezultaty eksperymentalne.

Mimo wielu uproszczeń, zaproponowany model ma pewne cechy nowości, polegające na wprowadzeniu charakterystyki strefy lokalnej $F-u$ wraz z parametrem u_0 (por. rys. 12) oraz parametru S_r .

5. WNIOSKI I KIERUNKI DALSZYCH BADAŃ

Na podstawie wyników przeprowadzonych badań można sformułować następujące wnioski.

1. Zastosowane parametry strukturalne i geometryczne płyt oraz parametry uderzenia pozwoliły na zaobserwowanie różnych postaci zniszczenia: od „czystego” przebicia bez większych uszkodzeń poza miejscem uderzenia do przebicia z powstaniem wielu rys powierzchniowych o znacznej rozwartości.

2. Zniszczenie płyt następowało w konsekwencji wydzielania stożkowego klina materiału w bezpośrednim sąsiedztwie miejsca uderzenia oraz jego przesuwania (przy jednoczesnym rozkruszaniu) względem pozostałej części płyty. W przypadku płyt z fibrobetonu o $V_f = 0,5\%$ niezależnie od ich grubości oraz o $V_f = 1,0\%$ o mniejszych grubościach zaobserwowano dodatkowo pojawianie się wachlarza rys na górnej powierzchni płyty w odległości $60 \div 180$ mm od środka płyty.

3. Zniszczeniu lokalnemu towarzyszyło powstanie rys powierzchniowych biegnących od środka płyty ku narożom i krawędziom. Zawartość objętościowa włókien wpływała wyraźnie na przebieg procesu propagacji rys; narastanie rys w przypadku płyt o zawartości włókien $1,0\%$ było znacznie wolniejsze niż w przypadku płyt mających dwukrotnie mniejszą ilość włókien, tj. $0,5\%$.

4. Stwierdzono istotny wpływ grubości płyt na wielkości zarysowań powierzchniowych towarzyszących przebicciu; wzrostowi grubości płyty odpowiadało wyraźne zmniejszenie rozwartości i długości rysy.

5. Na podstawie obliczania kolejnych uderzeń aż do całkowitego przebicia można sformułować uwagę, że dwukrotnemu wzrostowi zawartości włókien (z $0,5\%$ na $1,0\%$) nie odpowiadał dwukrotny, lecz mniejszy wzrost zawarty w granicach $1,3 \div 1,8$.

6. Stwierdzono następujące efekty pojedynczego uderzenia w płyty fibrobetonowe:

— utworzenie krateru w miejscu uderzenia o kształcie odpowiadającym kulistemu zakończeniu bijaka,

— zarysowanie dolnej powierzchni płyty od miejsca uderzenia w kierunkach krawędzi i naroży, oraz powstanie rysy obwodowej wokół miejsca uderzenia, będącej śladem formowania się stożka ścinania.

Niektóre z płyt o mniejszej grubości zostały przebite wskutek pojedynczego uderzenia, przy czym postać zniszczenia odpowiadała zaobserwowanej przy uderzaniu wielokrotnym.

7. Zauważono tendencję zmniejszania się głębokości krateru wraz ze wzrostem grubości płyt, jak również ze zmniejszeniem się masy bijaka. Nie stwierdzono jednoznacznego wpływu zawartości objętościowej włókien w płytach na głębokość krateru.

8. Zaproponowany uproszczony model obliczeniowy dotyczący efektów pojedynczego uderzenia w płyty fibrobetonowe jest dobrą aproksymacją jakościowego i ilościowego charakteru obserwowanych zjawisk.

Istnieje potrzeba prowadzenia dalszych prac w tej dziedzinie. Pierwszym etapem badań, które autorzy już podjęli, jest analiza rzeczywistej struktury uzbrojenia włóknistego w płytach określona na podstawie sporządzonych radiogramów. W ten sposób zweryfikować można podane obserwacje doświadczalne oraz zaproponowany model obliczeniowy. Przewidywane są następujące kierunki dalszych prac badawczych:

— rozszerzenie zakresu zmienności badanych parametrów, przede wszystkim wymiarów, kształtu i masy bijaka, prędkości uderzenia oraz parametrów strukturalnych i geometrycznych płyt,

— określenie charakteru zjawisk w bezpośrednim sąsiedztwie miejsca uderzenia przez pomiary odkształceń płyt oraz zmienności naprężeń kontaktowych występujących w miejscu zetknięcia bijaka z płytą,

— poznanie wpływu mikropeknięcia i tłumienia na przestrzenny stan odkształcenia dynamicznego płyt.

Podjęcie wymienionych tematów pozwoli na bardziej wnikliwe poznanie zjawisk występujących przy udarowym obciążaniu płyt fibrobetonowych, co jest koniecznym warunkiem uzyskania nowych danych doświadczalnych do zweryfikowania dotychczasowych i sformułowania następnych, doskonalszych modeli obliczeniowych.

LITERATURA CYTOWANA W TEKŚCIE

1. A. M. NEVILLE, *Właściwości betonu*, (tłum. z ang.), Arkady, Warszawa 1977
2. W. RADOMSKI, *Badania betonu pod obciążeniami uderzeniowymi*, PWN, Warszawa—Łódź 1978
3. W. RADOMSKI, *Właściwości fibrobetonu pod obciążeniami uderzeniowymi*, Wydawnictwo Instytutu Dróg i Mostów Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1982
4. *Concrete Structures under Impact and Impulsive Loading*. RILEM, CEB, IABSE, IASS — Interassociation Symposium, Berlin (West), June 2-4, 1982
5. *Trans. 5-th Intern. Conf. on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT-5)*, Berlin 1979, Vol. J
6. *Trans. 6-th Intern. Conf. on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT-6)* Paris 1981, Vol. J
7. *Trans. 7-th Intern. Conf. on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT-7)*, Chicago 1983, Vol. J
8. *Mechanika kompozytów betonopodobnych*, red. J. KASPERKIEWICZ, Ossolineum, Wrocław 1983
9. *Wybrane zagadnienia z mechaniki kompozytów*, red. A. M. BRANDT, Wyd. Politechniki Białostockiej, Białystok 1982
10. ACI Committe 544, *State of the art report on fiber reinforced concrete*, Concrete International, 4, 5, 1980, 9-30
11. A. M. BRANT, *O składowych energii zniszczenia w zginanych elementach fibrobetonowych*, Arch. Inż. Ląd., 28, 3-4, 1982, 271-279
12. R. P. KENNEDY, *A review of procedures for the analysis and design of concrete structures to resist missile impact effects*, Nucl. Engrg. Des., 37 2, 1976, 183-203
13. G. E. SLITER, *Assesment of empirical concrete impact formulas*, Jour. Struct. Div., ASCE, 106 ST 5, 1980, 1023-1045
14. W. S. CHANG, *Impact of solid missiles on concrete barriers*, Jour. Struct. Div., ASCE, 107 ST2 1981, 257-271

15. F. STANGENBERG, P. BUTTMANN, *Impact testing of steel fibre reinforced concrete slabs with liner*, w [5], J. 7/5
16. J. R. CLIFTON, L. I. KNAB, *Cumulative damage of reinforced concrete subjected to repeated impact*, Cem. Conc. Res., 12 No 3, 1982, 359-370
17. J. R. CLIFTON, L. I. KNAB, *Impact testing of concrete*, Cem. Concr. Res., 13 4, 1983, 541-548
18. N. I. FATTUHI, *Toughness of thin slabs under flexural or impact loading*, Int. J. Cement Compos., 5, 2, 1983, 121-126
19. A. DE S. JAYATILAKA, *Fracture of engineering brittle materials*, Applied Science Publ., London 1979
20. J. KASPERKIEWICZ, *Struktura uzbrojenia w kompozytach z włóknami rozproszonymi*, w [8], 211-249
21. G. HUGHES, *Hard missile impact on reinforced concrete*, Nucl. Engrg. Des., 77, 1984, 23-35
22. U. N. GOKOZ, A. E. NAAMAN, *Effect of strain rate on the pull out behaviour of fibres in mortar*, Int. J. Cement Compos., 3, 3, 1981, 187-202
23. E. VOS, H. W. REINHARDT, *Influence of loading rate on bond behaviour of reinforcing steel and prestressing strands*, Matériaux et Constructions, 15, 85, 1982, 3-10
24. W. SUARIS, S. P. SHAH, *Mechanical properties of materials under impact and impulsive loading*, w [4]
25. A. BURAKIEWICZ, *Przyczepność włókien do matrycy w kompozytach fibrobetonowych*, Prace IPPT PAN, 42, 1979
26. B. P. HUGHES, A. J. WATSON, *Compressive strength and ultimate strain of concrete under impact loading*, Mag. Concr. Res., 105 12, 1978, 189-199
27. G. HUGHES, A. W. BEEBY, *Investigation of the effect of impact loading on concrete beams*, The Struct. Eng., 60B, 3 Sept., 1982, 45-52

ИССЛЕДОВАНИЯ ФОРМ РАЗРУШЕНИЯ ФИБРОБЕТОННЫХ ПЛИТ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ УДАРНЫХ НАГРУЗОК

Резюме

Обсуждаются причины возросшего интереса к исследованиям свойств бетона и фибробетона под воздействием ударных нагрузок. Представлены динамические явления в бетонных плитах подверженных ударам. Приведены оригинальные исследования фибробетонных плит постоянных размеров в плане разной толщины. Переменным структурным параметром являлось объемное содержание стальных волокон: 0,5% и 1,0%.

Плиты нагружались недеформируемым копром, падающим с постоянной высоты. Наблюдаемый вид разрушения плит, т.е. формы разрушения поверхности и формы местного разрушения — описаны. На основе теоретического анализа вида разрушения приведена формула для расчета толщины плиты при которой происходит разрушение согласно с результатами экспериментов. Представлены направления дальнейших исследований.

INVESTIGATION OF FAILURE MODE OF FIBRE REINFORCED CONCRETE SLABS LOADED BY IMPACTS

Summary

The reasons for increase of research work on plain and fibre reinforced concrete behaviour due to impact are given. Effects of impact on concrete slabs are described. An original experiment on fibre reinforced concrete slabs of different thicknesses and of different steel content is presented. The slabs were loaded by

hard missiles falling down from a constant height. Observed failure modes of slabs, i.e. surface crack pattern and local damage forms until perforation are described. A theoretical analysis of observed failure modes leads to the proposed formula for perforation thickness, well fitting to experimental results. The scope of further investigation is outlined.

INSTYTUT PODSTAWOWYCH PROBLEMÓW TECHNIKI PAN
WYDZIAŁ INŻYNIERII LĄDOWEJ POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ

Praca wpłynęła do Redakcji 1985.05.20

Akceptowana do druku 1986.01.21

*Uwagi na temat pracy prosimy
przesyłać do Redakcji AIL
do 1987.06.30*