

# 論文 レジンモルタル被覆による高強度コンクリートの耐衝撃性向上効果の検討

中村 昭男\*1・佐藤 正俊\*2・黒田 一郎\*3

**要旨:** 洪水に含まれる土石による落下衝撃に起因する損傷から、ダム洪水吐などのコンクリートを防護する補修材料としてレジンモルタルに着目し、その耐衝撃性向上効果を落下衝撃試験を行い検討した。レジンモルタルで被覆した高強度コンクリートの破壊時の重錘エネルギーとレジンモルタル厚さの関係、衝突面の損傷状況に与えるレジンモルタル被覆の影響について明らかにし、更に、レジンモルタル被覆に加えて耐すり減り摩耗性を向上させるためステンレス鋼板で被覆したケースについても検討を加えた。

**キーワード:** レジンモルタル, 高強度コンクリート, 落下衝撃試験, 耐衝撃性

## 1. 緒言

洪水に含まれる土石によって、ダムの洪水吐や排水路などのコンクリートが損傷する事例が多くみられる。損傷の著しいダムには、僅か数年でコンクリート断面欠損が数mの深さで生じて補修を必要とするものもあり、経済性の面から補修頻度を一般的に用いる高強度コンクリートの場合の1/2程度以下に低減する補修材料が求められている。

補修には耐久性を向上するために、様々な補修材料が検討されてきた(例えば文献1~3)。この中でも、鑄鉄製ライニング材は、耐すり減り摩耗性や耐衝撃性に優れていることが安藤<sup>1)</sup>や伊藤<sup>4)</sup>によって報告されており、大粒径の礫が流下するダムなどで、補修材料に使用される事例がある<sup>5)</sup>。しかし、鑄鉄製ライニング材は質量が重い、補修工事においてタワークレーンなどの重機が必要である<sup>6)</sup>ため、作業環境と経済性の面から施工可能な箇所に限られる場合がある。

これに対して樹脂系材料は、コンクリート打設に用いる仮設設備で施工が可能であり、また耐すり減り摩耗性に優れる(例えば文献2)ことと、弾性係数が比較的小さく変形性に富むため、耐衝撃材料として期待される。

そこで本研究では、レジンモルタル(以下、REMという)および耐すり減り摩耗性を更に向上するためにREM被覆に加えて鋼板で被覆した高強度コンクリートを対象に、落下衝撃試験を実施してその耐衝撃性向上効果について検討した。

## 2. 実験要領

### 2.1 供試体

#### (1) 供試体形状および製作方法

供試体は、無補強の高強度コンクリートと、REMで被覆した供試体および19mmのステンレス鋼板とREMの2層で被覆した3種類とし、図-1に示すように一辺450mmの立方体とした。

REM被覆の供試体は、高強度コンクリートとREMの2層打ちとし、REMは施工面の高強度コンクリートを骨材の表面が現れる程度のブラストで目荒らしし、プライマーを塗布した後に打設した。鋼板とREM被覆の供試体は、鋼板を高強度コンクリート打設時に埋め込んだ4本のアンカーボルト(D19, 定着長300mm)を用いてREM層が所定の厚みになるように固定した後に、REMを供試体の側面側から充填して作製した。REM施工面は、REM被覆の場合と同様の処理をするともに、鋼板裏面側もREMの付着を向上させるためにブラスト処理した。

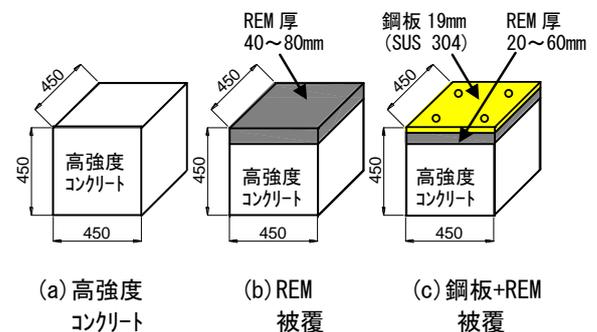


図-1 供試体形状 (単位: mm)

表-1 高強度コンクリートの配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	水セメント比 (%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
					水	セメント	細骨材	粗骨材	高性能減水剤	AE剤
20	12	40	4.5	46.3	160	400	825	958	2.60	0.64

\*1 中部電力(株) 電力技術研究所 土木技術 G 主任 (正会員)

\*2 中部電力(株) 電力技術研究所 土木技術 G 研究主査 工博 (正会員)

\*3 防衛大学校 建設環境工学科 准教授 工博 (正会員)

表-2 実験ケース

供試体ケース	補強材	REM厚 (mm)	落下高さ (cm)	重錘質量 (kg)	供試体数
N	無補強		10~150	155	3
R-40	REM	40	10~320	267	各2
R-60		60			
R-80		80			
RT-20	鋼板+REM	20	10~320	267	各2
RT-40		40			
RT-60		60			



写真-1 試験装置全景



写真-2 重錘部

養生方法は、高強度コンクリートは最高温度50℃の蒸気養生とし、REM打設後は試験時まで気中養生とした。

(2) 使用材料および配合条件

高強度コンクリートは、早強ポルトランドセメントを用いて、表-1に示す配合条件で作製した。REMは、耐すり減り摩耗性の高いエポキシ樹脂（主剤：変性エポキシ樹脂，硬化剤：変性脂肪族ポリアミン）に微粉末骨材（ガーネット）を1：6.35の重量比で配合したものである。鋼板はステンレス鋼SUS304を、アンカーボルトは異形棒鋼SD345を用いた。圧縮強度は、高強度コンクリートが約57.2N/mm<sup>2</sup>（材齢28日），REMが約72.8N/mm<sup>2</sup>（材齢7日）であった。

(3) 実験ケース

実験ケースを表-2に示す。まず、基準とするために無補強の高強度コンクリート供試体を用いたケースを設定した。次に、供試体の衝突面をREMで置き換えた場合の耐衝撃性の向上効果を比較するため、REM厚を40, 60, 80mmとした供試体を設定した。さらに、耐すり減り摩耗性向上のため19mmの鋼板とREMの2層で被覆した供試体では、REM厚を20, 40, 60mmの3種類を用いた。

無補強の高強度コンクリートのケースは供試体数を3体とし、REMや鋼板+REMで被覆したケースは、それぞれ供試体数を2体とした。

2.2 実験方法

(1) 落錘式衝撃試験装置

落下衝撃試験は、写真-1に示す最大落下高さ320cmの落錘式衝撃試験装置を用いた。この装置では、重錘を

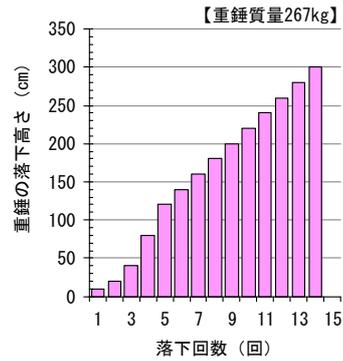


図-2 荷重パターンの例 (R-60)

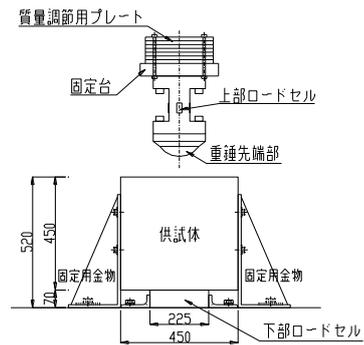


図-3 供試体設置状況

所定の高さから自由落下させて衝撃荷重を載荷する。

重錘先端部は写真-2に示すように半径10cmの半球状になっている。また、重錘は質量調節用鋼製プレートを加減することによって、質量を調節できる。

(2) 荷重パターン

衝撃荷重の荷重パターンは漸増荷重とし、その一例を図-2に示す。実験は、重錘の落下高さを10cmから開始し、5~40cmの範囲で落下高さを徐々に高くしながら繰り返し載荷した。実験は、高強度コンクリート部の底面まで貫通するひび割れが発生した状態（本研究ではこの状態を破壊と定義した）、もしくは試験装置の能力（最大落下高さ3.2m）に達するまで実施した。

重錘質量は、無補強の高強度コンクリートでは155kgとし、補強供試体では267kgとした。

(3) 測定項目

測定項目は、衝撃時の荷重と供試体衝突面の損傷状況（衝突痕の深さ、衝突痕の平均径）である。

供試体設置状況を図-3に示す。衝撃時の荷重は、重錘軸部のロードセル（ひずみゲージを貼り付けて作製）と、重錘軸部の測定結果の信頼性を高めるために供試体下部に設置したロードセル（東京測器研究所製 CLF-200）で測定したひずみを、荷重へ換算して求めた。衝撃時の時刻歴波形を分析可能とするため、サンプリング時間間隔0.1msecの動ひずみ測定機（東京測器研究所製 DRA-107A）を用いた。上部と下部のロードセルによって得られた荷重を、上部衝撃力と下部衝撃力と

呼ぶ。上部衝撃力には、供試体中を伝達した衝撃力である下部衝撃力よりも衝突面の材料の種類や厚みの違いが現れ易いと考え、主に上部衝撃力について検討した。

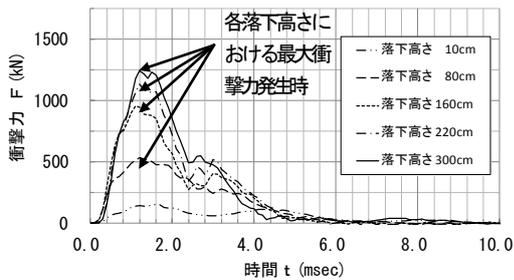
供試体の損傷状況は、重錘を落下させた後、毎回測定した。衝突痕の深さは、金尺とノギスを用いて最大値を測定した。また、衝突痕の平均径は、金尺で測定した衝突痕の最大径とその直角方向の幅を平均して求めた。

### 3. 実験結果と考察

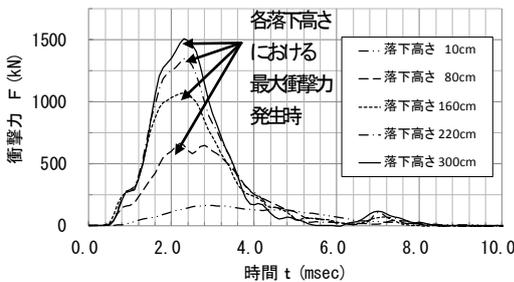
#### 3.1 衝撃力の時刻歴波形

図-4に落下衝撃試験の落下高ごとの衝撃力の時刻歴波形の一例として、実験ケースR-60の結果を示す。ここで、時刻歴波形の最大値をその落下高さの最大衝撃力とし、供試体破壊時における最大衝撃力を破壊衝撃力とする。

下部衝撃力の波形は、ほぼ一つの山形波形であるのに対し、上部衝撃力の波形は、応答時間が比較的長い8m

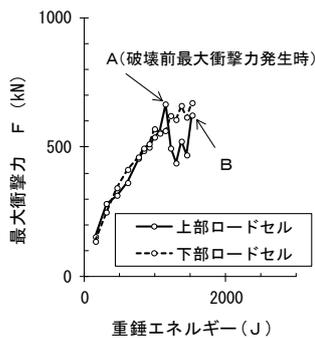


(a) 上部衝撃力

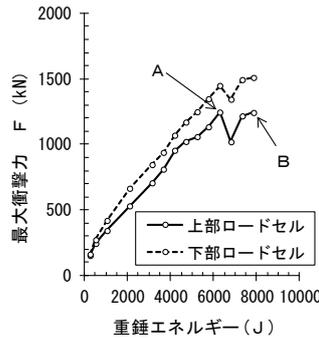


(b) 下部衝撃力

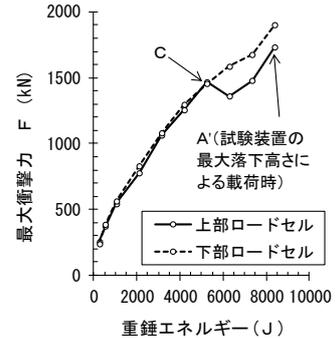
図-4 衝撃力の時刻歴波形の例



(a) 高強度コンクリート (N)



(b) REM (R-60)



(c) 鋼板+REM (RT-60)

図-6 重錘エネルギーと衝撃力の関係の例

sec程度の波形とその1/2程度の短い波形の合成波形となっている。この短い波長の影響は、落下高さが高くなり、衝突時の速度が速い程大きくなっている。これは衝撃波の衝撃面近傍のREMおよび重錘軸部における衝撃波の伝達や反射の影響によるものと思われる。

上部衝撃力は、約1.2msecで最大衝撃力が発生しているのに対し、下部衝撃力は、約2.4msecで最大衝撃力が発生している。

図-5には、重錘質量267kg、高さ120cmの同一衝撃作用に対する各ケースの時刻歴波形(上部ロードセルの測定値)の比較例を示す。時刻歴波形において、最大衝撃力の大きさは、鋼板+REM、高強度コンクリート、REMのケースの順となる。REMのケースの衝撃波形の初期の立ち上がり勾配は、高強度コンクリートのケースよりも小さくかつ応答時間が1msec程度長い。これは、REMの弾性係数は約3,000N/mm<sup>2</sup>であり、高強度コンクリートの圧縮強度から推定される弾性係数34,000N/mm<sup>2</sup>に比べ1/10程度であるため、REMは衝撃面において大きく変形するためと考えられる。また、REM部分の厚みが同じでも鋼板で被覆された場合(鋼板+REMのケース)は、初期立ち上がり勾配が大きくかつ応答時間が短い。これは、衝突面の鋼板(弾性係数約200,000 N/mm<sup>2</sup>)の変形性の影響が、その内部のREMの影響よりも大きいことを示している。

#### 3.2 各落下高さにおける最大衝撃力と重錘エネルギーの関係

図-6に重錘エネルギーと衝撃力の関係を示す。縦軸

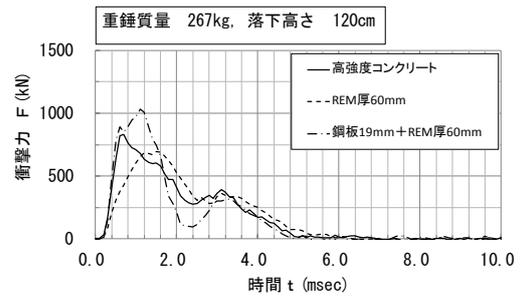


図-5 衝撃力の時刻歴波形の比較例

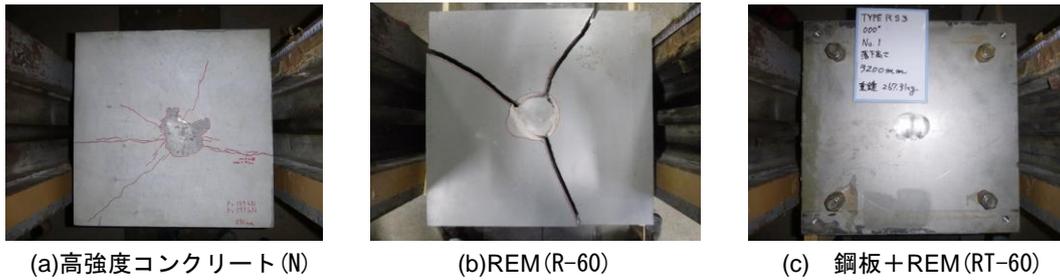


写真-3 最大落下高さにおける衝撃作用時の損傷状況の例

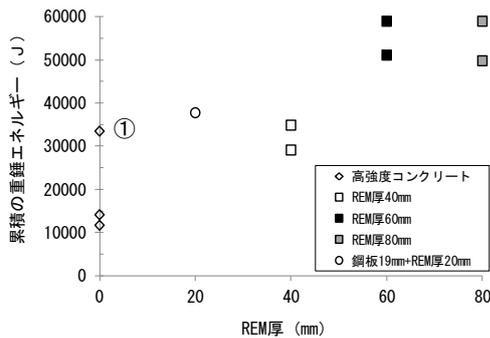


図-7 REM厚と累積の重錘エネルギーの関係

には、各落下高さにおける最大衝撃力をプロットしたものである。ここで、重錘エネルギーは次式によって求めたものであり、各落下高さにおける重錘の有する位置エネルギーを意味する。

$$E = mgh \quad (1)$$

ここで、 $E$ : 重錘エネルギー(J)、 $m$ : 重錘質量(kg)、 $g$ : 重力加速度( $m/s^2$ )、 $h$ : 落下高さ(m)

図中のA点はこの供試体における最大衝撃力を示している。その後、最大衝撃力が低下し破壊に至ることから、このA点を破壊前最大衝撃力と呼ぶ。B点は、供試体の破壊時である。このB点の重錘エネルギーを破壊時の重錘エネルギーと呼ぶ。A'点は破壊に至らなかったケースにおける最大重錘エネルギーを表す。また、図-6(c)に示すように、鋼板+REMのケースの上部ロードセルでのみ生じる変曲点をC点とする。

高強度コンクリートと鋼板+REMのケースでは、供試体の上下に設置したロードセルの値より求めた衝撃力は概ね一致するものの、REMのケースでは、上部の衝撃力は下部の衝撃力よりも小さく、下部の衝撃力の80%程度であった。これはREMの衝撃力の時刻波形において、下部のは1つの山形であるのに対し上部のは2つの山形波形であるのが顕著(図-5参照)であり、重錘エネルギーが分散した1山目の最大値を上部ロードセルの最大衝撃力としているためと考える。

高強度コンクリート、REMの全ケースおよび鋼板+REM厚20mmのケースでは、写真-3(a)、(b)に示すよ

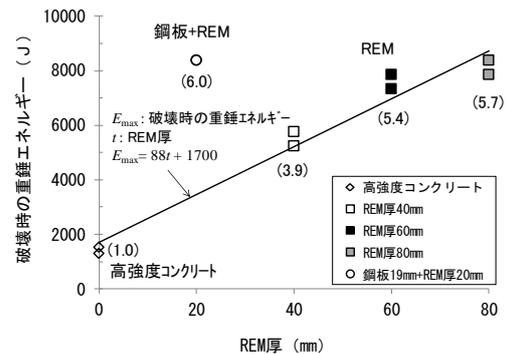


図-8 REM厚と破壊時の重錘エネルギーの関係

うに供試体中央の衝撃痕から放射線状に伸びたひび割れが供試体底面まで貫通して破壊した。鋼板+REM厚40mm、60mmのケースでは、今回使用した試験装置の能力では、破壊までには至らなかった。

高強度コンクリートでは、重錘エネルギーの増加に伴って最大衝撃力が単調増加しない。さらに、上下の衝撃力の値の差の大きさも一定の傾向を示さない。これは落下衝撃による供試体の損傷が大きく、損傷痕の窪みに重錘が当たると、重錘と供試体の接触面が大きくなり、衝撃力が大きくなるが、少しずれると小さくなるなどのことが影響しているものとする。

### 3.3 REM厚と破壊時の重錘エネルギーの関係

破壊に至ったケースにおけるREM厚と累積の重錘エネルギーの関係を図-7に示す。累積の重錘エネルギーの各ケースにおける供試体ごとの差は、図中の①で示す高強度コンクリートの場合を除き、破壊直前の数回の重錘エネルギーに相当する9,000J程度以下に収まっており、供試体が破壊するまでの载荷履歴に差がないことを表している。

しかし、①の供試体は、他の高強度コンクリートと比べて破壊するまでの载荷回数が多く、累積の重錘エネルギーが大きくなったため、以降の検討から除外した。

破壊に至ったケースにおけるREM厚と破壊時の重錘エネルギーの関係を図-8に示す。破壊時の重錘エネルギーは、REMの厚み40~80mmにおいて、厚みに明確に比例して増加する。高強度コンクリートの破壊時の重錘エネルギーに対して、REMのケースで破壊に必要なエネルギーは、REM厚が40mm、60mm、80mmでは、そ

それぞれの平均値において、約3.9倍、約5.4倍、約5.7倍であった（図中に倍率を括弧内に示す）。高強度コンクリートをREMで置き換えることによって母材の厚みが薄くなっても耐衝撃性が向上した。

図中の回帰線より、REMによって得られる破壊時の重錘エネルギーの増分の関係は、次式となる。

$$E_R = 88t \quad (2)$$

ここで、 $E_R$ ：破壊時の重錘エネルギーの増分(J)、 $t$ ：REM厚(mm)

また、鋼板+REMのケースにおいて破壊したのは、今回使用した試験装置の能力（最大重錘エネルギー8,400 J）では、REM厚20mmのケースの内1体のみであった。この破壊時の重錘エネルギーは、高強度コンクリートの値の約6.0倍であった。

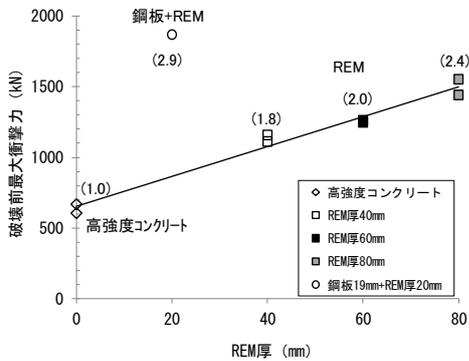


図-9 REM厚と破壊前最大衝撃力の関係

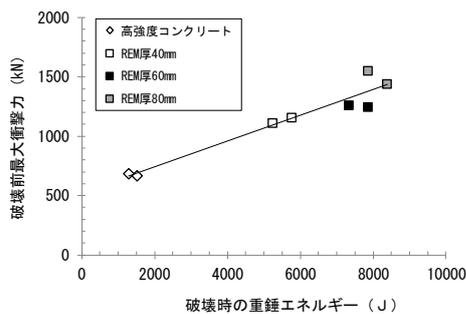


図-10 破壊時の重錘エネルギーと破壊前最大衝撃力の関係

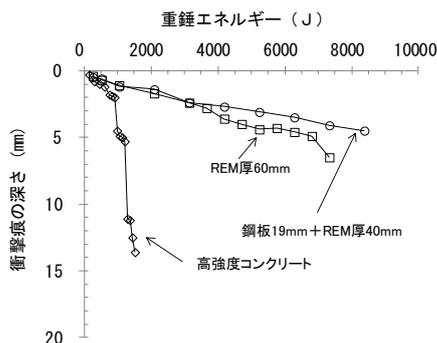


図-12 衝撃痕の深さと重錘エネルギーの関係の例

### 3.4 REM厚と破壊前最大衝撃力の関係

REM厚と破壊前最大衝撃力の関係を図-9に示す。破壊前最大衝撃力は、REMの厚みに比例して明確に増加する。高強度コンクリートの破壊前最大衝撃力に対して、REM厚が40mm、60mm、80mmでは、それぞれの平均値において約1.8倍、約2.0倍、約2.4倍であった。また、鋼板+REM厚20mmは、高強度コンクリートの値の約2.9倍であった。

図-10に、破壊時の重錘エネルギーと破壊前最大衝撃力の関係を示す。破壊前最大衝撃力は、REMで被覆したケースと高強度コンクリートのケースを含め、破壊時の重錘エネルギーに比例して増加する。

図-11に、鋼板+REMのケースにおけるREM厚と重錘エネルギーの関係を示す。図中には、図-6(c)上の変曲点Cの重錘エネルギーとREMの厚みとの関係を×印で示し、図-8におけるREMの厚みと破壊時の重錘エネルギーの関係の回帰直線を実線で示すとともに、実験における最大重錘エネルギーを○印で示す。C点の重錘エネルギーはREMの破壊時の重錘エネルギーと概ね一致している。このことからC点では、鋼板下にあるREMが損傷し、鋼板とREMがはく離した状態にあると考えられる。更に重錘エネルギーが大きくなると、鋼板の凹みが増え、REMとの間の空隙が小さくなるため、図-6(c)上で最大衝撃力が増加に転じていると思われる。

### 3.5 供試体の損傷状況

各材料における衝撃痕の深さと重錘エネルギーの関係の例を図-12に、衝撃痕の平均径と重錘エネルギーの

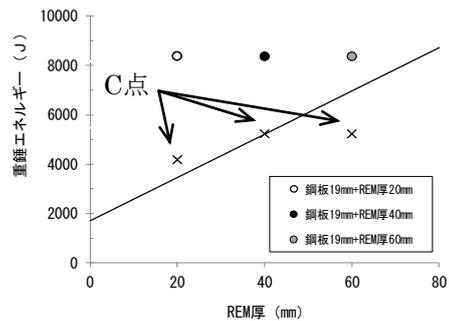


図-11 鋼板+REMにおけるC点の重錘エネルギー

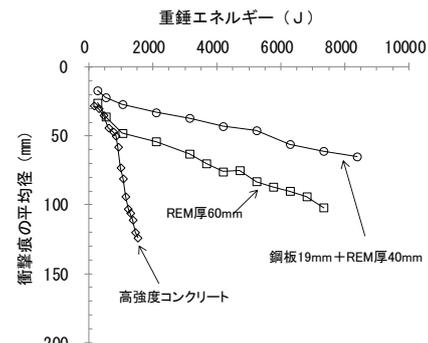


図-13 衝撃痕の平均径と重錘エネルギーの関係の例

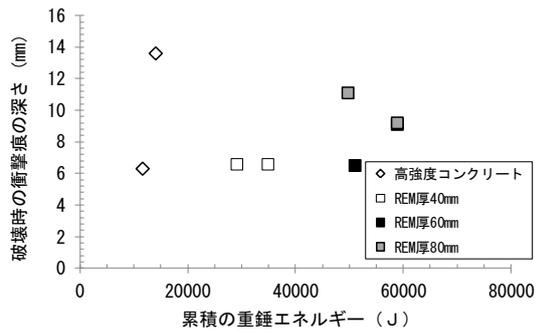


図-14 破壊時の衝撃痕の深さと累積の重錘エネルギーの関係

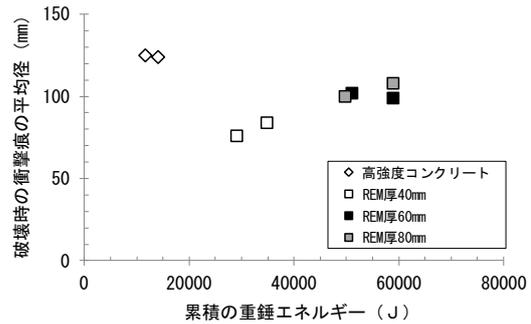


図-15 破壊時の衝撃痕の平均径と累積の重錘エネルギーの関係

関係の例を図-13に示す。

高強度コンクリートの破壊時又は試験装置の最大重錘エネルギー載荷時の衝撃痕の深さは6~14mm、REMおよび鋼板+REMのケースでは、それぞれ7~11mmおよび4~6mmであった。

破壊時又は試験装置の最大重錘エネルギー載荷時の衝撃痕の平均径は、高強度コンクリート、REMおよび鋼板+REMのケースで、それぞれ約125mm、76~108mm、64~74mmであった。

高強度コンクリートでは、重錘エネルギー800J程度以上で衝撃痕の深さ、平均径ともに急激に増大する。一方、REMと鋼板+REMのケースでは、衝撃痕の深さ、平均径共に重錘エネルギーの増加に従って漸増しており、重錘エネルギーの増加による衝撃痕の成長が抑制されている。

高強度コンクリートとREMのケースを対象に、累積の重錘エネルギーと破壊時の衝撃痕の深さの関係を図-14、破壊時の衝撃痕平均径を図-15に示す。破壊時の衝撃痕の深さは、高強度コンクリートでは6~14mmの範囲に分布している。これに対し、REM厚40mm、60mm、80mmでは、衝撃痕の深さは7mm、8mm程度、10mm程度であり、REM厚が厚くなり破壊までに与えた重錘エネルギーが大きい程、衝撃痕の深さが深くなる傾向が概ねある。高強度コンクリートに比べREM厚40mmでは、累積の重錘エネルギーが約2.5倍になっても衝撃痕深さは2/3程度である。REM厚80mmでは、累積の重錘エネルギーが約4.2倍であるが衝撃痕深さは高強度コンクリート程度である。

また、衝撃痕の平均径は、高強度コンクリートでは125mmである。これに対し、REM厚40mm、60mm、80mmでは、平均径はそれぞれ80mm程度、100mm程度、100mm程度であり、REM厚が厚くなり破壊までに与えた重錘エネルギーが大きい程、衝撃痕の平均径が大きくなる傾向が概ねある。高強度コンクリートに比べREM厚40mmでは、3/5程度、REM厚60mm、80mmでは、4/5程度に低減している。

#### 4. 結 言

本研究では、レジンモルタル (REM) および耐摩耗性を更に向上するためにREM被覆に加えてステンレス鋼板で被覆した高強度コンクリートを対象に、落下衝撃試験を実施してその耐衝撃性向上効果について検討した。得られた主要な知見は以下のとおりである。

- (1) REMで被覆した高強度コンクリートの破壊時の重錘エネルギーは、REMの厚み40~80mmにおいて、厚みに比例して増加した。最大重錘エネルギーは、高強度コンクリートに対し、REM厚40mmでは約4倍、80mmでは6倍程度であった。
- (2) REMに加えてステンレス鋼板 (厚さ19mm) で被覆した高強度コンクリートは、今回使用した試験装置能力 (最大重錘エネルギー8,400 J) では、REM厚が40mm以上では破壊しなかった。破壊したREM厚20mmのケースでも、破壊時の重錘エネルギーと破壊前最大衝撃力は、高強度コンクリートの6倍と3倍程度であり、破壊までの耐衝撃性能は高強度コンクリートよりも優れている。

#### 参考文献

- 1) 安藤謙治, 伊藤芳男, 深川積: 排砂路耐摩耗材の実験的研究, 電力土木, No.250, pp.47-58,1994.3
- 2) 国枝稔, 服部篤史, 宇治公隆, 日比野誠: レジンコンクリートの特性と構造設計指針(案)について, コンクリート工学, Vol.45, No.11, pp.7-12, 2007.11
- 3) 鈴木裕一, 涌井国宏, 岩本順: 塩郷えん堤エプロン摩耗対策材の検討と施工, 電力土木, No.299, pp.39-43,2002.5
- 4) 伊藤義人, 八谷徹, 宇佐美勉, 片岡誠, 草田昭一: 衝撃荷重を受けるメタルライナー取付構造物の耐荷力と変形能に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.39A, pp.1539-1552,1993.3
- 5) 満保隆, 伊藤剛, 山本隆二: 称名川第二発電所雑穀谷取水ダム水叩工改修工事の概要, 電力土木, No.358, pp.43-46,2012.3