

# 論文 爆轟を受けた鉄筋コンクリート部材の耐久性評価に関する研究

清 敦俊\*1・清原 千鶴\*2・別府 万寿博\*3・小澤 満津雄\*4

**要旨：**本研究では、爆薬による爆轟を受けた鉄筋コンクリート供試体の補強前後における耐久性評価について検討を行った。爆轟による損傷については、超音波伝播速度や透気係数の変化を追跡することにより評価が可能であることを示唆した。爆轟を受けた供試体に対してアラミド繊維シート、ポリウレタ樹脂およびHPFRCCによる補強を施し、塩水浸漬試験を実施した結果、塩分浸透性抑制効果が確認できた。また、超音波伝播速度および透気係数と塩分浸透深さには相関性が見られ、爆轟を受けた供試体において超音波伝播速度および透気係数を用いることで耐久性についても評価が可能であることを示唆した。

**キーワード：**爆轟, 耐久性, 補強, 透気試験, 超音波試験, 曲げ載荷試験, 塩水浸漬試験

## 1. はじめに

構造物は時として人的災害による爆風荷重や熱的作用によって損傷を受け、その後も自立せざるを得ないケースも存在する。例えば、建屋や格納容器内部において爆発(爆轟)や極高温作用を受けた福島第一原子力発電所は解体までの期間は、損傷後も構造物として機能するような構造性能を担保させる必要がある。一方、津波により基礎部分への海水の浸入や、火災を受けたあとも供用される建物も多い。しかしながら、地震による損傷や環境要因による劣化を生じた構造物を利用可能な状態とする為の評価、補修・補強技術は存在するが、前述のような爆轟による損傷を受けた鉄筋コンクリート部材に対する耐久性評価は現状確立されていない。

そこで本研究では、爆轟を受けた鉄筋コンクリート部材の耐久性評価の基礎として検討する事を目的とし、ここでは各鉄筋コンクリート供試体を作製後、爆轟による損傷を与え、各非破壊試験を用いて損傷程度を確認を行った。非破壊試験による損傷程度を確認後、破壊性状の異なる供試体に対して曲げ載荷試験および塩水浸漬試験を実施し、損傷程度と耐久性について検討を行った。さらに、損傷を受けた供試体に対して各補強材を用いて補強を施し、補強効果および塩分浸透抑制効果について検討を行った。

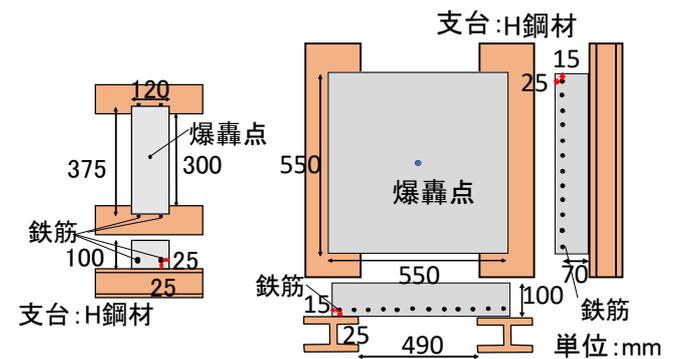
## 2. 爆轟による損傷評価

### 2.1 供試体概要

表-1にコンクリートの配合条件と力学特性を、図-1に供試体概要を示す。No.1~No.5供試体は、既往の研究<sup>2)</sup>において爆轟実験を実施した幅375mm×長さ600mm×高さ100mmの鉄筋コンクリート版供試体から、幅120mm×長さ375mm×高さ100mmの梁状にカットしたもので

表-1 コンクリートの調合条件および力学特性

供試体	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
			W	C	S	G			
No.1~6	47.5	48	180	379	814	899	47.5	27.7	3.3
No.7	47.5	48	180	379	814	899	41.7	45.2	2.92



(a) 鉄筋コンクリート梁 (b) 鉄筋コンクリート版  
図-1 供試体概要



(a) 鉄筋コンクリート梁 (b) 鉄筋コンクリート版  
図-2 爆薬設置状況

表-2 爆轟条件

供試体	爆轟種類	爆薬量(g)	離隔距離(mm)
No. 1, No. 2	近接爆轟	80	170
No. 3, No. 4			200
No. 5			100
No. 6	爆轟無し	—	—
No. 7	近接爆轟	80	75

\*1 東京理科大学大学院 工学研究科建築学専攻 (学生会員)

\*2 東京理科大学 工学部建築学科嘱託助教 博士(工学) (正会員)

\*3 防衛大学校 システム工学群建設環境工学科教授 博士(工学) (正会員)

\*4 群馬大学大学院理工学府 環境創生部門准教授 博士(工学) (正会員)

ある。これらの供試体においては、既往の研究<sup>2)</sup>で実施した爆轟実験による影響は小さく、損傷が極めて低い状態であったため、再び爆轟実験を実施し損傷を与えることとした。使用した供試体には引張側となる非爆轟面側(裏面)に異形鉄筋 D10 を配筋(かぶり厚さ 25mm)している。なお、No.6 は損傷を受けていないリファレンスの供試体である。

供試体 No.7 は、長さ 550mm×幅 550mm×高さ 100mm の鉄筋コンクリート版供試体である。鉄筋には D10 を使用し、かぶり厚さを長さ方向に 15mm、高さ方向に 25mm として引張側となる非爆轟面側に配筋し、爆轟実験後、幅 90mm の梁状に切断した。

図-2 に爆薬設置状況を、表-2 に爆轟条件を示す。近接爆轟は、針金で作製した専用の支台を用いて、C4 爆薬を供試体上部に設置し起爆を行った<sup>3)</sup>。なお、爆薬の設置位置は供試体の中心部とした。実験は、爆薬量を 80g 一定量とし、損傷程度の異なる供試体を得るため、爆薬までの距離(以下、離隔距離)を表-2 に示すように変化させて起爆した。

供試体は、爆轟後に実施する曲げ载荷試験時に影響を及ぼさないように鉄筋方向をスパンとして、図-1 に示すように H 形鋼で作成した 2 個の台座(支持幅 37.5mm、および 30mm)の上に設置し、支持部間距離は 300mm および 490mm とした。

## 2.2 実験方法

### (1) 透気試験

図-3 に非破壊試験測定箇所を示す。R.J.トレントによって開発された内外 2 層構造のチャンバーを用いて測定を行うダブルチャンバー法<sup>4)</sup>を用いた。爆轟の中心部か

ら供試体の端部にかけて測定を行い、爆轟面(表面)および非爆轟面(裏面)の損傷程度を確認した。

### (2) 超音波試験

超音波試験は、既往の研究結果<sup>5)</sup>より、二つの探触子を供試体の両面から挟み込んで測定する透過法とし、測定時の伝播時間と探触子間の距離により伝播速度を算出した。測定箇所は図-3 に示すように爆轟の中心から端部に掛けて測定を実施した。

## 2.3 破壊性状

表-3 に爆轟実験後の損傷状況を示す。爆轟による損傷状況を確認するにあたり、取り除く事が可能な浮き部分に関しては除去を行い、表-3 の写真の白線に示すような爆轟面における破壊部分(クレータ)と非爆轟面における破壊部分(スポール)の直径及びひびわれ幅(表中の白線部分)の計測を行った。

目視による損傷程度を確認したところ、離隔距離 170mm とした No.1 および No.2 は、爆轟面において長さ 140mm 程度の剥離箇所(表-3 中の A)が、離隔距離 200mm とした No.3 および No.4 においては、長さ 100mm

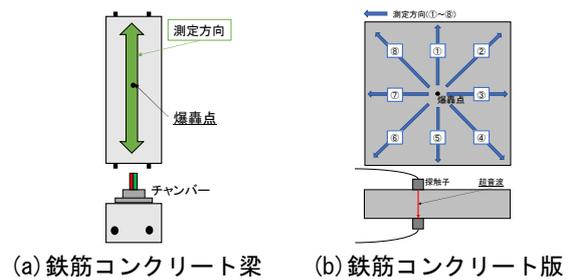
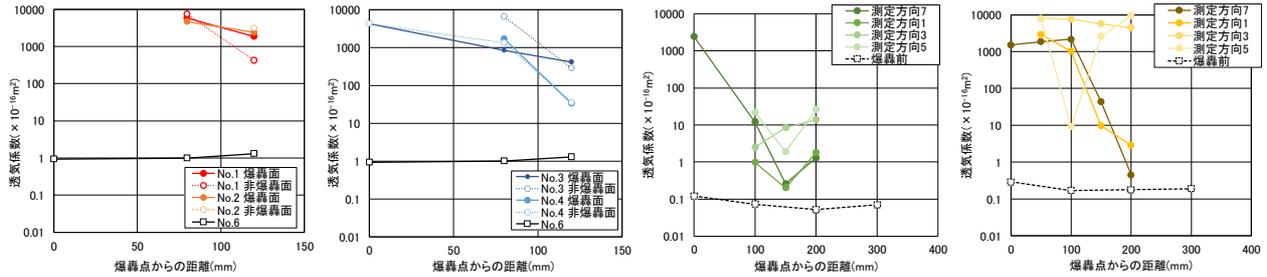


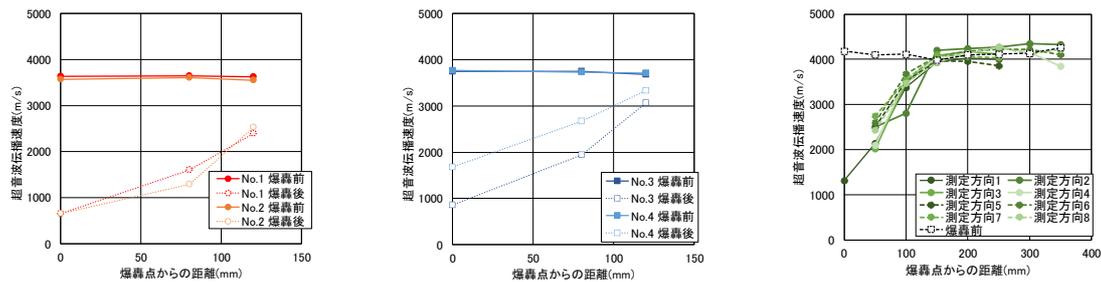
図-3 非破壊試験測定箇所

表-3 爆轟実験後の損傷状況

No.	爆轟条件		爆轟面(表面)	非爆轟面(裏面)	側面
	爆薬量	離隔距離			
No. 1	80g	170mm			
No. 3		200mm			
No. 5		100mm			
No. 7		75mm			



(a) No. 1, No. 2 (b) No. 3, No. 4 (c) No. 7 (爆轟面) (d) No. 7 (非爆轟面)  
 図-4 透気係数と爆轟点からの距離の関係



(a) No. 1, No. 2 (b) No. 3, No. 4 (c) No. 7  
 図-5 超音波伝播速度と爆轟点からの距離の関係

の剥離箇所(表-3中のB)を確認した。さらに、離隔距離100mmのNo.5においては鉄筋の垂直方向にひび割れが生じ、側面に長さ150mmの剥離箇所(表-3中のC)が確認できた。そして、離隔距離が75mmであるNo.7は爆轟面において、直径4.5mmのクレータが確認できた。

非爆轟面においては、No.1およびNo.2では中央部に鉄筋の垂直方向に向けてひび割れ幅5mm程度のひび割れが2箇所生じていた。同様に、No.3およびNo.4においては幅4mm程度のひび割れが1箇所のみ生じていた。また、No.5においてはかぶりコンクリートが剥落している。さらに、No.7においては直径10.2mmのスポール破壊が確認でき、スポール破壊範囲内に生じているひび割れ幅は0.15~1.5mmであった。

供試体側面においては、No.1およびNo.2においては爆轟面から非爆轟面に向けて損傷規模が大きくなり、最大5mm程度のひび割れ幅が確認された。No.3およびNo.4においてはNo.1およびNo.2に比べ損傷規模は小さく、3mm程度のひび割れ幅が確認できた。そして、No.5においては非爆轟面から1/3程度が損失していることを確認した。

No.7は爆轟中心部の断面において、スポール破壊が生じており、非爆轟面側に多くひび割れ(最大ひび割れ幅5mm)が生じていた。一方で、爆轟点から90mm離れた箇所の断面を確認してみると、少量のひび割れ(最大ひび割れ幅0.04mm)が発生している程度であり、爆轟点から180mm離れた箇所については、ひび割れは確認できなかった。

## 2.4 実験結果

図-4に透気係数と爆轟点からの距離の関係を示す。透気係数が高いほど、物質が容易に移動しやすいことを表す。図-4に示すようにNo.1~No.4は爆轟によって、中心部においてひび割れが発生したことから、爆轟面および非爆轟面ともに透気係数が測定不可能であった。いずれの供試体においても爆轟点に近いほど透気係数が大きくなっている。

No.7においては、爆轟面において爆轟の中心部は他の供試体と同様に著しく高い値を示しており、中心部の損傷が甚大である事が伺える。しかし、爆轟点からの距離が100mm離れると透気係数は $1\sim 20 \times 10^{-16} \text{m}^2$ まで小さくなっている。非爆轟面では爆轟点からの距離が100mm程度までの透気係数は、 $2164 \times 10^{-16} \text{m}^2$ と高い値を示しており、爆轟面よりも損傷が激しい。これは、爆轟の中心部の断面図からも合致するものである。

図-5に超音波伝播速度と爆轟点からの距離の関係を示す。超音波伝播速度は、供試体内部の空隙が多いほど遅くなる事から、超音波伝播速度が遅くなるほど損傷が大きいと考えられる。

爆轟後における超音波伝播速度は、爆轟点に近いほど遅くなっており、また、損傷程度が局所的であると超音波伝播速度も急激に遅くなっている。

以上のことから、透気係数ならびに超音波伝播速度によって、爆轟を受けた鉄筋コンクリート供試体に対する損傷評価が可能であることが示唆された。また、透気試験と超音波試験は部材の補強のための情報を精緻に与え

表-4 補強材の物性値

補強材名	目付量 (g/m <sup>2</sup> )	塗布量 (g/m <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	曲げ靱性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
アラミド 繊維シート	280	—	2060 以上	—
ポリウレア樹脂	—	2200	19.3~22.06	—
HPFRCC	—	—	—	—
・ 載荷試験用	—	—	3.0 以上*	2.3 以上*
・ 浸漬試験用	—	—	—	5.14

\* : 規格値

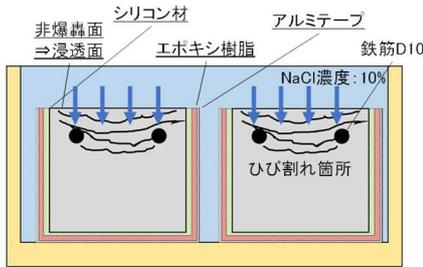


図-6 浸漬試験概要

るものでは必ずしもないが、本論においては健全部に対する相対的な損傷の評価に用いた。これらの値の意味と補強方法選定の関連付けについては今後の検討課題である。

### 3. 耐久性評価の検証

#### 3.1 補強方法

表-4 に補強材の物性値を示す。本実験では、補強材としてヤング係数および引張強度が大きいシート状材料のアラミド繊維シート、ヤング係数が小さく破断伸びが大きいポリウレア樹脂、曲げ破壊時の靱性が大きい HPFRCC の3 種類を用いて行った。実験の都合上、曲げ載荷試験および塩水浸漬試験に用いた HPFRCC の種類が異なっている。

表-5 に曲げ載荷試験用供試体の補強方法を示す。予備実験の結果を元に、アラミド繊維シート1方向2枚、ポリウレア樹脂厚さ2mm および HPFRCC(モルタル短繊維)を供試体表面に対し厚さ10mm で吹き付けを組み合わせた5種類の補強方法と、損傷を受けていない No.6 を用いて実験を行った。

#### 3.2 実験方法

##### (1) 曲げ載荷試験

試験は JISA 1106「コンクリートの曲げ強度試験方法」に準じて行った。試験は3等分点載荷を用いて実施した。また、各供試体に補強を施工する前に初期剛性までの測定を行い、補強後は曲げ破壊に達するまで測定を行った。

##### (2) 塩水浸漬試験

図-6 に浸漬試験概要を、表-6 に塩水浸漬試験供試体を示す。鉄筋コンクリート梁供試体に対し各補強材を施工後、非破壊試験結果を元に、損傷程度ごとに長さ

表-5 曲げ載荷試験用供試体の補強方法

供試体	補強方法	
	圧縮側(爆轟面)	引張側(非爆轟面)
No. 1	無し	アラミド繊維シート
No. 2	ポリウレア樹脂	アラミド繊維シート
No. 3	無し	HPFRCC
No. 4	ポリウレア樹脂	HPFRCC
No. 5	ポリウレア樹脂	HPFRCC アラミド繊維シート
No. 6	無し	無し

表-6 浸漬試験用供試体の補強方法と供試体本数

損傷程度 (超音波伝播速度)	供試体数(体)			
	無補強	アラミド繊維 シート	ポリウレア 樹脂	HPFRCC
0~2500m/s	1	1	×	×
2501~3500m/s	2	2	×	×
3501~4000m/s	2	2	1	1

150mm~200mm 程度に供試体を短辺方向に切断した。塩水浸漬試験は、既往の研究<sup>9)</sup>を元に塩分濃度を10%とし、浸漬期間は7日間とし、測定日を3日目および7日目とした。

塩水浸漬試験終了後、各供試体に対して硝酸銀噴霧試験を実施した。各供試体に対してコンクリートカッターを用いて幅20mm程度に切断し、0.1Nの硝酸銀溶液を噴霧した。噴霧後、ドライヤーによって噴霧面を乾燥させ、白色化した部分を塩分浸透深さとした。

#### 3.3 曲げ載荷試験結果

図-7 に初期剛性と超音波伝播速度の関係を示す。本実験において測定した超音波伝播速度と初期剛性、そして既往の研究<sup>2)</sup>の結果を合算して初期剛性と超音波伝播速度の関係について検討を行った。既往の研究結果と同様に超音波伝播速度と初期剛性は高い相関性がある。このことから、損傷した供試体の耐久性を評価する事が可能であると示唆した。

図-8 に荷重-変位関係を、図-9 に各供試体の最大荷重・初期剛性の回復率を示す。初期剛性は荷重と変位の傾きより算出した。供試体の回復率は、損傷を受けていないリファレンス供試体である No.6 を基準とし、補強後の最大荷重および初期剛性の回復率を百分率で示している。全供試体において No.6 よりも最大荷重が上回っている事が確認できた。また、各供試体の初期剛性の回復率においては No.1 が最も高く、No.5 が低い結果となった。これは、No.5 供試体が補強前の損傷が他の供試体に比べて激しかったことや表-7 に示すように補強を施した HPFRCC の界面にひび割れが発生しており、スポール破壊面と HPFRCC の付着性状の影響を受けていることも考えられる。今後は、データの蓄積とともに損傷程度の異なる供試体に対する補強効果の評価方法について検討する必要がある。

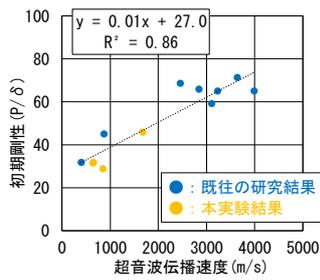


図-7 初期剛性と超音波伝播速度の関係

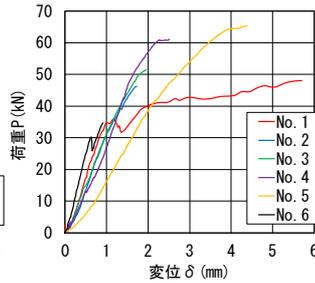


図-8 荷重-変位関係

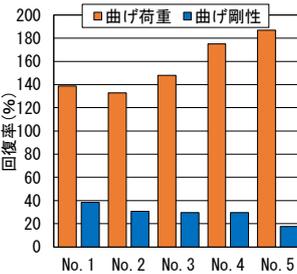


図-9 各供試体の最大荷重・初期剛性の回復率(補強後/No. 6)

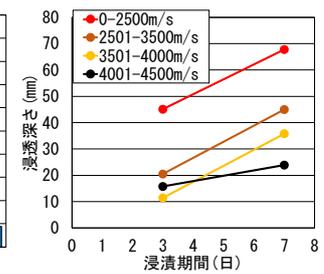
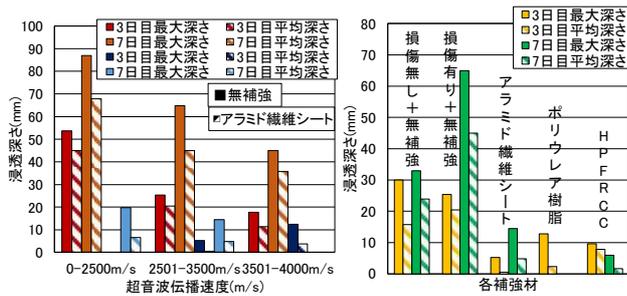


図-10 浸透深さと浸漬期間の関係

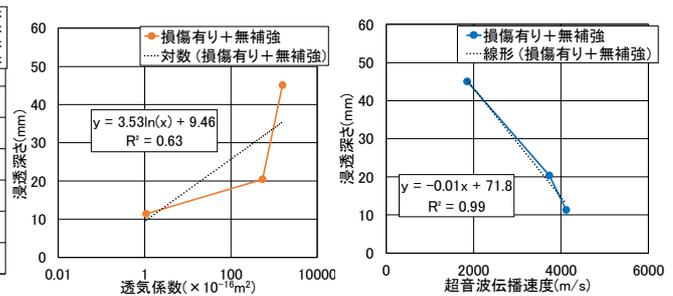
表-7 曲げ載荷試験後の破壊性状

供試体				
No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5



(a) アラムド繊維シートと無補強 (b) 各補強材

図-11 各補強材と塩分浸透深さの関係



(a) 透気係数 (b) 超音波伝播速度

図-12 各非破壊試験結果と塩分浸透深さ(3日目)の関係

表-7 に曲げ載荷試験後の破壊性状を示す。曲げ載荷試験後の供試体の破壊性状について確認した。アラミド繊維シートによる補強のみの No.1 については、せん断破壊が生じ、供試体の形状が崩壊したが、圧縮側にポリウレア樹脂を塗布した No.2 においては、ポリウレア樹脂の補強により供試体の形状は維持される事が確認できた。HPRCC による補強を施した No.3 および No.4 では、HPRCC に曲げひび割れが生じている事が確認できた。No.5 は表-3 に示すようにスポール破壊が生じており、剥落したかぶりコンクリート部分を表-7 に示すように HPRCC で補強を行っている。そのため、コンクリートと HPRCC の界面に沿ってひび割れが生じた。

以上の傾向から、初期剛性の回復において引張側のみをアラミド繊維シートによる補強が、最大荷重の回復においては HPRCC による補強が効果的な補強方法である事を示し、ポリウレア樹脂を用いることにより供試体の形状が維持されることを示した。

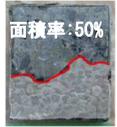
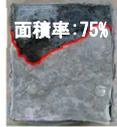
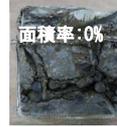
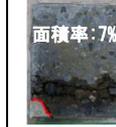
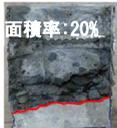
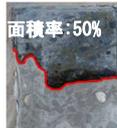
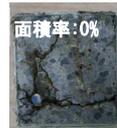
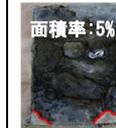
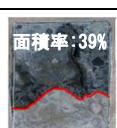
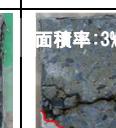
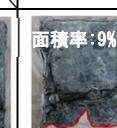
### 3.4 塩水浸漬試験結果

図-10 に浸透深さと浸漬期間の関係を、図-11 に各補強材と浸透深さの関係を、表-8 に硝酸銀噴霧試験後の供試体状況を示す。

超音波伝播速度が最も遅い補強無しの供試体では、3日目において最大で 53.7mm の浸透深さを示し、7日目には供試体高さの半分以上を超える結果となった。一方で、同程度の供試体に対しアラミド繊維シートを用いて補強を行った結果、供試体内部に浸透していない事が確認できた。また、HPRCC の補強を行った供試体は7日間において 9.6mm の最大浸透深さを示したが、ポリウレア樹脂の補強を行った供試体は 12.8mm の最大浸透深さであった。塩水の浸透は浸漬面の外側からの侵入であることから、供試体とシリコンの隙間が原因であったことが確認でき、塩分浸透抑制効果はあったと考えられる。

さらに、図-12 に各非破壊試験結果と塩分浸透深さ(3日目)の関係を示す。透気係数が低いほど塩分浸透深さが小さく、超音波伝播速度が大きくなるほど塩分浸透深さ

表-8 硝酸銀噴霧後の供試体状況

損傷程度 (超音波伝播速度)	補強無し (No. 7-4)		アラミド繊維シート (No. 7-3)		ポリウレア樹脂 (No. 7-5)		HPFRCC (No. 7-2)	
	3日目	7日目	3日目	7日目	3日目	7日目	3日目	7日目
0-2500m/s	 面積率:50%	 面積率:75%	 面積率:0%	 面積率:7%				
2501-3500m/s	 面積率:20%	 面積率:50%	 面積率:0%	 面積率:5%				
3501-4000m/s	 面積率:13%	 面積率:39%	 面積率:4%	 面積率:0%	 面積率:3%	 面積率:0%	 面積率:9%	 面積率:2%

も小さくなり、透気係数および超音波伝播速度は塩分浸透深さと相関が高いことが確認できた。

#### 4. まとめ

爆轟を受けた鉄筋コンクリート部材に対して異なる補強を施し、耐久性評価について検討を行った。実験結果より得た知見を以下に示す。

- (1) 爆轟による損傷より透気係数が増大し超音波伝播速度が遅くなる事を把握できた。以上より爆轟による損傷を非破壊で追跡できる可能性を示した。
- (2) 補強を施した供試体は、通常の鉄筋コンクリート梁以上の最大荷重を得る事ができた。また、アラミド繊維シートおよび HPFRCC による補強が非爆轟面において各曲げ性能の回復率が高く、ポリウレア樹脂を用いることにより供試体の形状が維持されることを示した。
- (3) 爆轟による損傷を受けた鉄筋コンクリート梁に対して各補強材を施工し、塩水浸漬試験を実施した。その結果、最も損傷程度の激しい箇所においては 7 日目において浸透深さが供試体高さの半分以上となる傾向を示した。また、各補強材ともに塩分浸透抑制効果を発揮する事を確認した。
- (4) 各非破壊試験結果と塩分浸透深さは高い相関性を持つ事が確認できた。この事から、透気試験および超音波試験により、耐久性評価ができる可能性がある事を示唆した。

#### 謝辞

本研究は、平成 26 年度科学技術研究補助金基盤研究

(C)No.26420561 (代表:今本啓一) の補助を受けました。

また本実験を遂行するにあたり、補強材を提供して頂いた前田工織株式会社、株式会社デーロス・ジャパン、株式会社トクヤマエムテック、ライノジャパン株式会社のご協力を得ました。ここに感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 廃炉・汚染水対策関係閣僚等会議：東京電力(株)福島第一原子力発電所の廃止設置等に向けた中長期ロードマップ, 2015.6
- 2) 清敦俊, 今本啓一, 清原千鶴, 別府万寿博, 小澤満: 爆轟を受けた鉄筋コンクリート部材の損傷程度と曲げ性能の関係に関する基礎的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), pp.211-212, 2016.8
- 3) 大久保一徳, 大山浩代, 別府万寿博, 大野友則, 片山雅英: C4 爆薬の接触・近接爆発に対するコンクリート板の損傷評価, 構造工学論文集, Vol.53A, pp.1273-1283, 2007.3
- 4) R.J.Torrent: A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site, Materials and Structures, Vol.25, No.150, pp.358-365, 1992
- 5) 依田祐果, 今本啓一, 別府万寿博, 清原千鶴: 爆轟を受けたコンクリートの非破壊損傷評価方法, 日本建築学会関東支部, pp.185-188, 2014
- 6) 塚越俊, 小澤満津雄, 別府万寿博, 清原千鶴: 接触・近接爆発による衝撃荷重と高温作用を受けた RC 部材の耐久性に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, pp.727-732, No.1, 2015