

論文 炭素繊維斜交メッシュ補強高欄の耐衝撃性に関する解析的検討

北山 篤^{*1}・宮本文穂^{*2}・岡田慎一郎^{*3}・小野紘一^{*4}

要旨：衝撃荷重を受ける高欄のようなコンクリート版構造に発生するひび割れは放射状を呈することが知られている[1]。他方、耐久性の面からは、総厚さの制限によりかぶりは小さくなるため鉄筋腐食進行によってかぶりコンクリートの剥落等の劣化につながる場合が多い。そこで斜めに交差させた炭素繊維(CF)メッシュは、上述のような現状にあるコンクリート高欄を対象にすると、放射状ひびわれに直交させることおよび鉄筋より高強度でしかも腐食劣化のしにくい炭素繊維とすることで力学的にも耐久的にも有利に適用できると考え、解析による検討を行い、CFメッシュの鉄筋代用品としての効果を確認した。

キーワード：炭素繊維，斜交メッシュ，衝撃荷重，耐衝撃性指標

1. はじめに

本研究は、炭素繊維を斜交メッシュ状に組み合わせたCFメッシュの鉄筋代用品としての適用性について検討するために実施された実物大高欄供試体に対する静的試験および衝撃実験結果を検証するため、実験の諸条件に適合させた3次元有限要素モデル[2]による破壊挙動解析を行い、これらの結果を基に耐衝撃性の評価を試みたものである。

2. 高欄実験の概要と主な結果

2. 1 補強筋の材料特性

表-1にCFメッシュの特性を鉄筋と比較して示す。

表-1 CFメッシュと鉄筋の比較

	密度 (g/cm ³)	降伏強度 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	ヤング係数 (kgf/cm ²)	降伏ひずみ (%)	破断ひずみ (%)
CFメッシュ	1.2	-	9200	710000	-	1.2
鉄筋(D13)	7.85	3600	5100~7140	2040000	0.17	3.5

2. 2 実験に用いた高欄供試体の諸元

図-1に実験を行った各タイプの高欄供試体の形状・寸法を示すと共に以下にその特徴を述べる。

- ①高欄タイプAは高架高速道路での標準鉄筋コンクリート高欄(補強方法：鉄筋，補強材間隔：125mm，かぶり：60mm，高欄総厚さ：250mm)
- ②高欄タイプBは、CFメッシュで補強し、CFの有する高強度と高耐食性を考慮してかぶり厚を高欄タイプAに比べて減少させた高欄(補強方法：CFメッシュ，補強材間隔：275mm，かぶり：30mm，高欄総厚さ：250mm)

* 1 神戸大学大学院 自然科学研究科建設学専攻(正会員)

* 2 神戸大学助教授 工学部建設学科，工博(正会員)

* 3 大阪ガス(株) 開発研究所リーダー

* 4 (株) 鴻池組土木本部部长，工博(正会員)

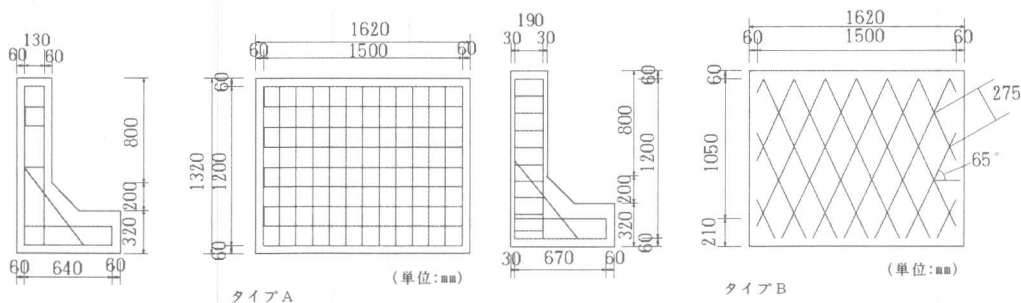


図-1 高欄供試体の形状・寸法

2. 3 衝撃実験

衝撃力は、重量2.48tfの球形重錘を2点吊りした振り子式試験装置により、振り子半径3mで所定の落下高さより载荷した。衝撃力作用位置は、大型車のバンパー高さを考慮して路面より65cm（高欄上縁より35cm）の位置であり、長さ15cmの衝突面積を確保するため重錘と高欄の間に载荷版を設置した。

2. 4 衝撃実験の結果

衝撃実験結果の主な結果をまとめると以下ようになる。

- ①各高欄とも、落下高さ106cm(原位置エネルギー2.63tf・m)で高欄の内外面に多数の水平ひび割れが発生し、高欄外面のコンクリートの剥離が生じた。また、エネルギーの吸収率もほぼ100%となっており、この時の落下エネルギー(2.63tf・m)が各高欄を1回の衝撃で破壊するのに必要なエネルギーであると考えられる。
- ②破壊時最大衝撃荷重は、タイプA(RC)で218tf、タイプB(CF)で124tfと、かなり差異がみられる。
- ③破壊形式は、タイプA(RC)では高欄が押し抜けるせん断型の破壊を示したのに対して、タイプB(CF)ではひび割れが広がり、曲げ型の破壊であった。
- ④高欄の変形は、CFメッシュ使用高欄がかなり大きかった。

3. 解析手法と解析モデル

3. 1 解析手法とその精度

ここでは過去に著者等が行った鉄筋コンクリート版およびFRP筋を鉄筋の代わりに補強筋として用いたコンクリート版に対する振り子重錘落下実験結果による衝撃破壊実験結果と、これらの実験と対応させた6面体要素による3次元有限要素解析[2]の解析結果がRC版などの弾塑性領域での挙動とどのように対応するかの検証を行い、本解析手法がコンクリート版構造の衝撃挙動に対してどの程度の精度を得る事が出来るかを把握した。なお、本解析における衝撃荷重の基本入力データは、これらの実験によって得られた衝撃荷重波形を用いている。

ここで、解析および実験で対象とするコンクリート版は2種類で、普通コンクリート(圧縮強度331kgf/cm²、ヤング係数 $E=2.76 \times 10^5$ kgf/cm²)に普通鉄筋(SD35)を組み合わせたもの(RC版)および普通コンクリートに破断ひずみ $\epsilon_u=7020\mu$ 、ヤング係数 $E=1.33 \times 10^6$ kgf/cm²の高弾性炭素繊維を用いた連続繊維補強筋(FRP)を組み合わせたもの(RC-A版)である。解析手法として、コンクリート要素の弾塑性および破壊状態を3次的に評価するために導入したOttosenのモデル[3]、ひびわれ発生後のコンクリートの剛性を改善するために導入したコンクリートの引張軟化特性[4]、鉄筋をバネと考え、コンクリートと鉄筋の間に付着バネを設定しコンクリート要素と鉄筋要素間の付着特性等を考慮した。

検証結果の例として、図-2に普通鉄筋を用いたコンクリート版(RC版)の有限要素解析および実験に

おける衝撃荷重～版中央変位曲線の解析結果と実験結果の比較を示す。この図より6面体要素を用いた有限要素解析による解析結果は、実験と比較して衝撃荷重の第1ピーク時から除荷段階までは良く一致しているものの、その後の挙動は一致しているとは言い難い。この原因としては、本解析が荷重増分法を用いているため、解析過程での除荷時における挙動を無視して負の荷重を作用させているため、除荷時およびその後の再載荷時において版の挙動と荷重との関係がアンバランスになっているためであると考えられる。

また、図-3にFRP筋を用いたコンクリート版(RC-A版)の衝撃荷重～版中央変位曲線の衝撃荷重の第1ピークと除荷時までの解析結果と実験結果との比較を示す。衝撃荷重は非常に短い時間の間に作用するため、実験の際にコンクリート版を支える支柱にも衝撃力が加わり微少ではあるが振動したと考えられ、この影響も解析値と実験値の差異に影響していると考えられる。しかしながら、コンクリート版の衝撃作用による破壊現象を対象とした場合、衝撃荷重の第1ピークあたりまでが重要となると考えられ、第2ピーク時の挙動はさほど重要ではないと考えられる。したがって、コンクリート版の破壊挙動を評価する場合には本解析方法でも十分な精度が得られるものと考えられる。

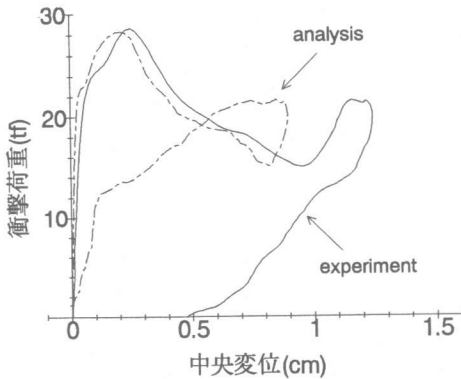


図-2 RC版の解析結果と実験結果の比較

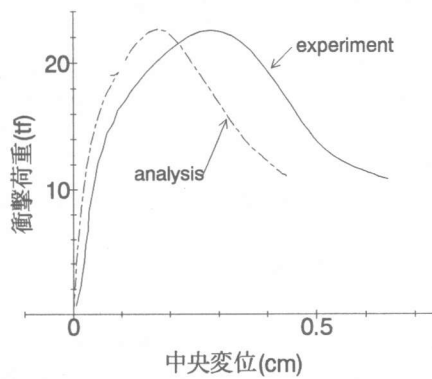


図-3 RC-A版の解析結果と実験結果の比較

3. 2 荷重条件

上述の検証の結果、本解析手法はコンクリート版構造の衝撃破壊挙動に関して、ほぼ適用可能であると考えられるので、図-1に示した実物大実験で用いた高欄(タイプAとタイプB)に対して適用し、種々の耐衝撃性評価を試みる。

なお、今回解析に用いた入力衝撃荷重としては、3.3で設定する各種高欄の衝撃荷重～時間関係が不明であるため、単質点系による衝撃荷重を想定し、図-4に示すような3角形近似した衝撃荷重波形を用いることとした。入力荷重の載荷速度の大きさは、載荷速度の変化による影響をみるため、50,100tf/msecの2種類を設定した。(図-4の t_1 は高欄が破壊した時点で、そのとき最大衝撃力 P_0 となるように設定する)

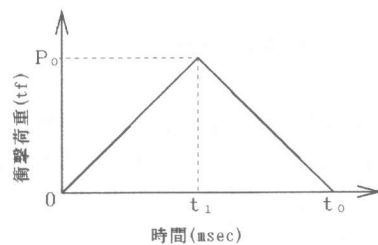


図-4 入力荷重波形

3. 3 解析モデルと解析に用いた高欄の種類

解析モデルとしては、図-5に示すような要素分割(X方向15分割,Y方向20分割,Z方向5分割)を設定し、可能な限り実験に用いられた供試体に近似するようにして解析を行った。解析は補強筋配置タイプAとタイプBの2種類の場合について行った。各高欄の補強筋の配置を図-6のように設定した。

また、実験に用いられた供試体の載荷速度の変化による比較、材料の効果、配筋形状の効果を考察するため6通りの高欄に対して解析を行った。今回の解析対象とした高欄の種類と記号などを表-2にまとめて示す。なお、表-2のBSN2は、図-2のタイプAとタイプBのように鉄筋を配置すると、同じ鉄筋を用いた場合、両者間に鉄筋比の差が生じるためBSN2はASNとの鉄筋量が同じになるように鉄筋量を増加(鉄筋の半径、周長を増加)させ、配筋の効果の比較が可能となるようにしたものである。

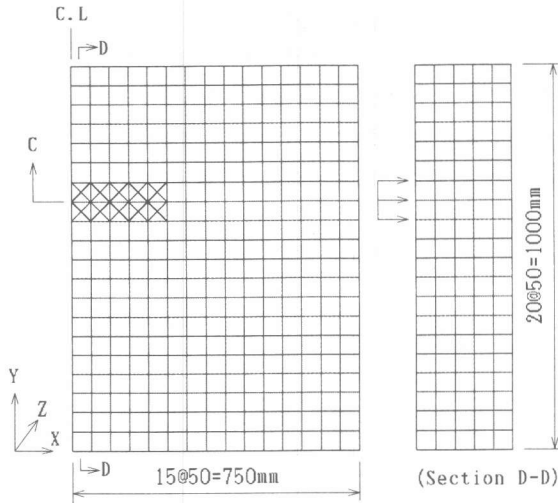


図-5 解析に用いた高欄の要素分割

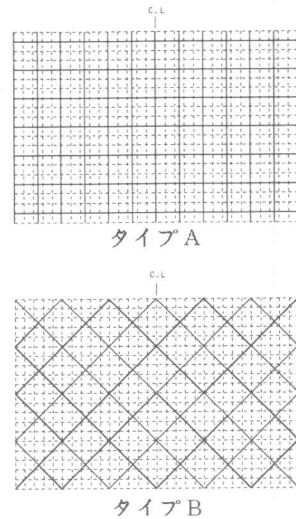


図-6 解析に用いた各高欄の補強筋配筋図

表-2 解析に用いた高欄の種類と記号一覧

目的	高欄種類	補強筋配置	使用補強筋	せん断補強筋
実験結果との比較 載荷速度の影響	ASY	タイプ A	鉄筋 (S)	有り (Y)
	BCY	タイプ B	C F (C)	有り (Y)
材料の効果	BSN	タイプ B	鉄筋 (S)	無し (N)
	BCN	タイプ B	C F (C)	無し (N)
配筋の効果	ASN	タイプ A	鉄筋 (S)	無し (N)
	BSN2	タイプ B	鉄筋 (S)	無し (N)

4. 解析結果と考察

4.1 破壊時衝撃荷重

図-7は実物大供試体による破壊時衝撃荷重の実験結果と解析結果の比較を示したものである。この場合の解析に限っては、実験で得られた、衝撃荷重～時間関係を入力し、解析上での破壊が生じた衝撃力を破壊時衝撃荷重として比較している。なお、実験結果の破壊時衝撃荷重は、衝撃荷重～時間関係のピーク時の値を取っている。これより、解析プログラムの性格上、ハンチ等の断面変化部の形状を一致させることは出来なかったが、それ以外は可能な限り実験供試体の諸寸法や、諸条件と一致させて解析を行った。この実験結果と解析結果の比較をみてみると、破壊時衝撃荷重に関して言えば非常に良く一致した解析結果が得られているこ

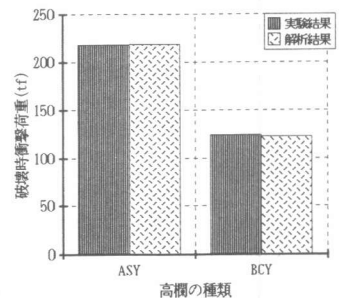


図-7 実験結果と解析結果の比較

とが明らかであり、本解析手法が高欄構造物にも十分適用可能と考えられる。

図-8は実験に用いた供試体に近似させた解析モデルを用いて、図-4の三角形荷重波形を入力した場合の荷重速度の変化による破壊時挙動の比較の内、破壊時衝撃荷重の比較を行ったものである。これより、荷重速度50tf/msecの場合、高欄ASYおよび高欄BCYの両者は同様の耐荷力を有するが、100tf/msecになると、高欄BCYは高欄ASYに比べ30tfの耐荷力の減少が見られるようになる。この原因として荷重速度50tf/msecでは高欄ASY、高欄BCYとも荷重面に対して裏面の支点で破壊する曲げ破壊を示したのに対し、100tf/msecでは荷重部近傍で圧壊する押し抜きせん断破壊であったことから考えると、高欄ASYに比べ高欄BCYの方がかぶり厚が30mmと薄いため、解析モデルの1要素の強度が小さいことよって早い段階で破壊したものと思われる。

次に図-9は補強筋配置タイプBの場合でせん断補強筋を考慮しない解析を行い、補強筋として鉄筋とCFの2種類の材料を用いて材料特性を変化させた場合の破壊時衝撃荷重(図-4の三角形荷重波形を入力)の解析結果を比較したものである。この図よりヤング係数の小さなCFを用いた場合でも鉄筋を用いたモデルと同程度の耐荷力が荷重速度に関係なく得られていることがわかる。このことから、材料の効果としてCFを鉄筋の代わりに用いても十分耐荷力が確保され、衝撃荷重に有効に抵抗するものと考えられる。

図-10は補強筋配置形状の効果を検討するため、実験で用いた直交配置と斜交配置の破壊時衝撃荷重に及ぼす差異を、補強筋として鉄筋を用いて比較したものである。これより荷重速度が50tf/msecの曲げ破壊形式を示すような場合は、斜交配置の方が直交配置よりも約5tfの破壊時衝撃荷重の増加がみられ、斜交配置の有効性が明かである。しかし、荷重速度100tf/msecのように荷重部近傍でコンクリートが圧壊するような場合では高欄ASN、高欄BSN2とも同程度の耐荷力を示す結果となり、斜交配置は版構造が曲げ破壊を示すような場合に効果を示すものと思われる。

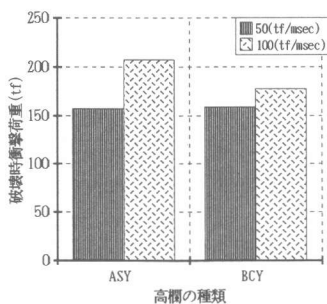


図-8 実験供試体での荷重速度の影響

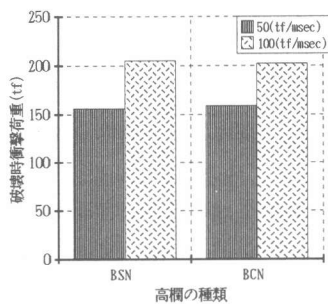


図-9 材料の効果

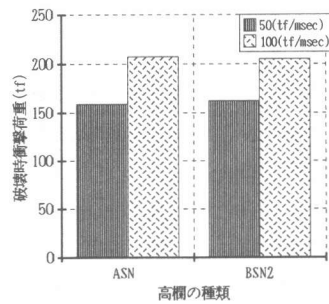


図-10 配筋形状の効果

4. 2 耐衝撃性指標[5](たわみ体積)

コンクリート版構造の、衝撃破壊挙動特性は、荷重速度の増加に伴って破壊時衝撃荷重の増加と、破壊時変位の減少といった特徴が現れる[5]。そこで、ここでは変位量に注目し、高欄に衝撃荷重が作用する前の状態を基準面とし、破壊時における高欄のたわみ分布を積分し、その変形状態を体積で表した指標をたわみ体積と定義し、荷重速度50tf/msec、100tf/msecと変化させて高欄の耐衝撃性を検討するものとする。

図-11は実験に用いた供試体に近似させた解析モデルを用いた場合、図-12は補強筋として鉄筋とCFの2種類の材料を用いて材料特性を変化させた場合、図-13は補強筋配置形状を変化させた場合、各々の耐衝撃性をたわみ体積を用いて評価したものを示してある。

図-11より、荷重速度50tf/msecでは高欄ASY、高欄BCYとも大きな差はみられないが、100tf/msecになると高欄BCYのたわみ体積が高欄ASYの約60%とたわみ体積が低下している。この原因として、荷重速度の遅い場合は曲げ破壊形式であるため高欄BCYも十分な耐荷力が得られているが、荷重速度が速くなると荷重部近傍でコンクリートが圧壊し、高欄BCYでは高欄ASYに比べかぶり厚が小さいため早い段階で破壊し、破壊時衝撃荷重が小さくなり、たわみ体積も小さくなったものと考えられる。

図-12より、鉄筋、CFのどちらの材料を用いた場合も大きな差異はなく、荷重速度の変化による影響も受けていないことから鉄筋の代わりにCFを用いた場合でも耐衝撃性という面から十分有効であると考えられる。

図-13より、荷重速度50tf/msecのように曲げ破壊形式を示す場合、斜交配置の高欄BSN2のたわみ体積が高欄ASNに比べて大きな値を示しており、斜交配置の高欄が版全体で衝撃力を受け持つといった耐衝撃性に対し非常に大きな効果を持つことが考えられる。しかし、荷重速度が早くなると荷重部で圧壊するためその効果がなくなり高欄ASN、高欄BSN2は両者同程度の結果を取ることになる。

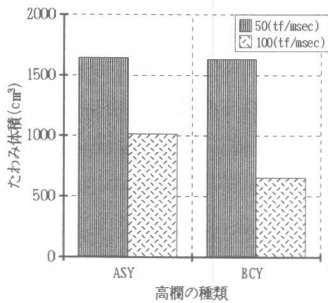


図-11 実験供試体を用いた比較

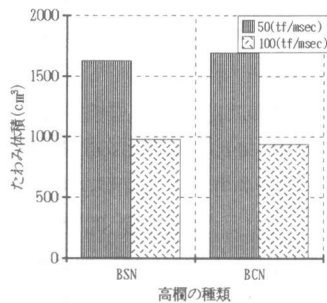


図-12 材料の効果

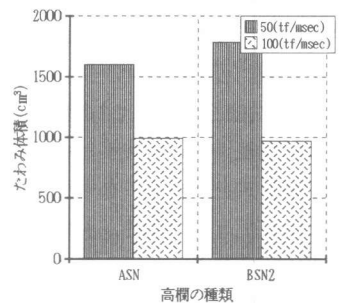


図-13 配筋形状の効果

5. 結論

本研究で得られた主な結果を以下に示す。

- ①本解析手法が高欄構造物にも適用可能であり、実際の構造物の諸条件を与えることにより高い精度で解析を行える。
- ②CFは鉄筋と同程度の耐荷力を有し、鉄筋の代用品として期待できる。
- ③斜交配置は直行配置に比べ版構造物が曲げ破壊を起こすような版全体で衝撃力に抵抗する場合、耐衝撃性を向上することができる。

参考文献

- [1]土木学会構造工学委員会、衝撃問題研究小委員会：構造物の衝撃挙動と設計法，構造工学シリーズ6，土木学会，1994.1
- [2]三戸雅文：3次元有限要素解析によるコンクリート版の衝撃破壊挙動解析と耐衝撃性評価，神戸大学，修士論文，1994.3
- [3]W.F.Chen, D.J.Han:Plasticity for Structural Engineers, Springer-Verlag, New York, 1988.
- [4]Zdenek P.Bazant, B.H.Oh :Crack band theory for fracture of concrete,Materiaux et Constructions, Vol.16, No.93, pp.155-177, 1983.
- [5]宮本文穂・M.W.KING・三戸雅文：FRP筋を用いたコンクリート版の衝撃破壊挙動解析と耐衝撃性評価，コンクリート工学論文集第4巻第1号，1993.1