

# 鉄筋コンクリート床版の乾燥収縮ひびわれに関する研究

## STUDY OF SHRINKAGE CRACKS IN REINFORCED CONCRETE DECK SLABS OF BRIDGES

今井宏典\*・岡田 清\*\*・児島孝之\*\*\*・水元義久\*\*\*\*  
By Hirosuke IMAI, Kiyoshi OKADA, Takayuki KOJIMA  
and Yoshihisa MIZUMOTO

### 1. ま え が き

道路橋鉄筋コンクリート床版（以下 RC 床版）の損傷が問題にされ始めて久しいところであるが、鋼桁などにおける RC 床版の初期欠陥をもたらす原因の1つとしてコンクリートの乾燥収縮の影響が挙げられる。

しかしながら、コンクリートの乾燥収縮に関する既存データは数多いが、これらの多くは実験室内で得られたもので現場でのデータは比較的少ない。橋梁上の RC 床版のような実構造物では、コンクリートの乾燥収縮は部材の形状・寸法や暴露条件・気象条件などの多くの影響を受け、さらにコンクリートの使用材料や配合条件により異なった性状を示すために現場と実験室内とにおけるこの種の現象を明確に関連づけることは困難な場合が多

道路橋 RC 床版は他の鉄筋コンクリート構造と異なり活荷重が直接作用し、しかも活荷重の占める割合が高い移動繰り返し荷重を受ける。そして、この活荷重の大きさと頻度は設計荷重を超えることが多い。しかも、版構造であり、施工の影響も受け多くの床版が補修・補強をしいられてきた。特に、都市高速道路においては路下が街路や公園などの他の都市施設と共存することが多く、RC 床版の損傷によるかぶり部のコンクリート片の落下は、路下における2次の災害に直結する可能性が高く問題視されてきた。

このような背景には、交通量の増大や過積載車両の通行など交通荷重条件の加速的増加と累加に伴う疲労問題が挙げられ、表-1のような示方書などの変遷とともに多くの実験的研究が行われてきた<sup>1)</sup>。

表-1 鉄筋コンクリート床版設計にかかわる示方書などの変遷（道路橋）

発行または通達 年 月 日	規定の名称	主 要 規 定 の 内 容					最小床版厚 (cm)
		一 等 橋 の 輪 荷 重 (P) (kg)	連 続 版 で 車 両 進 行 方 向 に 直 角 の 場 合 の 曲 げ モ ー メ ン ト 主 筋 方 向 (kg・m)	配 力 筋 方 向 (kg・m)	鉄 筋 の 許 容 応 力 度 (kg/cm <sup>2</sup> )	配 力 鉄 筋 の 量	
昭和31年5月	鋼道路橋設計示方書	8000	2<l≤4m l:床版支間長 ± $\frac{0.4P(l-1)}{l+0.4}$	規定なし	1200	規定なし	11 <最小有効厚さ>
昭和39年	鋼道路橋設計示方書				SSD 49	主筋の25%以上	14
昭和42年9月9日	配力鉄筋量に関する 局長通達				SD 30 1800		
昭和43年6月	床版の設計に関する 暫定基準(案)	SD 30	3l+9≥16				
昭和46年3月18日	鉄筋コンクリート床版の設計局長通達	8000	0.8(0.12l +0.07)P	0.8(0.10l +0.04)P	1400	0.10l+0.04 0.12l+0.07	3l+11≥16
昭和48年2月	道路橋示方書	ただし、大型車が1方向1000台/日以上では9600			SD 30 1400で200kg/cm <sup>2</sup> 程度余裕をもたせる		
昭和53年4月13日	設計・施工についての企画課長通達	9600			上記にk <sub>1</sub> , k <sub>2</sub> を乗する*		

\* k<sub>1</sub>, k<sub>2</sub>: 交通量, 補修の難易, 合成および桁剛性を考慮した係数

\* 正会員 工修 (財) 阪神高速道路管理技術センター理事  
\*\*\* 正会員 工博 立命館大学助教授 理工学部

\*\* 正会員 工博 京都大学教授 工学部  
\*\*\*\* 正会員 阪神高速道路公団工務部調査役

従来の研究による RC 床版の損傷防止は主として、作用外力と断面性能との応答関係より評価が重ねられてきたところであるが、本研究では RC 床版の損傷原因をコンクリート材料特性面に着目して検討した。すなわち、RC 床版損傷の大きな影響因子として、作用外力や断面性能のほかに材料特性と環境条件が重要な因子として挙げられる。たとえば、骨材事情の悪化やポンプ施工に伴うコンクリート中のモルタル量増加の問題が挙げられ、このモルタル量の増加はコンクリートの乾燥収縮現象を増長し、最近の鋼桁と鉄筋などの軸方向および曲げ剛性の上昇傾向と相まって床版におけるコンクリートの乾燥収縮ひずみの拘束引張応力を増大させ、初期ひびわれの発生を増加させている傾向がある。

これらの結果によりもたらされる RC 床版の初期欠陥は、床版の活荷重に対する剛性や有効幅の低下をもたらせて RC 床版の疲労特性・耐久性に悪影響を及ぼすものと考えられる。

本論文では、RC 床版におけるコンクリートの乾燥収縮による初期欠陥に着目し、実橋の RC 床版試験施工によるひびわれの観察と実験室における収縮特性の把握を行い、初期欠陥の解析法の検討ならびに材料面での改善策の諸検討を実施したものを報告する。

## 2. 実橋床版のひびわれ調査

鉄筋コンクリート構造物では、ある程度のひびわれ発生は当然として看過されてきた。また、一般的に乾燥収縮ひびわれの発生程度は問題視するほどに至らない場合が多いと考えられるが、施工条件・環境条件（湿度、温度、風）・材料条件・構造条件などの悪条件が重なることにより顕著に現われることもある。このような諸条件が厳しいと考えられる RC 床版において、初期ひびわれがその耐久性に関与すると仮定すれば、まずその実態把握が重要となる。

このような認識のもとに 3 径間連続非合成の鋼桁 2 橋について試験床版を施工し、コンクリート打設直後より数年間にわたり床版下面のひびわれの詳細調査を実施してきた。調査対象とした橋梁上部工の例を図-1 に示す。

本橋について、ひびわれ幅とその状況、超音波伝播速度、シュミットハンマー試験や温度変化による伸縮量などに関する調査を実施した<sup>2)</sup>。

そして、本橋床版のひびわれ状況の経時変化を活荷重載荷前の約 3 年間について、その変化を目視可能な 0.05 mm 未満のひびわれも対象として現地調査を行い初期欠陥に関する興味あるデータを得た。

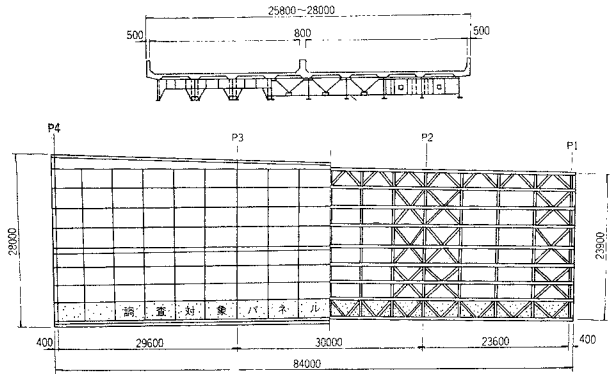


図-1 ひびわれ調査橋梁の一般図

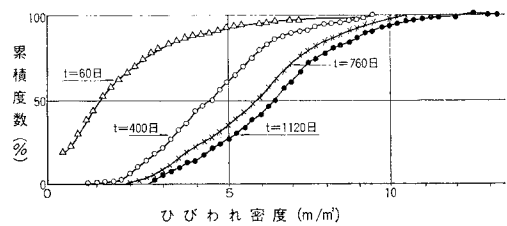


図-2 供用前のひびわれ密度の経時変化実測例

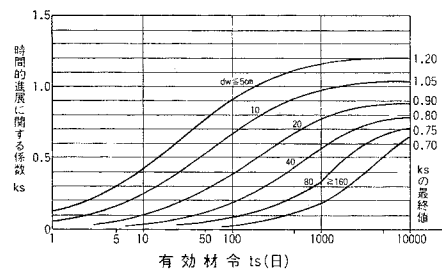


図-3 乾燥収縮度とコンクリートの有効材令

ひびわれ密度の経時変化の一例を、文献<sup>3)</sup>に示す格子密度法によりデータ処理したものを図-2 に示す。このようなひびわれ調査により確認した事項は下記のとおりである。

① 経年変化に伴うひびわれ密度累積度数分布は図-2 に示すように、計測時のコンクリート材令は約 60, 400, 760, 1120 日であり、活荷重載荷以前にもかかわらず 2~3 年を経過してもひびわれが生長している。

② コンクリートの乾燥収縮の時間経緯は DIN 4227 やわが国の各種示方書<sup>4)</sup>に用いられている図-3 に示す Rüschi 式<sup>5)</sup>により得られる。実橋における図-2 に示すひびわれ密度の増加傾向は、Rüschi 式の有効厚さ ( $d_w$ ) を 20 cm とした場合の時間的収束におおむね近似される。図-3 における乾燥収縮度の基本値に対する比率 ( $k_s$ ) と最終値 ( $k_{s\infty}$ ) との関係が示される Rüschi 式では  $k_s/k_{s\infty}$  について材令 50, 200, 500, 1000 日のおの

おのにおいて、30, 54, 73, 86% の乾燥収縮の進行度が得られるが、実橋のひびわれ密度の変化もこのような傾向を示している。

④ ひびわれパターンは明確に桁拘束の影響を受けて橋軸直角方向のひびわれが発達している。そして、橋梁の端部では横桁の拘束効果が影響し、45° 方向に 0.2 mm を超えるひびわれも確認された。

このように実橋床版の一部においては、明らかにコンクリートの乾燥収縮によるひびわれが表面化しており、状況により補修・補強工事に結びつく場合も多い。このようなひびわれの評価判定を合理化し、適切な補修を行うためには、これらの成因と機構とを的確に把握しておくことが望ましい。

### 3. 乾燥収縮応力の解析<sup>9)</sup>

#### (1) コンクリートの乾燥収縮とクリープ

実橋におけるこのような現象を解析的に予測・評価することは予防措置を講ずるうえからも重要である。一方、コンクリートの乾燥収縮およびクリープは材料、配合、部材寸法、環境条件などの多くの因子に影響され、これらの因子をすべて解析に含めることは非常に複雑な計算を要する問題があり、また現在では個々のデータ不足が挙げられる。そこで、本研究では問題をより簡単にするために以下の仮定と条件を設けて解析し、実橋におけるひびわれ状況との対比を行った。そして、同じ解析手法を用いて室内における模型桁の乾燥収縮とクリープに伴う挙動を実験することにより、諸定数の把握と解析手法の確認を行うこととした。

① コンクリートの乾燥収縮度とクリープの時間的進行は、解析による実橋床版の評価についてはひびわれ調査にて相関性の認められた Rüschi 式を用いる。

② 材料、配合および乾燥条件の影響は、基本乾燥収縮ひずみおよび基本クリープ係数の値により考慮できるものと仮定する。

③ 部材寸法の影響は Rüschi 式により考慮に入れる。

ある条件下におけるコンクリートの乾燥収縮およびクリープの時間的進行については、多くの実験式が提案されており、乾燥収縮に対しては線形あるいは非線形の拡散方程式でその機構を近似し、部材寸法の影響を解析する試みもなされている<sup>7)</sup>。乾燥収縮によるコンクリート部材断面内部の拘束応力度などを考察するためにはこのような解析が有効な手段となるものと考えられるが、本研究の対象としている RC 床版のように比較的薄い部材が鋼桁や床版内部の鉄筋に拘束されている場合には、Rüschi 式を用いて上記のように仮定しうるものとした。

#### (2) 段階的積分法による乾燥収縮拘束応力解析

簡単な構造系における乾燥収縮拘束応力の解析は、近似的にクリープと乾燥収縮が相似して進行すると仮定できる場合には Dischinger の方法等<sup>9)</sup>により求められるが、乾燥収縮特性および遅れ弾性変形を考慮したクリープ特性を用いる場合にはこの方法では正確な解は得られない。

このような場合には乾燥収縮とクリープが進行する時間を適当な間隔で分割し、クリープを生じさせる応力度は各時間間隔内で一定と仮定して、段階的に積分を実行することにより近似的ではあるが十分な精度で解析することができる。そこで、本研究では図-4 に示すようなフローチャートの段階的積分法による解析法を用いた。

#### (3) 構造解析

鋼桁上の RC 床版は、非合成桁として設計されたものでも多くの場合は合成桁としての挙動を示す。そこで、本解析では RC 床版はすべて合成桁として扱う。

合成桁の RC 床版の乾燥収縮は橋軸方向には主桁と床版内の配力鉄筋とにより拘束され、橋軸直角方向にはおもに横桁と床版内の主鉄筋の拘束を受ける。さらに連続

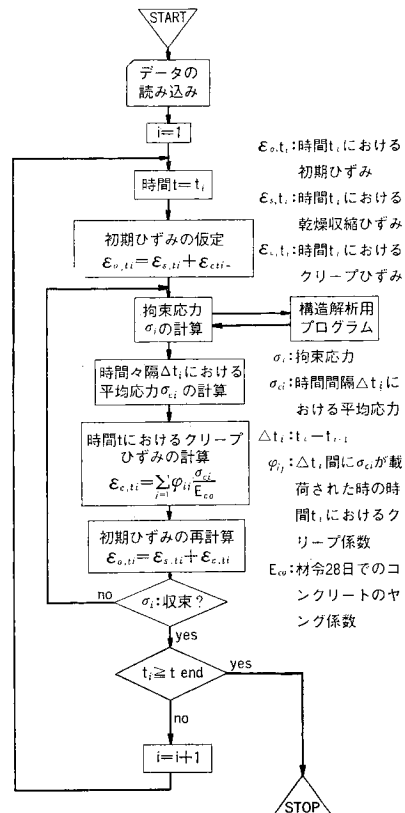


図-4 乾燥収縮による拘束応力解析フロー

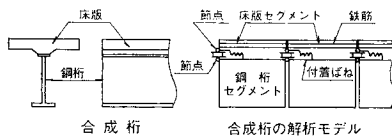


図-5 合成桁の解析モデル

桁のような不静定構造物では収縮による不静定力を生じ、収縮拘束応力のほかに、この不静定力による応力が加算される。

一般に床版に対する拘束は橋軸方向が大きく、一様な収縮により生ずる変形は隣接する桁の影響をほとんど受けないと考えられるので、本研究では1本の鋼桁とRC床版との合成断面よりなる桁として解析する方法を用いた。

また、解析に用いる乾燥収縮の値は各種示方書で示される設計用の値に対し、床版コンクリート表面に着目する場合には JIS A 1129 で得られる実験値を上限値として与えて検討することとした。

解析対象の橋梁は橋長 40 m の単純合成 I 桁ならびに図-1 に示した 3 径間連続桁である。前者の単純合成 I 桁の解析は 4. の模型桁による実験についても適用し、実験値との対比により手法の適合性確認を試みた。また、後者の解析は 30+30+30 m の等径間の連続桁として扱った。

解析のモデル化は図-5 であり、下記仮定を設けた。

- ① 床版・鋼桁および配力鉄筋は橋軸方向にある長さ(実橋解析では解析精度などを考慮して約 5 m)のセグメントに分割する。
- ② 相隣合う床版セグメントは両端の床版ハンチ部下面の節点のみによって連結される。
- ③ 相隣り合う鋼桁セグメントは両端の上フランジ上面の節点のみによって連結される。
- ④ 同じ位置にある床版と鋼桁セグメントの節点は鉛直方向の相対変位はなく、橋軸方向のずれに対しては付着ばねにより拘束されるものとするが、実際の解析ではほとんどずれが生じない程度のばね定数を与える。
- ⑤ 床版コンクリート、鉄筋、鋼桁および付着ばねはすべて線形弾性体であり、鉄筋セグメントは軸変形のみ抵抗し、床版および鋼桁セグメントにははり理論が適用できる。

このような仮定のもとに合成セグメントの剛性マトリックスを求め、一般のマトリックス変位法と同様な手段で解析を行った<sup>6)</sup>。図-6 に構造解析のフローチャートを示す。

解析における諸定数は以下のものを用いた。

まず、乾燥収縮ひずみと材令との関係は図-3 に示した Rüschi 式を用い、部材の有効厚さ ( $d_w$ ) は 20 cm と

し、基本乾燥収縮ひずみは  $-20, -40, -60$  および  $-80 \times 10^{-5}$  の場合について検討した。そして遅れ弾性クリープ係数 ( $\varphi_{00}$ ) は 0.4 とし、流動変形のクリープ係数の基本値 ( $\varphi_{f0}$ ) は 1.0, 2.0 および 3.0 の場合について解析した。

コンクリートの弾性係数は  $3.0 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$  ( $2.94 \times 10^4 \text{ MPa}$ ) と一定とし、乾燥の始まる材令は実橋床版での脱型時期と養生条件とも考慮し 7 日とした。床版および鋼桁の断面諸量ならびに配力鉄筋量は実橋の値を用いた。

なお、鉄筋の影響は鉄筋の剛性マトリックスの要素を対応する床版の剛性マトリックス要素に加えることにより考慮した。

#### (4) 解析結果および考察

本解析により得られた結果を以下に述べる。

まず、単純合成桁(橋長 40 m) スパン中央付近における床版下面の拘束応力度を表-2 に示す。

当然ながら、基本乾燥収縮ひずみと拘束応力度とは比例する。そして、基本流動係数を増加させると、クリープにより緩和される応力が大きくなり拘束応力は減少する。材令が大きいほどこの傾向は大きく、基本流動係数 1.0 の変化に対して材令 100 日で 7~8%、材令 1000 日では 9~11% 程度拘束応力は変化する。

また、床版内の橋軸方向鉄筋の拘束応力度に及ぼす影響は大きく、解析対象とした単純合成桁では、拘束応力はいずれの場合も鉄筋を考慮しない解析結果と比較して 40% 以上大きい値を示している。

次に、図-1 に示した 3 径間連続桁 (30+30+30 m) の中央径間中央の床版下面の拘束応力と材令との関係を図-7 に示す。そして、基本乾燥収縮ひずみを  $-80 \times 10^{-5}$  とした場合の収縮拘束応力の橋軸方向分布を図-8 に示す。図-8 には道路橋示方書鋼橋編で規定されている合成桁での温度差を床版側に  $-10^\circ\text{C}$  とした拘束応

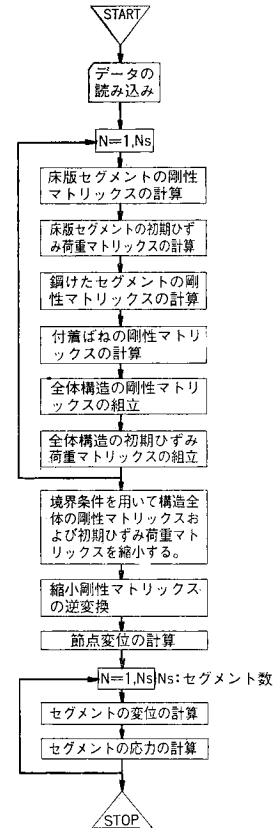


図-6 構造解析のフロー

実-2 拘束応力度の解析結果 (単純合成 I 桁) (単位: kg/cm<sup>2</sup>(×98 kPa))

基本乾燥収縮ひずみ (×10 <sup>-5</sup> )	基本流動係数	床版内の鉄筋を考慮しない場合			床版内の鉄筋を考慮する場合		
		材令 100 日	材令 1000 日	最大 値	材令 100 日	材令 1000 日	最大 値
-20	1.0	2.0	4.4	5.1	2.8	6.3	7.2
-40		4.0	8.9	10.2	5.6	12.5	14.3
-60		6.0	13.3	15.2	8.4	18.8	21.5
-80		8.0	17.8	20.3	11.2	25.0	28.6
-80	2.0	7.4	16.0	17.5	10.5	22.6	25.2
-80	3.0	6.9	14.7	16.0	9.9	20.8	22.7

力分布をあわせて示す。なお、温度変化の試算ではクリープは無視し、コンクリートの線膨張係数は  $1.0 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$  として計算した。

図-9 は同一乾燥収縮ひずみを与えた場合の鋼桁のたわみ変化を示す。

実橋床版の観察では、乾燥収縮ひびわれが表面化しはじめるのは、コンクリート打設後3か月程度の場合が多い。そこで、材令 100 日における拘束応力に着目すると、単純桁では表-2 に示すように  $-80 \times 10^{-5}$  の基本乾燥収縮ひずみに対し  $10 \text{ kg/cm}^2$  (0.98 MPa) 程度であるが連続桁では図-7 に示すように  $20 \text{ kg/cm}^2$  (1.96 MPa) 程度と約 2 倍の拘束応力を生じている。これは単純桁に比較し鋼桁の断面積、断面 2 次モーメントとも連続桁の方が小さいにもかかわらず、連続桁では収縮たわみが中間支点で拘束されるため、不静定モーメントの影響を生じているためである。この影響を調査するため図-8 に拘束応力の橋軸方向分布を示したが、本図のように拘束応力は台形分布をなし、中央径間でほぼ一定値で、中間支点から端支点にかけてほぼ直線分布となっている。

また、図-8 に示すように温度差による応力は  $-10^{\circ}\text{C}$  で約  $10 \text{ kg/cm}^2$  (0.98 MPa) 程度であり乾燥収縮拘束応

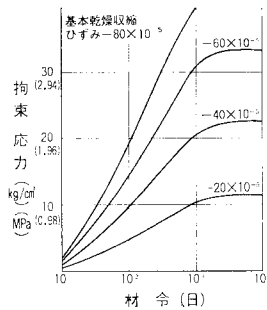


図-7 拘束応力と材令

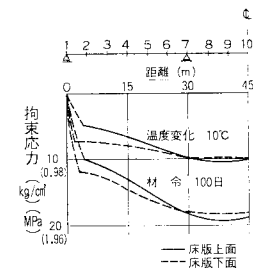


図-8 温度変化と収縮拘束の応力分布 (基本乾燥収縮ひずみ  $-80 \times 10^{-5}$ )

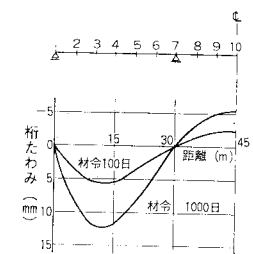


図-9 たわみ曲線 (基本乾燥収縮ひずみ  $-80 \times 10^{-5}$ )

力とを合わせると  $30 \text{ kg/cm}^2$  (2.94 MPa) 程度となり、特に中央径間付近においては床版にひびわれの発生する危険性が高いことが判明した。

なお、これらの解析は既応のデータを用いての計算であり、基本乾燥収縮ひずみやクリープ性状などの解析前提値がわが国における実情に合ったものであるか否かの課題が残されており、これらを以下で検討した。

#### 4. コンクリートの乾燥収縮実験

コンクリートの基礎的性状の1つである乾燥収縮を把握するため数多くの室内実験が実施されているが、多くは JIS A 1129 “モルタルおよびコンクリートの長さ変化試験方法” に準拠したものが多く、この試験方法はコンクリートの場合、 $10 \times 10 \times 40$  (または  $50$ ) cm の供試体を用いて実施するもので、簡便でありかつ関連データとの相対比較も容易であるため、数多くの試験結果が蓄積されている。

この試験方法によるコンクリートの乾燥収縮ひずみは乾燥条件にもよるが、最近のコンクリートの配合では相対湿度 60% の条件で  $-100 \times 10^{-5}$  前後の乾燥収縮ひずみの値を示している<sup>9)</sup>。一方、各種示方書では乾燥収縮ひずみに対し、クリープならびに鉄筋などの影響を配慮し  $-15 \sim -20 \times 10^{-5}$  の値を設計上用いることとなっている。しかしながら、RC 床版の初期欠陥評価では 3. で示したようにこれらの影響を分離して検討する必要がある。

一方、JIS A 1129 で得られる小型供試体での乾燥収縮性状を実構造物へ関連づけるためには、解析手法の検証とともに寸法効果の影響も把握しておく必要があり、以下の実験を行った。

なお、本実験ではこのようなコンクリートの乾燥収縮に伴う RC 床版の初期欠陥を材料面で改善するには、どのような配合あるいは材料を選定すべきかを評価できるような意図をもち各種コンクリートについて実施した。

##### (1) 骨材と寸法効果の影響に関する実験<sup>10)</sup>

###### a) 実験概要

表-3 使用したコンクリートの配合

配合	粗骨材の種類と 最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	水セメント 比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単 位 量 (kg/m <sup>3</sup> )						粗骨材 G	混 和 剤		
						水		セメント		細 骨 材			s	AE 減水剤 (%)	AE 助剤
						W	C	海 砂	砕 砂	風 砕 砂					
A	砕 石 20	15.0	6.0	50	41	170	340	714	—	—	1078	C×0.25	2.5 A		
B	砕 石 20	12.6	8.2	50	39	178	356	333	343	—	1094	C×0.25	5.5 A		
C	砕 石 20	13.9	6.9	50	42	168	336	243	250	264	1064	C×0.25	4.0 A		
D	砕 石 20	6.7	5.0	50	41	170	340	714	—	—	1078	C×0.25	2.0 A		
E	砕 石 40	10.7	4.0	50	35	162	324	620	—	—	1217	C×0.25	2.0 A		
F	人工軽量材	15	16.0	6.8	41	168	336	714	—	—	567	C×0.25	2.0 A		

(注) 本表のスランプ・空気量の値は、10±2cm, 5±1% を目標値とした試験練りに基づいて打設した結果の値である。(×98 kN/m<sup>3</sup>)

表-4 実験項目の一覧

◎：収縮とクリープ試験 ○：収縮試験

V/S (cm)	供試体寸法 (cm)	乾燥面数	目的および寸法選定の意図	(シリーズI) 細骨材を変化			(シリーズII) 粗骨材を変化		
				A	B	C	D	E	F
2.2	10×10×40	6	JIS A 1129 による基本データ	○	◎	○	◎	◎	◎
2.2	10×10×40	6	上記のモルタル分の試験	○	◎	○	—	—	—
5.0	10×10×40	2	V/S=2.2 との乾燥面数変化をみる	○	◎	○	◎	◎	◎
7.5	15×10×40	2	昭和 39 年当時の最小床版厚さに近似	○	◎	○	◎	◎	◎
10.0	20×10×50	2	昭和 46 年以降の床版を想定	○	◎	○	◎	◎	◎
12.5	25×10×50	2	昭和 55 年以降の床版を想定	○	◎	○	◎	◎	◎

コンクリートの種類は関西地区の立地条件と RC 床版という具体的構造物を対象とし、実施工に現実的に採用しうる骨材・配合条件を前提とした表-3 に示すものを用いた。

実験項目は表-4 に示すようにシリーズ I (A~C) では細骨材を、シリーズ II (D~F) では粗骨材の種類を変化させた。そして、寸法効果の影響を調査するために供試体の体積 (V) と表面積 (S) とを変化させている。図-3 に示す Rüschi 式の有効厚さ ( $d_w$ ) は V/S の 2 倍に相当するものである。各供試体は図-10 に示すような寸法変化と側面に防水シートを貼りつけることにより V/S 値を変化させた。

供試体はコンクリート打設翌日に脱型し、材令 7 日まで温度 20°C の恒温水槽内で養生し、その後シリーズ I では温度 20°C、湿度 60%、シリーズ II では温度 20°C、湿度 70% の恒温恒湿の室内に保存し、シリーズ I ではホイットモアひずみ計、シリーズ II ではフーゲンベルガーひずみ計を用いて長さ変化を計測した。また、乾燥による供試体の重量変化は容量 30 kg、精度 1/15 000 ののかりを用いて計測した。

b) 実験結果と考察

表-3 の各種コンクリートについてひずみ変化を計測し、V/S と乾燥収縮ひずみとの関係を調査した。

個別の収縮状況は省略するが、得られた測定値をもとに V/S と乾燥収縮ひずみとの関係を図-11 に示す。図中の乾燥収縮ひずみ ( $S_t$ ) は、ひずみ測定値と時間 (t) との関係を  $S_t = t/(a + bt)$  と仮定し、a, b の値を最小乗法により定め、各供試体における基本乾燥収縮ひずみ ( $S_{t=\infty}$ ) が 1/b で与えられる。A, B, C おおのの

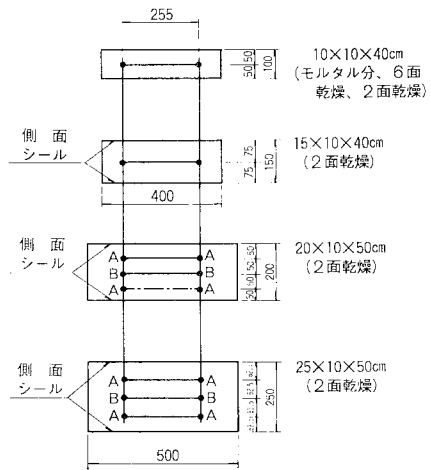


図-10 供試体の諸元

JIS A 1129 試験で得られた  $S_t$  は  $-87 \times 10^{-5}$ 、 $-112 \times 10^{-5}$  および  $-97 \times 10^{-5}$  である。

本図で示されるように、細骨材の乾燥収縮に及ぼす影響は大きい。A と D とは同一配合であり、湿度条件が 60% と 70% とに変化させているが、この 10% の変化は JIS A 1129 試験で評価すると約 60% の収縮ひずみの低減をもたらした。そして、この低減率は V/S の増加とともに大きくなる結果を得た。

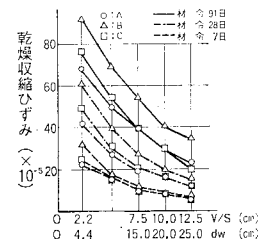


図-11 乾燥収縮ひずみと V/S

いずれの配合においても、乾燥収縮と V/S との関係

は 図-11 に例示するように  $V/S$  の増加に伴いほぼ双曲線に近い形で収縮量は減少する。一般的に用いられる JIS A 1129 で得られる収縮ひずみ ( $S_{t=\infty}$ ) を基準とし、 $V/S$  による収縮量の減少率を表わすと 図-12 となる。

図-12 に示すように、JIS A 1129 の小型供試体で得られる試験値をもとに実構造部材の寸法効果を考慮した収縮ひずみを定めることが可能である。すなわち、一般の道路橋 RC 床版 ( $V/S \approx 10$  cm) では、JIS A 1129 で得られる収縮量の約 1/2 を基本乾燥収縮ひずみとすればよいことが本図より明らかになる。一方、図-3 の Rüschi 式では  $d_w (=2 V/S)$  値を 5 cm に基準とすれば、 $d_w = 20$  cm における低減率は 0.75 であり、JIS A 1129 の試験値を直接 Rüschi 式で  $V/S$  により低減するには多少無理がある。

次に関西地区で多用されている配合 A について供試体の重量減少率と時間との関係を 図-13 に例示する。本図のように重量減少率は収縮量とほぼ同じ傾向を示し

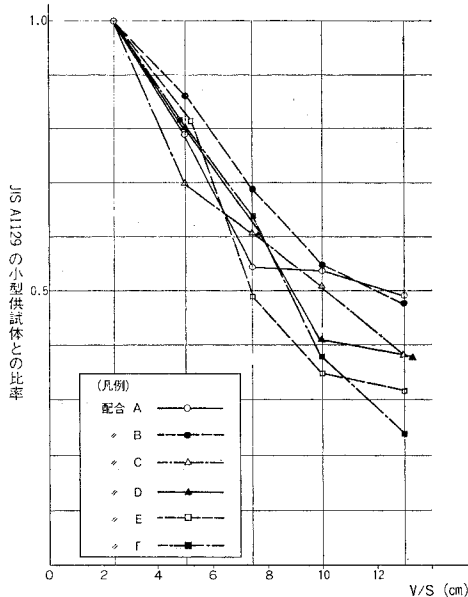


図-12  $V/S$  と JIS A 1129 乾燥収縮ひずみとの比率

た。また、図-14 に重量減少をコンクリートの逸散水量とみなして、逸散水量と収縮ひずみとの関係を同一配合 A で例示する。いずれの供試体においても、本図のように初期の逸散水量は収縮ひずみにあまり寄与せず、それ以降はほぼ直線関係となる傾向が確認された。

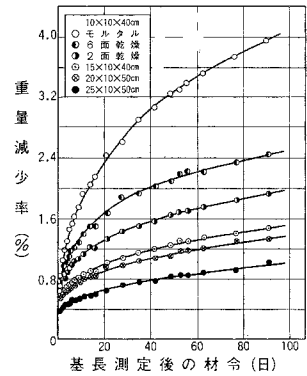


図-13 配合 A の材令と重量減少率

(2) 模型桁による乾燥収縮実験

a) 実験概要  
鋼桁などにより収縮拘束を受ける RC 床版の初期欠陥発生機構を模型

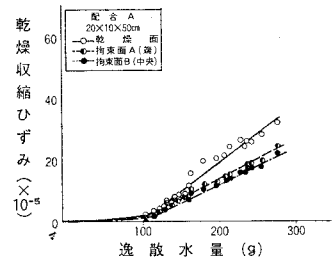


図-14 配合 A の減少重量と乾燥収縮ひずみ

桁により再現し、3. の解析手法を用いた理論値と実測で得られる桁たわみやひずみとの対比をすることにより解析方法の適合性を検討した。

コンクリートの種類は普通コンクリート (以下 CC) を基本とし、ひびわれ発生防止対策として、単位水量削減効果を期待した高性能減水剤使用コンクリート (以下 HWRC)、ひびわれ拘束効果をねらった鋼繊維補強コンクリート (以下 SFRC)、収縮補償効果をねらった膨張コンクリート (以下 EXC) および実橋調査でひびわれ発生の少ない人工軽量骨材コンクリート (LC) を用いた。これらの配合と諸性質を表-5 に示す。

表-5 に示す各種コンクリートを用いて、全長 300 cm、支間 270 cm の合成桁を製作したが、その概要と計

表-5 使用コンクリートの諸性質

コンクリートの種類	最大骨材寸法 (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m³) (×9.8 kN/m³)					混和剤	物理的性質 (kg/cm²) (×98 kPa)						備考		
						水	セメント		粗骨材	膨張材		鋼繊維	$\sigma_c$		$\sigma_t$		$E_c \times 10^4$			
							水	セメント					粗骨材	膨張材	鋼繊維	水	空気		水	空気
CC	20	9.5	3.7	50	42	180	360	210	500	1047	—	—	AE 減水剤	414	—	34.0	—	31.8	—	
HWRC	20	9.5	3.8	50	44	157	314	241	555	1061	—	—	高性能減水剤	416	—	31.0	—	34.8	—	
SFRC	20	10.0	4.0	50	55	203	406	270	617	766	—	*79	AE 減水剤	489	398	40.8	36.1	30.7	27.9	*伸線切断型
LC	15	12.0	4.3	50	38	151	302	*528	—	578	—	—	AE 減水剤	290	272	19.3	16.1	17.0	16.1	*細、粗とも軽量
EXC	20	9.5	3.8	50	42	175	320	221	505	1069	30	—	AE 減水剤	418	351	34.8	27.4	31.9	28.8	

(注)  $\sigma_c$ ,  $\sigma_t$ ,  $E_c$  は材令 28 日の圧縮強度、引張強度および静弾性係数を示す。

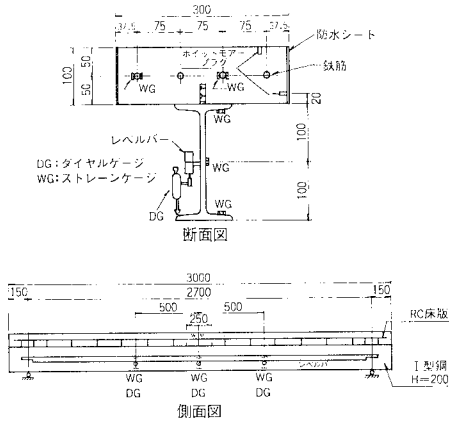


図-15 模型桁と測定装置

器配置を 図-15 に示す。合成桁の床版内には軸方向鉄筋比の影響を考慮するため、桁Ⅰでは D13、桁Ⅱでは D16 の鉄筋をおのの 4 本ずつ配筋し、模型床版の側面は実橋床版の 2 面乾燥条件に合わせるため防水シートを貼付した。

乾燥収縮に伴う桁のたわみ、鋼桁と鉄筋のひずみは支間中央および中央より 50 cm 離れた断面で、コンクリートのひずみは中央断面の床版上下面で測定した。

床版コンクリートは、材令 7 日までビニールシートで密閉養生することにより実橋床版の型枠・被覆養生条件に近似させ、それ以降はビニールシートを除去して温度 20°C、湿度 60% の恒温恒湿室内に暴露した。

また、3. の手法による 模型桁の 解析に供するため、模型桁と同一の V/S の供試体 (12×30×40 cm, 2 面乾燥, V/S=6 cm) を作成し、無拘束条件で同一雰囲気中で乾燥収縮ひずみを計測した。

b) 実験結果と考察

V/S=6 cm の無拘束供試体による各種コンクリートの乾燥収縮ひずみの計測結果を 図-16 に示す。

D16 鉄筋を 4 本配置した桁Ⅱについてスパン中央のたわみ変化を 図-17 に、CC および LC の床版と鋼桁のひずみ変化を 図-18 に代表例として示す。

図-17 と 図-18 における実線は 3. の解析手法により 図-16 で得られた乾燥収縮ひずみを用いて、桁たわみの実測値に最も適合する基本流動係数 ( $\phi_{f0}$ ) を設定した理論値を表す。

得られた結果を要約すると下記のとおりである。

① 乾燥収縮ひずみ

材令 1 日を基長とした無拘束収縮ひずみの値は 図-16 に示すようコンクリートの種類によりかなり差がある。一例として実測値を材令 90 日で比較すると、CC の  $-50 \times 10^{-5}$  に対し、単位水量が約 20 kg/m<sup>3</sup> (196 N/m<sup>3</sup>) 増減する SFRC と HWRC とでは収縮ひずみは約  $5 \times 10^{-5}$  増減している。そして、EXC と LC では材令初

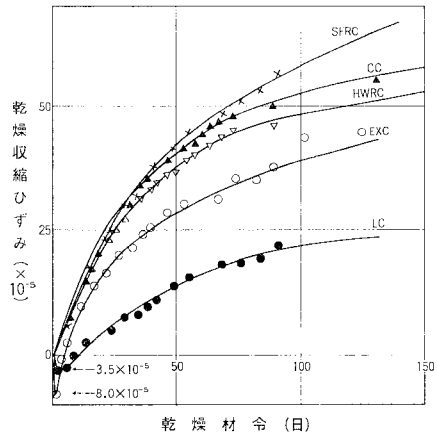


図-16 各種コンクリートの乾燥収縮ひずみ

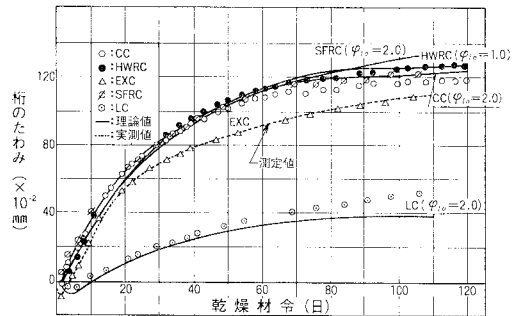


図-17 桁中央におけるたわみの時間変化

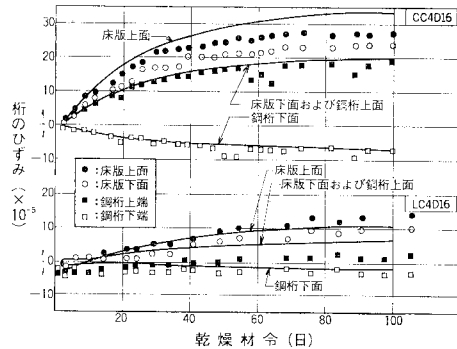


図-18 桁中央におけるひずみの時間変化

期には膨張を起こし、その後収縮に転じるが、その値は  $-35 \times 10^{-5}$ 、 $-20 \times 10^{-5}$  と CC に比較し著しく小さい結果を得た。

② 桁たわみ

図-17 に示すように CC に比較して SFRC および HWRC は桁たわみが大きい結果を得た。SFRC は CC と同程度の圧縮強度と静弾性係数を有するが収縮ひずみが大きいためである。また、HWRC は収縮ひずみは小さいが、静弾性係数が高くセメントペースト量が少ないためクリープひずみが小さいためと推定される。



収縮ひずみの小さい EXC や収縮ひずみと静弾性係数ともに小さい LC では桁のたわみは小さく、特に LC は CC の 1/3 程度と顕著である。

次に、解析法の各種コンクリートへの適合性は、基本流動係数 ( $\phi_{f0}$ ) を CC, SFRC, LC に対し  $\phi_{f0}=2.0$ 、クリープが小さいと推定される HWRC で  $\phi_{f0}=1.0$  を採用すれば十分な適合性が得られた。しかし、EXC の場合は初期膨張量と静弾性係数との関係、拘束条件との関係などにまだ不明な点があり適合性は十分でなく、解析法に新たなパラメーターの導入の必要性を示唆していると考えられるので解析は行わなかった。

鉄筋比の影響を CC について例示すると 図-19 のようであり、鉄筋比 ( $p=1.7\%$  と  $2.6\%$ ) の差により収縮変形が変化する程度が解析で再現できることがわかる。

③ 桁と床版のひずみ

図-18 のように EXC を除いて解析値は実験値とほぼ一致した。本図で対比されるように、CC に比較して低収縮で弾性係数の低い LC は拘束収縮ひずみで約 1/3 と著しく小さくなっていることが注目される。阪神高速道路での実橋床版の点検結果においても CC に比較し、LC を用いた床版で損傷率が低い傾向と一致し興味深いところである。

④ 拘束引張応力とひびわれ

各種コンクリート (EXC を除く) の合成桁模型における床版下縁に生ずる引張応力と時間との関係を解析したが、桁 II の結果を 図-20 に例示する。

この解析結果から、拘束引張応力が最大値に達する時間は CC, HWRC, SFRC, LC でそれぞれ 73, 73, 122 および 108 日であり、そのときの拘束引張応力は LC を除いてすべてのコンクリートでその引張強度を超えておりひびわれ発生の可能性が著しく高いことが算定された。

一方、模型桁におけるひびわれ観察結果は、図-20 で示すような材令で、可視ひびわれが CC, HWRC, SFRC

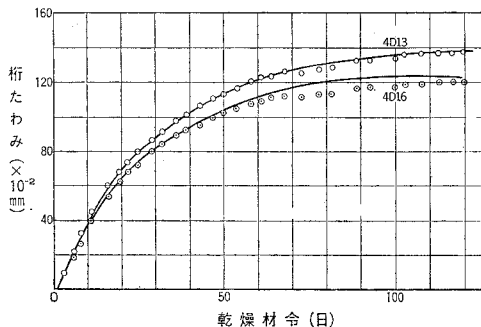


図-19 桁たわみと鉄筋量 (CC)

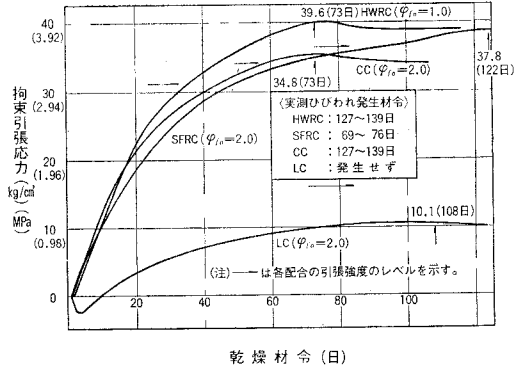


図-20 コンクリートの種類による床版下縁拘束引張応力

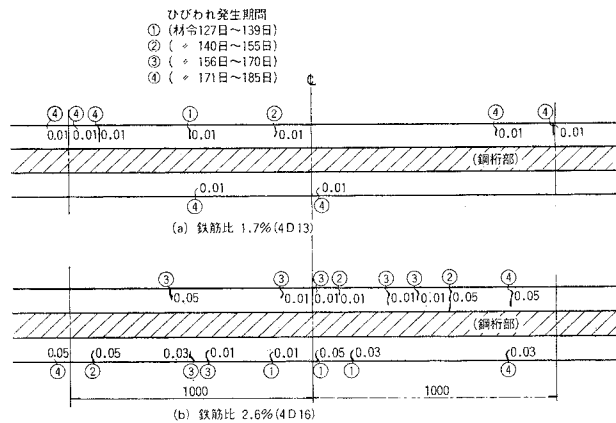


図-21 床版下面のひびわれ発生状況 (CC)

について確認された。実測ひびわれの状況例を CC について示したものが 図-21 である。本図に示すようにひびわれ発生の程度と時間とは、明らかに鉄筋拘束の度合により変化し、理論値の傾向と一致した。

なお、模型桁でのひびわれ発生時期は、コンクリートの強度発現、持続載荷の影響もあり正確に予測することは困難であるが、単純に表-5の引張強度で理論最大引張応力が達する時期を評価すれば、CC, HWRC で 50 日程度遅れる傾向を示した。LC については引張強度は低いにもかかわらず、拘束引張応力の発生は CC の 1/3 以下と小さいため、ひびわれ発生に対し十分な余裕がある結果となった。以上のように工学的には 3. の解析手法によりひびわれ予測は可能であることが本実験により確認できた。

なお、模型桁の観察においても LC は EXC とともに材令 250 日においても、ひびわれは発見できなかった。

5. 結 語

道路橋の維持管理においては RC 床版の損傷に伴う補修・補強に多くの投資と労力の消費が余儀なくしられ

てきた。この損傷問題に関し、コンクリート材料固有の乾燥収縮がひびわれ発生に及ぼす影響に焦点をあてて研究し下記知見が得られた。

(1) 実橋における RC 床版下面のひびわれ観察により、脱型直後ではほとんど認められない状況でも、経時変化によりひびわれ密度等が交通車両供用以前の段階で生長する場合がある。この現象はコンクリートの乾燥収縮が鋼桁および鉄筋に拘束されることにより、RC 床版下面に拘束引張応力を生ずるためであり、その生長はコンクリート打設後 2~3 年をこえて増加する。

(2) このような RC 床版の乾燥収縮現象を鋼桁・鉄筋の拘束との関係より、任意の乾燥収縮およびクリープ性状を用いて、任意材令の応力解析可能なプログラムを作成した。そして、この解析プログラムの適合性を模型桁における実測値との対比により検証した。

(3) 鋼あるいは PC 合成桁などの設計に用いられる諸定数は DIN や CEB などに準拠することが多く、わが国での気象条件、材料条件などに相応した諸定数の蓄積が少ない。そこで、既応データが多くある JIS A 1129 に代表される小型供試体による乾燥収縮ひずみの値を具体的な構造物の設計・評価へ関連づけることを意図し、 $V/S$  との関係を実験的に検討した。その結果、 $V/S=10$  cm 程度の道路橋 RC 床版では JIS A 1129 で得られる収縮ひずみの 1/2 程度を基本乾燥収縮ひずみに用いればよいことが判明した。

(4) 床版コンクリートに生ずる乾燥収縮拘束引張応力に与える鉄筋の影響はかなり大きく、単純合成桁では鉄筋を考慮しない場合より 40% も増加する。鉄筋の拘束引張応力増加というコンクリートへの負効果と、外力に対する鉄筋のひびわれ拘束という正効果との兼ね合いより、細径鉄筋の使用などを含め、適切な配筋法が望まれる。

(5) 連続桁では、収縮に伴う不静定反力の影響が大きく、スパン比にもよるが中央径間では単純桁と比較して約 2 倍の拘束引張応力を生ずる。

(6) 模型桁により乾燥収縮ひずみによる拘束引張応力とひびわれ発生との関係を各種コンクリートについて行ったが、結果は人工軽量骨材コンクリートと膨張コンクリートとがひびわれ発生防止に有効であることが判明した。特に人工軽量骨材コンクリートでは、弾性係数が低いこと、収縮変形に対する引張伸び変形追従性が良好と報告<sup>9)</sup>されているが、本実験では無拘束の乾燥収縮値も小さいことなどの相乗効果により拘束応力が顕著に低減された。なお、人工軽量骨材コンクリートの収縮ひずみは普通コンクリートと同程度かやや低いとされており<sup>10)</sup>、骨材の吸水特性や  $V/S$  との相関、長期材令の収縮特性などについて、さらに検討する必要がある。

また、膨張コンクリートについては、初期膨張、弾性係数、拘束条件の影響などの相関に不明な点も残されており、本研究での解析手法では再現できなかった。

## 6. あとがき

道路橋 RC 床版のひびわれは維持管理で問題視され、多くの補修・補強が行われてきた。その原因は疲労問題が第 1 に挙げられるが、実橋床版には、荷重、繰り返し条件と構造条件は厳しいにもかかわらず損傷率の低い橋梁も多く存在している。

このような事実を問題視して RC 床版の乾燥収縮に着目した検討を行うとともにその対処法についても材料面・構造面<sup>12)</sup>などを含めて総合的に検討してきた。本稿では、主としてひびわれ発生機構について紹介したが、調査研究を進めるにあたっては、阪神高速道路公団技術審議会コンクリート構造分科会の委員各位ならびに中野錦一氏(大阪セメント K.K. 研究所)、そして実橋調査にあたっては阪神高速道路公団大阪第二建設部の関係者に協力を賜った。記して謝意を表します。

### 参考文献

- 1) たとえば、岡田 清・岡村宏一・園田恵一郎・島田 功: 道路橋 RC 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, 1982-5.
- 2) 阪神高速道路公団: 大阪西宮線床版追跡調査(その 5) 報告書, 1981-3.
- 3) 土木学会関西支部編: 土木技術者のためのデータ処理と確率統計マニュアル, 構造編, pp. 132~135, 1982-8.
- 4) 土木学会編: プレストレスト コンクリート標準示方書, 1978.
- 5) H. リュッシュ・D. ユンクビルト著, 百島祐信訳: コンクリート構造物のクリープと乾燥収縮, 鹿島出版, 1976.
- 6) 日本材料学会: RC 床版の初期欠陥とその改善策に関する研究報告書, 阪神高速道路公団委託, pp. 14~45, 1980-3.
- 7) たとえば, Broune R.D. and R. Blundell: The behavior of concrete in prestressed concrete pressure vessels, Nuclear Engineering and Design, Vol. 20, 1972. (岡田克也・吉岡保彦抄訳, コンクリートジャーナル, Vol. 11, No. 10, 11, 1973-10, 12.)
- 8) A. ハウラネック・O. シュタインハルト著, 橋 善雄・小松定夫共訳: 鋼橋の理論と計算, 山海堂, pp. 449~469, 1965.
- 9) 日本材料学会: 混合砂を用いたコンクリートの諸性質に関する調査研究報告書, 阪神高速道路公団委託, pp. 145~167, 1978-3.
- 10) 日本材料学会: RC 床版の初期欠陥とその改善策に関する調査研究(その 2) 報告書, 阪神高速道路公団委託, pp. 12~51, 1981-3.
- 11) 柿崎正義: 人工軽量骨材コンクリートの収縮ひびわれ発生に関する研究, セメントコンクリート, No. 316, pp. 18~27, Jun. 1973.
- 12) 岡田 清 監修: 人工軽量骨材コンクリート, 朝倉書店, pp. 55~58, 1969-8.
- 13) 今井宏典・水元義久: RC 床版の損傷防止と PCC 床版, 橋梁と基礎, Vol. 17, No. 8, pp. 116~120, 1983-8.

(1983.4.15・受付)