GRC 打込み型枠による鉄筋コンクリートはりの構造特性に 関する実験的研究

その2 負荷の下での GRC 打込み型枠の付着剥離性状

EXPERIMENTAL STUDY ON STRUCTURAL CHARACTERISTICS OF REINFORCED CONCRETE BEAM WITH GRC PERMANENT FORM

Part 2 Debonding behavior of GRC permanent form under loading

村上 聖^{*1}, 平居 孝之^{*2}, 岸谷 孝一^{*3}, 前田 孝一^{*4}

三井 宜之^{*5}, 武田 浩二^{*6}

Kiyoshi MURAKAMI, Takayuki HIRAI, Koichi KISHITANI, Koichi MAEDA,
Yoshiyuki MITSUI and Koji TAKEDA

In this study, for purposes of clarifying the debonding behavior of glass fiber reinforced cement (GRC) permanent form in almost full-scale reinforced concrete beams, non-destructive inspection of the beams was conducted using a separation diagnostic device for tile mortar. The results showed that almost no spread of the separation was detected by the device until yielding load was reached, and that after the yielding a part of the GRC form which was completely separated from the cast-in-place concrete was formed around the cracks generated in the pure bending section between loading points, and the separation, making the part as its core, spread gradually over the neighboring areas. In addition, the validity of the above results obtained by the non-destructive inspection was verified by the outcome of visual observation of core samplings and surface bonding strength tests.

Keywords: glass fiber reinforced cement, permanent form, debonding behavior,
separation diagnostic device, surface bonding strength test

ガラス繊維強化セメント、打込み型枠、付着剥離性状、剥離診断器、表面接着強度試験

1. はじめに

鉄筋コンクリート（以下、RCと略記する）施工の自動化・省力化のために、現在、実用化が進められている打込み型枠工法において、打込み型枠に要求される構造性能とし、型枠材としての強度、剛性および寸法精度の確保はもちろんのこと、打込み型枠のように構造体コンクリートの一部として型枠材を扱う場合には、次の2点が重要な要件となる。

①型枠材を構造用寸法、すなわちかぶり厚さに含めたときに、在来のRC部材と同等以上の耐力や変形状態を有すること。

②耐久性や耐火性の面から、設計荷重レベルまで、型枠材と後打ちコンクリートの付着面が剥離せず、十分な一体性を保つこと。

そこで、本研究では、高強度のガラス繊維強化セメント（以下、GRCと略記する）を打込み型枠材として用いた大型RCはりの曲げ載荷試験を行い、上記の観点について実験的に検討した。ここで

①の観点については、その1として、すでに報告済みであり²⁾、G

RC打込み型枠によるRCはりは、ひびわれ発生、引張鉄筋降伏および終局荷重ともに、在来の合板型枠による同一寸法のRCはりのそれを上回り、耐力だけでなく、変形状態についても、在来のRCはりと同等以上であることを実験的に確認している。なお、高強度のGRC型枠を用いたRCはりが、在来のRCはりに比べて、同等以上の耐力を有することは、はじめから判明しているという意見が予想されるが、これはあくまでGRC型枠材と後打ちコンクリートが剥離せず、一体性を保持しているという前提の下での理論的予測であり、大変形時に圧縮側のGRC型枠材が剥離し、圧縮側コンクリートの断面欠損を生じれば、終局耐力や変形能力に直接、悪影響を及ぼすことは十分に予想されることであり、大型のRCはりについて実際に確認実験を行う意義は大きいものと考えられる。

本報では、その2として、②の観点について実験的検討を行い、その1で既報のGRC打込み型枠によるRCはりについて、タイル用剥離診断器を用いた非破壊調査により、曲げ負荷の下でのGRC

本論文は、日本GRC工業会の委託研究の成果報告書である参考文献1)の内容の一部を取りまとめ、再編成したものである。

*1 熊本大学工学部環境システム工学科 助教授・工博

*2 大分大学工学部共通講座 教授・工博

*3 日本大学理工学部建築学科 教授・工博

*4 千葉大学工学部建築学科 助教授・工博

*5 熊本大学工学部環境システム工学科 教授・工博

*6 熊本大学大学院自然科学研究科 大学院生・工修

Assoc. Prof., Dept. of Archit. and Civil Eng., Faculty of Eng., Kumamoto University, Dr. Eng.

Prof., Dept. of Inter-department Study, Faculty of Eng., Oita University, Dr. Eng. Prof., Dept. of Archit., Faculty of Science and Eng., Nihon University, Dr. Eng.

Assoc. Prof., Dept. of Archit., Faculty of Eng., Chiba University, Dr. Eng.

Prof., Dept. of Archit. and Civil Eng., Faculty of Eng., Kumamoto University, Dr. Eng.

Graduate Student, Graduate School of Science and Technol., Kumamoto University, M. Eng.

型枠材と後打ちコンクリートの付着剥離性状をリアルタイムで調べた。また、予備的に、GRC型枠材とコンクリートの圧縮負荷の下での付着剥離性状を調べるために、部分圧縮試験による付着剥離試験を同時に行い、その結果との対応について検討した。さらに、曲げ試験終了後のRCはりについて、コアの抜き取りによる付着剥離性状の目視観察や建設省建築研究所式（通称、建研式）表面接着強度試験を併せて行い、剥離診断器による非破壊調査結果の妥当性についても検討した。

2. 実験方法

GRCの使用材料や練り混ぜ方法、後打ちコンクリート用のレディーミクストコンクリートの仕様、GRC打込み型枠の形状寸法および作製、GRCおよびコンクリートの素材試験、RCはりの形状寸法および配筋、RCはりの曲げ荷重試験方法などについては、その1で報告済みであるが、本報では、論旨の展開を損なわない程度に記述することにする。

2.1 使用材料

GRCの使用材料および調合を表1に示す。繊維には、長さ25mmの耐アルカリ性ガラス繊維を用い、外割質量で3%を混入した。GRCの練り混ぜには、容量30lのオムニミキサーを使用し、まずプレーンモルタルを練り混ぜた後で、ガラス繊維を混入した。プレーンモルタルのフロー値は、194mm、GRCのフロー値および空気量はそれぞれ153mmおよび6.5%であった。また、RCはりに用いたレディーミクストコンクリートは、表2の仕様に示すように、呼び強度が21（210kgf/cm²）の普通コンクリートとし、スランプおよび空気量の測定値は、それぞれ18.7cmおよび4.3%であった。鉄筋には、SD295Aを用い、主筋はD22、あばら筋はD10とした。

2.2 GRC打込み型枠の作製

GRC打込み型枠の形状寸法は、図1に示すように、外形寸法が幅250mm×高さ400mm×長さ4,800mmのU字形とし、下記の2種類の断面形状のものを1体ずつ作製した。1つは、図2に示すように、後打ちコンクリートと接する型枠内面に、エアーキャップにより、

表1 GRCの使用材料および調合

使用材料		質量比
セメント	普通ポルトランドセメント	100
骨材	けい砂5号	90
混和材	シリカヒューム	10
混和剤	高性能減水剤（ナフチルスルホン酸系）	3.5
繊維	耐アルカリ性ガラス、繊維長 25mm	7
混練水	上水道水	30

*繊維は、外割質量で3%混入した。

表2 レディーミクストコンクリートの仕様

コンクリート種類	呼び強度	スランプ	粗骨材の最大寸法	セメントの種類
普通	21	15	20	N

*スランプおよび空気量の測定値は、それぞれ18.7cmおよび4.3%。

円形の凹部を設けた、一体成形のU字形断面で、凹部および凸部のGRCの厚さは、それぞれ15mmおよび19mmとした。もう1つは、図3に示すように、亜鉛ビキ亀甲金網を寸法が30×30mmの角材により凹凸に型押しして、GRC中に半分埋め込んだ、厚さ15mmのGRC平板をU字形に組み立てたものである。以上のGRC打込み型枠は、GRC打設後材齢21日まで現場封緘養生を行い、その後は、コンクリート打設時まで気乾状態とした。なお、上記2種類の断面形状を選定した理由は、既報³⁾に示すように、各種断面形状のGRC型枠による部分圧縮試験の結果から、特に付着性状のすぐれていたものである。その中で、剥離性状の力学モデルとして、剥離やすべりがなく、型枠とコンクリートが完全に接合した状態、接合面にずれは生じるが、ある程度の応力伝達が残存しているすべりの状態、応力がまったく伝達されない剥離の状態に大別して、凹凸内面は、すべりを生じるまでの接合面の密着性が特に大きく、すべりおよび剥離開始荷重レベルも高いこと、また金網埋込内面は、凹凸内面に比べて接合面の密着性はやや劣るものの、すべりおよび剥離開始荷重レベルがもっとも高いことを示している。

図1 GRC打込み型枠の形状寸法

図2 円形凹凸内面U字形
一体成形GRC型枠

図3 金網埋込内面U字形
組立成形GRC型枠

2.3 素材試験および付着剥離試験

GRC、レディーミクストコンクリートおよび鉄筋の素材試験は表3に示す試験条件で行った。その詳細については、その1で示すとおりである。

前述の2種類の断面形状を有するGRC打込み型枠とコンクリートの付着剥離性状の予備的検討のために、ここでは、簡便な付着剥離試験法として部分圧縮試験を行った。試験体は、図4に示すように、長さ400mmのコンクリート角柱の両側面に、長さ300mmのGRC

表3 GRC、レディーミクストコンクリートおよび鉄筋の素材試験

材 料	試験項目	試験体形状寸法	養生・材令	個数	測定項目ほか
GRC	圧縮試験	$\phi 100 \times 200\text{mm}$ 円柱	20℃水中、現場封緘養生(材令21日)および現場気中養生の3種類	各養生について3個ずつ	圧縮応力-ひずみ曲線、 σ/ϵ 比測定
	引張試験	幅40mm×厚さ10mm×長さ380mmのGRC工業会試験体、および中央両側面に切り込みを設けた「Z」形状の2種類	現場封緘養生(材令21日)	各形状について3個ずつ	引張応力-ひずみ曲線測定 *直接引張試験は、GRC工業会の7枚板接着法に準拠 *両端支持間隔280mm、クロスヘッド変位速度3mm/min.
	曲げ試験	幅50mm×厚さ10mm×長さ275mmのGRC工業会試験体	現場封緘養生(材令21日)	6個	荷重-クロスヘッド変位曲線測定 *中央集中3点曲げ(スパン長さ225mm) *クロスヘッド変位速度3mm/min.
レディーミクストコンクリート	圧縮試験	$\phi 100 \times 200\text{mm}$ 円柱	20℃水中、現場封緘養生(材令21日)および現場気中養生の3種類	各養生について3個ずつ	圧縮応力-ひずみ曲線、 σ/ϵ 比測定
	引張試験	$\phi 100 \times 200\text{mm}$ 円柱	20℃水中および現場封緘養生(材令21日)の2種類	各養生について3個ずつ	割裂引張強度測定
	曲げ試験	100×100×400mm 角柱	20℃水中および現場封緘養生(材令21日)の2種類	各養生について3個ずつ	曲げ強度測定 *3等分点曲げ(スパン長さ300mm)
主筋およびあばら筋	引張試験	2号試験片		各6個	降伏点、引張強度および破断伸び測定

平板が接合された形のもので、内形寸法が100×100×400mmの鋼製型枠の両側面に、前述の2種類の断面形状を有するGRC平板を設置し、コンクリートを後打ちする方法により作製した。なお、コンクリートには、前述のレディーミクストコンクリートを使用した。また、試験は、後打ちコンクリート角柱の両端面を圧縮し、荷重と試験体中央のコンクリートおよびGRC平板表面の軸方向ひずみを測定した。なお、ひずみの計測には、ゲージ長さ30mmのワイヤーストレインゲージを使用した。ここで、試験体は、後打ちコンクリート打設後材齢21日まで、20℃水中養生および現場封緘養生の2種類で、接合部のGRC平板が凹凸内面および金網埋込内面の前述の2種類と、比較のために全体がコンクリートで同一形状のものについて各3個ずつ作製した。

2.4 RCはりの作製および曲げ載荷試験

外形寸法が幅250mm×高さ400mm×長さ4,800mmで、前述の2種類の断面形状を有するGRC打込み型枠を用いたRCはりとは、比較のために在来の合板型枠による同一外形寸法のRCはりを各1体ずつ

作製した。図5に、RCはりの配筋と載荷形式を示す。配筋は、圧縮および引張鉄筋ともに2-D22、あばら筋は $\square D10@200$ とした。また、載荷形式は4点曲げで、スパン長さは4,000mm、中央の載荷点間隔は800mmとした。

RCはりの載荷方法は、引張鉄筋降伏荷重の約2/3の荷重点、降伏荷重点、スパン中央変位がスパン長さの約1/150および1/100に達した時点でそれぞれ除荷・再載荷を繰り返し、最終的に変位がスパン長さの約1/50に達した時点で除荷して、試験を打ち切った。ここで、負荷の下でのGRC打込み型枠と後打ちコンクリートの付着剥離性状をリアルタイムで調べるために、載荷前と上述の除荷ごとに、後述するタイル用剥離診断器を用いて非破壊調査を行った。なお、荷重、変位および鉄筋・コンクリート表面ひずみなどの測定については、その1に示すとおりであり、これらの測定データは、本報の考察の対象外なので、その詳細は割愛する。

2.5 GRC打込み型枠の付着剥離状況調査

ここで使用した剥離診断器の仕様を表4に示す。本器は、打撃による振動音をマイクロフォンで検出・解析することにより、剥離状況を青、黄および赤の3色ランプで表示するもので、打撃部・診断部およびバッテリーにより構成されている。また、仕様では、それぞれのランプ表示色に対して、接着強度の範囲は、4kgf/cm²以上

図4 部分圧縮試験による打込み型枠の付着剥離試験

図5 RCはりの配筋および載荷形式

(青色)、 $1 \sim 4 \text{ kgf/cm}^2$ (黄色) および $0 \sim 1 \text{ kgf/cm}^2$ (赤色) となっている。なお、本実験における GRC 打込み型枠の場合には、タイルの仕様に準じ、その適用条件である、大きさ 50 mm 角以上、厚さ 30 mm 以内を満足している。測定要領は、RC はりの片側スパン半長の両側面に 100 mm 角のグリッド線を引き、その線上に沿って剥離診断器の打撃部を移動させ、そのときのランプ表示色を記録した。その際に、赤色のランプを示した部分についてはその周辺を詳しく、また、曲げ載荷試験終了後は、全面を入念に測定し、剥離部分の範囲を特定した。

上述の剥離診断器による非破壊調査の有効性を確認するために、曲げ載荷試験終了後に、はり側面でのコア抜き取りによる剥離状況の目視観察と、建研式表面接着強度試験による GRC 打込み型枠の接着強度の測定を行った。なお、コアの採取および接着強度試験用スリット加工位置は、剥離診断器により青、黄および赤色を示した領域のそれぞれについて、3箇所ずつとした。また、コア寸法は、直径 75 mm 、深さ約 60 mm 、スリット寸法は、 40 mm 角で、深さ約 60 mm とした。

3. 実験結果および考察

3.1 素材試験結果

GRC、レディーミクストコンクリートおよび鉄筋の素材試験結果については、その1で示しているが、GRCおよびレディーミクストコンクリートについて、RCはり試験体と同一養生条件の現場封緘養生材齢21日の場合の圧縮、引張および曲げ試験結果を参考までに、それぞれ表5, 6に示す。なお、表中の値は、測定値の平均を示している。

3.2 部分圧縮試験によるGRC型枠の付着剥離性状

接合部が凹凸および金網埋込内面のGRC平板についての部分圧縮試験結果を表7に示す。また、RCはり試験体と同一養生条件の現場封緘養生について、試験体の最終的なひびわれおよび破壊性状を図6に、荷重とGRCおよびコンクリート表面のひずみの関係を図7に示す。なお、 20°C 水中養生の場合も、現場封緘養生の場合とほぼ同様の破壊性状と荷重-ひずみ挙動を示した。

最終的なひびわれおよび破壊性状については、全体がコンクリートの試験体では、コンクリートの圧縮試験でみられるような縦方向のひびわれの進展から、加圧面端部の局部的圧壊により終局的破壊

に至った。接合部が凹凸内面のGRC平板の場合には、接合部両端から付着面に沿ってひびわれが進展し、最終的には、ほとんどの試験体で、片側あるいは両側のGRC接合部全体がコンクリートから完全に剥離した。また、剥離面を観察すると、GRC面に凸にくい込んでいるコンクリート部分がすべてくび切れており、付着面でコンクリートがずりせん断破壊したものと同様と予想される。接合部が金網埋込内面のGRC平板の場合には、接合部両端から付着面よりやや内側に沿ってひびわれが進展し、加圧面端部の局部的圧壊により終局的破壊に至った。また、接合部が凹凸内面の場合のように、GRC接合部全体の剥離はみられなかった。

荷重-GRCおよびコンクリート表面ひずみ関係については、全体がコンクリートの試験体では、接合部と本体のコンクリート表面ひずみは、最大荷重点近傍に至るまでほぼ一致し、接合部と本体が一体化していた。接合部が凹凸内面のGRC平板の場合には、ある荷重レベルまで、GRC接合部とコンクリート本体の表面ひずみはほぼ一致しているが、その直後にGRC接合部の表面ひずみが急減し、ほぼ0になっている。これは、GRC平板の全面剥離を意味しており、凹凸内面のGRCの場合には、剥離開始荷重レベル(表7中の値では、最大荷重の約60%となっている)まで高い密着性(表7中の値では、ほぼ1.0となっている)を保ち、その後、接合部両端から生じた剥離が一気に中央部分まで進行し、接合部全体が完全に

表5 GRCの素材試験結果

圧縮強度 (kgf/cm^2)	ヤング係数 (kgf/cm^2)	ポアソン 比	引張強度 (kgf/cm^2)	曲げ強度 (kgf/cm^2)
626	2.57×10^5	0.19	55.4 ~ 74.6	190

*引張強度の左側および右側の値は、それぞれGRC工業会試験体およびダンベル形状試験体によって求められた値を示す。

表6 レディーミクストコンクリートの素材試験結果

圧縮強度 (kgf/cm^2)	ヤング係数 (kgf/cm^2)	ポアソン 比	引張強度 (kgf/cm^2)	曲げ強度 (kgf/cm^2)
240	2.19×10^5	0.21	20.3	37.6

表7 接合部がGRC平板の部分圧縮試験結果

1) 接合部が凹凸内面GRC平板

養生方法	ϵ_{Gmax} (μ)	ϵ_{ccor} (μ)	密着性 ($\frac{\epsilon_{Gmax}}{\epsilon_{ccor}}$)	P_{cor} (tf)	剥離開始 荷重レベル ($\frac{P_{cor}}{P_{max}}$)
20℃水中養生	272	252	1.08	7.3	0.66
現場封緘養生	257	271	0.95	7.8	0.58

2) 接合部が金網埋込GRC平板

養生方法	ϵ_{Gmax} (μ)	ϵ_{ccor} (μ)	密着性 ($\frac{\epsilon_{Gmax}}{\epsilon_{ccor}}$)	P_{cor} (tf)	剥離開始 荷重レベル ($\frac{P_{cor}}{P_{max}}$)
20℃水中養生	580	1068	0.54	15.0	0.94
現場封緘養生	417	754	0.55	13.7	0.84

* ϵ_{Gmax} : GRC表面の最大ひずみ, ϵ_{ccor} : GRC表面ひずみの最大時に対応するコンクリート表面ひずみ, P_{cor} : GRC表面ひずみの最大時の荷重, P_{max} : 最大荷重

表4 タイル用剥離診断器の仕様

適用条件: タイル モルタル 下地	大きさ 50 mm 角以上、厚さ 30 mm 以内 こて仕上げ、弾性塗装の無い壁面 RC構造			
検出深度	40 mm 以内			
診断目安	3色ランプ(LED)表示			
	ランプ表示色	青	黄	赤
	接着強度 (kgf/cm^2)	4以上	1~4	0~1
使用環境	$0 \sim 40^\circ\text{C}$ 、R.H.85%以下			

剥離したものと考えられる。一方、接合部が金網埋込内面のGRC平板の場合には、凹凸内面の場合よりも密着性は小さい(表7中の値では、約0.55となっている)が、より高い剥離開始荷重レベル(表7中の値では、約90%となっている)で、接合部両端から剥離が生じはじめ、その後、荷重の増加を伴いながら徐々に剥離が中央部に進行する様相が観察される。ここで、金網埋込内面の場合の密着性が小さいのは、表面に突き出た金網により、GRC面へのコンクリートの充填が阻害されたことや、GRC面が平滑なためにコンクリートとの付着強度が小さかったことなどが考えられるが、剥離拡大に対する金網の拘束効果はかなり大きいことが確認された。

3.3 RCはりの曲げ試験によるGRC打込み型枠の付着剥離性状

図8に示す、GRC打込み型枠によるRCはりの荷重-スパン中央変位曲線の測定値において、①載荷以前、②降伏荷重の約2/3の荷重で除荷、③ほぼ降伏荷重で除荷、④変位がスパン長さの約1/150で除荷、⑤変位がスパン長さの約1/100で除荷および⑥変位がスパン長さの約1/50で除荷のそれぞれの時点で、前述の剥離診断器によりGRC打込み型枠の付着剥離状況を非破壊で調査した。その調査結果を図9に示している。この図より、載荷以前においても、ランプ表示が黄色を示す部分が点在しており、特に、金網埋込内面のGRC打込み型枠において顕著に現れている。これは、前述の部分圧縮試験結果において金網埋込内面のGRC平板の場合の密着性が、凹凸内面のGRC平板の場合よりも小さかったことに対応し、金網による型枠内面へのコンクリートの充填が阻害された結果の施工欠陥によるものと考えられる。

載荷状態においては、RCはりにおける短期設計用荷重にほぼ対応している降伏荷重点まで、新たな剥離の拡大はほとんどみられない。一方、降伏荷重以降の変形の大きい範囲では、純曲げ区間で発生・進展したひびわれの近傍にランプ表示が赤色を示す剥離部分

が形成され、それが核となって、次第に剥離部分が周辺に広がって行く様相が観察される。また、変位がスパン長さの約1/50に達した(試験打ち切り)時点で曲げ圧縮側コンクリートの圧壊がみられたが、その時点において、凹凸内面のGRC打込み型枠では、ランプ表示が赤色を示す完全剥離部分が純曲げ区間全体に広がっているのに対して、金網埋込内面のGRC打込み型枠では、完全剥離部分は引張縁近傍のひびわれ周辺の狭い範囲に集中しているだけであり、

1)凹凸内面GRC平板 2)金網埋込内面GRC平板

図7 荷重-GRCおよびコンクリート表面ひずみ関係

1)凹凸内面GRC平板 2)金網埋込内面GRC平板

図6 部分圧縮試験の最終的ひびわれおよび破壊性状

図8 GRC打込み型枠RCはりの荷重-変位曲線

剥離拡大に対する金網の拘束効果が顕著にみられる。これは、前述の部分圧縮試験結果と良い対応を示している。なお、部分圧縮試験のように、凹凸内面のGRC打込み型枠がコンクリートから完全に剥がれ落ちることはなかった。また、上述のような降伏荷重以降のGRC打込み型枠の剥離拡大が、その1で述べたように、RCはりの変形および耐荷性状には、ほとんど悪影響を及ぼさなかった。ただし、本実験における曲げ降伏先行型のRCはりに対して、軸圧縮

力やせん断力が卓越するRC柱の場合には、せん断圧縮状態が支配的な部分圧縮試験結果にみられるように、凹凸内面のGRC打込み型枠の全面剥離による断面欠損が耐力や変形能力に悪影響を及ぼす可能性は否定できず、今後さらに検討が必要である。

3.4 剥離診断器によるGRC打込み型枠の付着剥離性状の非破壊調査の妥当性に関する検討

ここでは、前述の剥離診断器によるGRC打込み型枠の剥離状況

図9 剥離診断器によるGRC打込み型枠の付着剥離性状の非破壊調査結果

の非破壊調査結果の妥当性を調べるために、RCはりの曲げ載荷試験終了後に、はり側面から抜き取ったコアの目視観察とGRC打込み型枠の表面接着強度試験を行った。図10に、コアの採取位置と、表面接着強度試験のためのスリット加工位置を示す。なお、コアの採取およびスリットの加工位置は、剥離診断器のランプ表示が赤、黄および青色を示した領域について各3箇所ずつとした。また、100mm角グリッド線上で剥離診断器を走査した領域（片側スパン半長）で、コアの採取やスリットの加工の場所の余裕がない（特に、赤色の領域）場合には、その領域以外の場所で、新たに剥離診断器により剥離状況を調査し、その場所でコアの採取やスリット加工を行った。

表8に、剥離診断器のランプ表示が赤、黄および青色を示した領域で採取したコアの目視による観察結果を示す。凹凸内面のGRC打込み型枠の場合には、赤色の領域では、GRC型枠がすべてコンクリートから剥離しており、型枠面に凸にくい込んでいるコンクリートが全面くび切れていた。黄色の領域では、3体中2体についてGRC型枠が全面剥離していたが、残りの1体については、見た目には健全であり、型枠とコンクリートの付着面にひびわれなどの異状は観察されなかった。青色の領域では、3体中1体についてGRC型枠が全面剥離していたが、残りの2体は健全であった。一方、金網埋込内面のGRC打込み型枠の場合には、赤色の領域では、GRC型枠がすべてコンクリートから剥離しており、その状況は、ちょうどコンクリートに埋め込まれたアンカーボルトの引き抜けに類似し、金網部分でコンクリートがコーン状に剥離していた。黄色の領域では、3体とも型枠とコンクリートの付着面にひびわれなどの異状はみられず、見た目には健全であった。同様に、青色の領域でも3体とも健全であった。以上の結果より、剥離診断器のランプ表示による青色（ほぼ健全）、黄色（剥離の危険性あり）および赤色（ほとんど剥離）の判定とコアの抜き取り調査結果とは、定性的にほぼ妥当な対応を示しているものと考えられる。

図10 コア採取および接着強度試験用スリット加工位置

表8 採取されたコアの目視による観察結果

凹凸内面 GRC 打込み型枠			金網埋込内面 GRC 打込み型枠		
コア 記号	型枠剥離 の有無	目視による 観察結果	コア 記号	型枠剥離 の有無	目視による 観察結果
CR1	全面剥離	型枠内面に凸 にくい込んで いるコンクリートが 全面くび切れ	CR1	全面剥離	金網部分でコ ンクリートがコーン状 に剥離
CR2	全面剥離	CR1 に同じ	CR2	全面剥離	CR1 に同じ
CR3	全面剥離	CR1 に同じ	CR3	全面剥離	CR1 に同じ
CY1	全面剥離	型枠内面に凸 にくい込んで いるコンクリートが 全面くび切れ	CY1	剥離無し	型枠とコンクリート の付着面にひび割れは 見られず、見た目 には健全
CY2	剥離無し	見た目には健 全	CY2	剥離無し	CY1 に同じ
CY3	全面剥離	CY1 に同じ	CY3	剥離無し	CY1 に同じ
CB1	全面剥離	型枠内面に凸 にくい込んで いるコンクリートが 全面くび切れ	CB1	剥離無し	型枠とコンクリート の付着面にひび割れは 見られず、見た目 には健全
CB2	剥離無し	見た目には健 全	CB2	剥離無し	CB1 に同じ
CB3	剥離無し	CB2 に同じ	CB3	剥離無し	CB1 に同じ

表9 GRC打込み型枠の表面接着強度試験結果

凹凸内面 GRC 打込み型枠			金網埋込内面 GRC 打込み型枠		
スリット 記号	接着強度 (kgf/cm ²)	観察結果	スリット 記号	接着強度 (kgf/cm ²)	観察結果
SR1	0	スリット加工時点 で全面剥離	SR1	0	スリット加工時点 で全面剥離
SR2	0	SR1 に同じ	SR2	1.6	金網部分でコ ンクリートがコーン状 に剥離
SR3	0	SR1 に同じ	SR3	1.1	SR2 に同じ
SY1	3.6	型枠内面に凸 にくい込んで いるコンクリートが 全面くび切れ	SY1	11.1	金網部分でコ ンクリートがコーン状 に剥離
SY2	2.2	SY1 に同じ	SY2	11.8	エポキシ樹脂接 着面剥離
SY3	0	スリット加工時点 で全面剥離	SY3	6.3	SY1 に同じ
SB1	2.3	型枠内面に凸 にくい込んで いるコンクリートが 全面くび切れ	SB1	18.6	金網部分でコ ンクリートがコーン状 に剥離
SB2	4.2	SB1 に同じ	SB2	20.0	SB1 に同じ
SB3	5.4	SB1 に同じ	SB3	7.6	SB1 に同じ

表9には、剥離診断器のランプ表示が赤、黄および青色で示した領域で行われた表面接着強度試験の結果を示す。凹凸内面のGRC打込み型枠の場合には、赤色の領域では、コアと同様に、スリット加工時点でGRC型枠がコンクリートからすべて剥離していた。黄色の領域では、3体中1体についてスリット加工時点でGRC型枠が全面剥離していたが、残りの2体は付着していた。青色の領域では、3体とも付着していた。一方、金網埋込内面のGRC打込み型枠の場合には、赤色の領域では、3体中1体についてスリット加工時点でコンクリートがコーン状に剥離していたが、残りの2体は付着していた。黄および青色の領域ではすべて付着していた。なお、接着強度試験では、黄色の領域の1体について、GRC型枠と40mm角の鋼板のエポキシ樹脂接着面で剥離した以外は、金網部分でコンクリートがコーン状に剥離した。また、40mm角の接着面での埋込金網量のばらつきのために表面接着強度の測定値の変動が大きくなっている。図11には、剥離診断器の各ランプ表示色と表面接着強度の測定値の関係を示す。なお、図中には、剥離診断器の仕様による、各ランプ表示色に対応する表面接着強度の範囲を併記している。図より、赤、黄、青色の順に接着強度は増加し、その程度は、凹凸内面より金網埋込内面のGRC打込み型枠の方が著しく大きくなっており、剥離に対する金網の拘束効果が顕著にみられる。また、凹凸内面の場合には、各ランプ表示色に対する仕様の接着強度の範囲と測定値の間に良い一致がみられ、測定値の平均は、仕様の接着強度の範囲のほぼ下限値に対応している。一方、金網埋込内面の場合には、赤色の領域での接着強度の測定値の平均は、仕様の範囲のほぼ上限値に対応しているが、黄色の領域では、すべての測定値が仕様の範囲を超えている。これは、接着強度試験における最終的な破壊が、金網部分でのコンクリートのコーン状の剥離によるので、剥離診断器で黄色として感知される、型枠とコンクリートの付着面の部

分的な肌分かれは、それほど接着強度に影響しないためであると考えられる。以上の結果より、剥離診断器による剥離状況の判定は、接着強度について、定量的にもほぼ妥当な結果を与えるものと考えられる。

4. まとめ

本研究では、高強度のGRCを打込み型枠として用いた大型のRCはりの曲げ載荷試験を行い、打込み型枠に要求される構造特性のうち、耐久性・耐火性の面から、設計荷重レベルまで型枠材と後打ちコンクリートの付着面が剥離せず、十分な一体性を保つかどうかについて、タイル用剥離診断器による非破壊検査により、曲げ負荷の下でのGRC打込み型枠の付着剥離状況をリアルタイムで調査した。その結果として、次のような知見が得られた。

剥離診断器により、載荷以前に施工欠陥と思われるGRC打込み型枠の剥離箇所の点在が認められたが、RCはりの降伏荷重に至るまで、新たな剥離の拡大はほとんどみられず、型枠材と後打ちコンクリートが十分な一体性を保っていることが実験的に確認された。また、降伏荷重以降の変形の大きい範囲では、純曲げ区間で進展したひびわれ近傍に剥離診断器で赤色のランプを示す剥離部分が形成され、それが核となって次第に剥離が拡大して行くこと、さらに、コンクリートが圧壊する終局時点では、凹凸内面のGRC打込み型枠の場合には、剥離部分が純曲げ区間全体に広がったのに対して、金網埋込内面では、剥離部分が引張縁のひびわれ周辺の狭い範囲に限定され、剥離拡大に対する金網の拘束効果が顕著に認められた。以上の剥離診断器による非破壊調査結果について、曲げ載荷試験終了後のコアの抜き取りによる目視観察と、建研式表面接着強度試験による接着強度の測定から、その妥当性が実験的に確認された。

〔謝辞〕

本研究は、日本GRC工業会の委託による、平成6年度GRC打込み型枠調査・研究委員会〔顧問：岸谷孝一、委員長：平居孝之、委員：前田孝一、村上 聖、徳富久二氏(鹿児島大学助教授)、高田博尾氏(清水建設)、小柳光生氏(大林組)、中川裕章氏(鹿島建設)、一家惟俊氏(秩父小野田)、大沼邦由氏(旭硝子)、伊藤哲郎氏(セントラル硝子)、塩見敬一氏(日本板硝子)、藤井洋氏(日本電気硝子)、内田郁夫氏(秩父小野田)、小倉保雄氏(日東紡績)、加藤信義氏(旭硝子)、三嶋清敬氏(旭硝子)]における調査・研究の一貫として行われたものであり、ご協力をいただきました委員およびGRC工業会技術部会(部会長：大沼邦由氏)会員の皆様に感謝の意を表します。また、本実験を行うにあたって、熊本大学工学部技官甲斐定夫氏をはじめ、当時の建築材料・施工研究室の大学院生および卒業生の諸氏に多大な協力をいただき重ねて深謝いたします。

〔参考文献〕

- 1) 日本GRC工業会：GRC打込み型枠調査・研究委員会報告書、1995.6
- 2) 村上聖、平居孝之、岸谷孝一、前田孝一、武田浩二、三井宜之、市村信：GRC打込み型枠による鉄筋コンクリートはりの構造特性に関する実験的研究—その1 変形および耐荷性状—、日本建築学会構造系論文報告集、第487号、pp.21-28、1996.9
- 3) 平居孝之、岸谷孝一、村上聖、前田孝一、徳富久二、何仕栄：GRC打込み型枠とコンクリートの接合面における応力伝達に関する基礎的考察、日本建築学会構造系論文報告集、第485号、pp.17-24、1996.7

図11 剥離診断器のランプ表示色と表面接着強度の対応

(1996年5月23日原稿受理、1996年12月12日採用決定)