

急速荷重を受けるRPCはりの曲げ挙動に関する研究

Study on flexural dynamic behaviors of RPC beams under rapid loadings

千賀孝宣*, 上田宣人**, 片桐誠***, 藤掛一典****, 大野友則*****

Takanori SENG, Nobuhito UEDA, Makoto KATAGIRI, Kazunori FUJIKAKE and Tomonori OHNO

*防衛大学校 理工学研究科前期課程 建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

**太平洋セメント(株) 中央研究所 研究員 (〒285-8655 千葉県佐倉市大作 2-4-2)

***博(工) 太平洋セメント(株) 中央研究所 チームリーダー (〒285-8655 千葉県佐倉市大作 2-4-2)

****博(工) 防衛大学校 助教授 建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

*****工博 防衛大学校 教授 建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

キーワード：RPCはり, 超高強度セメント複合材料, 鋼繊維, 動的曲げ荷重, 荷重速度
(RPC beam, ultra-high strength cementitious composite, steel fiber, dynamic flexural behavior, loading rate)

1. はじめに

1990年代にフランスで開発されたRPC(Reactive Powder Concrete, 反応性粉体コンクリート)は, 短鋼繊維を混入した超高強度セメント複合材料である^{1),2)}. その特性は, 200N/mm^2 を越える超高圧縮強度や非常に大きなじん性率,さらには極めて小さい透水性・透気性などによって特徴づけられる. このような特性は,多量の高性能減水剤,珪石質微粉末等の反応性粉体および細骨材のみを使用するとともに鋼繊維を混入した結果得られるものである.

既にRPCは歩道橋において一部実用化が始まっているが, 超高強度および高じん性という優れた特性からRPCは車両, 船舶, 航空機などの衝突, 落石, 爆破などの衝撃荷重を受ける構造物への適用が有効であると考えられる. これまで,従来の繊維補強コンクリートに対しては衝撃荷重下におけるその有効性が明らかにされている^{3),4),5),6)}. しかし,RPCのような超高強度鋼繊維補強コンクリートの衝撃挙動に関する研究は見当たらない⁷⁾. そこで本研究では,基礎的なデータを得ることを目的として,軸方向鉄筋比や荷重速度をパラメータとする鋼繊維補強されたRPCはりの動的曲げ荷重試験を行い,これらの試験パラメータが破壊モード, 荷重-変位関係およびじん性率に及ぼす影響を調べた.

2. 試験概要

2.1 試験体形状

図-1にRPCはりの断面形状寸法および配筋状況を示す. 試験体は, 全長1700mmでI型断面を有し, 有効高さ170mmの位置に主鉄筋としてそれぞれD13(SD295), D19(SD295)を3本配置している. ここでは, それぞれの試験体をFM13, FM19と呼ぶ. 一般的なRC曲げ部材の設計では破壊が脆性的になるという理由から主鉄筋比を釣合鉄筋比の75%以下に制限している. 本研究では,RPCが新材料であることから,過度に主鉄筋を配置した場合の挙動を調べる必要があると考え,FM13, FM19試験体の鉄筋比を2.60%および5.92%とした.

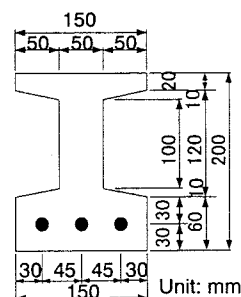


図-1 RPCはり試験体の断面形状寸法

2.2 試験体の製作

試験体の製作に使用したRPCの配合を表-1に示す. 水セメント比を22%とし,直径0.2mmで長さ15mmの

鋼繊維を体積比で 2%混入した。なお本試験では、ポルトランドセメントやシリカフュームなどの結合材と最大粒径 1.2mm の石英砂から成る細骨材、無機混和材をあらかじめ一定の比率で混ぜ合わせた市販のプレミックスを用いた。RPC の練混ぜは、100 リットルパン型ミキサーで行った。はり試験体への RPC の打ち込みは、はり中央部から流し込んだ後、型枠にバイブレータで振動を与えることによって型枠の隅々まで充填した。試験体は、20℃で 4 日間湿潤養生（1 次養生）後に脱型し、さらに 90℃で 48 時間蒸気養生（2 次養生）を行った。打設 2 日後（1 次養生後）で 45N/mm² の圧縮強度

が得られ、蒸気による 2 次養生実施後では 200N/mm² 以上の強度が得られた。表-2 に本試験に使用した RPC の静的一軸圧縮試験結果を示す。

2.3 試験方法

本試験では、最大荷重容量 980kN、最大載荷速度 4m/sec の能力をもつサーボ制御式急速載荷装置を用い、図-2 に示すようにスパン 1200mm で単純支持された試験体に対して中央部の等曲げモーメント区間を 150mm とした 2 点載荷を行った。表-3 に試験パラメータを示す。載荷速度は、静的、低速、中速および高速（変位

表-1 RPC の配合

鋼繊維の混入率 V_f (%)	2.0
水セメント比 W/C (%)	22.0
水 (kg/m ³)	180
RPC プレミックス (kg/m ³)	2254
鋼繊維 (kg/m ³)	157
高性能 AE 減水剤 (kg/m ³)	25

表-2 静的一軸圧縮試験結果

圧縮強度 (N/mm ²)	214.7
弾性係数 ($\times 10^3$ N/mm ²)	55.0
ポアソン比	0.2

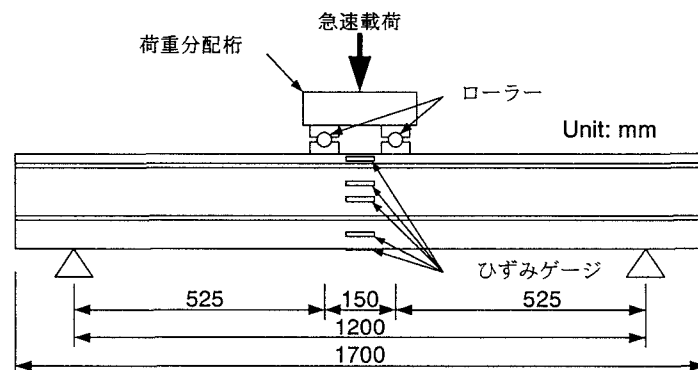


図-2 試験体の概要

表-3 試験パラメータ

試験体名	軸方向鉄筋の直径 (mm)	載荷速度 (m/sec)	試験体数
FM13S	13	1.4×10^{-4} [静的]	1
FM13L		4.5×10^{-2} [低速]	2
FM13M		4.9×10^{-1} [中速]	2
FM13H		2.1×10^0 [高速]	2
FM19S	19	1.4×10^{-4} [静的]	1
FM19L		4.5×10^{-2} [低速]	2
FM19M		4.9×10^{-1} [中速]	2
FM19H		2.1×10^0 [高速]	2

速度表示で 1.4×10^{-4} , 4.5×10^{-2} , 4.9×10^{-1} , 2.1×10^0 (m/sec) の4種類とした。

計測項目は、試験体に作用する荷重、載荷点変位、スパン中央における鉄筋ならびにRPC表面のひずみである。荷重の計測にはロードセル、変位の計測にはレーザー式変位計をそれぞれ用いた。また、鉄筋ならびにRPC表面のひずみの計測位置を図-3に示す。

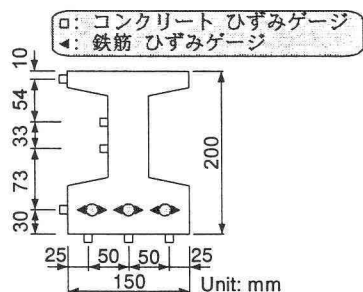


図-3 スパン中央部のひずみゲージ位置

3. 実験結果及び考察

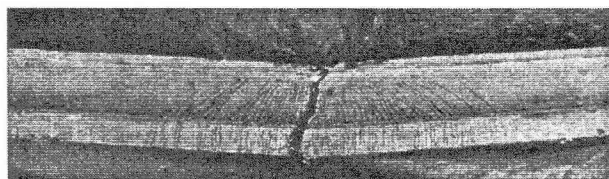
3.1 破壊状況

図-4に、FM13 および FM19 シリーズの各載荷速度で得られたRPCはりの破壊状況を示す。破壊形式は、

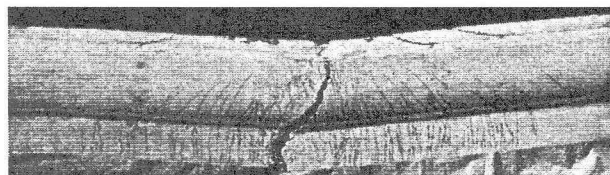
主鉄筋比により大きく異なり、FM13 シリーズでは主鉄筋が降伏した後十分に變形する曲げ引張型破壊を、FM19 シリーズでは上フランジが圧壊する曲げ圧縮型破壊を示した。FM19 試験体は過鉄筋状態になっており、そのために破壊が脆性的になったと考えられる。多くの鉄筋コンクリート設計基準書の中では、一般的に破壊が脆性的になることから釣合い鉄筋比以上の過鉄筋配置を禁じている⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾。

本試験体にはせん断補強筋を一切配置していないが、すべての載荷速度下においてせん断破壊は生じていない。したがって、せん断スパン比(a/d)が3.1程度のはり部材においては、鋼繊維2%を混入したRPCを用いた場合せん断補強筋は不要といえる。

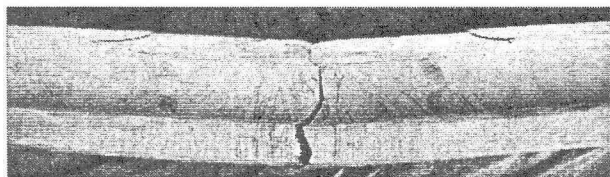
また、試験後の観察では各試験体シリーズとも非常に微細な分散ひび割れが確認された。微細ひび割れ領域は、載荷速度によらずFM13 および FM19 の各シリーズでそれぞれ80cm および100cm程度の範囲に分散している。鉄筋比が大きくなるほど微細な分散ひび割れ領域が拡大していることがわかる。微細な分散ひび割れは、下フランジ内では、はりの軸方向に直交する方向に入っているが、ウェブ内では等曲げモーメント



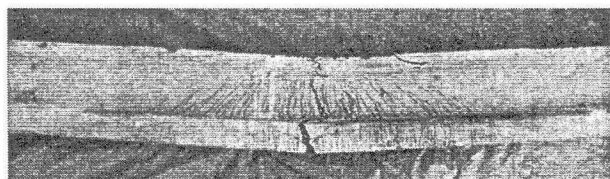
1) 静的載荷



2) 低速載荷



3) 中速載荷



4) 高速載荷

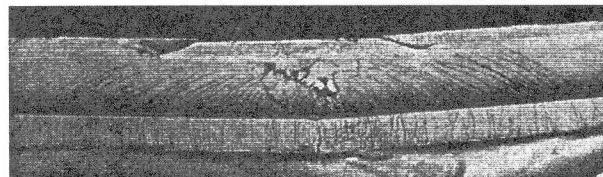
(a) FM13 試験体



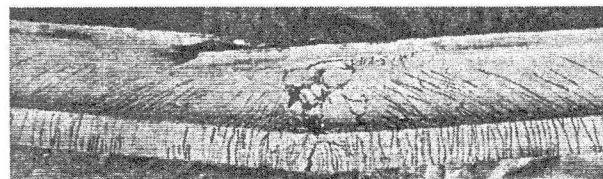
1) 静的載荷



2) 低速載荷



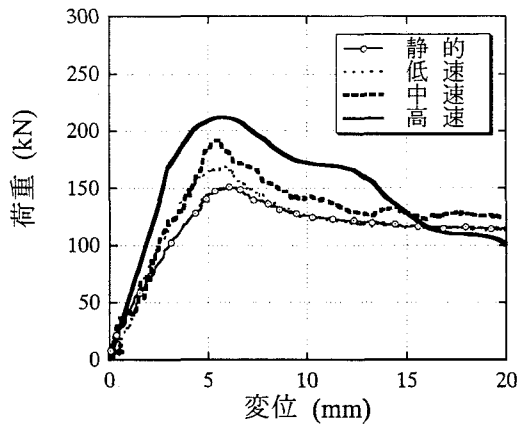
3) 中速載荷



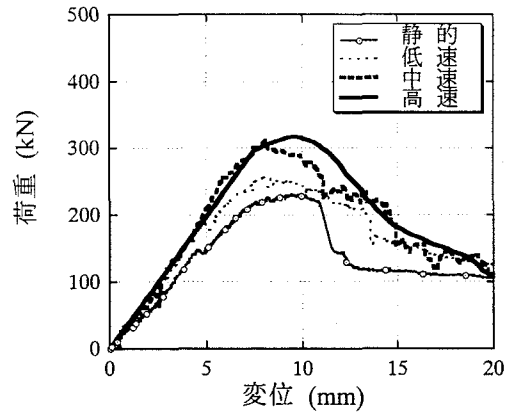
4) 高速載荷

(b) FM19 試験体

図-4 RPCはりの破壊状況



(a) FM13 試験体



(b) FM19 試験体

図-5 荷重-変位関係

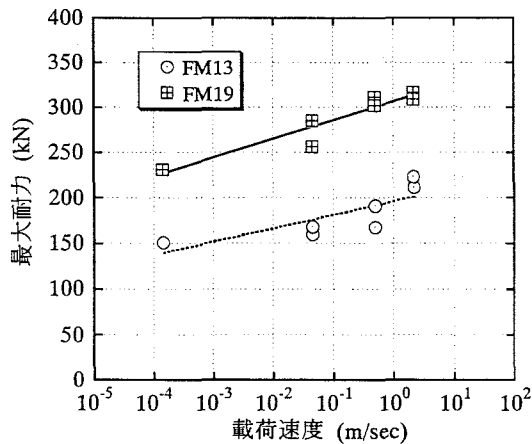


図-6 最大耐力と載荷速度の関係

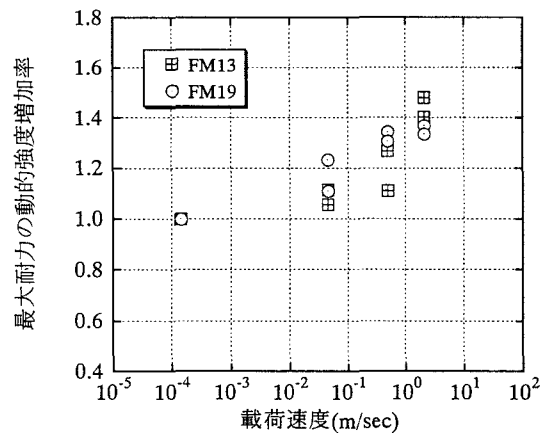


図-7 最大耐力の強度増加率と載荷速度の関係

領域から離れるに従い徐々に傾き、破壊領域端では FM13 シリーズの場合 45° 、FM19 シリーズの場合は 30° 程度になっている。

3.2 載荷速度および軸方向鉄筋比が荷重～変位関係に及ぼす影響

図-5 に、FM13 および FM19 シリーズの各載荷速度で得られた荷重～載荷点変位関係を示す。各シリーズで載荷速度が大きくなると初期の曲げ剛性が大きくなるとともに最大耐力が増加している。一方、最大耐力時の変位は、FM13 および FM19 の各シリーズとも載荷速度によらずほぼ一定で、それぞれ約 6mm ならびに 9mm 程度である。したがって、最大耐力時の変位は鉄筋比に大きく依存することがわかる。

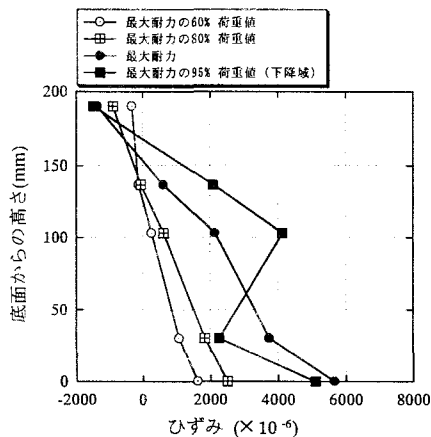
最大耐力以降の挙動についてみると、FM13 シリーズでは全体的に緩やかな下降勾配をもった延性的な挙動を示すのに対して、FM19 シリーズでは非常に急峻な脆

性的な挙動を示している。また、変位が増大するに伴い、載荷速度、鉄筋比の違いによらず一定の荷重値(約 120kN)に収束していく傾向が認められる。

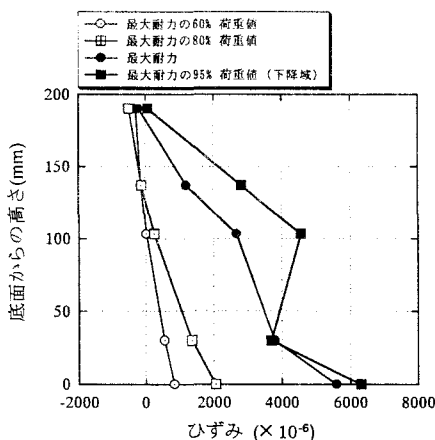
図-6 に最大耐力と載荷速度の関係を示す。RPC はりの最大耐力は、載荷速度の増大に伴って大きくなり、載荷速度の対数値とほぼ比例関係にあることがわかる。FM13 と FM19 試験体の静的載荷における最大耐力はそれぞれ 151.3、231.3kN となっている。同一載荷速度では FM19 は FM13 の約 1.5 倍程度の耐力を有していることがわかる。つぎに、各載荷速度における最大耐力を静的載荷における最大耐力で割って無次元化したものを、最大耐力の動的増加率と定義する。図-7 に FM13 ならびに FM19 シリーズにおける RPC はりの最大耐力の増加率と載荷速度の関係を示す。この図から、最大耐力の増加率は主鉄筋比の違いによらず載荷速度のみに依存することがわかる。高速載荷における最大耐力は、静的載荷の場合より 40% 大きくなることがわかる。

3.3 スパン中央部における断面ひずみ分布

スパン中央部における代表的な断面ひずみ分布を図-8に示す。これより、コンクリートと鉄筋のひずみ分布は最大耐力まではほぼ直線的な関係にあるが、最大耐力以降の下降域ではもはや直線的な関係にないことがわかる。



(a) 静的載荷



(b) 高速載荷

図-8 代表的な断面ひずみ分布 (FM13 試験体)

3.4 吸収エネルギー

次に、主鉄筋比がRPCはりの荷重～変位関係を積分して得られる吸収エネルギーに及ぼす影響について検討した。ここでは、吸収エネルギーとして、下降域における最大耐力の85%までに部材に吸収されたエネルギーを用いた。FM13, FM19 シリーズで得られた吸収エネルギーと載荷速度の関係を図-9に示す。各試験体の吸収エネルギーは、載荷速度の増大に伴って大きくなる。FM13 と FM19 試験体の高速載荷における吸収エネルギーはそれぞれ 1528J, 2856J となっている。同一載荷速度ではFM19はFM13の約1.8倍程度の吸収エネルギーを有している。

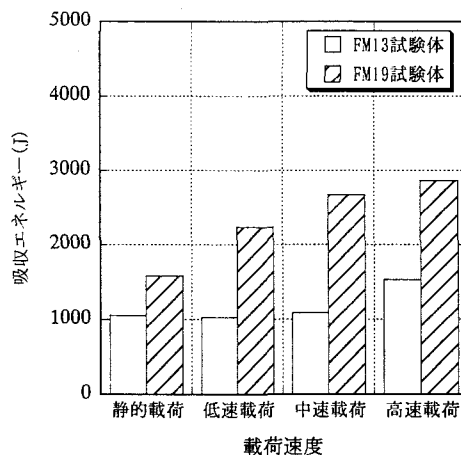


図-9 各試験体の吸収エネルギー

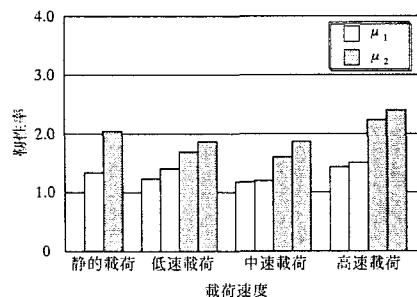
3.5 じん性率

RPCはりの構造的な性能を評価するため、次に示す2つのじん性率を用いた。

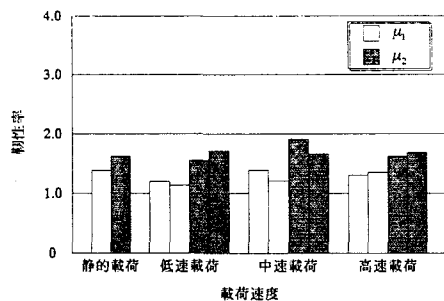
$$\mu_1 = \frac{\delta_0}{\delta_y} \quad (1) \quad \mu_2 = \frac{\delta_u}{\delta_y} \quad (2)$$

ここに、 δ_y : 軸方向鉄筋の降伏開始時の変位、 δ_0 : 最大耐力時の変位、 δ_u : 荷重-変位関係の下降域で最大耐力の85%時の変位である。

FM13, FM19 シリーズで得られた μ_1 , μ_2 それぞれのじん性率と載荷速度の関係を図-10に示す。最大耐力時の変位から計算したじん性率 μ_1 は、FM13, FM19 シリーズともほぼ等しく1.3程度である。これに対して、下降勾配中の最大耐力の85%時の変位から求めたじん性率 μ_2 は、FM13シリーズが2.0程度であるのに対してFM19シリーズの場合には1.6程度と小さくなっている。これは、FM13シリーズが各載荷速度で曲げ引張型破壊するのに対しFM19シリーズでは曲げ圧縮型破壊を生じたことに起因している。このように破壊形式の違いがじん性率に影響を及ぼしており、理想的な破壊形式であるFM13の方が各載荷速度で大きなじん性率を期待できる。



(a) FM13 試験体



(b) FM19 試験体

図-10 各試験体のじん性率

4. まとめ

本研究では、鋼繊維混入率 2%とした RPC はりの動的曲げ荷重試験を行い、軸方向鉄筋比や荷重速度が破壊モード、荷重-変位関係、じん性率に及ぼす影響を調べた。本研究より得られた結果をまとめて以下に示す。

- (1) RPC はりの破壊形式は、荷重速度によらず主鉄筋比により大きく異なる。釣合い鉄筋比以下で FM13 シリーズは曲げ引張型破壊するのに対して、FM19 シリーズは曲げ圧縮型破壊を示す。
- (2) すべての試験体において、RPC に特有の微細な分散ひび割れが小さな間隔で形成された。主鉄筋比が大きくなると、微細ひび割れが広く分布する傾向にある。
- (3) 鋼繊維を 2%混入した RPC を用いたせん断スパン比 3.1 程度のはりでは、せん断補強筋を配置しなくても十分なせん断耐力を有している。
- (4) RPC はりの初期剛性や最大耐力は荷重速度の増加にともない増大する。しかしながら、最大耐力時の変位は荷重速度にはよらず主鉄筋比のみに依存する。
- (5) RPC はりの荷重-変位関係における最大耐力以降の挙動は特に主鉄筋比の違いによって大きく異なる。主鉄筋比が釣合い鉄筋比以下のはり部材は緩やかな下降勾配を有し延性的な挙動を示すのに対して、過鉄筋状態のりは急激な下降勾配を有する脆性的な挙動を示す。
- (6) RPC はりの荷重-変位関係における最大耐力以降の下降勾配は荷重速度の増加にともない大きくなる。しかしながら、大きな変位領域では荷重速度、鉄筋比の違いによらず一定の荷重値(約 120kN)に収束していく傾向が認められる。
- (7) RPC はりの断面ひずみは、最大耐力までほぼ直線的に分布する。

- (8) 荷重-変位関係の下降部分における最大耐力の 85%に相当する点におけるじん性率 μ_2 は荷重速度に依らず、主鉄筋比のみに依存する。しかし、最大耐力点におけるじん性率 μ_1 は荷重速度および主鉄筋比にはよらずほぼ一定値を示す。
- (9) RPC はりの荷重-変位関係を積分して得られる吸収エネルギーについて、荷重-変位関係の下降域における最大耐力の 85%までに部材に吸収されたエネルギーは、荷重速度の増大に伴って大きくなる。

参考文献

- 1) Cheyrezy, M., Maret, V. And Frouin, L., "Microstructural analysis of RPC (Reactive Powder Concrete)", Cement and Concrete Research, Vol.25, No.7, pp.1491-1510, 1995.
- 2) Richard, P. and Cheyrezy, M., "Composition of reactive powder concretes", Cement and Concrete Research, Vol.25, No.7, pp.1501-1511, 1995.
- 3) Naaman, A. E., and Gopalratnam, V. S., "Impact properties of steel fiber reinforced concrete in bending", International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, V.5, No.4, pp.225-237, 1983.
- 4) Gopalratnam, V. S., and Shah, S. P., "Properties of steel fiber reinforced concrete subjected to impact loading", ACI Journal, V.83, No.1, pp.117-126, 1986.
- 5) Banthia, N., Mindess, S., and Trottier, J.-F., "Impact Resistance of Steel Fiber Reinforced Concrete", ACI Materials Journal, V.93, No.5, pp.472-479, 1996.
- 6) Bindiganavile, V., and Banthia, N., "Polymer and Steel Fiber-Reinforced Cementitious Composites under Impact Loading—Part 2: Flexural Toughness", ACI Materials Journal, V.98, No.1, pp.17-24, 2001.
- 7) Bindiganavile, V., Banthia, N. and Aarup, B., "Impact Response of Ultra-High-Strength Fiber-Reinforced Cement Composite", ACI members and structures under impact or impulsive loadings", Proceedings of Concrete Structures Under Impact and Impulsive Loading, RILEM•CEB•IABSE•IASS-Interassociation Symposium, Berlin, pp.13-18, June, 1982.
- 8) 竹田仁一, 立川博之, 藤本一男, コンクリートと衝撃-衝撃を受けるコンクリートの性状と実験-, コンクリート工学, Vol.15, No.4, pp.11-21, 1977.4
- 9) コンクリート標準示方書〔構造性能照査編〕, 土木学会, pp11-72, 2002.
- 10) Canadian Standards Association, Design of Concrete Structures, 1995.