

[2044] 補修した鉄筋コンクリート部材の力学的特性に関する研究

正会員 長瀧重義 (東京工業大学工学部)  
 正会員 ○岡本享久 (東京工業大学工学部)  
 中井暁夫 (東京工業大学工学部)  
 正会員 鈴木智郎 (日本鋼管土木建築技術部)

1. まえがき

本研究は劣化した部分をはつりとり、この部分に補修材を充てんしたRC部材の力学性状を明らかにすることを目的としたものである。はじめに、補修材の種類、旧コンクリートの接着面の表面の処理方法を変え、補修材と旧コンクリートとの接着強度をせん断強度試験により、接着面の耐久性を耐凍結融解試験と耐熱試験によって評価した。次いで、曲げ破壊を対象としたはりを製作し、はりの曲げ引張部の補修箇所の厚さおよび長さ、補修材の種類および旧コンクリートの接着面の処理方法を変えて載荷試験を実施し、補修したはりの曲げ挙動について考察するとともに、補修後の曲げひびわれ幅の予測について解析を行い、この種部材の合理的な補修方法の確立のための基礎資料を得ようとするものである。

2. 各種補修材と既設コンクリートの接着強度および接着面の耐久性

2.1 実験概要

a. 使用材料、供試体

補修材にはポリマー系セメントコンクリート、早強セメントコンクリート、不飽和ポリエステルレジンコンクリートおよび鋼繊維コンクリートの4種を用いた。これらの材料と旧コンクリートの配合に関する概略を表-1に示す。

接着強度および耐久性試験用の供試体の寸法を、図-1に示す。

供試体の作製は、まず旧コンクリートを打設し、その後図-2に示すような養生を実施した。補修材を打設する前に、旧コンクリートの接着面の処理方法として、ワイヤーブラシで処理する方法とチップング処理する方法の2種類を用いた。

b. 接着強度試験

接着強度は、図-3に示した一面せん断試験<sup>(1)</sup>によって評価した。一面せん断試験では、接着面のずれ方向と、これに垂直方向変位を2軸型亀裂変位計で測定した。

c. 耐久性試験

接着面の耐久性は、耐凍結融解試験および耐熱試験の2つの方法によって評価した。凍結融解試験はASTM C

表-1 補修材およびコンクリートの配合

コンクリート	W/C=55%, Max Size=20mm Slump=8cm, Air=4.5%
ポリマー系セメントモルタル	NKK-Emulsion 4kg NKK-Compound 10kg NKK-Compound B 22kg Water 1.4kg, Flow=132mm
早強コンクリート	W/C=45%, Max Size=20mm Slump=8cm, Air=4.5%
レジンコンクリート	Unsaturated Polyester 12% Calcium Carbide (CaCO <sub>3</sub> ) 15% Fine Aggregate 40% Coarse Aggregate 33% Max Size 20mm
鋼繊維コンクリート	W/C=56%, Max Size=20mm Slump=16cm, Air=3.5% Fiber 0.5x0.5x30mm Fiber Content 1.0%

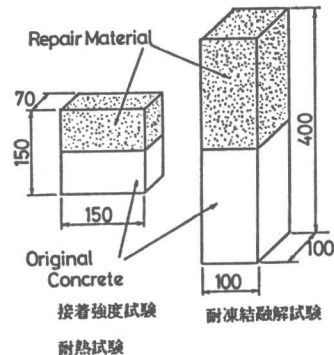


図-1 接着強度および耐久性試験用供試体

666 B 法、すなわち「空中における急速凍結と水中における融解」によって行われた。凍結サイクルは図-4に示したとおりであり、1サイクルの所要時間は4時間である。耐熱試験は乾燥炉を使用し、供試体周辺の温度を図-5に示すように変えた。

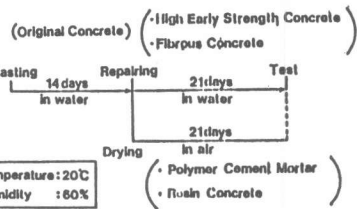


図-2 養生条件

## 2.2 接着強度

せん断破壊時のせん断応力 ( $\tau_0$ ) と垂直応力 ( $\sigma_0$ ) の関係を図-6に示した。図中の直線は実験によって得られた  $\tau_0$  と  $\sigma_0$  の関係を直線回帰したものである。接着面の破壊面を観察した結果、破壊は旧コンクリート側で生じていた。したがって、接着面の処理が同一ならば、 $\tau_0 - \sigma_0$  直線は補修材によらずほぼ同一のものとなり、補修材の種類の影響を受けない。しかし、接着面の処理をワイヤブラシ処理からチップング処理にすると、せん断強度は  $10 \sim 15 \text{ kgf/cm}^2$  程増加した。これは、チップング処理ではコンクリートの凸凹の深浅程度が大きくなり、凹部に侵入した補修材自身がせん断破壊をしたため、この貢献分が加算されたことによるものである。

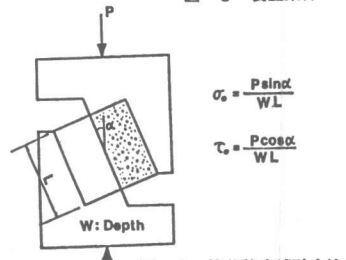


図-3 接着強度試験方法

## 2.3 耐久性

表-1に示したように旧コンクリートの空気量は4%~5%であり、単体としては十分な耐凍結融解性状を示した。しかしながら、表-2に示したように不飽和ポリエステルレジンコンクリートでは接着面の分離が熱膨張係数の相違により30サイクル以下で生じた。この場合、強度試験と異なり接着面の界面破壊であった。なお、ポリマー系セメントコンクリート、早強コンクリートおよび鋼繊維コンクリートでは、接着面の分離は300サイクルまで生じなかった。

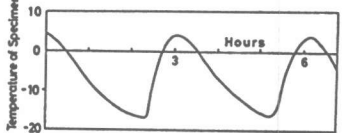


図-4 凍結サイクル (耐凍結融解試験)

耐熱性についても同様に表-2に示したように不飽和ポリエステルレジンコンクリートでは60サイクルで界面の分離を起こした。その他の補修材は200サイクル以内では接着面の分離は起こらなかった。

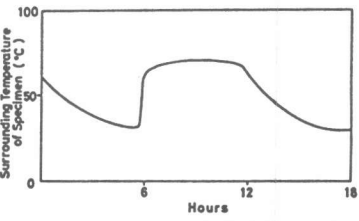


図-5 熱サイクル (耐熱試験)

3. 曲げ引張部を断面修復したRC部材のひびわれ、耐力および変形状

## 3.1 実験概要

### a. 使用材料、供試体

断面修復した鉄筋コンクリートはりの耐曲げ性状を把握する目的で、載荷試験

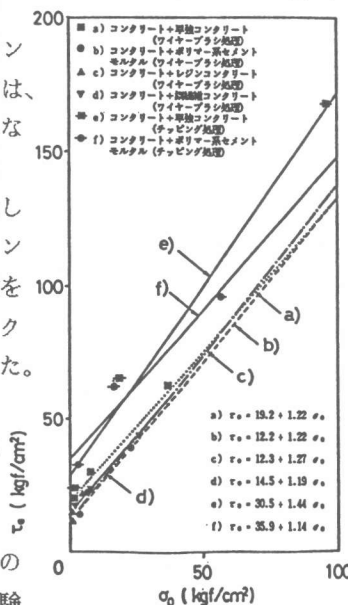


表-2 耐凍結融解試験および耐熱試験結果

	凍結融解	耐熱試験
コンクリート	> 300	> 200
レジンコンクリート	> 300	> 200
コンクリート + ポリマー系セメントモルタル	> 300	> 200
コンクリート + 早強コンクリート	> 300	> 200
コンクリート + 鋼繊維コンクリート	> 300	—
コンクリート + レジンコンクリート	21 & 26	60

単位 (サイクル)

図-6 せん断破壊時の  $\tau_0 - \sigma_0$  関係

を行った。用いた補修材はポリマー系セメントコンクリートと早強コンクリートである。供試体の寸法は図-7に示したとおりで、断面の高さは40cm、幅は30cmであり、はりの長さは300cmである。旧コンクリートと補修材の配合は表-1と同一である。補修箇所の寸法は図-8に示した。すなわち、補修厚さは5cmと10cmの2種に、補修長さは部材軸中心より両端に向かい長さを140cmと220cmの2種に変化させた。軸方向鉄筋には引張鉄筋としてSD-30, D16 ( $\sigma_{sy}=3859\text{kg/cm}^2$ )を3本(有効高さ=36.5cm)、圧縮鉄筋としてSD-30, D13 ( $\sigma_{sy}=3912\text{kg/cm}^2$ )を2本(上縁より3cmの位置)に配置した。なお、せん断破壊を防ぐ目的でSD-30, D10のスターラップをせん断スパン内に20cm間隔に配置した。次に断面修復は以下の二方法に従った。すなわち、鉄筋組立後、前もって型枠内に発泡スチロールを配置しておき、コンクリート打設・養生後にこれを取り除き、ここに補修材を充填をし養生後荷重試験を行う方法、なおこの方法では荷重前まで鉄筋には応力が作用していない。さらにFG-5-140-CONではコンクリート打設・養生後、曲げ引張部の鉄筋に許容引張応力度を作用させた状態で補修をし、この状態を養生期間中保持し、引き続いて荷重試験を行う方法の二通りである。

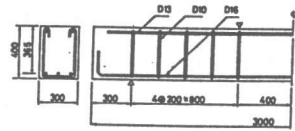


図-7 供試体

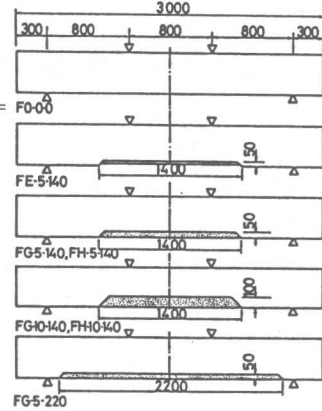


図-8 補修箇所の寸法



図-9 接着面のずれ変形

### b. 荷重方法

はりの曲げ破壊は図-8に示したように3等分点荷重で行い、各ひずみ増分ごとに、ひびわれ伸展状況、ひびわれ幅、補修材と旧コンクリートのずれ、鉄筋およびコンクリートのひずみ挙動を観測した。

### 3. 2 曲げひびわれ挙動

断面修復したRCはりの曲げ破壊試験結果の一覧を表-3に示す。初曲げひびわれは補修材より旧コンクリートの方が曲げ引張強度が弱いために先ず旧コンクリートに発生し、補修材と旧コンクリートの付着が十分なため、ほぼ同時に補修材まで伸展した。

接着面に貼付した亀裂変位計より図-9に示したように曲げひびわれが発生すると同時に接着面のズレ変形は  $1 \times 10^{-2}\text{mm}$  と急激に増加し、図-14に示した付着応力-すべ

表-3 荷重試験結果

Beam No.	t	l	*-1	*-2	$\sigma_c$	$\sigma_m$	Pb	Pi	Py	Pu
FO-0-0	-	-	-	-	299	-	6.5	3.9	21.4	24.3
FE-5-140	5	140	-	-	283	-	4.9	21.9	21.6	21.9
FG-5-140(1)	5	140	PM	I	283	172	3.4	20.1	20.1	22.2
FG-10-140	10	140	PM	I	284	172	8.7	13.8	20.6	23.7
FG-5-220	5	220	PM	I	284	172	7.7	13.4	21.8	22.9
FH-5-140	5	140	HESC	II	284	488	8.7	12.0	20.0	23.0
FH-10-140	10	140	HESC	II	284	488	7.1	13.0	20.0	24.3
FG-5-140(2)	5	140	PM	II	290	146	7.1	13.0	21.1	24.2
FG-5-140-CON	5	140	PM	II	362	207	16.1	19.8	18.1	22.4

t: 補修部の厚さ (cm)      l: 補修部の長さ (cm)      \*-1: 補修材の種類  
 PM: ポリマー系セメントモルタル      HESC: 早強コンクリート  
 \*-2: 旧コンクリートの表面処理方法      I: ワイヤブラシ処理      II: チッピング処理  
 $\sigma_c$ : コンクリートの圧縮強度 ( $\text{kg/cm}^2$ )       $\sigma_m$ : 補修材の圧縮強度 ( $\text{kg/cm}^2$ )  
 Pb: 初曲げひびわれ荷重 (tf)      Pi: 初締めひびわれ荷重 (tf)  
 Py: 引張鉄筋降伏荷重 (tf)      Pu: 最大荷重 (tf)

り関係よりもわかるように、この時点で接着面と局所的な大きなズレが生じ図-10に示すようにその後のひびわれ伸展状況に影響を与えた。

FG-5-140-CONとその他のはりにおける作用荷重(P)と平均ひびわれ幅(W)の関係を図-11に示す。実際の補修に近いFG-5-140-CONの補修後の初曲げひびわれ耐力は大幅に改善されるが、このひびわれ発生後のP-W関係は断面修復時に鉄筋に応力が作用しているか否かに関係なく大略同一であった。

### 3.3 荷重-変形関係

載荷荷重とはりの中央点のたわみの関係を図-12に示した。補修箇所の寸法、補修材の種類および旧コンクリートの表面処理寸法の相違にかかわらず、最大耐力はほぼ同一であった。FG-5-140-CONのはりでは断面修復後曲げ剛性、曲げひびわれ耐力とも大幅に改善され、設計荷重作用時( $U=1.7(D+L)$ )とすると大略13t)では曲げひびわれが発生せず、補修効果は顕著であった。

従って、断面修復時に鉄筋に応力が作用しているか否かの相違は修復後の初曲げひびわれ耐力と曲げ剛性に影響を与えるが、ひびわれ幅、最大耐力には影響を与えなかった。

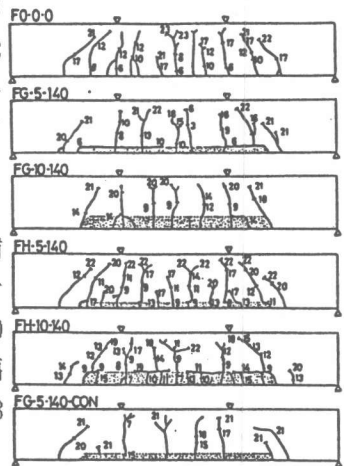


図-10 ひびわれ伸展状況

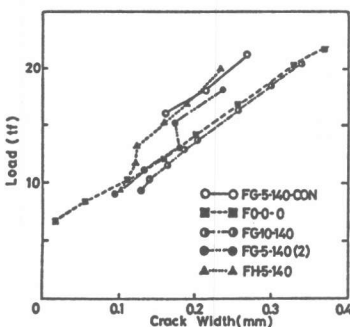


図-11 作用荷重とひびわれ幅の関係

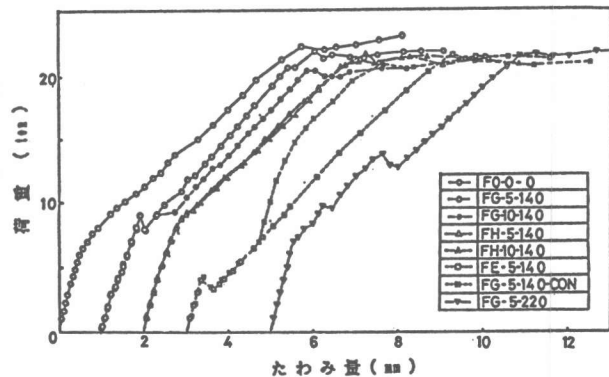


図-12 荷重-たわみ曲線

## 4. 断面修復したRC曲げ部材のひびわれ解析

### 4.1 解析モデルと仮定

本解析では、修復したRC曲げ部材を鉄筋、コンクリートおよび補修材の3材料で構成された複合構造と考え、曲げスパンから隣接する2つのひびわれに挟まれた部分を切り出し、図-13に示すようなモデルを用いて解析を行った。図-13において曲げモーメントによって鉄筋に生じる引張応力( $T/A_s$ )は、ひびわれ間において、鉄筋と補修材の付着応力( $\tau_{sr}$ )によって補修材に、さらには補修材とコンクリートの付着応力( $\tau_{rc}$ )によってコンクリートに伝わるものと考え、解析にあたり次のような仮定を設けた。すなわち、(I) 鉄筋と補修材、補修材とコンクリートの付着応力( $\tau$ )とずれ量( $S$ )の間に、弾性域では  $\tau = KS$ 、塑性域では  $\tau = \tau_y$

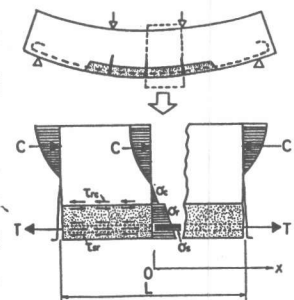


図-13 解析モデル

(=最大付着応力) が成り立つ。(鉄筋と補修材、補修材とコンクリートの  $\tau$ - $S$  関係をそれぞれ 図-14, 15 に示した。)(II) 鉄筋と補修材および補修材とコンクリートの間の付着応力により補修材およびコンクリートに作用する応力は、それぞれ補修部分全体および接着面から中立軸まで、一様に分布する。

#### 4. 2 基礎方程式

解析モデル(図-13)と仮定から次の基礎方程式が成り立つ。

はじめに、力の釣合いから、

$$\begin{aligned} \sigma_s(x) &= \sigma_s(0) + \frac{u}{A_s} \int_0^x \tau_{sr}(x) dx \\ \sigma_r(x) &= \sigma_r(0) - \frac{1}{A_r} \left\{ u \int_0^x \tau_{sr}(x) dx - B \int_0^x \tau_{rc}(x) dx \right\} \\ \sigma_c(x) &= \sigma_c(0) - \frac{B}{A_c} \int_0^x \tau_{rc}(x) dx \end{aligned} \quad (1)$$

また、ひずみの適合条件より、

$$\begin{aligned} \frac{dS_{sr}(x)}{dx} &= \frac{\sigma_s(x)}{E_s} - \frac{\sigma_r(x)}{E_r} \\ \frac{dS_{rc}(x)}{dx} &= \frac{\sigma_r(x)}{E_r} - \frac{\sigma_c(x)}{E_c} \end{aligned} \quad (2)$$

(1) 式および (2) 式より次の連立方程式が得られる。

$$\begin{aligned} \frac{d^2 S_{sr}(x)}{dx^2} &= u \left( \frac{1}{E_s \cdot A_s} + \frac{1}{E_r \cdot A_r} \right) \tau_{sr}(x) - \frac{B}{E_r \cdot A_r} \tau_{rc}(x) \\ \frac{d^2 S_{rc}(x)}{dx^2} &= -\frac{u}{E_r \cdot A_r} \tau_{sr}(x) + B \left( \frac{1}{E_r \cdot A_r} + \frac{1}{E_c \cdot A_c} \right) \tau_{rc}(x) \end{aligned} \quad (3)$$

(3) 式が修復したRC曲げ部材のひびわれ解析における基礎方程式で、この式により  $\tau_{sr}(x)$  と  $S_{sr}(x)$  の関係(図-14 参照)、 $\tau_{rc}(x)$  と  $S_{rc}(x)$  の関係(図-15 参照)が求まれば(3)式を  $\tau_{sr}(x)$ 、 $\tau_{rc}(x)$  に関する常微分方程式として解くことができる。解析モデルにおいて、鉄筋と補修材、補修材とコンクリートの付着状態は次の四つの状態に分類できる。状態I:  $\tau_{sr}$  と  $S_{sr}$ 、 $\tau_{rc}$  と  $S_{rc}$  の関係が弾性付着状態、状態II:  $\tau_{sr}$  と  $S_{sr}$  が弾性付着状態、 $\tau_{rc}$  と  $S_{rc}$  が塑性付着状態、状態III:  $\tau_{sr}$  と  $S_{sr}$  が塑性付着状態、 $\tau_{rc}$  と  $S_{rc}$  が弾性付着状態、状態IV:  $\tau_{sr}$  と  $S_{sr}$  が、 $\tau_{rc}$  と  $S_{rc}$  の関係が塑性付着状態

以上、状態I~IVについて境界条件を与え、(3)式を解くことにより、 $\tau_{sr}(x)$ 、 $\tau_{rc}(x)$  が求まり、さらに(1)式にこれらを代入することにより、 $\sigma_r(x)$ 、 $\sigma_s(x)$ 、 $\sigma_c(x)$  が求まる。

この  $\sigma_r(x)$  により鉄筋の引張力(T)が与えられたときの補修部における最小ひびわれ間隔( $l_{min}$

凡例

$A_s$ : 鉄筋の断面積	$A_r$ : 補修材の有効面積
$A_c$ : コンクリートの有効面積	$\sigma_s$ : 鉄筋に生じる引張応力
$\sigma_r$ : 補修材に生じる引張応力	$\sigma_c$ : コンクリートに生じる引張応力
$\tau_{sr}$ : 鉄筋と補修材の付着応力	$\tau_{rc}$ : 補修材とコンクリートの付着応力
B : 梁の幅	u : 鉄筋の周長
$S_{sr}$ : 鉄筋と補修材のずれ変形量	$S_{rc}$ : 補修材とコンクリートのずれ変形量
$E_s$ : 鉄筋の弾性係数	$E_r$ : 補修材の弾性係数
$E_c$ : コンクリートの弾性係数	

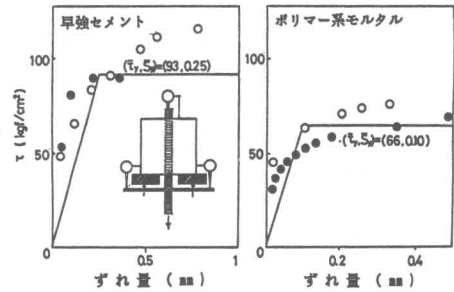


図-14 鉄筋と補修材の  $\tau$ - $S$  関係

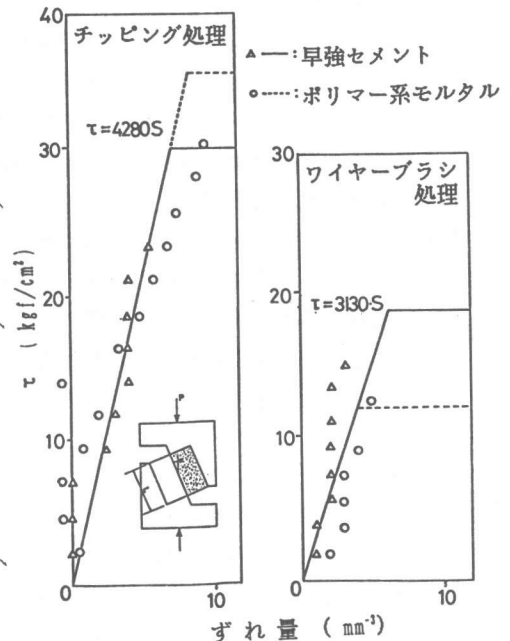


図-15 補修材とコンクリートの  $\tau$ - $S$  関係

)、最大ひびわれ間隔 ( $l_{max}$ ) が得られる。また、最小ひびわれ幅 ( $W_{min}$ )、最大ひびわれ幅 ( $W_{max}$ ) は (2) 式より求まることができる。

#### 4. 3 解析結果と実験結果の比較検討

各荷重段階でのひびわれ幅に関する解析結果と実験結果の比較検討を図-16~18に示した。荷重が低い段階では、解析結果は実験結果の傾向を捉えることができたが、荷重が大きい段階になると、解析は実験結果を過小評価する傾向が認められた。これは本解析では鉄筋と補修材、補修材と旧コンクリートの付着のすべり曲線を完全弾塑性体に近似していること、またひびわれ断面では付着は部分的に破壊され、このような点を解析にとり入れることができなかったことが原因と思われる。しかしながら、設計荷重作用時(13t付近)では解析値と実験値はほぼ一致した。なお、早強コンクリートを用いて修復した梁は、ポリマー系セメントモルタルを用いた梁に比べて平均ひびわれ幅が小さくなっているが、本解析もその傾向をとらえることができた。

#### 5. 結語

本研究の範囲内で以下のような結論が得られた。

(1) 補修材と旧コンクリートの接着強度は、補修材の種類より旧コンクリートの接着面の仕上げの影響を大きく受ける。すなわち、接着面の凸凹の分布とその深浅の程度により、接着強度が決まる。

(2) 補修材と旧コンクリートの接着面の耐久性は、レジコンクリートが最も弱く、ポリマーセメント系コンクリートおよび早強コンクリートでは300サイクルをすぎても耐熱性、耐凍結融解性は十分に認められた。

(3) 曲げ引張部を断面修復したRCはりの接着面には曲げひびわれ発生と同時に局部的なずれが生じ、このずれはその後のひびわれ伸展状況に影響を与える。

(4) 曲げ引張部を断面修復したRCはりのひびわれ挙動、降伏耐力および最大耐力は補修材の寸法、補修材の種類さらには修復時に鉄筋に応力が作用しているか否かの影響を受けず、同一であった。この修復時に鉄筋に応力が作用しているか否かの影響は補修後のはりの曲げ剛性、曲げひびわれ耐力に影響を与えた。従って、この種の補修方法に関する材料の選定を行うこと目的とした室内実験として、鉄筋に応力を作用させずに補修し載荷する方法が簡単で有力な手段として用いられる可能性が示された。

(5) 曲げ引張部を断面修復したRCはりのひびわれ解析に当り、鉄筋と補修材、補修材と旧コンクリートの付着・すべり関係を考慮し、釣合いおよびひずみの適合条件により求めた本解析は設計荷重作用時のこの種部材のひびわれ幅、ひびわれ間隔を推定することが可能である。

〔参考文献〕(1) 後藤祐司、長瀧重義：コンクリート接合部のせん断耐力に関する研究、土木学会論文報告集、No. 254、pp. 95-106、1976

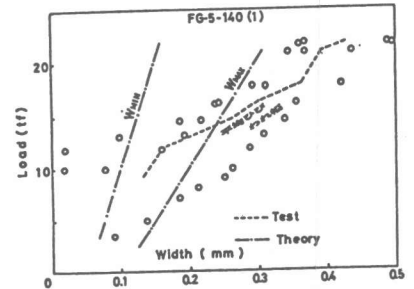


図-16 各荷重段階におけるひびわれ幅

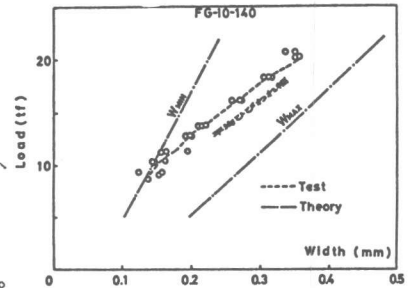


図-17 各荷重段階におけるひびわれ幅

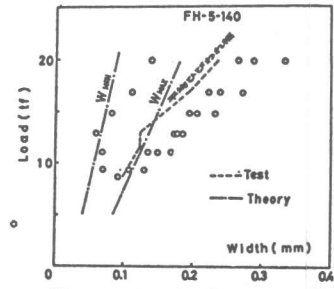


図-18 各荷重段階におけるひびわれ幅