

## 論文 格子状ひび割れを有する RC 床版の押抜きせん断耐荷力

東山 浩士<sup>\*1</sup>・小田 憲司<sup>\*2</sup>・松井 繁之<sup>\*3</sup>

要旨：道路橋 RC 床版の維持管理では，主に，床版下面のひび割れ発生パターンやひび割れ密度を調査することによって対象床版の劣化度判定が行われる。調査判定後の耐荷力，余寿命を評価するとともに，補修・補強の要否，耐荷力・耐久性不足に対する補強方法の選択を合理的に行う必要がある。本研究では，予め RC 床版に格子状ひび割れを形成することによって劣化損傷を受けた RC 床版を模擬し，押抜きせん断耐荷力の低下や破壊性状について検討した。

キーワード：RC 床版，格子状ひび割れ，押抜きせん断耐荷力，劣化損傷

## 1. はじめに

コンクリート構造物の維持管理の重要性が増すとともに劣化度を判定する種々の調査方法が検討されている。自動車荷重が繰返し載荷される道路橋 RC 床版の劣化度判定は，ひび割れ発生パターン，ひび割れ幅，ひび割れ間隔，ひび割れ密度，たわみなどの指標によって行われることが多い<sup>1)</sup>。調査点検時には，この他に遊離石灰，剥離，鉄筋の腐食などの有無も同時に調査される。また，コンクリート標準示方書[維持管理編]<sup>2)</sup>では，RC 床版の疲労による劣化過程が定義され，それぞれの劣化過程において，外観上のグレードに応じた標準的な補修・補強工法が示されている。しかし，調査点検の結果，補強が必要であると判断された対象床版の耐荷力，余寿命を評価し，それに対する補強方法とその効果を合理的に評価できる補強設計手法の確立が望まれる。

既往の研究では，貫通ひび割れを有する RC 床版の押抜きせん断耐荷力<sup>3)</sup>，疲労荷重を受けた後の押抜きせん断耐荷力<sup>4), 5)</sup>について，耐荷力低下や破壊性状が検討されている。これらの研究では，RC 床版の劣化損傷がかなり進行した状態における耐荷力低下の比較がなされて

いる。

本論文では，RC 床版に貫通ひび割れが形成される以前，すなわち，コンクリート標準示方書[維持管理編]<sup>2)</sup>に示されている進展期から加速期の段階に着目し，予め RC 床版に格子状ひび割れを導入した試験体を製作した。格子状ひび割れの深さや間隔を変化させることによって劣化損傷を受けた RC 床版の押抜きせん断耐荷力，破壊性状，変形性状を検討した。ただし，ひび割れ部における骨材のかみ合い効果は複雑であり，本実験では，人工ひび割れを導入していることからこれを考慮しないことにした。

## 2. 実験概要

## 2.1 試験体と使用材料

試験体は図 - 1 に示す辺長 1200mm，床版厚 150mm の RC 床版である。主鉄筋，配力鉄筋とも D13(SD295A,  $f_y=344\text{N/mm}^2$ ,  $E_s=180\text{kN/mm}^2$ ) を使用した。格子状ひび割れ(以下，人工ひび割れと呼ぶ)は厚さ 0.25mm のステンレス板を，写真 - 1 に示すように，格子状に配置した。試験体の種類は，表 - 1 に示すように，人工ひび割れ間隔を 240mm と 100mm，ひび割れ深さを 40mm，70mm，100mm とした。また，人工ひび

\*1 近畿大学講師 理工学部社会環境工学科 博(工)(正会員)

\*2 近畿大学大学院 総合理工学研究科環境系工学専攻

\*3 大阪大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻 工博(正会員)

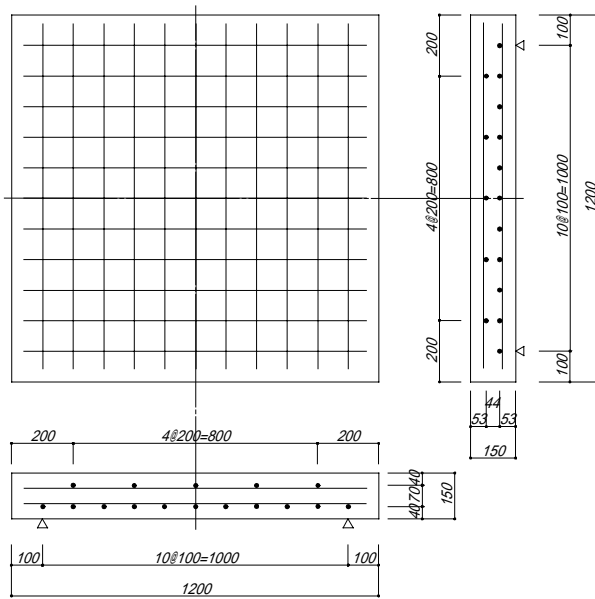


図 - 1 試験体



写真 - 1 ステンレス板配置

割れを有する試験体と比較するために、人工ひび割れの無い試験体も製作した。各シリーズのコンクリートの材料試験結果を表 - 2 に示す。

## 2.2 実験方法

試験体は支間長 1000mm、4 辺単純支持の状態、荷重は床版中央に 100mm × 100mm の載荷板を介して載荷した。載荷は 10kN ごとに除荷および再載荷繰返し、最終破壊まで行った。

## 3. 実験結果

### 3.1 押抜きせん断耐荷力

押抜きせん断耐荷力の実験値と計算値を表 - 3 に示す。計算値は図 - 2 および次式に示す松井式<sup>6)</sup>により求めた結果である。

表 - 1 試験体の種類

シリーズ	試験体	ひび割れ間隔 (mm)	ひび割れ深さ (mm)
C24	C24-0	0	0
	C24-4	240	40
	C24-7	240	70
	C24-10	240	100
C10	C10-0	0	0
	C10-4	100	40
	C10-7	100	70
	C10-10	100	100

表 - 2 材料試験結果

シリーズ	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
C24	24.1	27.4
C10	26.4	27.0

表 - 3 押抜きせん断耐荷力

試験体	P <sub>exp</sub> (kN)	P <sub>cal</sub> (kN)	P <sub>exp</sub> /P <sub>cal</sub>
C24-0	250	274	0.912
C24-4	271		0.989
C24-7	251		0.916
C24-10	173		0.631
C10-0	290	292	0.993
C10-4	249		0.853
C10-7	224		0.767
C10-10	186		0.637

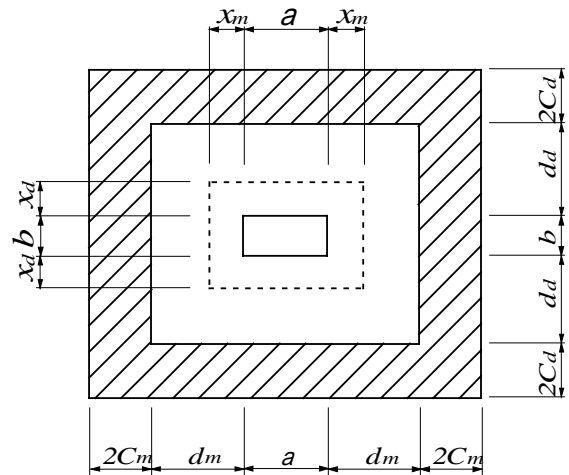


図 - 2 押抜きせん断破壊モデル

$$P = f_{cv} \{ 2(a + 2x_m)x_d + 2(b + 2x_d)x_m \} + f_t \{ 2(a + 2d_m)C_d + 2(b + 2d_d + 4C_d)C_m \} \quad (1)$$

$$f_{cv} = 0.656 f_c^{0.606} \quad (2)$$

$$f_t = 0.269 f_c^{0.667} \quad (3)$$

ここに、

$a, b$  : 載荷板の主鉄筋、配力鉄筋方向の辺長  
 $x_m, x_d$  : 主鉄筋、配力鉄筋に直角な断面の引張側コンクリートを無視した時の中立

### 軸深さ

$d_m, d_d$  : 引張側主鉄筋, 配力鉄筋の有効高さ  
 $C_m, C_d$  : 引張側主鉄筋, 配力鉄筋のかぶり深さ  
 $f_{cv}$  : コンクリートのせん断強度  
 $f_t$  : コンクリートの引張強度

人工ひび割れの無い試験体 C10-0 の計算値は実験値とよく一致しているが, C24-0 の計算値は実験値より大きい結果となった。これは押抜きせん断破壊状態の観察から, 押し抜けが床版全面に生じておらず, 偏りが見られたため, 載荷荷重の偏心が原因であったと判断される。そこで, C24 シリーズについては, C24-0 の計算値を基準に押抜きせん断耐荷力の低下を検討することにした。

図 - 3 には, 人工ひび割れの無い試験体の押抜きせん断耐荷力を基準とした耐荷力比と人工ひび割れ深さの関係を示す。人工ひび割れ深さが大きくなると, 押抜きせん断耐荷力は低下する傾向にあることが分かる。人工ひび割れ間隔が 240mm の C24 シリーズは非線形的に低下し, 人工ひび割れ間隔が 100mm の C10 シリーズは線形的に低下している。人工ひび割れ深さが 100mm の場合, 両シリーズとも同じ耐荷力比まで低下した。

### 3.2 荷重 - 変位関係

荷重 - 変位関係を図 - 4 に示す。初期剛性は人工ひび割れ深さに伴って低下しているが, 両シリーズとも人工ひび割れ深さが 40mm, 70mm の試験体は, 人工ひび割れの無い試験体の変形挙動に漸近していく傾向にあり, 破壊に至るまでほぼ同じ挙動を示す。人工ひび割れ深さが 100mm の試験体も漸近する傾向にはあるが, その前に破壊に至っている。

### 3.3 ひび割れ状態

実験終了後に床版下面のひび割れ状態を観察したところ, C24 シリーズでは, 図 - 5 に示すように, 人工ひび割れの他にも放射状に伸びた副次ひび割れが発生していた。一方, C10 シリーズでは, 格子状ひび割れのみであった。人工ひび割れ間隔の大きさによって人工ひび割

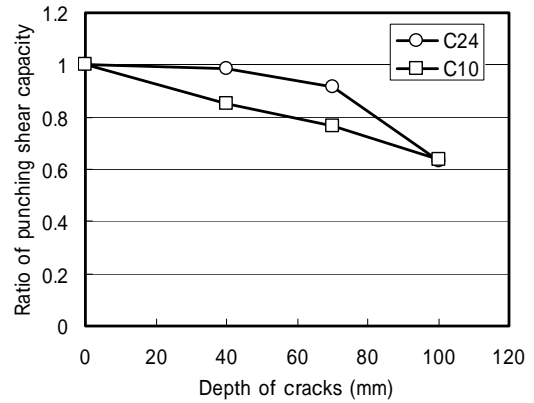
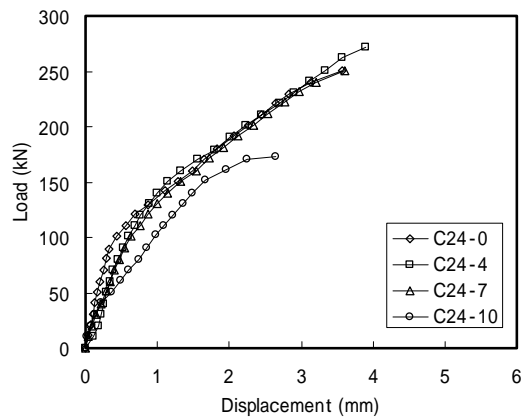
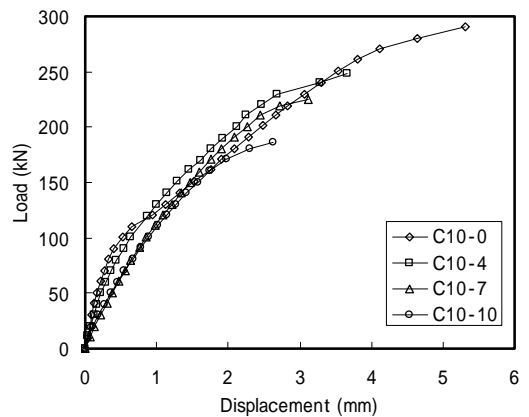


図 - 3 押抜きせん断耐荷力比



(a) C24 シリーズ



(b) C10 シリーズ

図 - 4 荷重 - 変位関係

れ間にも曲げやねじりによる新たなひび割れがテンションスティフニング効果により発生したと考えられる。また, 図 - 3 に示した耐荷力の低下傾向の違いは, 副次ひび割れの発生による可能性が考えられる。

次に, 押抜きせん断ひび割れを調べるため,

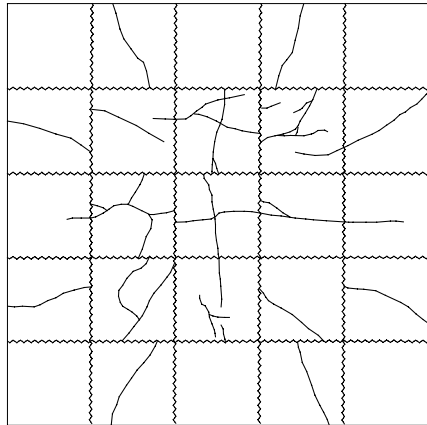


図 - 5 床版下面のひび割れ状態 (C24-7)

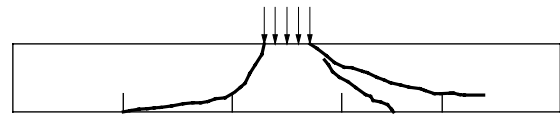
表 - 4 押抜きせん断耐荷力

試験体	$P_{exp}$ (kN)	$P_{cal}$ (kN)	$P_{exp}/P_{cal}$
C24-4	271	274	0.989
C24-7	251	274	0.916
C24-10	173	245	0.706
C10-4	249	292	0.853
C10-7	224	284	0.789
C10-10	186	284	0.655

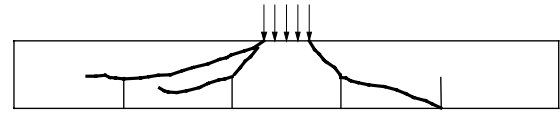
主鉄筋に直角な断面のひび割れ状態を図 - 6 に示す。全ての試験体において、載荷板端から  $45^\circ$  ,あるいは、それより小さい角度のせん断ひび割れが発生している。人工ひび割れ深さが 40mm の試験体では、かぶり深さと人工ひび割れ深さがほぼ一致していることから、ダウエル力による引張鉄筋に沿ったかぶりコンクリートの剥離がステンレス板の先端部に沿って発生している。人工ひび割れが深い試験体では、載荷板端からのせん断ひび割れの進展が人工ひび割れによって妨げられるとともに、人工ひび割れに囲まれたある領域のコンクリートが陥没することによって、人工ひび割れ位置でせん断ひび割れとダウエル力によるひび割れとが不連続になる。床版に貫通ひび割れを導入した仲山ら<sup>3)</sup>の押抜きせん断実験においても同様なひび割れが発生している。

#### 4. 押抜きせん断耐荷力算定方法の検討

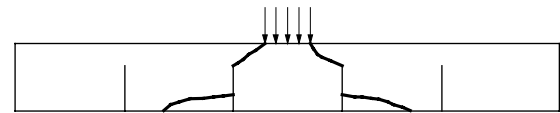
仲山ら<sup>3)</sup>の研究においては、載荷板から貫通ひび割れの距離に応じて、せん断抵抗領域の低減を行っており、式(1)の第2項目に示すダウエ



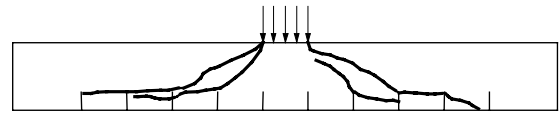
(a) C24-4



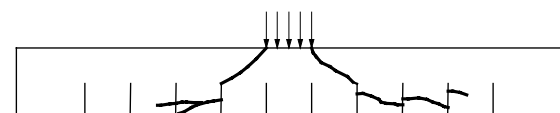
(b) C24-7



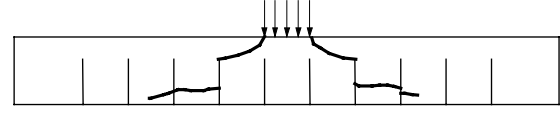
(c) C24-10



(d) C10-4



(e) C10-7



(f) C10-10

図 - 6 切断面のひび割れ状態

ル抵抗領域の低減は行われていない。貫通ひび割れ形成以前の劣化状態に着目した本実験では、人工ひび割れ深さに応じた押抜きせん断耐荷力の低下が確認されたことから、ダウエル抵抗領域について以下のように検討する。

#### 4.1 ダウエル抵抗領域

いずれの試験体においても、人工ひび割れ深さは引張側コンクリートを無視した時の中立軸位置まで達していない。また、切断面のひび割れ状態を観察しても、圧縮側コンクリートのせん断抵抗領域は人工ひび割れの影響を受けていたとは考えにくい。ただし、人工ひび割れ深さが増すに従って、載荷板端からのせん断ひび割れが人工ひび割れと連結する可能性が高く

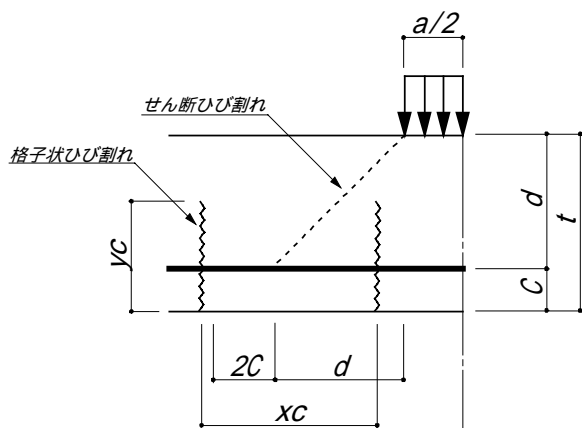


図 - 7 人工ひび割れとダウエル抵抗領域

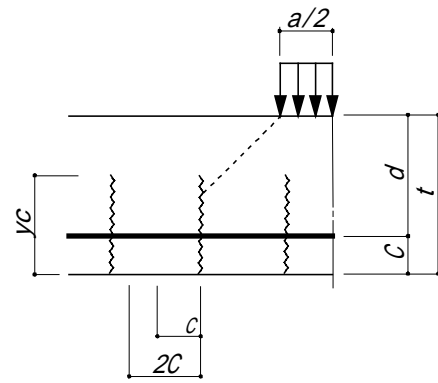
なる。このような場合には、ダウエル抵抗領域が狭くなり、押抜きせん断耐荷力が低下すると考えられる。

そこで、松井式<sup>6)</sup>を適用して、載荷板端からのせん断ひび割れが  $45^\circ$  で進展すると仮定し、せん断ひび割れと人工ひび割れとの連結の有無を判定することによってダウエル抵抗領域の面積を求め、押抜きせん断耐荷力を算定することにした。その結果を表 - 4 に示す。表 - 3 に示した結果と比較して、算定精度はほとんど改善できていないことが分かる。

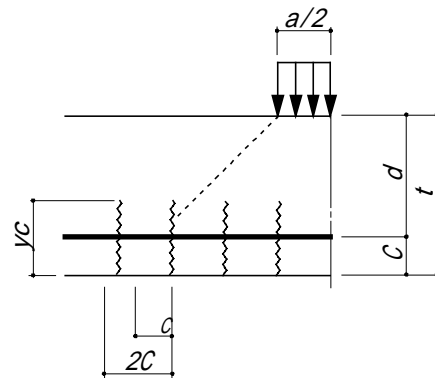
#### 4.2 ダウエル抵抗領域の低減係数

人工ひび割れの無い RC 床版の押抜きせん断破壊は、せん断ひび割れが引張鉄筋位置まで進展するとともに、ダウエル力による引張鉄筋に沿ったひび割れが発生する。一般に、ダウエル効果に及ぼす引張応力分布は、かぶりコンクリートの 2 倍程度の範囲である<sup>7)</sup>と考えられている。しかし、人工ひび割れを有する RC 床版では、図 - 6 (c), (f) のように、せん断ひび割れの進展が人工ひび割れ深さの程度によって妨げられ、ダウエル抵抗領域が狭くなることに加え、床版の破壊形式ごとに、ダウエル効果に及ぼす応力分布範囲の低下が生じていると考え、破壊形式ごとの押抜きせん断耐荷力の低下を実験値から検討することにした。

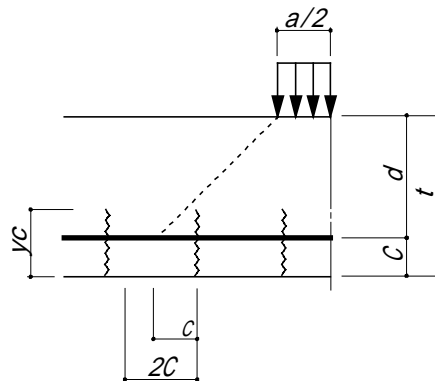
図 - 7 に示すように、格子状ひび割れが発生している状態を考え、載荷板端から  $45^\circ$  で有効



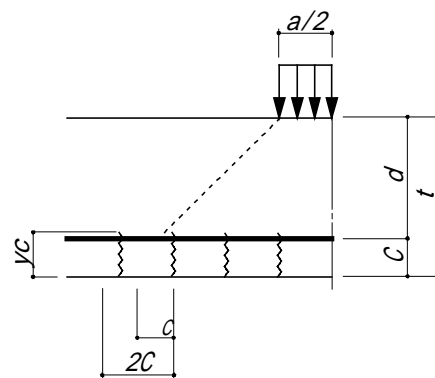
(a) Case 1



(b) Case 2



(c) Case 3



(d) Case 4

図 - 8 ひび割れ状態

高さの範囲に進展したせん断ひび割れが格子状ひび割れと連結するかどうかを判断する。

表 - 5 押抜きせん断耐荷力の再計算

試験体	$P_{exp}$ (kN)	$P_{cal}$ (kN)	$P_{exp}/P_{cal}$
C24-4	271	274	0.989
C24-7	251	274	0.916
C24-10	173	185	0.935
C10-4	249	261	0.954
C10-7	224	200	1.120
C10-10	186	200	0.930

せん断ひび割れが格子状ひび割れと連結する場合には、かぶり深さと人工ひび割れ間隔との関係から、ダウエル抵抗領域の低減係数を以下のように仮定する。

Case 1：ひび割れ間隔がかぶり深さの2倍より大きいとき、 $\beta = 1.25$  (図 - 8 (a)参照)

Case 2：ひび割れ間隔がかぶり深さの2倍より小さいとき、 $\beta = 1.0$  (図 - 8 (b)参照)

せん断ひび割れが人工ひび割れと連結しない場合も同様にして、ダウエル抵抗領域の低減係数を以下のように仮定する。

Case 3：ひび割れ間隔がかぶり深さの2倍より大きいとき、 $\beta = 2.0$  (図 - 8 (c)参照)

Case 4：ひび割れ間隔がかぶり深さの2倍より小さいとき、 $\beta = 1.5$  (図 - 8 (d)参照)

以上の判定を主鉄筋断面、配力鉄筋断面ともに行い、式(1)を式(4)のようにダウエル抵抗領域を修正できる形に表すことできる。同時に、Case 1 および Case 2 の場合には、せん断ひび割れの進展が格子状ひび割れによって妨げられるため、その場合には、式(4)中の有効高さを表す  $d_m$ 、 $d_d$  も修正する必要がある。

$$P = f_{cv} \{ 2(a + 2x_m)x_d + 2(b + 2x_d)x_m \} + f_t \{ \alpha(a + 2d_m)C_d + \alpha(b + 2d_d + 2\alpha C_d)C_m \} \quad (4)$$

各試験体に対して、上記の判定を行い、押抜きせん断耐荷力を再度計算・比較した結果を表 - 5 に示す。計算値は実験値に近づいたが、以前、変動が大きいことから、今後、実験データの蓄積とともに、さらなる検討を要する。

## 5. まとめ

格子状ひび割れを有する RC 床版の押抜きせん断実験より得られた知見をまとめると以下

の通りである。

- (1) 人工ひび割れ深さおよび間隔によって押抜きせん断耐荷力は低下することが確認され、その低下傾向は人工ひび割れ間隔によって異なる結果となった。
- (2) 押抜きせん断耐荷力算定において、載荷板端からのせん断ひび割れと人工ひび割れとの関係から、ダウエル抵抗領域の低減を行うことによって計算値は実験値に近づく結果となったが、試験体数が少ないこと、計算結果に変動が大きいことから、今後もデータの蓄積が必要である。
- (3) RC 床版の維持管理へ適用するためには、ひび割れ間隔と深さとの関連を検討する必要があり、ひび割れ深さの推定が大きな課題となる。

## 参考文献

- 1) 例えば、松井繁之、前田幸雄：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、1986。
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書[維持管理編]、2001。
- 3) 仲山元章、桧貝 勇、中村 光、飯束義夫：貫通ひび割れを有する鉄筋コンクリートの床版の押し抜きせん断耐荷力、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.16、No.2、pp.425-430、1994。
- 4) 関口幹夫、穴戸 薫、森 俊介：高井戸陸橋 RC 床版の残存疲労耐久性の評価、第三回道路橋床版シンポジウム講演論文集、pp.187-192、2003。
- 5) 阿部 忠、木田哲量、高野真希子、澤野利章、加藤清志：静荷重・走行荷重を受ける RC 床版の押し抜きせん断耐力、構造工学論文集、Vol.50A、pp.919-927、2004。
- 6) 前田幸雄、松井繁之：鉄筋コンクリート床版の押し抜きせん断耐荷力の評価式、土木学会論文、第 348 号/V-1、pp.133-141、1984。
- 7) Swamy, R. N. and Bahia, H. M.: Influence of Fiber Reinforcement on the Dowel Resistance to Shear, ACI Journal, Vol.76, No.2, pp.327-355, 1979。