

4.44 — płyty
5.54 — beton żbrojony

Renata Bojanowska

**BADANIE PROCESU NISZCZENIA
PLYT FIBROBETONOWYCH
POD OBCIĄŻENIEM STATYCZNYM
SYMULUJĄCYM DZIAŁANIE
KOŁA POJAZDU NA POMOST**

30 / 1982

P-269



WARSZAWA 1982

ISSN 0208-5658

Praca wpłynęła do Redakcji dnia 4 czerwca 1982 r.

Zarejestrowana pod nr 30/1982



57044



Na prawach rękopisu

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN

Nakład 130 egz. Ark. wyd. 1,5. Ark. druk. 2.

Oddano do drukarni w sierpniu 1982 r.

Nr zamówienia 428/0/82 | Z - 108.

Warszawska Drukarnia Naukowa, Warszawa,
ul. Śniadeckich 8

Renata Bojanowska
Pracownia Pól Odkształceń

BADANIE PROCESU NISZCZENIA PŁYT FIBROBETONOWYCH
POD OBCIĄŻENIEM STATYCZNYM SYMULUJĄCYM DZIAŁANIE
KOŁA POJAZDU NA POMOST

1. Wstęp

Przeprowadzone badania są związane z możliwością zastosowania fibrobetonu w budownictwie mostowym do wykonywania płyt pomostów.

Wiele cech fibrobetonu, jako nowego materiału kompozytowego, jest ciągle jeszcze nieznanymi mimo, że od szeregu lat w licznych ośrodkach prowadzone są badania, przeważnie dotyczące elementów zginanych w postaci belek o przekroju prostokątnym, natomiast niewiele przeprowadzonych badań dotyczyło płyt. Najczęściej zajmowano się wpływem składu mieszanki betonowej / stosunku $\frac{w}{c}$, rodzaju i uziarnienia kruszywa/, rodzaju parametrów geometrycznych i sposobu uporządkowania włókien oraz technologii wykonania elementu na wytrzymałość i odkształcalność fibrobetonu.

W niniejszej pracy zajęto się procesem niszczenia kwadratowych płyt fibrobetonowych, swobodnie podpartych na obwodzie, uzbrojonych stalowymi włóknami rozproszonymi. Płyty obciążano w sposób statyczny siłą skupioną w środku płyty i imitującą koło pojazdu.

2. Przykłady wykonywanych dotychczas badań elementów w postaci płyt fibrobetonowych.

Przeprowadzone dotychczas w ograniczonym zakresie bada-

nia eksperymentalne płyt miały na celu sprawdzenie celowości zastosowań nowego materiału kompozytowego w konkretnych elementach budowlanych.

Jednym z pierwszych zastosowań fibrobetonu na dużą skalę były prefabrykowane płyty 1100 mm x 1100 mm x 63,5 mm, użyte jako pokrycie stropów na ramowej konstrukcji przestrzennej dwukondygnacyjnego parkingu samochodowego przy londyńskim lotnisku Heathrow [1]. Jako matrycę betonową użyto mieszankę o stosunku składników 1:3:1,5 i stosunku $\frac{W}{C} = 0,65$. Uzbrojenie stanowiły cięte włókna stalowe okrągłe, gładkie 0,25 x 25 mm. Aby sprawdzić w jaki sposób płyty zachowują się wobec projektowego obciążenia wynoszącego 9,0 kN przyłożonego na powierzchni 305 mm², poddawano wzrastającemu obciążeniu dwie serie płyt o grubości 500 mm oraz 63,5 mm i różnej zawartości objętościowej włókien 0,3% ; 0,6% ; 0,9% ; 1,2%.

Wyniki badań wykazały, że płyty o grubości 63,5 mm, przy zawartości uzbrojenia 0,9% wykazują wymaganą rezerwę wytrzymałości z współczynnikiem obciążenia 2,8. Płyty o grubości 50 mm i 0,9% uzbrojenia mogłyby przenosić obciążenie projektowe przy współczynniku obciążenia 2,0.

W Polsce przeprowadzono badania płyt fibrobetonowych z włóknem stalowym, w celu zastosowania jako elementów do rekonstrukcji stropodachu hal w Krakowskich Zakładach Betoniar-skich [2, 3].

Płyty miały wymiary 750 mm x 750 mm i grubość zmienną od 14,2 do 25 mm. Wykonane były z mieszanki betonowej o składzie na 1 m³ betonu:

cement portlandzki "350"	-	550 kg
piasek	-	1350 kg
woda	-	308 l

i wskaźniku $\frac{W}{C} = 0,55$. Uzbrojenie w ilości 1,5% w stosunku do objętości mieszanki betonowej stanowiły włókna stalowe 0,25 x 25 mm. Elementy badano jako swobodnie podparte na dwóch przeciwległych krawędziach, obciążone statycznie siłą skupioną w środku.

Na podstawie przeprowadzonych badań sformułowano nastę-

pujące wnioski :

- a/ Drobnowymiarowe płyty fibrobetonowe można stosować jako nośne elementy stropów, stropodachów wentylowanych itp., przy optymalnej grubości 20 mm.
- b/ Stan graniczny nośności płyty z dobrą dokładnością można określić traktując jej przekrój jako przekrój betonowy ; rozproszone zbrojenie znacznie polepsza charakterystykę mechaniczną betonu. Nośność płyt zginanych należy sprawdzać z warunku

$$M \leq R_{bz} \times W_f$$

M - moment zginający wywołany działaniem obciążenia zewnętrznego, obliczeniowego,

$R_{bz} = 0,53R_r$ - obliczeniowa wytrzymałość betonu na rozciąganie,

0,53 - współczynnik jednorodności fibrobetonu,

R_r - wytrzymałość betonu na rozciąganie,

$W_f = 0,292 bh^2$ - plastyczny wskaźnik wytrzymałości przekroju dla skrajnych włókien rozciąganych.

- c/ Ugięcia badanych płyt były zbliżone do ugięć obliczonych jak dla przekroju nie zarysowanego.

3. Przygotowanie elementów do badań.

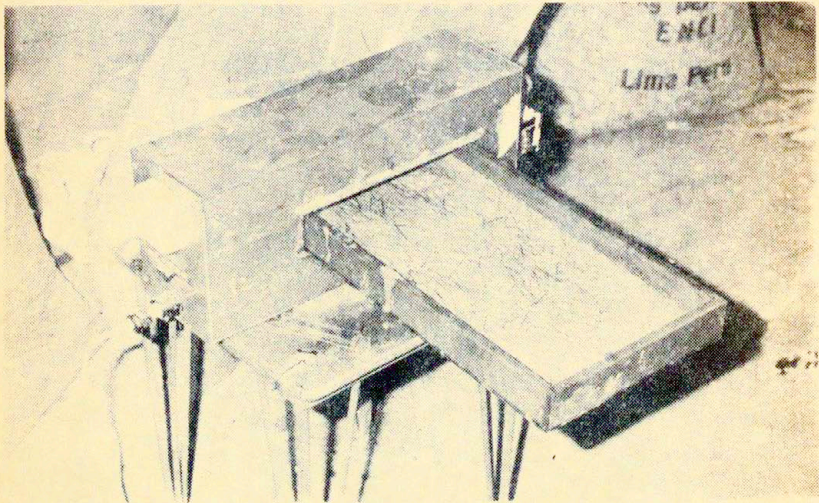
Elementy próbne do badań statycznych wykonano w Instytucie Doświadczalnym Siatkobetonu PW, w kształcie płyt o wymiarach 200 x 200 x 10 mm, fibrobetonu o nominalnej zawartości uzbrojenia $\beta_n = 0,5\%$, 1% i 1,5% i strukturze uzbrojenia typu 1D i 2D oraz z matrycy betonowej /Tablica 1/.

Tablica 1

Grupa	Rodzaj uzbrojenia	Liczba próbek
1	0 %	15
2	0,5% 1D	6
3	0,5% 2D	6
4a	1,0% 1D	3
4b	1,0% 2D	3
5a	1,5% 1D	6
5b	1,5% 2D	6

Opis przygotowania elementów próbnych podano w Załączniku.

Aby ukierunkować uzbrojenie w płytach tzn. uzyskać strukturę uzbrojenia typu 1D zaprojektowano i wykonano urządzenie linearyzujące, wytwarzające pole magnetyczne / Rys.1/.



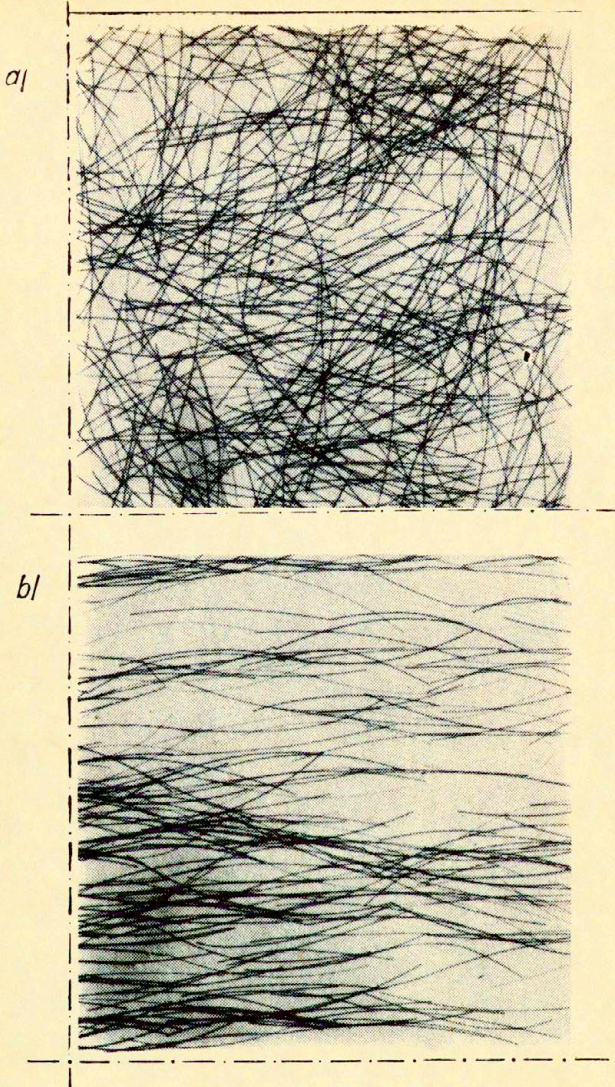
Rys.1. Urządzenie do linearyzacji uzbrojenia

W tekstolitowej obudowie urządzenia wykonany jest prostokątny otwór o wymiarach 230 x 50 mm, przez który przesuwana jest forma ze świeżym fibrobetonem.

Fibrobeton poddawany jest działaniu pola magnetycznego wytwarzanego w wyniku przepływu prądu o natężeniu 10 A przez 2 cewki mające po 4500 zwojów znajdujące się wewnątrz obudowy i równoczesnej wibracji. Urządzenie zasilane jest prądem elektrycznym z sieci miejskiej.

W celu określenia rzeczywistego rozkładu włókien w badanych elementach zastosowano metodę fotografii rentgenowskiej; przykładowe zdjęcia pokazano na rys. 2. Okazuje się, że próbki poddane działaniu pola magnetycznego wykazały układ włókien zbliżony do 1D przy zawartości włókien $\beta_n = 0,5\%$. Jednak nie

wszystkie włókna ustawiły się równoległe podczas linearyzacji. Widać wyraźnie zakłócenie układu przy brzegach form. Wystąpiło też zjawisko wyciągania włókien ku skrajnym brzegom wzdłuż formy, powodujące nierównomierność rozmieszczenia uporządkowanych włókien. Najwięcej pojawia się ich przy zewnętrznych, krótszych krawędziach form. Przy zawartości włókien $\beta_n = 1\%$ i $\beta_n = 1,5\%$ efekt ukierunkowania był niewielki. Z tego powodu próbki w grupach 4a i 4b oraz 5a i 5b /tablica 1/ traktowano dalej łącznie.

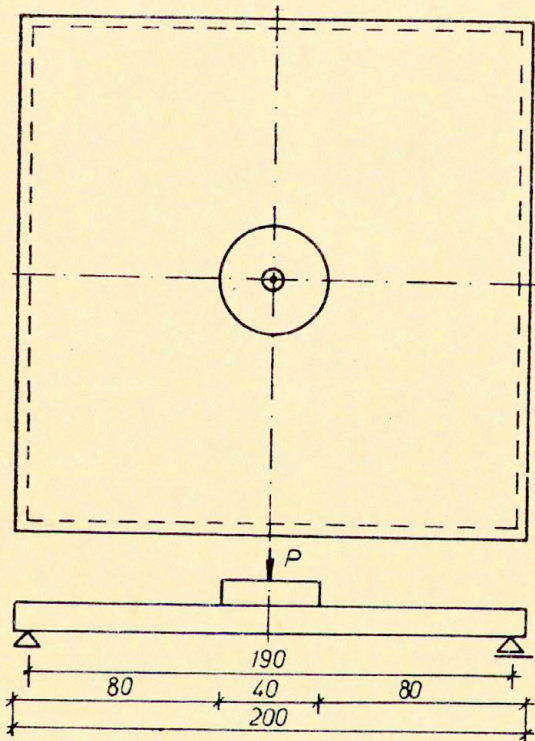


Rys.2. Rentgenogram uzbrojenia w płytach fibrobetonowych 1/4 płyty kwadratowej/: a/ uzbrojenie równomiernie rozproszone dwukierunkowo / $2D \beta_n = 1,5\%$ /, b/ uzbrojenie zliniarzowane jednokierunkowo / $1D, \beta_n = 0,5\%$ /.

4. Opis badań i pomiarów.

Badania statyczne płyt wykonano w IPPT PAN w Warszawie, w prasie wytrzymałościowej typu Lipsk.

Program obejmował badanie zależności obciążenia P przenieszonego przez płytę od ugięcia u i analizę postaci zniszczenia.

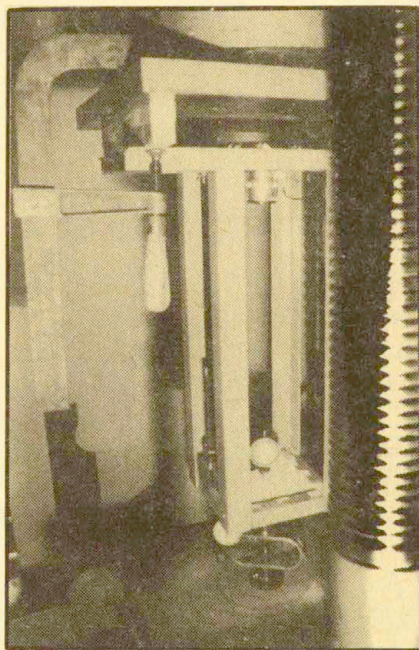


Rys.3. Schemat podparcia i obciążenia płyty.

Płyty oparte były na obwodzie za pośrednictwem czterech wałeczków z tworzywa plastycznego, zapewniających równomierny docisk do ramy stalowej konstrukcji wsporczej. Naroża przymocowane były czterema śrubami, aby wyeliminować efekt ich odrywania podczas obciążania w prasie wytrzymałościowej.

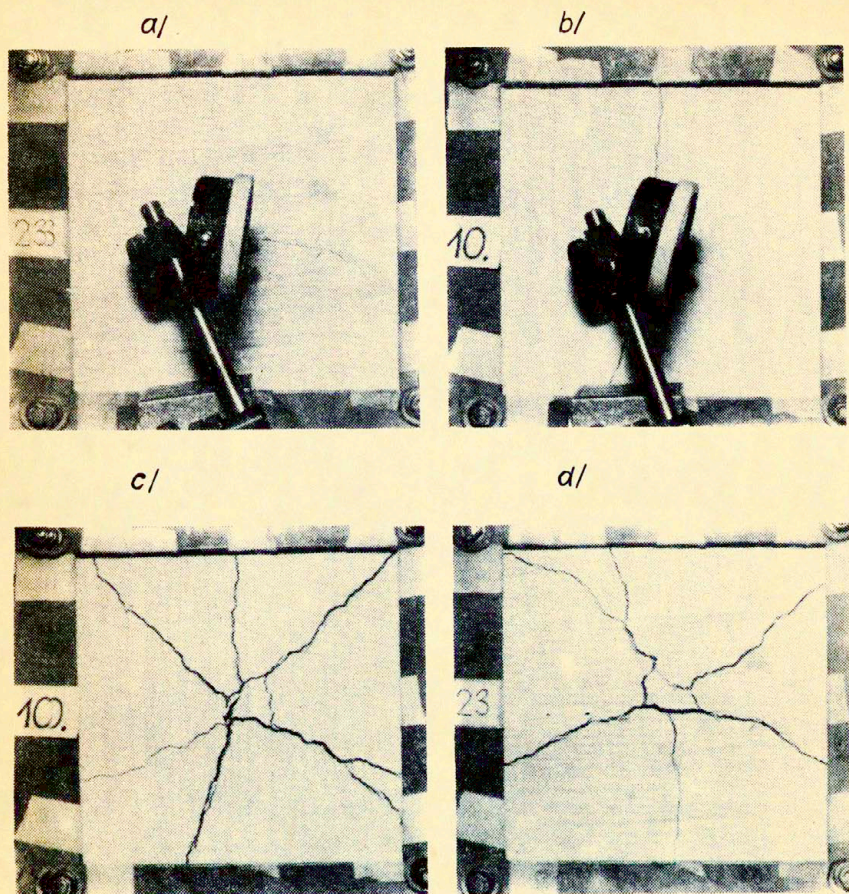
W środku płyty, przez stalowy walec o średnicy ϕ 40 mm, za pośrednictwem gumowej podkładki, przekazywano statycznie wzrastające obciążenie aż do zniszczenia próbki. W trakcie zwiększania obciążenia fotografowano kolejne etapy niszczenia.

Wartość siły odczytywano na siłomierzu kontrolnym, o udźwigu do 5000 N. Najmniejsze odczytywane wartości sił P odpowiadały wzrostom ugięcia u o 0,20 mm. Ugięcie mierzono czujnikiem zegarowym o zakresie do 10 mm, z dokładnością do 0,01mm.



Rys.4. Widok stanowiska pomiarowego.

Wyniki badań uzyskano w postaci fotografii ^azrysowanych płyt w różnych fazach procesu niszczenia /Rys.5/ oraz wykresów ugięć w funkcji obciążenia /Rys.6/.

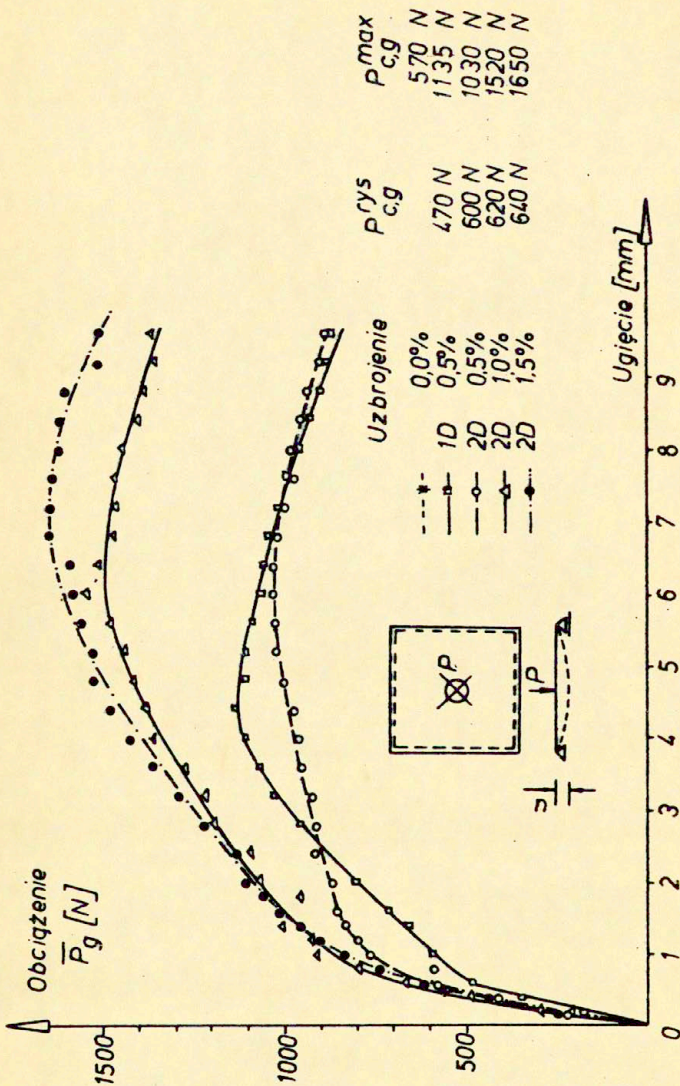


Rys. 5. Postać niszczenia płyt fibrobetonowych na powierzchni rozciąganej; widać wpływ linearyzacji uzbrojenia na początkową postać zarysowania.

a/ $\beta = 0,5\%$; 2D; $P = 895 \text{ N}$, $u = 3,0 \text{ mm}$. Początkowe ryby rozprzestrzeniają się w różnych kierunkach od środka obciążenia.

b/ $\beta_n = 0,5\%$, 1D; $P = 959 \text{ N}$, $u = 3,0 \text{ mm}$. W układzie zlinearyzowanym początkowa rysa propaguje się wzdłuż włókien.

c/ i d/ Końcowy obraz zniszczenia w układach 2D i 1D jest zbliżony.



Rys.5. Wykresy ugięć płyt w funkcji obciążenia P /u/.Każy punkt odpowiada średniej dla wszystkich płyt w danej grupie.

4.1. Badanie dodatkowe.

W celu określenia modułu Younga i odkształcalności materiału z nie zarysowanych fragmentów płytek pozostałych po badaniu wycięto beleczki o wymiarach 80 x 30 x 10 mm. Beleczki z naklejonymi na powierzchni tensometrami poddane były zginaniu dwiema siłami skupionymi w prasie wytrzymałościowej po upływie roku od zakończenia głównych badań. Na podstawie uzyskanych w ten sposób wykresów zależności naprężeń od odkształceń określono w przybliżeniu moduł Younga w każdej z badanych grup beleczek odpowiadającej grupie płyt.

Dla próbek wykonanych z matrycy nieuzbrojonej oraz dla próbek o najmniejszym stopniu uzbrojenia $\beta_n = 0,5\%$ otrzymano następujące wyniki /tablica 2/.

Tablica 2.

Uzbrojenie	E_{exp} [MPa]
0 %	250 000
0,5% 1 D	260 000
0,5 % 2 D	325 000

W pozostałych grupach otrzymano wyniki różniące się od powyższych o rząd wielkości, co mogło być spowodowane istnieniem wewnętrznych rys w materiale powstałych podczas zginania płyt.

Określono także graniczną odkształcalność kompozytu przy rozciąganiu $\epsilon_{ct} = 313 \times 10^{-6}$ oraz przy ścisaniu $\epsilon^u = 300 \times 10^{-6}$, odpowiadające odkształcalności matrycy tuż przed^{cc} zniszczeniem.

5. Analiza wyników.

5.1. Układ i zawartość procentowa uzbrojenia w płytach a proces ich niszczenia.

Postać niszczenia płyt o układzie 2D nie zależała od zawartości włókien. Rysy pojawiały się ukośnie od środka płytki ku narożom i krawędziom. Natomiast w układzie 1D, pierwsza rysa przebie-

gała zawsze od środka przez całą długość płyty, równoległe do kierunku włókien. Następnie powstawały i propagowały się rysy ukośne, podobnie jak w przypadku 2D aż do utraty zdolności do przenoszenia zwiększonego obciążenia. Proces zniszczenia przykładowych płyt o układzie uzbrojenia-1D i 2D obrazują fotografie na rys.5.

W trakcie obciążania badanych płyt i rozszerzania się rys słychać było pojedyncze trzaski, które odpowiadały zmniejszeniu się wskazań czujnika ugięcia średnio o jedną działkę.

Po zakończeniu badania wszystkie próbki z kompozytu fibrobetonowego zachowały spójność oraz postać zarysowania i ugięcia jak w końcowej fazie obciążenia.

Badaniu poddano także próbki z nieuzbrojonej matrycy betonowej, których niszczenie następowało gwałtownie w chwili pojawienia się pierwszej rysy a matryca rozpadała się na kawałki.

Niedoskonały efekt linearyzacji otrzymany w próbkach o zamierzonym układzie uzbrojenia 1D był spowodowany ograniczoną swobodą przemieszczania się włókien w mieszance betonowej. Aby określić rzeczywistą zawartość uzbrojenia w fibrobetonie wykorzystano następujące pojęcia [4] :

a/ pozorny rozstaw włókien S_{app} :

$$S_{app} = \frac{l_b}{n}$$

gdzie:

l_b - łączna długość linii bazy pomiarowej
przyjmowanej dowolnie w mm,

n - policzona liczba przecięć bazy pomiarowej
z cieniami pojedynczych włókien .

b/ powierzchnia przekroju przypadająca na jednostkowy przekrój włókna α^{1D}

$$\alpha^{1D} = w \times S_{app}, \quad i = 1, 2$$

w - grubość elementu w mm,

c/ rzeczywista zawartość uzbrojenia β_r :

$$\text{dla układu uzbrojenia 1D: } \beta_r = \frac{\pi d^2}{4 \alpha^{1D}} \times 100 \%$$

$$\text{dla układu uzbrojenia 2D: } \beta_r = \frac{\pi^2 d^2}{8 \alpha^{2D}} \times 100 \%$$

d - średnica włókna uzbrojenia w mm.

W przypadku badanych płyt fibrobetonowych, bazę pomiarową stanowiła suma długości głównych rys zawartych w obszarze koła o promieniu 50 mm, którego środkiem był środek obrazu zniszczenia płyty. Zliczano następnie włókna przecinające tak określone bazę. Wyznaczono zatem rzeczywistą zawartość uzbrojenia w przekrojach zarysowanych płyt. Wyniki zestawione są w tablicy 3.

Tablica 3.

Uzbrojenie		Płyty najsilniejsze				Płyty najsłabsze			
β_n	Układ	Nr płyty	l_b	S_{app}	β_r	Nr płyty	l_b	S_{app}	β_r
%			mm	mm	%		mm	mm	%
0,5	1D	5	257	2,79	0,45	27	260	6,50	0,19
0,5	2D	13	210	4,20	0,47	16	230	6,05	0,33
1	2D	14	275	2,02	0,58	22	225	2,53	0,78
1,5	2D	20	225	1,68	1,17	18	215	2,05	0,96

Przedstawione w tablicy wartości określające rzeczywistą zawartość uzbrojenia β_r w przekrojach zarysowanych są dla każdej z grup mniejsze od nominalnej zawartości β_n . Wartości te potwierdzają wizualną ocenę miejsc, w których pojawiły się rysy. Przy porównaniu zdjęcia płyty po zakończeniu badania z obrazem rentgenowskim układu uzbrojenia, widać, że rysy przeszły przez miejsca najmniej uzbrojone a także miejsca o zbyt dużej koncentracji włókien, zaburzającej strukturę fibrobetonu.

W grupie płyt o uzbrojeniu $1D/\beta_n = 0,5\%$ zauważono, że pierwsza rysa powstała przy sile zbliżonej do maksymalnego obciążenia matrycy nieuzbrojonej, równoległe do włókien uzbrojenia. W inicjującej rysie brakowało włókien poprzecznych w kierunku największych naprężeń rozciągających, dlatego przekrój ten uległ zarysowaniu jako pierwszy.

Zdolność do przenoszenia zwiększonego obciążenia, po zarysowaniu można wytłumaczyć tym, iż obciążenie przekazywane było na stosunkowo dużej powierzchni koła o średnicy 40 mm, a nie punktowo. Włókna uporządkowane występujące w płycie pod obwodem stempla włączały się do współpracy powodując spójność płyty. Naprężenia rozciągające w płycie, rozchodzące się wokół stempla obciążającego były przejmowane przez włókna uzbrojenia dzięki ich przyczepności do betonu. Na zachowanie płyty po początkowym zarysowaniu miała wpływ również pewna liczba włókien, które nie uległy linearyzacji lecz przecinały inicjującą rysę przejmując część naprężeń. Przedstawione w tablicy 2 wartości wskaźnika określającego rzeczywistą zawartość uzbrojenia w zniszczonych przekrojach elementów próbnych pokazują, że w obrębie grup o tej samej nominalnej zawartości uzbrojenia β_n istnieją znaczne różnice w rzeczywistym nasyceniu kompozytu włóknami β_r . Dlatego w badaniach wytrzymałościowych otrzymano różne wyniki określające zdolność do przenoszenia maksymalnych obciążeń przez płyty.

Płyty najsilniejsze w grupie /o największej wartości $P_c^{\max}/$ charakteryzowały się znacznie większą wartością wskaźnika β_r od płytek najsłabszych /o najmniejszej wartości $P_c^{\max}/$. Te różnice rzeczywistej zawartości objętościowej włókien dla elementów w poszczególnych grupach wynikają z niedoskonałej technologii wykonywania próbek fibrobetonowych.

Najsilniejsza próbka z grupy $\beta_n = 1\%$ charakteryzuje się wartością wskaźnika $\beta_r = 0,98$ zbliżoną do wskaźnika $\beta_r = 0,96$ płyty najsłabszej w grupie $\beta_n = 1,5\%$.

5.2. Analiza obciążeń rysujących i maksymalnych przenoszonych przez płyty.

Wartość siły powodującej zarysowanie płyty określono

dwoma metodami :

- a/ bezpośrednim odczytem wskazań czujnika siły w chwili zauważenia pierwszej rysy na rozciąganej powierzchni próbki $/P_{c,o}^{rys}/$.
- b/ na podstawie wykresu zależności siły od ugięcia $P/u/$, jako wartość siły, przy której kończy się zależność liniowa $P/u/$ $/P_{c,g}^{rys}/$

Wartości odczytane bezpośrednio podczas badań i wartości określone na wykresach uśrednionych $/Rys.6/$ zestawiono w tabelicy 4.

Tablica 4.

Uzbrojenie	P_m^{max}	u_m^{max}	$P_{c,o}^{rys}$	$u_{c,o}^{rys}$	$P_{c,g}^{rys}$	$u_{c,g}^{rys}$	$P_{c,o}^{max}$	$u_{c,o}^{max}$	$P_{c,g}^{max}$	$u_{c,g}^{max}$	
β_n %	Układ	N	mm	N	mm	N	mm	N	mm	N	mm
0,5	1D	532	0,66	589	0,76	470	0,60	1112	4,84	1135	4,40
0,5	2D	532	0,66	798	1,17	600	0,60	1073	6,07	1030	6,40
1,0	2D	611	0,60	1002	1,72	620	0,55	1527	6,74	1520	6,00
1,5	2D	578	0,60	981	1,66	640	0,60	1670	6,60	1650	6,80

Analiza wyników zebranych w tabelicy 4 wskazuje na znaczne różnice pomiędzy obciążeniem rysującym określonym metodą graficzną $P_{c,g}^{rys}$ i zarejestrowanym podczas bezpośredniej obserwacji $P_{c,o}^{rys}$. Wartości odczytane z wykresu $P_{c,g}^{rys}$ są znacznie niższe od $P_{c,o}^{rys}$. Wynika to z faktu, że wizualna rejestracja zarysowania na powierzchni rozciąganej płyty jest opóźniona w stosunku do rzeczywistego momentu pojawienia się mikrorys w kompozycie. Wykorzystując wartości określone metodą graficzną, określono efekt wzmocnienia płyt fibrobetonowych względem płyt z matrycy nieuzbrojonej oraz względem zarysowania płyt fibrobetonowych. Wskaźnik wzmocnienia fibrobetonu względem matrycy nieuzbrojonej określa wzór

$$\eta_{sm} = \frac{P_c^{\max}}{P_m^{\max}}$$

Wskaźnik wzmocnienia względem obciążenia rysującego w płytach fibrobetonowych

$$\eta_{sc} = \frac{P_c^{\max}}{P_{rys}^c}$$

Tablica 5.

Uzbrojenie		Wskaźniki wzmocnienia	
β_n	Układ	η_{sm}	η_{sc}
0,5 %	1 D	1,99	2,41
0,5 %	2 D	1,81	1,72
1,0 %	2 D	2,70	2,48
1,5 %	2 D	2,89	2,58

Na podstawie wyników zebranych w tablicy 5, widać wyraźny efekt wzmocnienia płyt z kompozytu fibrobetonowego względem płyt wykonanych z matrycy nieuzbrojonej oraz względem obciążenia rysującego. Już zawartość uzbrojenia $\beta_n = 0,5\%$ daje efekt wzmocnienia fibrobetonu względem matrycy i względem obciążenia rysującego wynoszący ponad 1,7. W przypadku zwiększenia zawartości uzbrojenia, rośnie również zdolność fibrobetonu do przenoszenia obciążenia, ale efekt ten wzrasta znacznie wolniej niż zawartość uzbrojenia.

Wskaźniki η_{sm} i η_{sc} są bliskie, co wynika ze stwierdzonej poprzednio małej różnicy między obciążeniem niszczącym płyt nieuzbrojonych, a obciążeniem rysującym.

Porównując efekty wzmocnienia w układach uzbrojenia 2 D i 1 D, które otrzymano w grupach płyt o uzbrojeniu $\beta_n = 0,5\%$ /tablica 5/ stwierdzono większe efekty wzmocnienia przy uzbro-

jeniu 1 D.

Można to wyjaśnić zwiększoną sztywnością na zginanie w przekrojach płyty równoległych do włókien zlinearyzowanych.

5.3. Ugięcia badanych płyt.

Określenie wpływu uzbrojenia włóknistego na ugięcie elementów próbnych przeprowadzono obliczając stosunek średniego ugięcia fibrobetonu przy zarysowaniu i maksymalnym obciążeniu do maksymalnego ugięcia matrycy /tablica 6/.

Tablica 6.

Uzbrojenie		$\frac{u_c^{rys}}{u_m^{max}}$	$\frac{u_c^{max}}{u_m^{max}}$
β_n	Układ		
0,5 %	1 D	0,83	6,67
0,5 %	2 D	0,83	9,70
1,0 %	2 D	1,00	10,00
1,5 %	2 D	1,17	11,33

Z porównania wartości zebranych w tablicy 6 wynika, że w grupie płyt o układzie uzbrojenia 2 D, zarówno średnie ugięcie elementów próbnych odpowiadające zarysowaniu jak i maksymalnemu obciążeniu rośnie ze wzrostem zawartości uzbrojenia.

Zarysowanie następuje przy wartości u_c^{rys} zbliżonej do maksymalnego ugięcia matrycy nieuzbrojonej tuż przed zniszczeniem u_m^{max} /dla próbek o $\beta_n = 1\%$ wartości te są równe/.

Porównując ugięcia przy zarysowaniu i maksymalnym obciążeniu dla próbek o uzbrojeniu $\beta_n = 0,5\%$ i układach 1D oraz 2D, stwierdzono, że układy 1 D i 2 D uginają się jednakowo w chwili zarysowania, natomiast ugięcie przy maksymalnym obciążeniu jest znacznie mniejsze w przypadku uzbrojenia zlinearyzowanego /1 D/ niż nieuporządkowanego /2 D/. Spowodowane jest to większą sztywnością płyty z uzbrojeniem zlinearyzowanym. Uśrednione wykresy P /u/ płyt fibrobetonowych /Rys.6/ pozwalają wyróżnić 3 fazy pracy płyty pod zwiększającym się obciążeniem .

Faza I - fibrobeton zachowuje się sprężysto. Występuje tu pełna współpraca matrycy fibrobetonowej z włóknami. Płyty z fibrobetonu zachowują się w tej fazie podobnie jak z matrycy nieuzbrojonej.

Faza II - Wzmocnienie spowodowane włączeniem się włókien do współpracy z betonem. Próbką mogła przenosić zwiększające się obciążenie. Maksymalne obciążenie przenoszone przez element fibrobetonowy zwiększało się wraz ze wzrostem zawartości uzbrojenia.

Występujące w trakcie badania pojedyncze trzaski były wywołane efektem utraty przyczepności do betonu /wyrwania/ lub zrywaniem pojedynczych włókien.

Faza III - Opadająca część wykresu, osłabienie. Mimo zmniejszającej się wartości siły przenoszonej przez płytkę następował tu dalszy wzrost ugięcia.

Szybki wzrost ugięcia przy gwałtownie zmniejszającej się wartości siły, aż do zera towarzyszył wyrwaniu pozostałych włókien spajających dotychczas rysy.

Fazy pracy płyty oddzielają 2 punkty charakterystyczne wykresów :

- koniec zakresu liniowego określa zazarysowanie płyty fibrobetonowej. Matryca osiągnęła graniczną odkształcalność na rozciąganie ,
- maksymalne obciążenie przenoszone przez elementy fibrobetonowe.

Podobnie dwie początkowe fazy pracy płyty podano w pracy [5] traktującej o wynikach badań i obliczeń teoretycznych kwadratowych płyt żelbetowych, swobodnie podpartych, pod obciążeniem ciągłym. Dla tych płyt nie zaobserwowano trzeciej fazy pracy charakteryzującej płyty fibrobetonowe.

Wykres dla grupy płyt o układzie uzbrojenia 1D zakłamuje się gwałtownie przy wartości siły rysującej odpowiadającej w przybliżeniu wartości maksymalnego obciążenia przenoszonego przez matrycę nieuzbrojoną, po czym następuje szybsze i większe wzmocnienie, niż w płytach o układzie 2D. Efekt ten widoczny jest dobrze na szczegółowych wykresach P/u/ odpowiada-

jących płytom o dobrze zlinearyzowanych włóknach.

6. Porównanie wyników doświadczalnych z obliczeniami płyt.

6.1. Ocena wpływu zjawiska przebiccia i złamania na proces zniszczenia.

Analizę występowania zjawiska przebiccia w badanych płytach pod wpływem działania sił skupionych przeprowadzono według dwóch metod [6] :

a/ metoda szwedzka zalecana przez CEB /1963/,

b/ metoda amerykańska zalecana przez normę ACI - 318 - 63.

Metoda CEB :

Wartość charakterystycznego naprężenia granicznego w betonie przy przebicciu określa wzór :

$$\tau_1 = \frac{15 \tau_0}{10 + \frac{d}{2h_1}}$$

natomiast naprężenie nominalne w płycie wynikające z działającego obciążenia skupionego P, obliczyć można ze wzorów: przy

$$\frac{c}{h_1} \leq 3,5$$

$$\tau_{nom} = \frac{P}{\pi h_1 (c+h_1)}$$

Do obliczeń przyjęto następujące wartości parametrów występujących we wzorach :

a = $19 \cdot 10^{-2}$ m - długość boku płyty,

c = $4 \cdot 10^{-2}$ m - średnica pola przekazania obciążenia skupionego,

$h_1 = 10^{-2}$ m - wysokość użytkowa przekroju płyty,

d = $\frac{1 + \sqrt{2}}{8} a = 5,7 \cdot 10^{-2}$ m - średni promień obwodu zerowych momentów promieniowych,

$R_w \approx f_{cc_m} = 37,5$ MPa - wytrzymałość na ściskanie matrycy betonowej o podobnym składzie badanej w IPPT PAN na walcach $\phi 100 \times 200$

$$\tau_1 = \frac{15 \times 1,35}{10 + \frac{5,7}{2 \times 1,0}} = 1,576 \text{ MPa}$$

przy

$$\frac{nc}{h} = 4 > 3,5 \quad \tau_{\text{nom}} = \frac{P}{\pi \times 10^{-2} (0,5 \times 4 \times 10^{-2} + 2,75 \times 10^{-2})} = 670 \text{ P}$$

Naprężenie nominalne określono przy maksymalnym obciążeniu przenoszonym przez płytę w każdej z rozpatrywanych grup:

1. 0 %, $P^{\text{max}} = 570 \times 10^{-6} \text{ MN}$
 $\tau_{\text{nom}} = 670 \times 570 \times 10^{-8} = 0,382 \text{ MPa} < \tau_1 = 1,576 \text{ MPa}$
2. 0,5 %, 1 D, $P^{\text{max}} = 1135 \times 10^{-6} \text{ MN}$
 $\tau_{\text{nom}} = 670 \times 1135 \times 10^{-6} = 0,760 \text{ MPa} < \tau_1 = 1,576 \text{ MPa}$
3. 0,5 %, 2 D, $P^{\text{max}} = 1030 \times 10^{-6} \text{ MN}$
 $\tau_{\text{nom}} = 670 \times 1030 \times 10^{-6} = 0,690 \text{ MPa} < \tau_1 = 1,576 \text{ MPa}$
4. 1,0 %, 2 D, $P^{\text{max}} = 1520 \times 10^{-6} \text{ MN}$
 $\tau_{\text{nom}} = 670 \times 1520 \times 10^{-6} = 1,018 \text{ MPa} < \tau_1 = 1,576 \text{ MPa}$
5. 1,5 %, 2 D, $P^{\text{max}} = 1650 \times 10^{-6} \text{ MN}$
 $\tau_{\text{nom}} = 670 \times 1650 \times 10^{-6} = 1,106 \text{ MPa} < \tau_1 = 1,576 \text{ MPa}$

Metoda ACI - 63

Wartość naprężenia granicznego w betonie przy przebicciu określa wyrażenie :

$$\tau_1 = 1,03 \sqrt{R_w}$$

przy

$$R_w = 37,5 \text{ MPa} \quad \tau_1 = 1,03 \sqrt{37,5} = 1,995 \text{ MPa} ;$$

natomiast naprężenie nominalne istniejące w badanej płycie:

$$\tau_n = \frac{P}{u_1 h_1} \quad ; \quad u_1 = 2 \pi \left(\frac{c}{2} + 0,5 h_1 \right) = \pi (c + h_1)$$

$$\tau_n = \frac{P}{\pi h_1 (c + h_1)}$$

$$\tau_n = \frac{P}{\pi \times 10^{-2} (4 \times 10^{-2} + 10^{-2})} = 636,6 P$$

W każdej z rozpatrywanych grup płyt wyznaczono następujące wielkości naprężeń:

$$1. \tau_n = 636,6 \times 570 \times 10^{-6} = 0,300 \text{ MPa} < \tau_1 = 1,995 \text{ MPa}$$

$$2. \tau_n = 636,6 \times 1135 \times 10^{-6} = 0,723 \text{ MPa} < \tau_1 = 1,995 \text{ MPa}$$

$$3. \tau_n = 636,6 \times 1030 \times 10^{-6} = 0,656 \text{ MPa} < \tau_1 = 1,995 \text{ MPa}$$

$$4. \tau_n = 636,6 \times 1520 \times 10^{-6} = 0,968 \text{ MPa} < \tau_1 = 1,995 \text{ MPa}$$

$$5. \tau_n = 636,6 \times 1650 \times 10^{-6} = 1,051 \text{ MPa} < \tau_1 = 1,995 \text{ MPa}$$

Na podstawie obu rozpatrywanych metod stwierdzono, że w każdej z rozpatrywanych grup naprężenie w płycie pod obciążeniem niszczącym było mniejsze od granicznego naprężenia przy przebiciu, Oznacza to, że zniszczenie nie było wynikiem przebicia płyty lecz zginania. Wniosek ten został potwierdzony obserwacją postaci zniszczenia płyt.

Minimalne obciążenie, przy którym według metody CEB występuje zjawisko przebicia płyty wynosi:

$$\tau_{\text{nom}} = \tau_1 : 670 P = 1,576 \times 10^6 \text{ Pa}$$

$$P = \frac{1,576 \times 10^6}{670} = 2352 \text{ N}$$

Według metody ACI-63 wartość analogicznego obciążenia jest równa:

$$\tau_n = \tau_1 : 636,6 P = 1,995 \times 10^6 \text{ Pa}$$

$$P = \frac{1,995 \times 10^6}{636,6} = 3134 \text{ N}$$

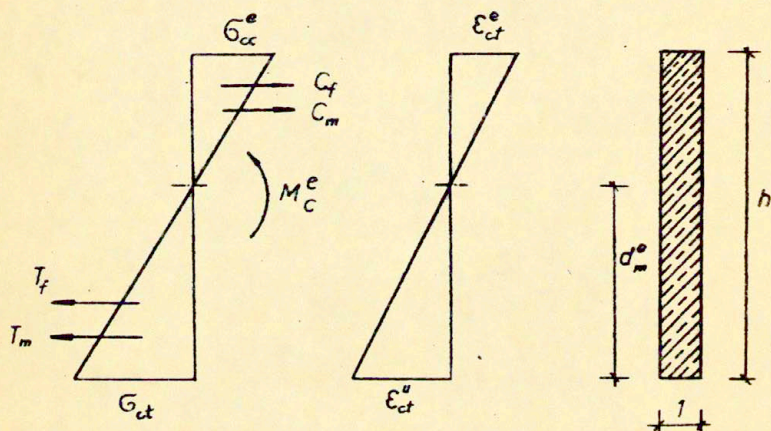
Metoda CEB podaje niższą wartość obciążenia powodującego przebicie badanych płyt, w porównaniu z metodą ACI-63. Żadna z

badanych płyt tak określonych obciążeń nie przeniosła.

6.2. Porównanie wartości obciążenia rysującego określonego z doświadczeń, z wartościami obliczonymi analitycznie.

Opierając się na analizie płyt sprężystych i biorąc pod uwagę analizę sił wewnętrznych w przekroju fibrobetonowym w chwili zarysowania podaną w pracy [7], można określić moment zginający działający na element zginanego przekroju poprzecznego o szerokości jednostkowej /Rys.7/ ze wzoru:

$$M_c^e = \varepsilon_{ct}^u (E_{mt} + E_f \beta_n) d_n^e \frac{h}{3}$$



Rys.7. Rozkład sił wewnętrznych i odkształceń w fibrobetonowym przekroju poprzecznym w chwili zarysowania.

Podstawiając występujące we wzorze wartości określonych doświadczalnie charakterystyk geometrycznych i fizycznych badanych płyt, obliczono M_c^e

$$\varepsilon_{ct}^u = \varepsilon_{ct} = \varepsilon_{mt} = 313 \times 10^{-6} - \text{graniczna odkształcalność kompozytu przy rozciąganiu,}$$

$$\varepsilon_{ct}^e = \varepsilon_{oc}^u = 300 \times 10^{-6} - \text{graniczna odkształcalność kompozytu przy ściskaniu,}$$

ε_{mt} - graniczna odkształcalność matrycy przy rozciąganiu,

$E_{mt} = 25000$ MPa - moduł Younga dla matrycy przy rozciąganiu,

$E_f = 210000$ MPa - moduł Younga dla stali zbrojenia włóknistego,

$h = 10^{-2}$ m - wysokość całkowita przekroju,

$d_n^e = \frac{\varepsilon_{ct}^u \times h}{\varepsilon_{cc}^u + \varepsilon_{ct}^u} = 4,868 \times 10^{-3}$ m - wysokość strefy rozciąganej przekroju w chwili zarysowania,

$E_{zast} = E_{mt} + E_f \times \beta_n$ - zastępczy moduł kompozytu fibrobetonowego ;

$$M_c^e = 5,0789 \times 10^{-3} (25000 + 210000 \times \beta_n)$$

Z zależności analitycznych podanych w pracy 8 wynika moment promieniowy w płycie kwadratowej swobodnie podpartej, obciążonej w środku za pośrednictwem walca o promieniu c , na obwodzie tego obciążenia

$$M_r = \frac{P}{4\pi} \left[(1 + \nu) \ln \frac{a}{c} + \frac{(1 + \nu)(a^2 + c^2)}{4a^2} \right],$$

przy $a = 19 \times 10^{-2}$ m, $c = 2 \times 10^{-2}$ m i współczynnikiem Poissona $\nu = 0,2$ obliczono M_r :

$$M_r = 0,23069 P$$

Obciążenie rysujące P_{rys}^e określono w badanych grupach płyt z porównania wartości momentów:

$$M_c^e = M_r$$

$$P_{rys}^{teor} = \frac{M_c^e}{0,23069}$$

Porównanie wartości obciążenia wyliczonego z określonym doświadczalnie przedstawiono w tabelicy 7.

Tablica 7

Uzbrojenie	p_{rys}^{exp}	$p_{rys}^{teor} (E_{exp})$	$p_{rys}^{teor} (E_{zast})$	$\gamma = \frac{p_{rys}^{teor}}{p_{rys}^{exp}}$
	N	N	N	—
0,0%	570	550,403	550,403	0,966
0,5% 1D	470	572,419	—	—
0,5% 2D	600	660,484	573,500	0,956
1,0% 2D	620	—	596,637	0,962
1,5% 2D	640	—	619,754	0,968

Obliczone na podstawie zależności teorii sprężystości wartości obciążenia rysującego stosunkowo dobrze zgadzają się z określonymi na podstawie wykresów zależności obciążenia P od ugięcia u otrzymanych z wyników doświadczeń.

7. Wnioski i uwagi.

7.1. Wnioski z badań.

Następujące wnioski dotyczące właściwości obciążanych elementów z kompozytu fibrobetonowego wynikają z przeprowadzonych badań.

- a/ W wyniku porównania postaci zniszczenia i nośności elementów wykonanych z nieuzbrojonej matrycy oraz z kompozytu fibrobetonowego, widać wyraźnie wyższość fibrobetonu, który po zarysowaniu zdolny jest do przenoszenia znacznych obciążeń i nie ulega zniszczeniu przez gwałtowny rozpad na części, jak elementy z matrycy nieuzbrojonej.
- b/ Efekty wzmocnienia elementów fibrobetonowych w stosunku do matrycy i do obciążenia rysującego, nie są proporcjonalne do zawartości procentowej uzbrojenia β_n . Wartość $\beta_n = 0,5\%$ daje dość dobre wzmocnienie /względem matrycy 1,81; względem obciążenia rysującego 1,72/. Zwiększenie dwukrotne wskaźnika β_n do 1,0% daje przyrost efektu wzmocnienia w porównaniu z wartością $\beta_n = 0,5\%$ względem matrycy wyno-

szący 1,49, a względem obciążenia rysującego 1,44. Natomiast trzykrotny wzrost β_n do 1,5% powoduje przyrost efektu wzmocnienia w stosunku do wartości odpowiadającej wskaźnikowi $\beta_n = 0,5\%$ względem matrycy równej 1,59, a względem obciążenia rysującego 1,50. Okazuje się więc, że ze względu na efekty wzmocnienia nieopłacalne jest zwiększenie zawartości uzbrojenia ponad $\beta_n = 1,0\%$.

- c/ Zastosowanie uzbrojenia zlinearyzowanego /układ 1 D/ wpływa na zwiększenie sztywności elementu płytowego, czyli zmniejszenie ugięć.
- d/ Zwiększenie procentowej zawartości uzbrojenia powyżej 0,5% utrudnia przeprowadzenie linearyzacji uzbrojenia w cienkich płytach.
- e/ Ze względu na trudności z uzyskaniem idealnie jednorodnej struktury uzbrojenia, występuje nieunikniony rozrzut wyników badań poszczególnych elementów i konieczne jest badanie licznych populacji próbek. W interpretacji wyników niezbędne przy tym jest uwzględnienie rzeczywistych różnic w układzie uzbrojenia elementów badawczych.

7.2. Uwagi o projektowaniu elementów fibrobetonowych.

Przy projektowaniu płyt fibrobetonowych jako elementów nośnych pomostów w fazie sprężystej bez rys można je obliczać jak elementy betonowe z uwzględnieniem granicznej odkształcalności kompozytu przy zarysowaniu \mathcal{E}_{ct}^u równej maksymalnej odkształcalności matrycy tuż przed zniszczeniem \mathcal{E}_{mt}^{\max} oraz wprowadzając zastępczy moduł sprężystości $E_c^{\text{zast}} = E_m + E_f \cdot \beta_n$. Moduł ten niewiele różni się od modułu matrycy.

Przy uwzględnieniu obciążeń skupionych należy sprawdzić możliwość wystąpienia zjawiska przebiccia elementu płytowego, jak to się wykonuje dla płyt betonowych np. według zaleceń CBI lub ACI-63 [6] .

W elementach nośnych konstrukcji mostowych, których obliczanie wykonuje się według metody naprężeń liniowych, a więc nie dopuszcza się zarysowania, należy stosować uzbrojenie typu 2D, które daje wyższą wartość obciążenia rysującego

/przy $\beta_n = 0,5\%$ $p_{rys} = 600 \text{ N/}$, w porównaniu z tym, które charakteryzuje 1 D/przy $\beta_n = 0,5\%$ $p_c^{rys} = 470 \text{ N/}$, podczas gdy $p_m^{max} = 570 \text{ N}$.

W konstrukcjach mostowych stwierdzono celowość zastosowania fibrobetonu do wykonywania następujących elementów 9 :

- a/ płyt pomostu współpracujących ze stalowymi lub betonowymi belkami głównymi,
- b/ nawierzchni drogowych ze względu na odporność na ścieranie,
- c/ elementów deskowań,
- d/ elementów wyposażenia mostu podlegających uderzeniom /bariery, krawężniki, naroża dylatacji/,
- e/ napraw lub wzmacniania konstrukcji, najczęściej przy użyciu fibrobetonu natryskiwanego.

W ustrojach ciągłych, w których strefie momentów ujemnych występuje rozciąganie płyty, dotychczas stosowano uzbrojenie miękkie pochłaniające duże ilości stali, odcinkowe sprężenie płyty kablami albo wyłączenie płyty ze współpracy. Jeżeli zamiast tych zabiegów zastosować współpracujące płyty z fibrobetonu, to można wykorzystać jego kilkakrotnie większą od betonu wytrzymałość na rozciąganie, a ponadto stosunkowo mały skurcz fibrobetonu wpływa na zmniejszenie sumarycznych naprężeń w belkach głównych.

Elementy nośne w konstrukcjach mostowych, a także budowlanych z fibrobetonu były dotychczas wykonywane łącznie z uzbrojeniem klasycznym prętami stalowymi. Współdziałanie uzbrojenia skupionego /pręty/ z rozproszonym /włókna/ wykracza poza zakres niniejszej pracy.

Załącznik - Przygotowanie elementów próbnych.

Elementy próbne wykonano według następującej recepty sporządzonej na 10 l mieszanki:

- cement portlandzki "350" - 5,50 kg
- piasek normowy - 16,35 kg
- woda - 3,25 l
- włókna stalowe w ilości zależnej od założonego procentu uzbrojenia: 0% - 0,0 kg; 0,5% - 0,395 kg; 1% - 0,785 kg ; 1,5% - 1,180 kg.

Używano piasek znormalizowany pochodzący z Tomaszowskich Kopalni Surowców Mineralnych w Białej Górze k.Tomaszowa Maz. o maksymalnej frakcji 2 mm.

Uzbrojenie stanowiły włókna stalowe proste, okrągłe, gładkie 0,40 x 40 mm, cięte w IPPT ze zwojów drutu stalowego. Dozowanie składników wykonano w kolejności takiej jak w betonie tzn. najpierw piasek normowy, później cement i woda. Włókna stalowe dodawano jako ostatni składnik mieszanki.

Mieszania dokonywano ręcznie w dużej kuwecie. Po napełnieniu form, do zagęszczenia mieszanki zastosowano stolik wibracyjny Ve - Be. Czas wibrowania nie przekraczał 20 sekund. Zastosowano częstotliwość drgań 50 Hz, przy amplitudzie 0,5 mm.

Wykonane elementy przechowywano w komorze klimatyzacyjnej, po trzech, do pięciu dniach rozformowano, po czym dojrzewały one w tych samych warunkach najmniej przez 28 dni. Dolne, gładze powierzchnie płyt przygotowano bezpośrednio przed badaniem malując rzadkim, wodnym roztworem gipsu.

9. Wykaz piśmiennictwa.

1. Swamy R.N, Lankard D.R.; "Some practical applications of SFRC" - Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Part 1, Vol. 56, Aug. 1974.
2. Pieniążek Z., Ruppert J, Ligęza W : " Zastosowanie cienkich płyt betonowych z dodatkiem ciętego drutu stalowego do rekonstrukcji stropodachów". - Przegląd Budowlany nr 1, 1975.
3. Ruppert J, Ligęza W. : "Wytrzymałość i sztywność cienkich drobnowymiarowych płyt z betonu zbrojonego ciętym drutem stalowym". XIX Konferencja Naukowa KI PAN i KN PZiTB, Krynica 1973, Referaty t.II. s. 181.
4. Kasperkiewicz J. : "Struktura uzbrojenia w kompozytach z uzbrojeniem rozproszonym". Prace IPPT PAN, Warszawa 1979r.
5. Brandt A.M., Absi E.: "Analiza i badanie płyt żelbetowych w stanie zarysowania". Studia z zakresu inżynierii nr 14, PWN 1974.
6. Ajdukiewicz A.: "Obliczanie płyt żelbetowych na przebicie". Politechnika Śląska.
7. Babut R.: "Nośność i odkształcalność elementów fibrobetonowych przy zginaniu". Prace IPPT PAN, Warszawa 1979r.
8. Timoshenko S., Wojnowsy-Krieger S.: "Teoria płyt i powłok". Arkady, 1962.
9. Brandt A.M., Radomski W.: "O możliwościach zastosowań kompozytów fibrobetonowych w mostownictwie". Referat na Konferencję SIT Kom . Lublin 1979.

Spis rozdziałów

1. Wstęp
2. Przykłady wykonywanych dotychczas badań elementów w postaci płyt fibrobetonowych.
3. Przygotowanie elementów do badań.
4. Opis badań i pomiarów.
 - 4.1. Badania dodatkowe.
5. Analiza wyników.
 - 5.1. Układ i zawartość uzbrojenia w płytach, a proces ich niszczenia.
 - 5.2. Analiza obciążeń rysujących i maksymalnych przenoszonych przez elementy próbne.
 - 5.3. Ugięcia badanych płyt.
6. Porównanie wyników doświadczalnych z obliczeniami płyt.
 - 6.1. Ocena wpływu zjawisk przebiccia i złamania na proces zniszczenia.
 - 6.2. Porównanie wartości obciążenia rysującego określonego metodą graficzną bezpośrednio z wyników doświadczeń z wartościami wyliczonymi analitycznie.
7. Wnioski i uwagi.
 - 7.1. Wnioski z badań.
 - 7.2. Uwagi o projektowaniu elementów fibrobetonowych.
8. Załączniki - Przygotowanie elementów próbnych.
9. Wykaz piśmiennictwa.