

SFRC 版の衝撃破壊と耐衝撃性に関する実験的研究

Experimental study on failure and bearing capacity of steel fiber reinforced concrete slab under impact

外山 正修*, 榊谷 浩**, 西本 耕一郎***, 山本 満明****

Masanobu Toyama, Hiroshi Masuya, Kouichirou Nishimoto and Michiaki Yamamoto

* 金沢大学大学院 自然科学研究科前期課程 (〒920-8667 金沢市小立野 2-40-20)

** 工博 金沢大学助教授 工学部土木建設工学科 (〒920-8667 金沢市小立野 2-40-20)

*** 株式会社高松建設 工事統括部(〒104-0061 東京都中央区銀座 7-12-7)

**** 工修 株式会社日本サミコン 北陸支店 (〒921-8002 金沢市玉鉾 5-12)

It has well known that Steel Fiber Reinforced Concrete is superior at various characteristics. However, the behavior of Steel Fiber Reinforced Concrete slabs under impact has not been clear definitely. Therefore, in the present paper, static, impact tests of the Steel Fiber Reinforced Concrete slabs, and material tests defined by ACI are performed. Fundamental characteristics of the failure types, energy of perforation, crack surfaces, developments of penetration up to complete perforation, and number of blow up to destruction at material test. Finally propositions to evaluate thickness of perforation under impact based on experimental data is performed.

Key Words: steel fiber reinforced concrete, impact, perforation

1. はじめに

今日、コンクリートは、土木、建築構造物などの構造用材料として幅広く使用されている。コンクリート部材としての特性も鉄筋コンクリートやプレストレストコンクリートと言った形で大幅に改善されてきたのだが、コンクリート自身の脆さに関してはそれほど改善されず、その点を大幅に改善するために繊維補強コンクリート (Fiber Reinforced Concrete "FRC") が考え出された。FRC はコンクリート中に繊維を一様に分布させたもので、改善される特性としては、曲げ強度、ひびわれ発生後の進展、靱性、耐衝撃性、耐凍結融解性、耐摩耗性などが挙げられる¹⁾。

FRC は道路や飛行場のコンクリート舗装、トンネルのライニング、コンクリートの2次製品、機械の基礎、ダム of 放水路などに適用され、その特徴が発揮され十分な効果をあげている。FRC として使用される繊維としては鋼繊維、ガラス繊維、合成繊維などがあげられるが、この中でも鋼繊維を用いた鋼繊維補強コンクリート (Steel Fiber Reinforced Concrete、以後 SFRC と呼ぶ) が最も広く使用されている。

落石覆工などの衝撃を受ける構造物の重要な限界状態としてスラブの打ち抜きが挙げられる。構造物の衝撃挙動に関する実験的ならびに理論的研究は盛んに行われて

いるものの^{2), 3), 4)}、SFRC 版の耐衝撃性、特に低速度の衝突を受けた場合の打ち抜き(貫通)については十分に研究されていないのが現状である^{5), 6), 7), 8), 9)}。

そこで本研究では、SFRC 版に対し静的試験ならびに重錘落下による繰返し衝撃試験を行い、破壊形式の特徴やスラブの貫通エネルギーについて明らかにし、その簡易な評価法を示している。また、材料試験として用いられる ASTM¹⁰⁾ (American Society of Testing and Materials) によって規定されている鋼繊維に関する衝撃試験を行い、SFRC 版の打ち抜き評価への利用についても検討を行っている。

2. 試験概要

2.1 試験体

ASTM 試験に関しては、その規定書の中で定義されている“落下重錘による繰返し衝撃試験”(repeated impact drop weight test)¹⁰⁾を行った。直径 15.7cm、厚さ 6.4cm の円盤状試験体に鋼繊維(鋼繊維混入率 $V_f=0, 0.5, 1.0\%$ の3種類)を配したものをを用い、それぞれの鋼繊維混入率 V_f につき3体ずつ試験を行った。

一方、SFRC 版に関しては、版厚 $d=4, 5, 6\text{cm}$ の3種とし、 $75\text{cm} \times 75\text{cm}$ の正方形版に鋼繊維(鋼繊維混入率 $V_f=0, 0.5, 1.0\%$ の3種類)を配したものをを用いた。SFRC 版の形状を

図-1 に、SFRC 版の静的荷重試験と衝撃試験の一覧を表-1 に示す。また、用いた鋼繊維(ブリジストン社製タフグリッパ)は、長さ 3.0cm、直径 0.05cm、アスペクト比 1/75 のものである。また、鋼繊維混入率 $V_f=0\%$ 、 $V_f=0.5\%$ 、 $V_f=1.0\%$ のコンクリートについてそれぞれ圧縮強度試験、割裂試験、曲げ強度試験を行った。表-2 に使用したコンクリートの力学的特性を示す。鋼繊維の特徴としては、鋼繊維の増加に伴う引張強度と曲げ強度の顕著な増加が認められ、縦弾性係数は変化なく、逆に圧縮強度は若干低下するといった一般的に知られている特性が確認できる¹⁾。

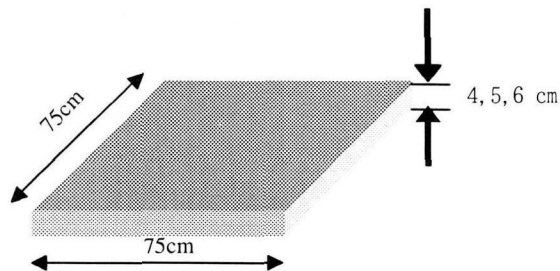


図-1 SFRC 版の形状

表-1 SFRC 版の静的荷重試験と衝撃試験の一覧

静的荷重試験			衝撃試験		
試験番号	試験名	供試体数	試験番号	試験名	供試体数
S 1	T4D00	2	D 1	T4D00M10	3
S 2	T4D05	2	D 2	T4D05M10	3
S 3	T4D10	2	D 3	T4D10M10	3
S 4	T5D05	2	D 4	T5D05M10	3
S 5	T5D10	2	D 5	T5D10M10	3
S 6	T6D00	2	D 6	T6D00M10	3
S 7	T5D05	2	D 7	T6D05M10	3
S 8	T6D10	2	D 8	T6D10M10	3
試験名の凡例 T4S10 T4:版厚 4 c m、 S10:鋼繊維混入率 $V_f=1.0\%$			試験名の凡例 T4D10M10 T4:版厚 4 c m、 D10:鋼繊維混入率 $V_f=1.0\%$ M10:重錘 10.77 k g、		

表-2 使用したコンクリートの力学的特性

鋼繊維 量 (%)	圧縮強度 (N/cm ²)	縦弾性係数 (N/cm ²)	ポア ソン比	引張 強度 (N/cm ²)	曲げ 強度 (N/cm ²)
0	5086.2	2.56×10^6	0.2	302.4	754.5
0.5	4263.0	2.45×10^6	0.2	348.8	778.8
1.0	4312.0	2.50×10^6	0.2	485.6	1322.4

2.2 試験方法

(1) ASTM 試験

図-2 に ASTM 試験の概要を示す。ASTM 試験では固定し

た鋼版上に 2.1 で述べた円盤試験体を設置し、その中央部に質量 1.2kg、直径 6.4cm の鋼球を据え付けた。この鋼球上に高さ 45.7cm から質量 4.5kg の重錘を落下させ試験を行った。試験では、ひび割れが発生するまでの回数と供試体を囲む 4 方の壁のうち少なくとも 3 箇所に接した時点でこれを破壊と等価とみなし、それまでの回数を測定するものである。ASTM 試験はプレーンコンクリートと SFRC の性質を相対的に比較でき、また鋼繊維混入率の異なる SFRC の関連性を比較することができる。しかし結果は絶対的指標として設計に直接利用されることはない。

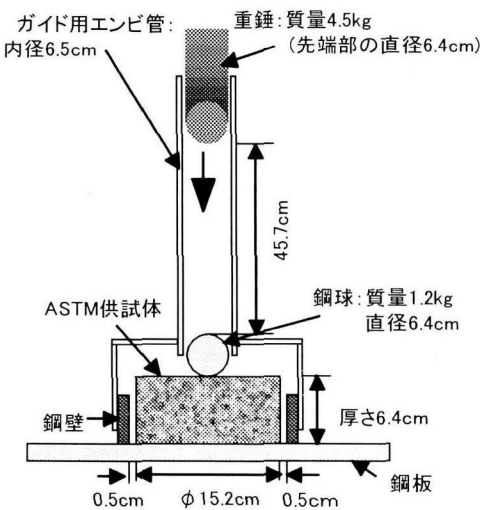


図-2 ASTM 試験概要

(2) SFRC 版における静的試験

静的試験の概要を図-3 に示す。静的試験はサーボバルサ(島津製作所、EHF-40)により SFRC 版中央点を載荷点とし試験を行った。同じ種類の SFRC 版について 2 体づつ行い、荷重-変位関係を求めた。図-4 に SFRC 版の支持位置と変位計測位置を示すが、試験体は 70cm 間隔で上下双方向から直径 1.5cm の鋼棒により挟み込み、4 辺単純支持した。なお、ロードセルを介し衝撃試験で使用する入力棒と先端形状が同じものを試験体中央部に置き、載荷を行った(入力棒は、直径 8.4cm で先端が半球となっている)。また、SFRC 版の 7 点にストローク変位計((株)東京測器 CDP50 及び CDP10)を設置し変位を計測した。

載荷は、 $V_f=0\%$ のプレーンコンクリートの試験体については荷重制御で行い、その他のスラブは変位制御で行った。これは、SFRC スラブにおいては最大荷重以降の変形が大きく重要であるためである。なお、この静的試験では供試体中央の変位がその供試体の版厚以上に達した時、その状態を貫通と等価とみなし試験を終了した。

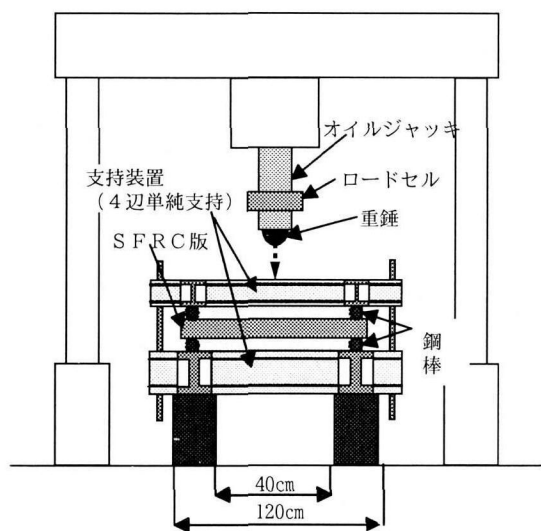


図-3 SFRC 版静的試験概要

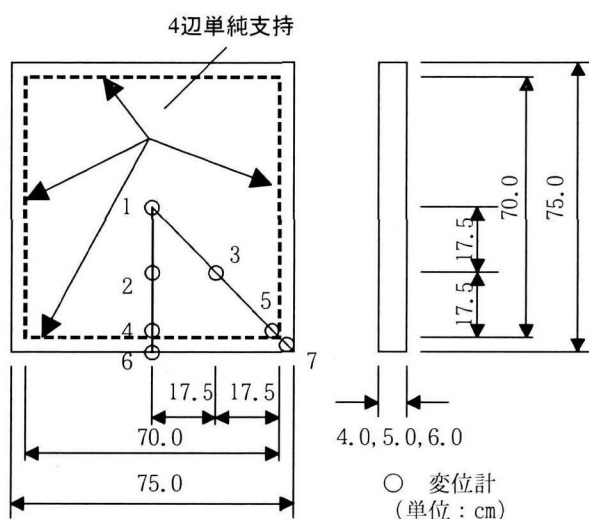


図-4 SFRC 版の支持位置と変位計測位置

(3) SFRC 版における衝撃試験

衝撃試験概要を図-5 に示す。衝撃試験は、鋼製の重錘を直接供試体に衝突させるのではなく供試体の上に設置した鋼製の入力棒に重錘を繰り返し衝突させることにより供試体に衝撃を与えた。1.5 m の高さから先端が半球になっている鋼製の重錘を自由落下させ、入力棒がスラブ供試体を完全に貫通するまで落下を繰り返した。支持装置は、静的試験で使用したのと同じものを用いた。鋼製の重錘は質量 10.77kg のものを用い、それぞれの条件について試験を 3 体ずつ行った。試験では、入力棒が貫通するまでの回数、入力棒の貫入深さが版厚に達するまでの落下回数を測定した。また、静的試験と同様、衝撃試験においても 4 辺単純支持した。

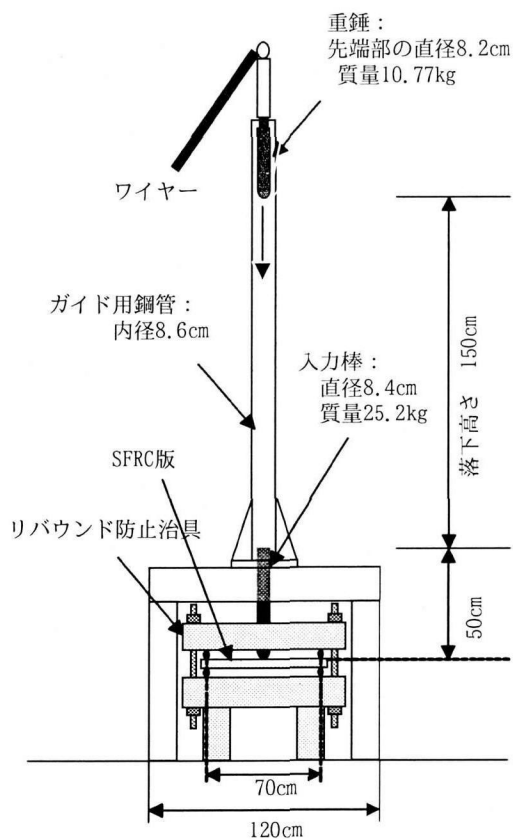


図-5 衝撃試験概要

3. ASTM 試験結果

図-6 に ASTM 試験結果を示す。最初のひびわれが入るまでの回数の平均は鋼繊維混入率 V_f の増加に対し、単調に増加している。一方、破壊までの回数の平均は、 V_f の増加によって飛躍的に増加していることがわかる。また、どの場合においてもひびわれ面では鋼繊維の破断は認められず、コンクリートと鋼繊維間の付着破壊による引き抜けが観察された。

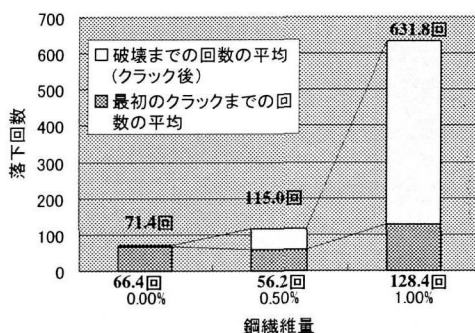


図-6 ASTM 試験結果

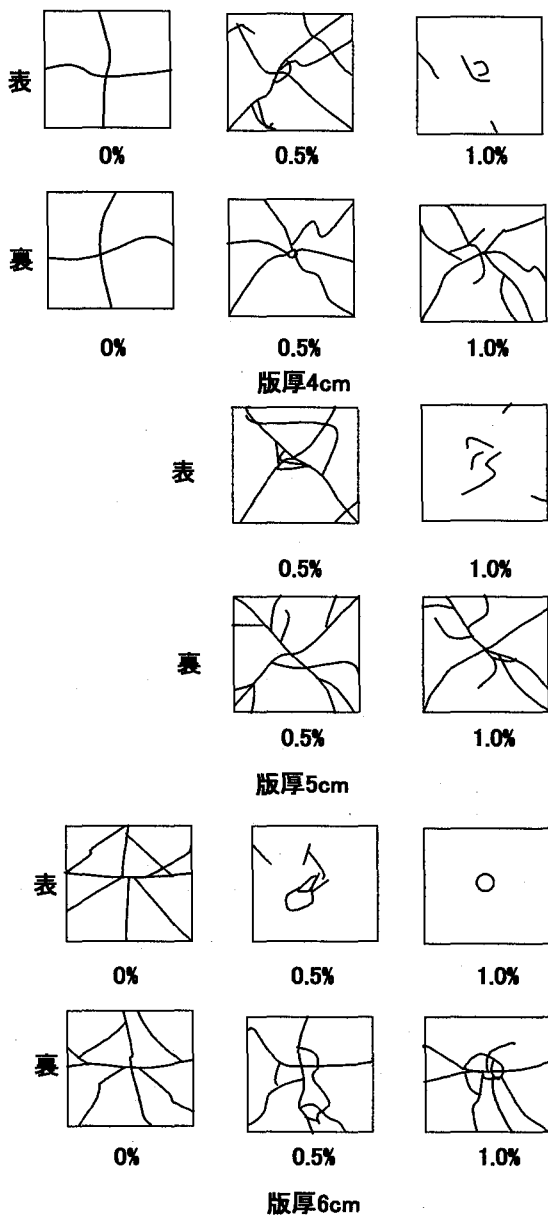


図-7 SFRC 版の破壊状況(静的)

4. SFRC 版における静的試験結果

4.1 SFRC 版の破壊形式

静的試験の試験体の破壊状況を図-7 に示す。最終的な破壊状況の観察結果は以下のようにまとめられる。

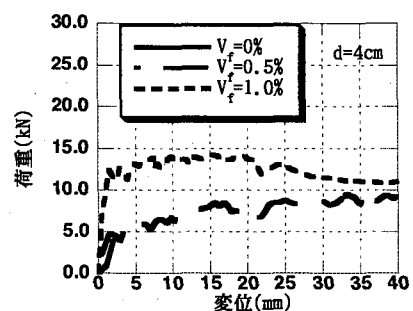
- すべての試験体において、最初に裏面にひびわれが発生する。遅れて表面にもひびわれが発生するが、鋼繊維混入率が大きいほど発生が遅れは大きい。いわゆる降伏線理論に従う曲げ破壊形式といえる。
- 裏面に発生するひびわれはどの場合においても放射上に発達し、鋼繊維混入率が大きいほどひびわれの本数が多い。版厚が6cm と厚く、鋼繊維混入率が大きい $V_f=1.0\%$ では、放射状のひびわれに引き続き最終的には荷重点直下に円状のひびわれが発生した。これは荷重点での押し

抜き破壊が生じたためである。

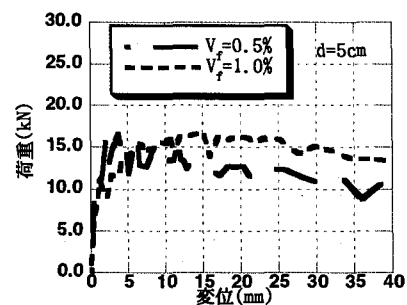
c) 鋼繊維がない場合、表面のひびわれは裏面と同じひびわれ形状となっており、裏面に発生したひびわれがすぐに上方向に進展し破壊に至る脆性的な破壊である。鋼繊維がある場合、鋼繊維混入率が小さい $V_f=0.5\%$ の表面では、荷重点と隅角部の間の、ひびわれのある点間を結ぶような曲げによるひびわれの発生、進展が認められた。

一方、繊維混入率が大きい $V_f=1.0\%$ の表面ではひびわれは比較的少なく、本実験で用いた版厚程度の変形では耐力を保持していることがわかる。

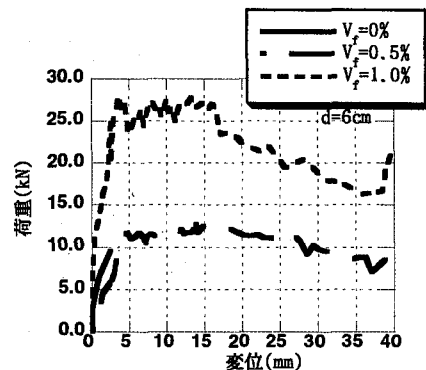
d) どの場合においても ASTM 試験と同様に、ひびわれ面では鋼繊維の破断は認められず、コンクリートと鋼繊維間の付着破壊による引き抜けが認められた。



(a) d=4cm



(b) d=5cm



(c) d=6cm

図-8 静的試験における荷重-変位関係

表-4 最大荷重と各段階の吸収エネルギー

鋼繊維 混入率 $V_f(\%)$	版厚 (cm)	P_{MAX} (KN)	$E_1(1/5)$ (J)	$E_1(1/2)$ (J)
0	4	4.1	-	-
	6	10.0	-	-
0.5	4	9.3	40.8	132.0
	5	14.5	116.0	303.0
	6	21.4	180.0	444.0
1.0	4	15.2	89.3	255.0
	5	15.7	131.0	342.0
	6	22.7	224.0	582.0

厚が厚くなるほど大きくなる。プレーンコンクリートと比較すると、鋼繊維補強コンクリートの特徴の一つとして靱性の改善が上げられる。その点について考察するために荷重-変位関係より求める吸収エネルギーの各段階における値を表-4に示す。なお、表-4において $E_1(1/5)$ 及び $E_1(1/2)$ はそれぞれ変位が版厚の1/5、1/2までの吸収エネルギーを示す。図-9は吸収エネルギーと鋼繊維混入率 V_f の関係を示したものである。

どの段階においても鋼繊維混入率 V_f の増加に伴い吸収エネルギーは増加することがわかる。また、どの段階においても版厚が大きいほど吸収エネルギーが大きい事が確認できる。

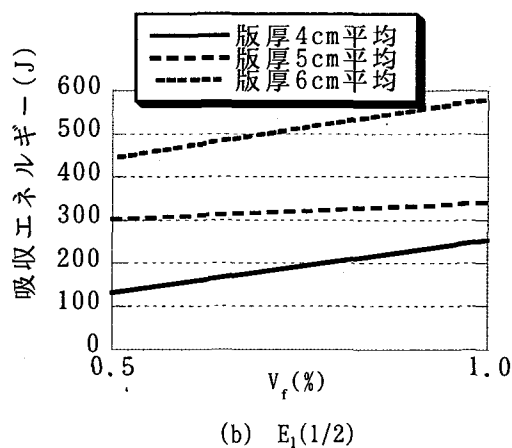
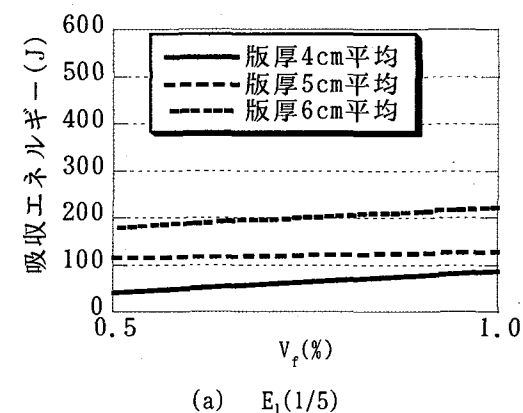


図-9 鋼繊維混入率と吸収エネルギー

4.2 荷重-変位関係

静的試験における荷重と SFRC 版中央変位との関係を図-8(a)、(b)、(c)に示す。最大荷重について注目すると、版厚の同じ供試体については鋼繊維混入率が増すほど大きくなり、同じ鋼繊維混入率の供試体については版

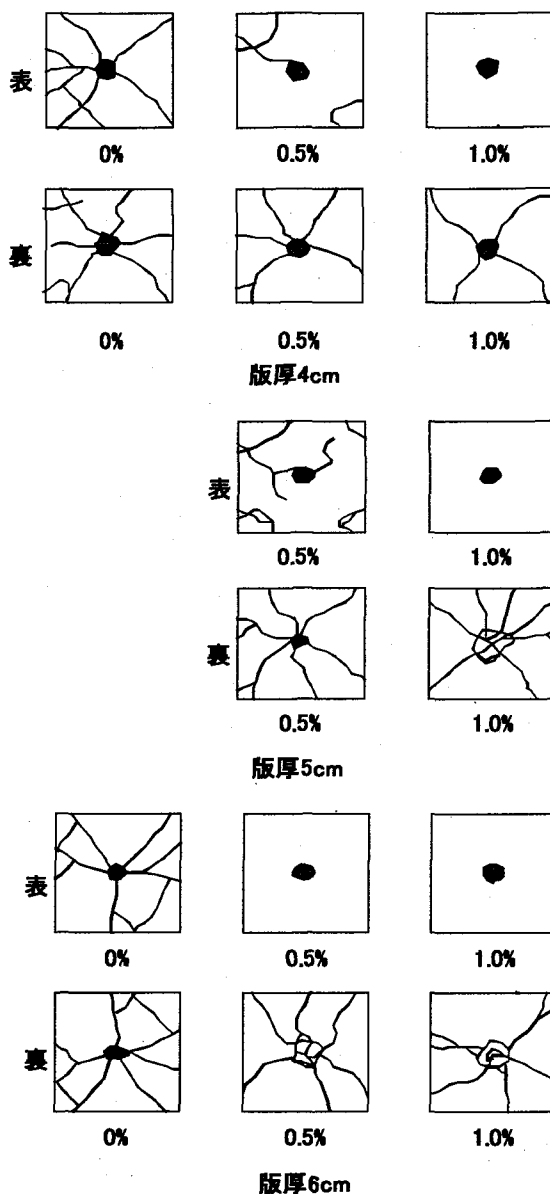


図-10 SFRC 版の破壊状況(衝撃)

5. SFRC 版における衝撃試験結果

5.1 SFRC 版の破壊形状

衝撃試験後の各条件における代表的な供試体の破壊状況を図-10 に示す。各供試体を比較すると鋼繊維が含まれていない供試体は完全に分裂してしまっているのに対し、鋼繊維が含まれている供試体では完全な分裂は認められなかった。また鋼繊維混入率が大きいほど全体としてひび割れの発生量が減少する傾向が認められた。これはひび割れ面で鋼繊維が引き抜けながらエネルギーを吸収し繊維混入率 V_f が大きいほどそのエネルギー量が大きいと考えられる。打撃部分の裏面剥離はプレーンコンクリートでは全ての場合に認められたが、SFRC 版では

表-5 SFRC 版の衝撃試験結果

供試体厚さ (4 cm)			
V_f (%)	落下回数		貫通エネルギー(J)
	変位 4 cm	貫通	
0	2	2	317.0
	3	3	475.4
	3	3	475.4
平均値			422.6
0.5	9	9	1426.3
	9	9	1426.3
	9	9	1426.3
平均値			1426.3
1.0	31	31	4912.7
	14	14	2218.7
	16	16	2535.6
平均値			3222.3
供試体厚さ (5 cm)			
V_f (%)	落下回数		貫通エネルギー(J)
	変位 5 cm	貫通	
0.5	12	12	1901.7
	15	15	2377.1
	28	28	4437.3
平均値			2905.4
1.0	23	23	3644.9
	33	33	5229.7
	42	42	6656.6
平均値			5176.9
供試体厚さ (6 cm)			
V_f (%)	落下回数(回)		貫通エネルギー(J)
	変位 6 cm	貫通	
0	5	5	792.4
	4	4	633.9
	6	6	950.9
平均値			792.4
0.5	38	38	6022.1
	30	30	4754.3
	45	45	7131.4
平均値			5969.3
1.0	45	45	7131.4
	41	41	6497.5
	36	36	5705.1
平均値			6444.7

貫通時にしか裏面剥離が生じなかった。SFRC 版では全ての場合において最終破壊形態が貫通であった。鋼繊維混入率が 1.0%では表面にひび割れはなく打撃による穴の発生だけであった。版厚の違いによる明確な破壊形式の違いは見られなかった。

5.2 衝撃試験結果

衝撃試験結果を表-5 に示す。表中の貫通エネルギーは次式で表される。

$$U_p = nU \tag{1}$$

ここに、 U ：衝突エネルギー- $0.5mV_c^2$ (J)、 n ：貫通するまでの錘の落下回数、 V_c ：衝突落下速度 (m/s)、 m ：衝突体の質量である。

図-11 は、鋼繊維混入率 V_f と貫通エネルギー U_p の関係を示したものである。これより、どの厚さにおいても鋼繊維混入率が高くなるにつれて、貫通エネルギーは大きくなり版厚が厚いほど貫通エネルギーは大きくなるのがわかる。しかし、表-5 より、貫通までの落下回数に比較的大きいばらつきが認められる。これは、衝突点近傍の繊維の配置が大きく影響することが原因と考えられる。一般的に、鋼繊維を完全に一様分布させるのは難しく、実験時の打撃点付近の観察においても不均一な状態が見られた。

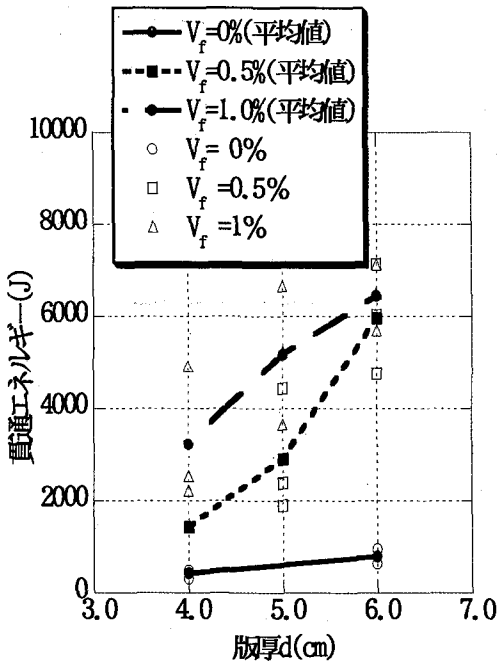


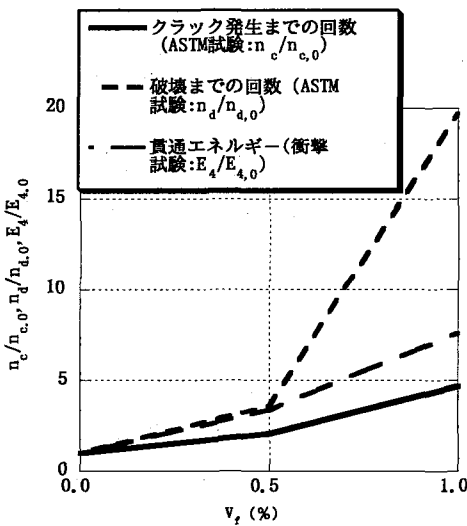
図-11 鋼繊維混入率と貫通エネルギーの関係

5.3 ASTM 試験と衝撃試験の比較

図-12 は鋼繊維混入率と ASTM 試験における打撃回数および SFRC 版衝撃試験における貫通エネルギーとの関係を示したものである。なお、 $V_f=0\%$ での打撃回数と SFRC 版の貫通エネルギーで無次元化し、示してある。ここに、 n_c ：

ASTM 試験において初めのクラックまでの重錘の平均落下回数、 $n_{c,0}$ ： n_c の $V_f=0\%$ における値、 n_d ：ASTM 試験における破壊までの平均落下回数、 $n_{d,0}$ ： n_d の $V_f=0\%$ における値、 E_4 ：衝撃試験において厚さ 4cm の SFRC 版の貫通までに要するエネルギー、 $E_{4,0}$ ： E_4 の $V_f=0\%$ における値である。

衝撃試験の値 $E_4/E_{4,0}$ に比べて $n_c/n_{c,0}$ は比較的近い値を示している。つまり、衝撃試験におけるそれぞれの版厚ごとの鋼繊維の影響は ASTM 試験におけるはじめのクラックが入るまでの鋼繊維の影響と相似である。一方、ASTM 試験の $n_d/n_{d,0}$ には混入率 V_f が他に比べ非常に大きく影響していることがわかる。



6. 貫通評価について

試験結果に基づき、SFRC スラブに関する貫通限界厚さについての評価法について検討する。またここでいう貫通とは、飛来物が鉄筋コンクリートスラブを完全に通り返ける現象であり、貫通限界厚さとは、飛来物がある速さで床版に衝突するとき、飛来物が貫通しない限界の最小版厚のことをさしている。鉄筋コンクリートの貫通限界厚さ e の評価式がいくつか知られている。

修正 BRL 式²⁾と呼ばれる提案式は次のように表される。

$$e = \frac{3.11Dd^{0.2}}{(f'_c)^{0.5}} \left(\frac{V}{1000} \right)^{1.33} \quad (2)$$

ここに、 e ：貫通限界厚さ(cm)、 d ：飛来物の径(cm)、 D ：飛来物の口径密度(kg/cm²)、 V ：飛来物の衝突速度(cm/s)、 f'_c ：コンクリートの圧縮強度(kgf/cm²)である。この評価式は、飛来物の条件として、密度 0.01~0.5624 (kg/cm³) 速度 1500~91500 (cm/s)、弾丸の直径 40.64(cm)以下の範囲で使用される。

Chang 式²⁾と呼ばれる提案式は次のように表される。

$$e = \left(\frac{V_0}{V} \right)^{0.25} \left(\frac{MV^2}{df'_c} \right)^{0.5} \quad (3)$$

ここに、 e ：貫通限界厚さ(cm)、 d ：飛来物の径(cm)、 V ：飛来物の衝突速度 (cm/s)、 V_0 ：基準速度(6096cm/s)、 M ：飛来物質量(kg)、 f'_c ：コンクリートの圧縮強度(kgf/cm²)である。

この評価式は飛来物の条件として、質量 11~343.64(kg)、速度 167.3~3118.1(cm/s)、直径 2.01~30.48 (cm)の範囲で実験的に導かれたものである。

以上2つの式を示したが、これらの式はほかの貫通厚さの評価式に比べて式を構成しているパラメータの数が少ない。ここで、上記の2つの評価式から得られた貫通エネルギーと試験結果とを比較する。比較手順としては

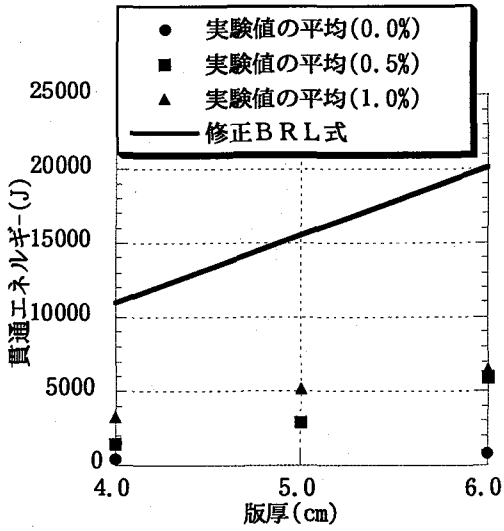


図-13 修正 BRL 式と実験値の比較

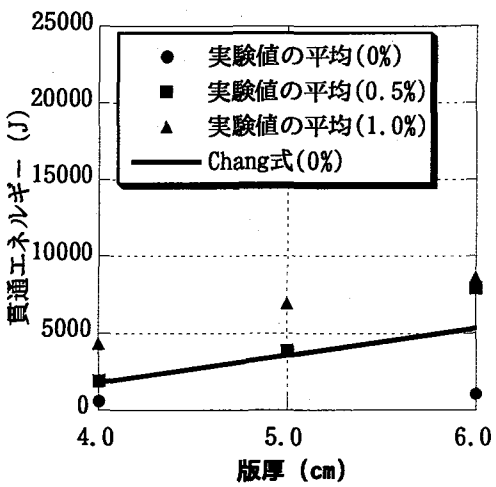


図-14 Chang 式と実験値の比較

それぞれの式における貫通限界厚さ e に試験で用いた供試体の版厚を代入し、速度 V を求め、エネルギーを算出した。修正 BRL 式については図-13、Chang 式については図-14 にそれぞれ版厚と貫通エネルギーの関係として示す。

修正 BRL 式は今回の試験結果とは差異が大きく貫通エネルギーが過大評価されていることがわかる。一方、Chang 式から求められる貫通エネルギーは本試験における $V_f = 0.5\%$ 、 $d=4, 5\text{cm}$ において近い値である。しかし $V_f = 0\%$ または $V_f = 1.0\%$ の供試体の試験結果を大きく下回っており、特に $d=6\text{cm}$ ではその差が大きい。この原因として、Chang 式が鋼繊維混入率を考慮していないことや、Chang 式を用いる場合の飛来物の速度条件が $16.73 \sim 311.81(\text{m/s})$ と本試験 (626.0cm/s) よりも高速であることが挙げられる。ここでは、Chang 式に本研究の衝撃試験の結果を用い、鋼繊維混入率 V_f の影響を考慮した評価式を導く。

手順としては Chang 式に諸条件を代入し、衝撃時の速度 V を求め、実験値から求めた貫通エネルギーから SFRC 版の衝撃試験において版が一回で貫通したと仮定した時の速度 V を実験値の貫通エネルギーから求めた。そして、Chang 式より求められる貫通エネルギー E_c を用いて鋼繊維補強コンクリート版の貫通エネルギー E_{SFRC} が、

$$E_{\text{SFRC}} = (1 + \alpha V_f) E_c \quad (4)$$

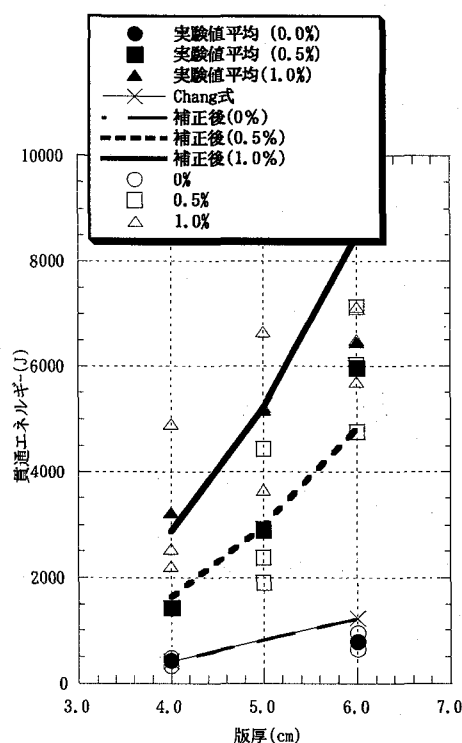


図-15 (式4)より求めたエネルギー

と表現できると仮定した。なお、 $(1 + \alpha V_f)$ は鋼繊維の影響を表す項であり最小2乗法により $\alpha = 5.93$ が求めた。

この結果を式(3)で示した Chang 式に代入し整理すると次式が得られる。

$$e = \left(\frac{V_0}{V} \right)^{0.25} \left(\frac{MV^2}{df_c'} \right)^{0.5} (1 + 5.93 V_f)^{0.38} \quad (5)$$

図-15 に版厚と貫通エネルギーの実験値および式 (4) の貫通エネルギーの関係を示す。この結果 $d=6\text{cm}$ 、 $V_f = 1.0\%$ の場合には多少大きく評価しているが、ほぼ実験結果を表しているといえる。

ここで、ASTM 試験結果を用いた評価について検討する。ASTM 試験における破壊までに要する落下回数 n_f 、ASTM

試験における $V_f = 0\%$ の時の破壊までに要する落下回数 n_0 を用いて、鋼繊維補強コンクリート版の貫通エネルギー E_{SFRC} が、

$$E_{\text{SFRC}} = \beta (n_f / n_0)^\gamma E_c \quad (6)$$

と表現できると仮定した。なお、 $\beta (n_f / n_0)^\gamma$ は鋼繊維の影響を表す項であり最小2乗法により $\beta = 1.28$ 、 $\gamma = 0.11$ が得られた。この結果を式(3)で示した Chang 式に

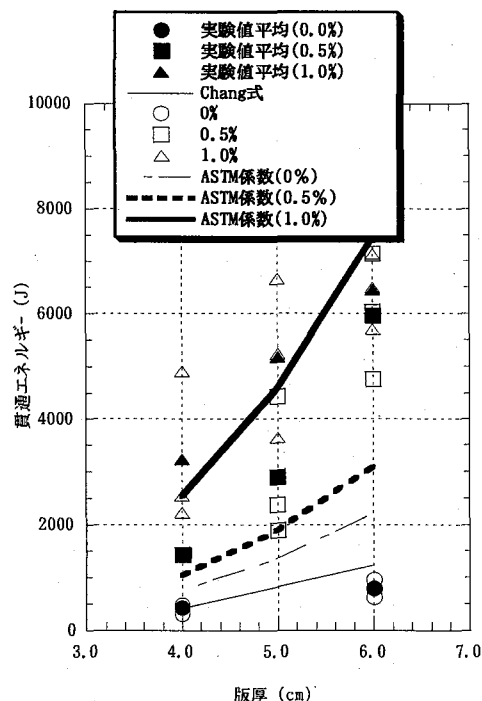


図-16 (式6)より求めたエネルギー

代入し整理すると次式が得られる。

$$e = 1.28 \left(\frac{V_0}{V} \right)^{0.25} \left(\frac{MV^2}{df_c'} \right)^{0.5} \left(\frac{n_{v_f}}{n_0} \right)^{0.11} \quad (7)$$

図-16 に版厚と貫通エネルギーの実験値および式 (6) の貫通エネルギーの関係を示す。この結果 $V_f = 0\%$ の場合には多少大きく評価しているが、ほぼ実験結果に一致している。

ここで示した評価方法は一種類の鋼繊維を用いた、限られたデータに基づいているため、一般化のためには更なるデータの蓄積が必要と考えるが、比較的簡易な ASTM の試験結果の定量的な利用は鋼繊維補強コンクリート版の衝撃による貫通を予測する実用的な方法の一つと考えている。

7. まとめ

本研究で得られた結果は以下のようにまとめられる。

- (1) 鋼繊維補強版では鋼繊維によるコンクリートの靱性が改善され、特に衝撃荷重下においては優れたコンクリート構造であることを実験的に確認した。
- (2) 各種条件下の SFRC 版の破壊状態と貫入エネルギーについて実験的に明らかにした。
- (3) ASTM 試験と SFRC 版における衝撃試験を比較すると ASTM 試験の方が鋼繊維混入率の増加に伴う靱性の向上の影響が顕著であることが明らかになった。
- (4) 貫通限界厚さの Chang の評価式に鋼繊維の影響を考慮した SFRC の貫通限界厚さに関する評価式を示した。
- (5) ASTM 試験からある程度の貫通エネルギー予測が可能であり、既存の評価式を利用した SFRC の貫通限界厚さに関する評価式を示した。

謝辞

本論文の作成にあたり御協力頂いた金沢大学工学部土

木建設工学科の石井裕介氏にはここに改めて感謝の意を表す。

参考文献

- 1) Hannant D.J. 著、槇谷英治訳：繊維コンクリート、森北出版、pp. 1-85、1980。
- 2) 土木学会：構造物の衝撃挙動と設計法、土木学会、pp. 275-291、1993。
- 3) 宮本文穂、中村英明、北山篤：RC 版の衝撃挙動解析におけるコンクリートの引張軟化特性の影響、構造工学論文集、Vol. 44A、pp. 1745-1752、1998。
- 4) 石丸和宏、小林治俊、園田恵一郎：弾性版の波動伝播解析に関する固有関数展開法と有限要素法、計算工学講演会論文集、日本計算工学会、Vol. 1、NO. 2、pp. 875-878、1996。
- 5) Gkinicki M.A. and Radomski W.: Fracture of steel Fiber Reinforced Concrete Slabs Produced by Impact Loads, Proc. of the RILEM Symp. on Development in Fiber Reinforced Concrete, Sheffield, Vol. 2, paper 6.6, pp. 55-60, 1986。
- 6) Radomski W. and Masuya H.: On Perforation of Concrete Slabs Produced by Impacts, Transactions of the Japan Concrete Institute of the Japan Concrete Institute, Vol. 13, pp. 441-448, 1991。
- 7) 槇谷浩、Wojciech RADOMSKI、梶川康男：鋼繊維補強コンクリートスラブの衝撃による貫通実験、構造工学論文集、pp. 147-155、1994。
- 8) 伊藤千浩、白井孝治、大沼博志、能町純雄：剛飛来物の衝突に対する鉄筋コンクリート床版の設計評価式、第 1 回落石等の衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集、土木学会、pp. 19-24、1991。
- 9) 電力中央研究所：総合報告 24、電力中央研究所報告、pp. 1-30、1991。
- 10) ACI: ACI Materials Journal、pp. 588-589、1988。

(1999 年 9 月 17 日受付)