

SFRC 版の衝撃貫通破壊特性に関する研究

A STUDY ON PERFORATION OF STEEL FIBER REINFORCED CONCRETE SLAB UNDER IMPACT

外山 正修*, 山本 満明**, 石井 裕介***, 榎谷 浩****

Masanobu TOYAMA, Michiaki YAMAMOTO, Yuusuke ISHII and Hiroshi MASUYA

* 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)

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

***金沢大学工学部 土木建設工学科 (〒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)

キーワード: 鋼繊維補強コンクリート, 衝撃, 貫通

(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物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⁾。

そ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) は、広く使用されている。

しかし、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^{1), 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す。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う。

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 種類とし、75cm×75cm 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 に示す。また、用いた鋼繊維 (ブリジストン社製タフグリップ) は、長さ 3.0cm、直径 0.05cm、アスペクト比 1/75 のものである。

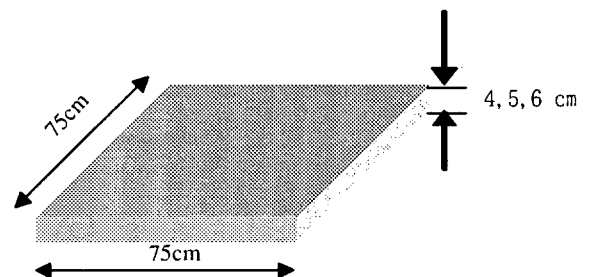


図-1 SFRC 版の形状

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板上に (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

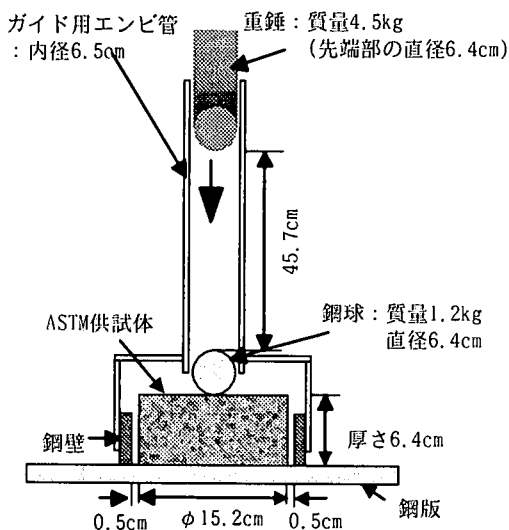


図-2 ASTM 試験

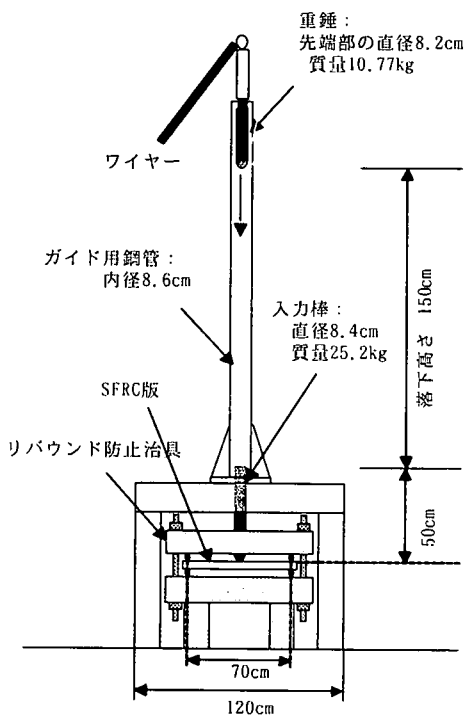


図-3 衝撃試験

量 4.5kg の重錘を落下させ、試験を行った。試験は、ひび割れが発生するまでの落下回数と、試験体を囲む 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、それまでの落下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。

(2) SFRC 版における衝撃試験

衝撃試験概要を図-3 に示す。衝撃試験は、鋼製の重錘を直接試験体に衝突させるのではなく、試験体の上に設置した鋼製の入力棒に重錘を繰返し衝突させることにより試験体に衝撃を与えた。1.5m 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、入力棒がスラブ試験体を完全に貫通するまで落下を繰返した。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落下回数、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、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 辺単純支持とした。

3. 試験結果

3.1 ASTM 試験結果

図-4 に ASTM 試験結果を示す。最初のひび割れが入るまでの落下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、破壊までの落下回数の平均は、 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割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。

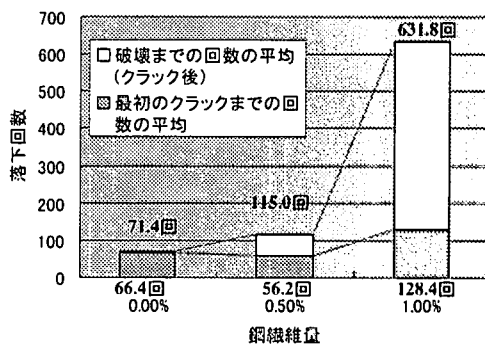


図-4 ASTM 試験結果

3.2 衝撃試験結果

(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試験体の破壊状況を図-5 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いいためと考えられる。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

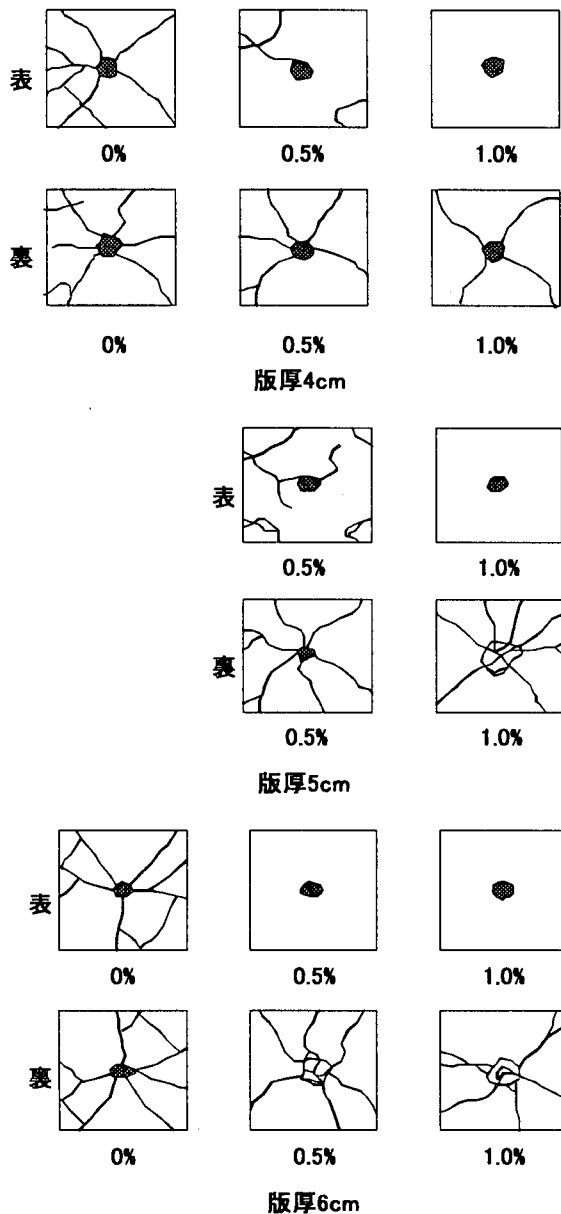


図-5 衝撃試験後の破壊状況

(2) 貫通エネルギー

衝撃試験における貫通エネルギー U_p を次のように定義する。

$$U_p = nU \quad (1)$$

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

図-6 に鋼繊維混入率 V_f と貫通エネルギー U_p の関係を示す。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、試験時において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た。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、試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。

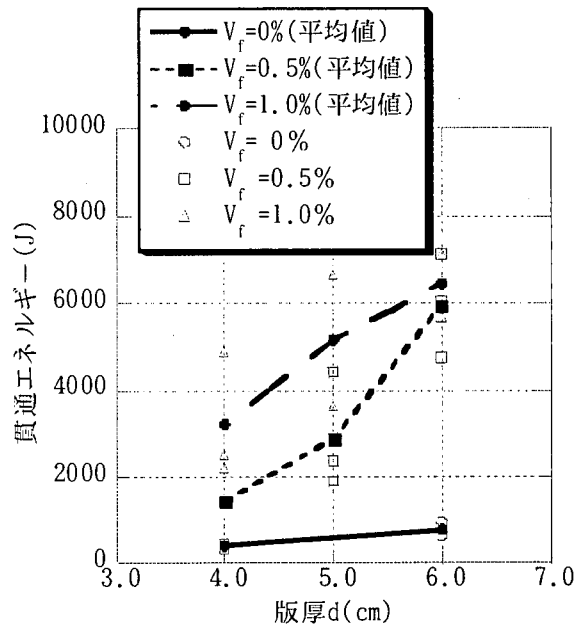


図-6 鋼繊維混入率と貫通エネルギーの関係

3.3 ASTM 試験と衝撃試験の比較

図-7 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 試験において最初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_1 : 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、 $E_{1,0}$: E_1 の $V_f=0\%$ における値である。

衝撃試験の値 $E_1/E_{1,0}$ 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。

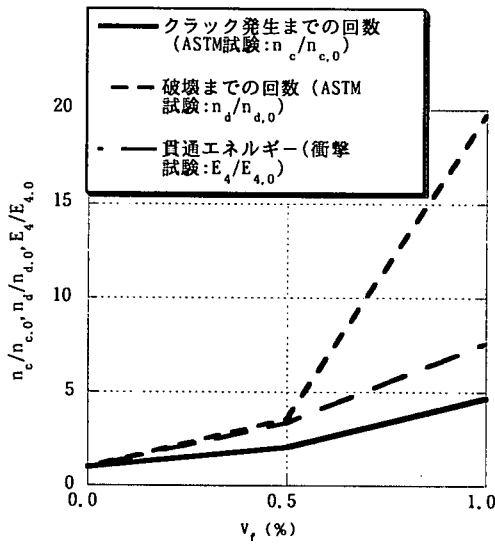


図-7 ASTM 試験と衝撃試験の比較

4. 貫通評価について

4.1 既存の RC に関する貫通限界厚さの評価式

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抜ける現象であり、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/cm^2)、 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/cm^2)である。この評価式は、飛来物の条件として、密度 $0.01 \sim 0.5624$ (kg/cm^3)

速度 $1500 \sim 91500$ (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。

$$e = \left(\frac{V_n}{V} \right)^{0.25} \left(\frac{MV^2}{df_c} \right)^{0.5} \quad (3)$$

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 (6096 cm/s)、 M :飛来物質量(kg)、 f_c :コンクリートの圧縮強度(kgf/cm^2)である。

この評価式は飛来物の条件として、質量 $11 \sim 343.64$ (kg)、速度 $1673 \sim 311810$ (cm/s)、直径 $2.01 \sim 30.48$ (cm)の範囲で実験的に導かれたもの

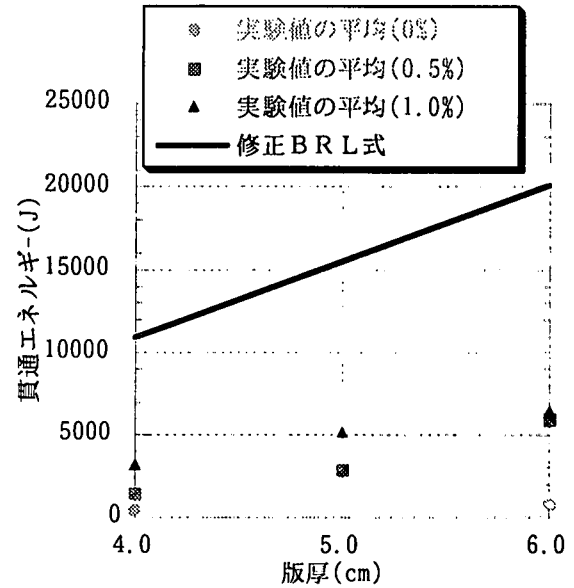


図-8 修正 BRL 式と実験値の比較

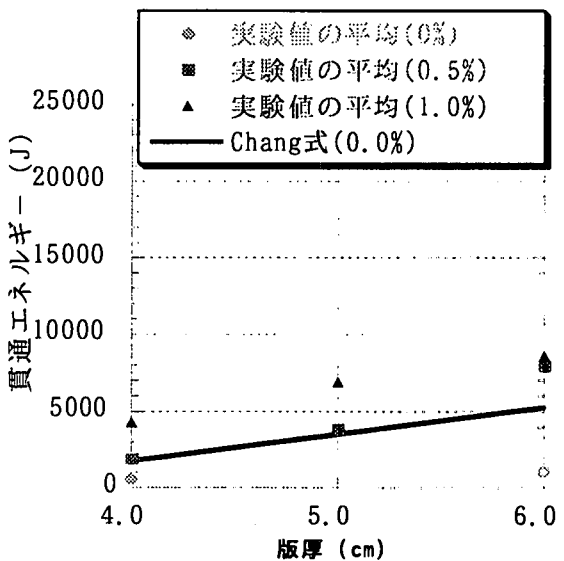


図-9 Chang 式と実験値の比較

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-8、Chang 式については図-9 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。

4-2 Chang 式を用いた評価式の提案

(1) 衝撃試験結果を用いた場合

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、

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

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 $\alpha = 5.93$ が求まった。

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。

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

図-10 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。

(2) ASTM 試験結果を用いた場合

次に 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

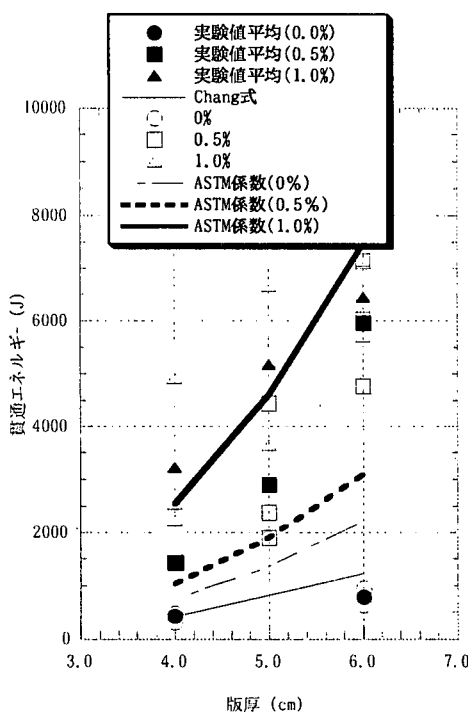


図-10 式(4)より得た貫通エネルギー

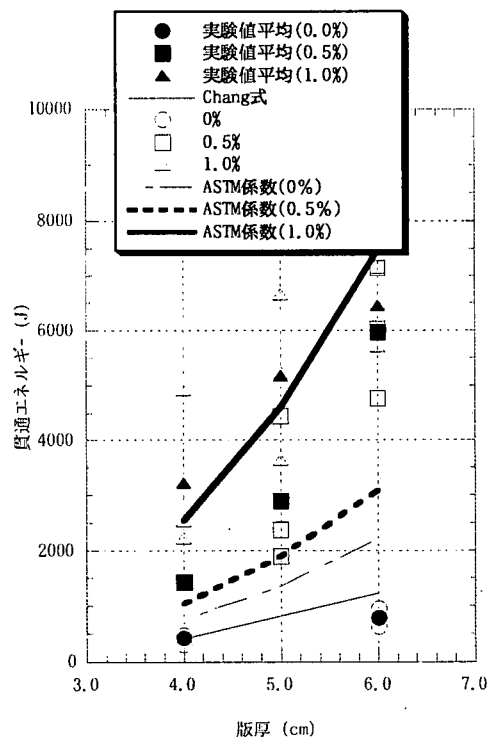


図-11 式(6)より得た貫通エネルギー

示した Chang 式に代入し整理すると次式が得られる。

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

図-11 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。

5. 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。

参考文献

- 1) Hannant D.J. 著、横谷英治訳：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) 榎谷浩、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。