

論文

[2057] 下面増厚補強した鉄筋コンクリート床版に関する実験的研究

永井 健\*1 小玉克巳\*2 佐藤貢一\*3

1. はじめに

道路橋の鉄筋コンクリート床版（以下、RC床版）、特に鋼橋上のRC床版の損傷事例が多く報告されるようになってから今日までの間、道路を維持、管理する機関を中心にこれらRC床版の損傷のメカニズムの解明が精力的に行なわれ、様々な対策が講じられてきた[1]。損傷の主な原因として、交通量の増大、過積載車両の走行、床版厚の不足、施工不良等が挙げられている。岡田ら[2]の研究では床版の損傷は、車両等による移動荷重の繰り返しによって横せん断とねじりせん断による応力集中が交互に起こるために生じること、また、松井[3]の研究では床版上の滞水が損傷を促進させていることが指摘されている。

損傷を受けたRC床版の補強工法として今日までに多く用いられている鋼板接着工法は交通規制を必要としないが補強後の損傷状態の確認が困難である。また、最近注目されている上面増厚工法は交通規制が必要であり、天候等の制約を受ける。種々ある補強工法には、それぞれ特徴と施工上の制約があり、個々の床版に対して適切な工法の選択基準の確立とともに新たな補強工法の開発が望まれている。

本研究は、RC床版供試体および補強筋（CFRP、PC鋼線）とポリアクリル酸エステル系ポリマーモルタル（以下、PPモルタル）を用いて作成したプレキャスト板によって床版の下面を増厚補強したRC床版供試体に静的載荷試験を行なうことにより、下面増厚補強の効果について検討した。

2. 実験概要

2. 1 下面増厚工法

PPモルタルと補強筋で作成したプレキャスト板によって補強を行う本工法は、これまではり供試体を用いた室内実験で使用され、静的曲げおよび曲げ疲労環境下において主鉄筋の応力度、たわみ量、ひびわれ幅が低減されること、また、プレキャスト板の母材となるモルタルは弾性係数の低いものを用い、補強部の断面厚は薄い形状のものが有効であることが確認されている[4]。

PPモルタルは、白セメントと珪砂からなるエマルジョンとコンパウンドを1：6の割合で練り混ぜ製作した。PPモルタルは、表-1に示すように弾性係数が比較的低く、特に曲げ、引張、付着強度が高く、さらに耐塩害、耐中性化、耐凍結融解性に優れている。

プレキャスト板の補強筋はCFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastic)、PC鋼線の2種類とした。

表-1 PPモルタルの性状

弾性係数	圧縮強度	曲げ強度	引張強度	付着強度	凍結融解
$1.19 \times 10^4$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	218(kgf/cm <sup>2</sup> )	92.5(kgf/cm <sup>2</sup> )	26.3(kgf/cm <sup>2</sup> )	75.0(kgf/cm <sup>2</sup> )	300cycle異常なし
促進耐候性試験	塩水噴霧	中性化促進試験		耐アルカリ性	
3000時間異常なし	3000時間異常なし	コンクリートの1/5		異常なし	

\*1 武蔵工業大学大学院 工学研究科土木工学専攻（正会員）

\*2 武蔵工業大学教授 工学部土木工学科、工博（正会員）

\*3 奈良建設(株)土木技術研究所（正会員）

CFRPは格子状のもの（プレキャスト板あたり主鉄筋方向10cmピッチ・20本、配力鉄筋方向2.5cmピッチ・40本）を用い、PC鋼線は直径2.9mmのもの（プレキャスト板あたり主鉄筋方向8.0cmピッチ・27本、配力鉄筋方向2.0cmピッチ・50本）とした（図-1）。CFRP、PC鋼線の性状を表-2に示す。プレキャスト板の寸法は100×200cm、断面厚はCFRPを用いたもの1.0cm、PC鋼線を用いたものは1.2cmとした（図-2）。下面増厚工法は、床版下面の脆弱層をミニディスクサンダーで取り除き表面処理した後、PPモルタルとアンカーを使用して接着厚が3mmとなるまで圧着し床版と一体化させた。本工法は、これまでの研究においてPPモルタルの接着力が強いこと、硬化前は粘性があり硬化後は弾性的な補強材であることから交通振動下での施工を想定した実験でも十分な補強効果が得られている[5]。

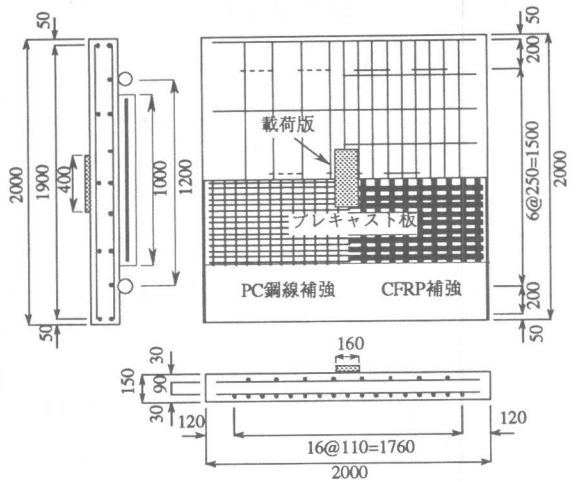


図-1 床版供試体寸法図

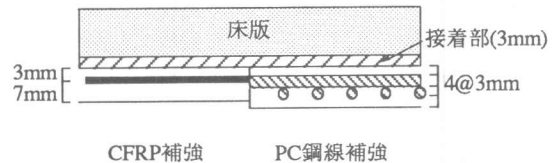


図-2 下面増厚部断面図

## 2.2 実験供試体および荷重方法

実験に用いた供試体は実橋床版の80%モデルで、幅200cm、床版厚15cm、スパン120cmとし、相対する二辺を単純支持、他の二辺を自由端とした（図-1）。コンクリートは普通ポルトランドセメントを使用し、水セメント比64.5%、単位水量は157kg/m<sup>3</sup>、細骨材率47.5%のもので、主鉄筋としてSD295-D16、配力鉄筋としてSD295-D13を用いた。供試体の種類は、無補強供試体2体（N-1、N-2）、CFRPを用いたプレキャスト板で補強したもの1体（FRP）、PC鋼線を用いたプレキャスト板で補強したもの1体（PC）の合計4体とした（表-3）。荷重は、輪荷重面積の80%を想定した40cm×16cmの鋼板（厚さ1.0cm）を介し床版中央の表面に静的に漸増荷重し、主鉄筋、配力鉄筋、プレキャスト板補強筋、床版下面、プレキャスト板下面のひずみおよびたわみ量の計測を行なった。

表-2 鉄筋および補強筋の性状

	弾性係数 (kgf/cm <sup>2</sup> )	断面積 (cm <sup>2</sup> )		降伏点応力 (kgf/cm <sup>2</sup> )	破断強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	引張剛性 (kgf/cm)
		縦断面積	総断面積			
鉄筋D16	2.1×10 <sup>6</sup>	1.986		3600	5365	—
鉄筋D13	2.1×10 <sup>6</sup>	1.267		3600	5365	—
CFRP	3.5×10 <sup>6</sup>	0.0499	0.1248	—	27000	1.75×10 <sup>4</sup>
PC鋼線	2.0×10 <sup>6</sup>		0.0605	—	21500	1.63×10 <sup>4</sup>

表-3 供試体の種類

供試体	RC床版		PC板	
	圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	主鉄筋比：配力鉄筋比	増厚 (cm)	引張剛性 (kgf/cm)
N-1	200	1.41%：0.54%	—	—
N-2	200	1.41%：0.54%	—	—
FRP	204	1.41%：0.54%	1.3	3.65×10 <sup>4</sup>
PC	204	1.41%：0.54%	1.5	3.45×10 <sup>4</sup>

表-4 破壊荷重の実験値と計算値

供試体	押抜きせん断耐力(tf)		Pt/Pc
	実験値(Pt)	計算値(Pc)	
N-1	37.0	38.5(1.00)	0.86
N-2	40.0	42.7	0.93
FRP	50.0(1.30)	50.9	0.98
PC	49.5(1.29)	52.7	0.94

## 3. 実験結果

### 3.1 破壊荷重と破壊性状

4体の供試体の破壊性状はすべて押抜き

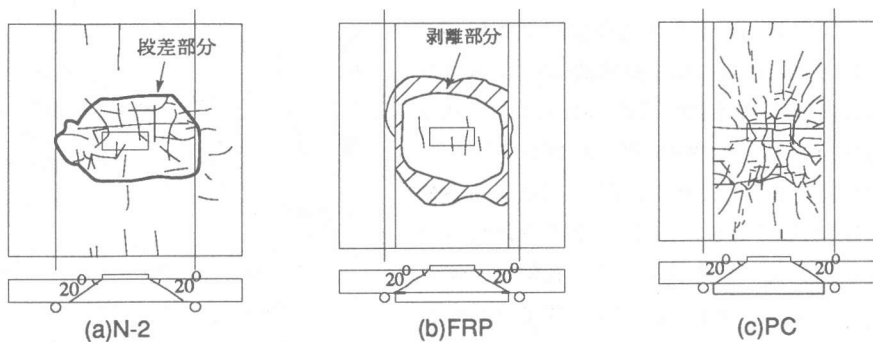


図-3 破壊後の供試体下面のひびわれ状況図

せん断によって破壊した。各供試体の破壊荷重および松井[6]の押抜きせん断耐荷力の算定式による計算値を表-4に示す。補強供試体の耐荷力の算出にあたっては、増厚部分が床版と一体化し、剥離を起こさないものと仮定のもとで増厚部分を床版の一部に換算することにより行った。実験の結果では、補強供試体FRP、PCともに破壊荷重が約50tfと無補強供試体N-1、N-2に比べて耐荷力が約1.30倍に向上し、補強効果が示された。下面増厚することにより床版の耐荷力が約1.30倍に向上したが、この程度の耐荷力向上で十分であるか否かの考察は、今後予定している繰返し載荷試験の結果を踏まえて行うことにする。実験値での破壊荷重と耐荷力の計算値との比較では、無補強供試体N-1、N-2で計算値との比 $P_t/P_c$ の平均値が0.90、補強供試体FRP、PCでは0.96となり、補強後の床版の耐荷力も算定が可能であると考えられる。図-3に無補強供試体N-2、補強供試体FRP、PCの破壊後の床版下面の状態を示す。N-2では載荷版直下を中心として楕円状の押抜き面が見られた。FRP、PCでは床版本体は押抜きせん断破壊を起こしたが、プレキャスト板は押抜かれておらずプレキャスト板は床版下面に接着されたままであった。FRPでは載荷板周縁から約20°の傾きで床版下面にいたる部分(図-3(b)斜線部分)で床版本体とプレキャスト板の剥離が確認でき、載荷板直下付近では剥離は見られなかった。すなわち、FRPでは剥離部分において床版本体と押抜かれた部分との段差が生じていると思われる、これは無補強供試体N-2の破壊形態と一致することがわかる。一方、補強供試体PCにおいてはFRPのように床版本体とPC板との間に明かな剥離は見られず、載荷板直下を中心として亀甲状のひびわれが発生していた。これは、PC鋼線とPPモルタルの付着がCFRPにくらべ弱くプレキャスト板のモルタル内でPC鋼線にずれが生じたため、補強床版の変形が大きくなりひびわれを多数発生し剥離を起こすことなく破壊に至ったものと考えられる。

### 3. 2 主鉄筋に作用する応力について

図-4に荷重と主鉄筋に作用する応力の関係を示す。応力は、各供試体中央部の鉄筋のひずみよ

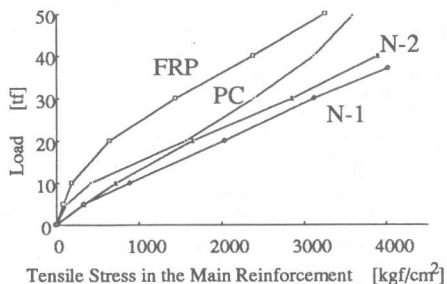


図-4 荷重と主鉄筋の応力の関係

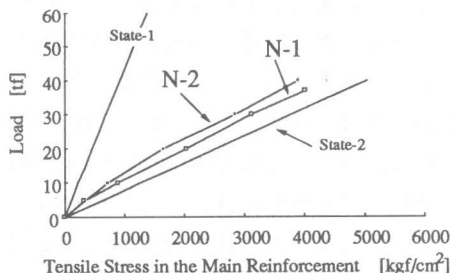


図-5 計算値と実験値の比較  
(主鉄筋応力：N-1、N-2)

り算出した。荷重5tfにおいて補強供試体FRP、PCの主鉄筋の応力はともに無補強供試体N-1、N-2の約7割、20tfにおいてもFRPは約7割、PCは約3割の応力低減が見られ、CFRPを用いたプレキャスト板は高い補強効果が示された。図-5、6に有効幅をもちいたRC床版の近似解法[7]による主鉄筋応力の計算値と実験値との比較を示す。補強供試体の計算値は破壊荷重の算出と同様に増厚部分を床版の一部に換算することにより行った。N-1、N-2(図-5)では全断面有効の状態(以下、状態1)よりも引張部コンクリートを無視した状態(以下、状態2)よりも近い結果となった。一方、FRP、PCはN-1、N-2にくらべて状態1の近くに位置しており、補強効果が示された(図-6)。図-7に床版断面各位置におけるひずみの分布を示す。N-1では、5tfですでにひびわれが発生していると思われ床版下面のひずみは状態1の理論値よりも大きくなった。また、FRPでは5tf、20tfにおいても状態1の理論値に近く、また、PCでは5tfで状態1の理論値に近く、補強床版においてはひびわれ発生荷重が向上し、平面保持の仮定も成立しているものと考えられる。

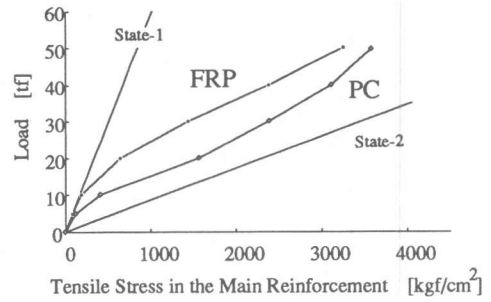


図-6 計算値と実験値の比較  
(主鉄筋応力：FRP、PC)

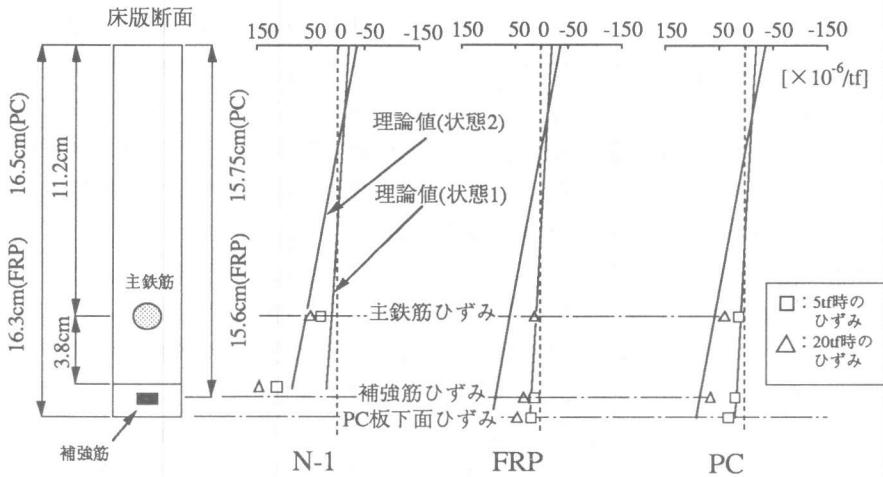


図-7 床版断面におけるひずみ分布

### 3. 3 配力鉄筋に作用する応力について

図-8に荷重と配力鉄筋に作用する応力の関係を示す。応力は、各供試体中央部の鉄筋のひずみより算出した。荷重5tfにおいて補強供試体FRPの配力鉄筋の応力は無補強供試体N-2の7.5割、PCでは3割、20tfにおいてもFRPは7.5割、PCは4割程度の応力の低減が見られた。CFRP、PC鋼線を用いたプレキャスト板ともに高い補強効果が得られ、配力鉄筋応力の低減効果は主鉄筋応力にくらべて高いことが示された。これは、RC床版の損傷要因の一

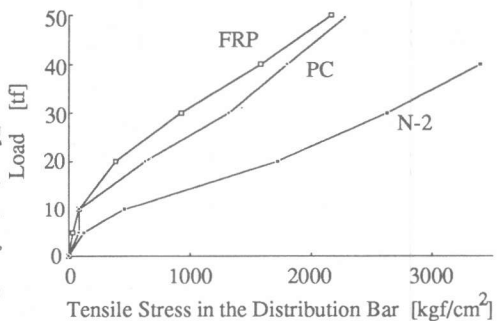


図-8 配力鉄筋の応力と荷重の関係

つである配筋不足を補うことを考慮し、プレキャスト板の配筋鉄筋方向の補強筋本数を主鉄筋方向に比べて2倍程度に設計したためであり、目的通りの補強効果があげられた。

### 3. 4 床版中央のたわみ量について

図-9に荷重と床版中央のたわみ量の関係を示す。下面増厚することにより無補強床版N-1に比べ5tfではFRP、PCともに5割、20tfではFRPが6割、PCが2.5割程度のたわみ量の低減効果が見られた。補強供試体FRPがPCにくらべてたわみ量の低減効果が高い結果となったのは、主鉄筋や配筋鉄筋の応力が低減効果が高いことからわかるように、補強筋CFRPが格子状であり、表面に凹凸があるためPC鋼線にくらべてPPモルタルとの付着がよく、プレキャスト板内に応力が分散されたため床版の変形が抑制されて、たわみ量の増加が少なかったものと考えられる。その結果、最終的に床版の押抜きせん断破壊とともに床版本体とプレキャスト板との間で剥離を生じたものと考えられる。一方、補強供試体PCでは、荷重のごく初期の段階においてはFRPと同程度のたわみ量の低減が見られるが、荷重の増加に伴う床版の変形にプレキャスト板が追従するため床版変形の抑制効果は少ない。その後荷重が増加するにしたがいプレキャスト板にもひびわれが発生し、剥離を生じることなく破壊に至ったと考えられる。図-10、11、12に前述の近似解法と床版軸方向に離散化した各断面の曲率を数値積分することにより求めたたわみ量の計算値と実験値との比較を示す。さらに、コンクリートの全断面を有効とした等方性板および引張側コンクリートを無視した直交異方性板として求めたたわみ量を付記した。ひびわれ発生後の断面2次モーメントについてはBransonの4乗式を用い、補強床版については増厚部分を床版の一部に換算して計算した。N-1、PCともに計算値とほぼ一致したが、FRPにおいては実験値が計算値を上回る結果となった。補強供試体FRPのたわみ量の計算値が実験値と一致しなかったのは、床版を梁に近似したた

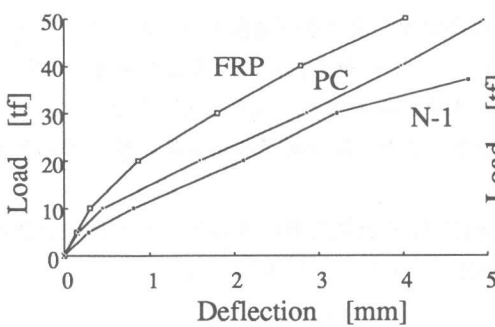


図-9 荷重と床版中央のたわみ量の関係

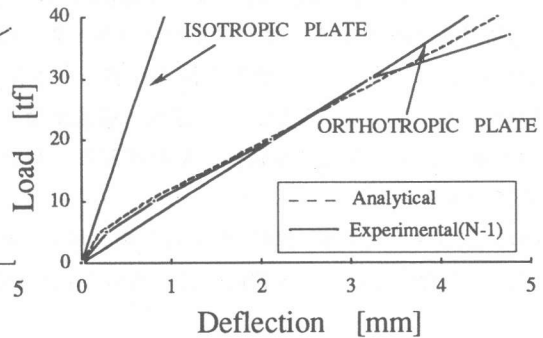


図-10 計算値と実験値の比較  
(たわみ量：N-1)

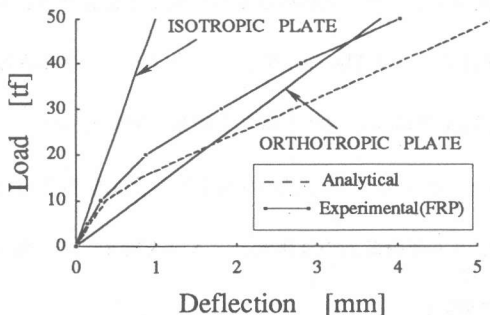


図-11 計算値と実験値の比較  
(たわみ量：FRP)

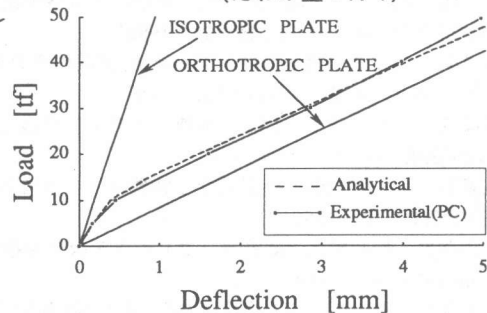


図-12 計算値と実験値の比較  
(たわみ量：PC)

めに格子状であるCFRPの剛性を面として十分評価できなかつたためと考えられる。

松井らは、RC床版の劣化度 $D_{\delta}$ をたわみ量を用いて次式で表した[8]。

$$D_{\delta} = \frac{W - W_0}{W_C - W_0} \quad (1)$$

ここで、 $W$ ：活荷重たわみ量の実測値、 $W_0$ ：コンクリートの全断面を有効と仮定した等方性板の理論たわみ、 $W_C$ ：引張側コンクリートを無視の状態で直交異方性を考慮した理論たわみ

式(1)の $W_0$ 、 $W_C$ をそれぞれ等方性板、直交異方性板として計算し、荷重と本実験のRC床版供試体の劣化度 $D_{\delta}$ の関係を表したものが図-13である。無補強供試体N-1では、劣化度が $D_{\delta}=1.14$ の時点で破壊を生じており、静的荷重を行った本実験においても $D_{\delta} \cong 1.0$ を使用限界と定義した松井らの指摘と符合した。また、補強供試体においても、FRPで $D_{\delta}=1.09$ 、PCでは $D_{\delta}=0.80$ と劣化度が1.0に近い時点で破壊を生じる結果となった。

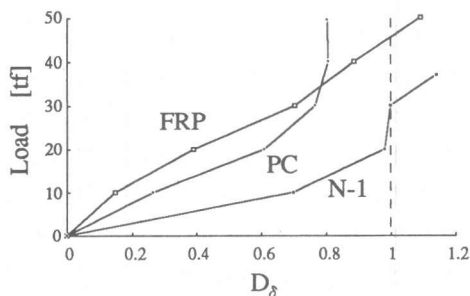


図-13 荷重と床版の劣化度の関係

#### 4. まとめ

下面増厚補強したRC床版の静的荷重試験の結果をまとめると以下の通りである。

- (1)補強筋とPPモルタルで作成したプレキャスト板を床版下面に増厚補強することにより、破壊耐力が向上し、さらに、主鉄筋や配力鉄筋の応力およびたわみ量を低減させることが可能である。
- (2)プレキャスト板を用いた本工法は、破壊に至るまで床版本体とプレキャスト板との間に剥離を生じることなく有効に補強効果をあげることができ、また、増厚補強後の床版損傷状態の確認も可能である。
- (3)押抜きせん断耐力算定式や有効幅を用いたRC床版の近似計算によって、増厚補強床版の押抜きせん断耐力および主鉄筋応力、たわみ量をを算定することができる。

#### [参考文献]

- [1]例えば、阪神道路公団、阪神高速道路管理技術センター：道路橋RC床版のひびわれ損傷と耐久性、1991
- [2]岡田清・岡村宏一・園田恵一郎・島田功：道路橋鉄筋コンクリート床版のひびわれ損傷と疲労性状、土木学会論文報告集NO.321、pp.49～61、1982
- [3]松井繁之：移動荷重を受ける道路橋RC床版の疲労強度と水の影響について、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.9、No.2、pp.627～632、1987
- [4]佐藤貢一・小玉克巳：FRPと各種モルタルで補強したRC梁の曲げ性状に関する研究、第46回セメント技術大会講演集、pp.808～813、1992
- [5]佐藤貢一・大木浩靖・小玉克巳：特殊ポリマーモルタルを使用したRC梁の補強工法、土木学会第44回年次学術講演概要集、1989
- [6]前田幸男・松井繁之：鉄筋コンクリート床版の押抜きせん断耐力の評価式、土木学会論文 集、第348/V-1、pp.133～141、1984
- [7]土木学会：コンクリート標準示方書・設計編[平成3年度版]
- [8]松井繁之・前田幸男：道路橋RC床版の劣化度判定法の一提案、土木学会論文集、第374号/I-6、pp.419～426、1985