

P C 橋脚梁部のひびわれ発生とその健全度

保全施設部 保全技術課 石塚 幹 剛

はじめに

阪神高速道路はそのほとんどが高架構造であり、都市河川や一般道路の中央分離帯を利用するものが多く、下部工の構造としては、T型単柱式の橋脚が代表的なものとなっている。この橋脚の梁部にP C鋼線あるいはP C鋼棒にてプレストレスを導入しているものが約1,000基供用されており、これらの約 $\frac{1}{3}$ の橋脚梁部に梁軸方向に水平なひびわれ（幅0.3～1.0mm程度のもが多い）が発生している。

これらのひびわれがいかなる要因にて発生するものか、構造物の健全度（使用耐力または終局耐力）にどのような悪影響を及ぼすのか、ひびわれの発生防止または補修はいかにすべきか、等種々の問題点に対して調査、実験による検討を行った。

実施した主な調査、実験項目と検討内容の概要は表-1に示すとおりである。

これらの検討の結果、次のようなことが明確になった。すなわち、ひびわれの発生には富配合マスコンクリート性状としての温度応力が大きく関与しており、コンクリートの内外面の温度差によって生ずるコンクリート表面部の引張応力が若材令の材料強度とクリティカルな関係にあって、ひびわれが発生する可能性が高い。また、ひびわれの存在は、ひびわれ深さがある程度浅いものであれば、構造物の終局的な耐力を大きく低下させることはなさそうである。しかしながら、ひびわれの発生は通行荷重の変動により進行し、鉄筋やシースさらにはP C鋼材を腐蝕させたり、コンクリート片の落下等を促進させる可能性もあり、都市高速道路の構造物の保全にあたっては、初期ひび

われの発生を防止することがもっとも大切であり、ひびわれを抑制することが必要である。

そこで、検討した主な事項といくつかの成果をまとめて記述し、材料本来の特性を配慮した入念な施工に役立つことを願うものである。

1. ひびわれ発生の主要因

コンクリートにひびわれを発生させる一般的な要因には、表-1に示すように種々のものが考えられる。ここで対象とするP C橋脚梁にあっては、ひびわれの発生が約 $\frac{1}{3}$ の基数に及んでいることからすると、施工段階の個有な要因によるものではなく、設計段階の材料特性に関する要因が内在している可能性が強い。そこで、次の点に注目して主要因を温度応力、乾燥収縮応力、P C緊張による応力として抽出し、解析・実験等により確認した。

- (1) 図-1に示すように断面寸法が大きい。
- (2) 表-2にコンクリート配合の一例を示すが、単位セメント量及び単位水量が多い。
- (3) P C梁構造としてのP C張力を導入する。

表-2 P C梁コンクリートの配合剤

粗骨材 最大 寸法 (mm)	スラン プの範 囲 (cm)	空気量 の範囲 (%)	水セメ ント比 率 W/C (%)	細骨材 比率 S/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)				
					水 W	セメ ン ト	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤
20	8	3	45.1	43.1	172	381	759	1013	ボゾ リス %8 152cc

1-1 ひびわれ発生と温度応力

一般にコンクリートはセメントの水和反応により発熱し、コンクリート打設後の初期段階には、か

表一 1 主な調査検討項目の概要一覧

種 別	主 な 実 施 項 目	調 査 ・ 検 討 事 項 等	
ひびわれ発生	実橋のひびわれ性状調査	発生基数、幅、長さ、分布、進行状況把握	
ひびわれ発生原因究明	発生要因調査	ひびわれ発生要因別の問題点確認	
	○設計段階	1. PC緊張による引張応力の発生 2. 断面寸法 ○コンクリート断面の大きさ ○梁長さ 3. 配筋 ○スターラップの分担率 ○各方向の鉄筋比	
	○施工段階	材 料 配 合	1. 各材料性状 2. 単位セメント量
		配筋組立て	1. 鉄筋かぶり 2. 組立て精度
	打 設	1. コンクリートの運搬 2. 打 設 ○打設順序 ○打設時間 ○締固め ○打継目の処置	
	型 枠 支保工養生脱型	1. 型枠のずれ 2. 支保工のゆるみ、沈下 3. 気象条件 4. 振動（交通振動、近接工事の振動） 5. 温度応力の発生 6. 鉄筋の拘束（軸方向鉄筋、スターラップ）	
	PC緊張	1. 緊張順序 2. 若材令コンクリートの緊張 3. グラウト 4. 定着部近傍の引張応力	
	桁架設床版打設	1. 乾燥収縮 2. 偏心荷重	
	○供用段階	1. 活荷重 ○繰返し荷重 ○過大荷重 ○ねじり荷重 2. 沓の拘束	
	発生要因の抽出及び性状解析	温度応力、乾燥収縮応力、PC緊張応力と材料強度の相関	
温度応力によるひびわれ発生確認実験	温度ひびわれの発生検証、クーリング及び型枠のひびわれ抑制効果、材料特性の把握		
実橋調査	発生温度応力の把握		
構造物の健全度評価	1/10小型模型実験	破壊性状の確認、ひびわれの影響度把握	
	1/30大型模型実験	ひびわれによる剛性低下度の把握	
	実橋の載荷実験	ひびわれの存在による剛性低下度の把握、静的、動的性状のひびわれの有無による比較、ひびわれによる材料特性の変化の確認	
	ひびわれ進行状況調査	供用荷重によるひびわれの進行状況把握、材料特性の変化状況の確認	
	繰返しによるせん断疲労特性の確認及び小型模型実験	ひびわれがせん断疲労に及ぼす影響度の確認、剛性低下に及ぼすせん断変動応力の把握	
ひびわれ防止対策及び管理手法検討	パイプクーリング及び中庸熱セメント使用によるひびわれ防止効果の確認試験工事	実橋において試験的にパイプクーリング及び中庸熱セメントを使用したひびわれ発生防止効果の確認、発生温度応力の把握	
総 合 評 価		ひびわれの発生原因の確認、構造物の健全度の把握、ひびわれ補修方法の提案、管理手法の提案	

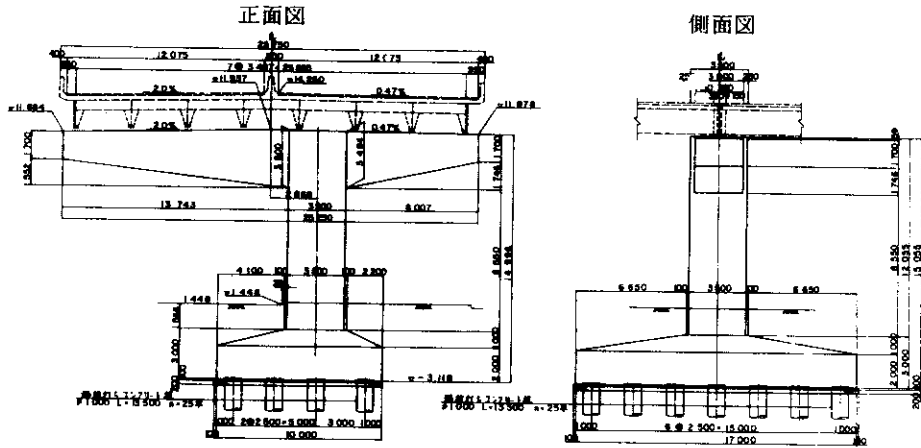


図-1 PCT型単柱橋脚一般図
(水平ひびわれの発生したN-22橋脚)

りの温度上昇が起こる。図-2は断面実物大供

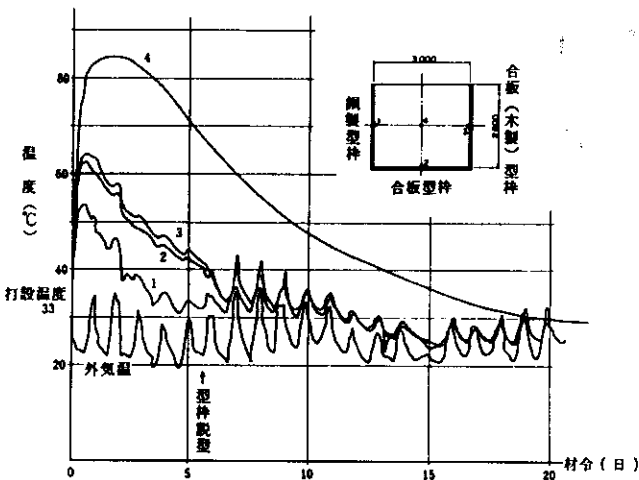


図-2 主要点の温度上昇履歴(供試体A)

試体による主要点の温度上昇履歴である。型枠の違いによる保温効果により表面温度で約10℃の差があるが、中央部は85℃となり約52℃の温度上昇を示している。配合は表-2と同様であるが、材料試験における断熱温度上昇は約44℃でありかなりの差がある。

コンクリートのひずみ量の測定結果と材料試験結果から、供試体内部の推定応力分布と主要点の応力履歴を図-3及び図-4に示す。これによると表面温度との差は20～30℃となり、この温度

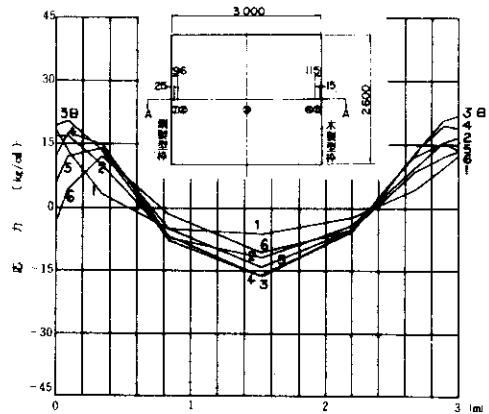


図-3 A-A断面の応力分布

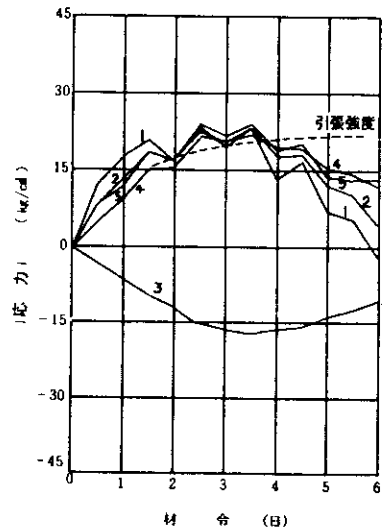


図-4 主要点の応力履歴

変化に起因して、内部拘束によって自由変形が拘束されて発生する温度応力が、材令1~4日で 20 kg/cm^2 程度の引張応力となる。なお、引張応力の最大は材令2~3日に発生するが、この時点での材料の引張強度は、水和反応の起こらない温度で示されるマチュリティーをファクターとした関数から推定すると、図-4の破線で示すように若材令時において発生する引張応力を下まわる傾向にある。この温度応力による引張応力と材料の引張強度は、おおむね図-5のような関係になり、ひびわれを

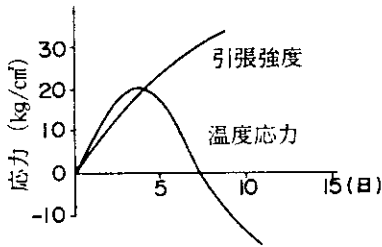


図-5 温度応力と引張強度の関係

生させるようである。解析によると温度応力による引張領域は表面より 50 cm 程度であり、ひびわれが発生しなければ材令6日で表面圧縮に転じ、 $20 \sim 30 \text{ kg/cm}^2$ の圧縮応力が残留する。

なお、この実験等では次のような成果が判明した。

- (1) 型枠による保温効果は、木製型枠が鋼製型枠に比べてよく、材令1~4日では表面温度は木製の方が 15°C 程度高くなり、その分、表面ひずみが小さくひびわれ発生がにぶい。
- (2) シース中に外気を流通すると内部の水和熱を放出し、温度上昇を抑制する効果がある。

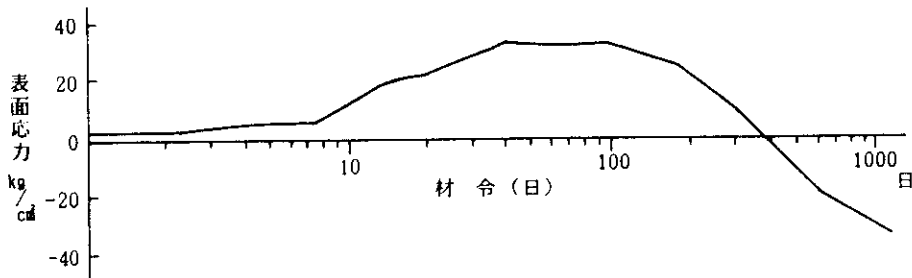


図-6 乾燥収縮応力の発生状況

この実験では材令1~2日で中心部温度を $10 \sim 20^\circ\text{C}$ 低減するのみで、ひびわれの発生を防止することができた。

- (3) 夏期にコンクリートを打設する場合は、打込温度が高くなり水和反応が促進され、表面引張応力も若干大きくなり、最大応力発生材令も若くなる傾向にある。
- (4) 型枠脱型時に構造物表面の温度と外気温の差が大きい場合、あるいは若材令時に降雨などがあった場合には、急激に表面が冷却されるため、温度衝撃による引張応力が発生して、脱型時まで生じていた温度応力に加算されて、ひびわれを発生させることになる。

1-2 ひびわれ発生と乾燥収縮応力

一般にコンクリートの内部温度が定常状態に戻ると、コンクリートは長期にわたって収縮を起こす。すなわち、セメントの水和に必要な水量以外の水の一部は、コンクリート中の自由水となって残り、これが乾燥状態になると表面から外部に蒸発しコンクリートを収縮させる。この収縮は外部拘束及び内部拘束によって自由変形が拘束されて、コンクリート内部に乾燥収縮応力が発生する。コンクリートの乾燥収縮は長期にわたって継続するので、施工時に入った 0.1 mm 程度の微細なひびわれが、乾燥収縮によりさらに大きくなることが考えられる。

この点、材料試験結果をもとに供試体測定期間中の平均湿度 65% の場合について、最終収縮ひずみ 700μ 程度を推定して解析した。湿度 65% の場合の表面引張応力は、図-6に示すごとく若材

令ではわずかに増大(5 kg/cm²程度)するが、養生時に発生する温度ひびわれに対する構架効果はきわめて小さいものと予測される。側面型枠を脱型し乾燥が促進されると表面引張応力は急増し、材令40日位で約30 kg/cm²の値に達する。この応力は初期の温度ひびわれが発生しない場合には、表面に残留する圧縮応力と相殺される。しかし、温度ひびわれが発生している場合には、材令が進むにつれてひびわれが進展する要因として乾燥収縮が作用するものと推測される。

1-3 ひびわれ発生とPC緊張応力

一般にPC構造物は、PC鋼材の緊張により梁部にポアソン比に相当する横ひずみが発生し、これが柱に拘束されて引張応力を生ずる。当該橋脚において張出し長及びPC鋼材の曲がり等を考慮して解析して次の結果をえた。

- (1) PC緊張による梁軸方向の応力は、張力導入断面では40～60 kg/cm²の圧縮応力となり、柱の結合部に近づくにつれて梁の曲げ応力状態となる。
- (2) ひびわれを誘発すると考えられる鉛直引張応力は、PC鋼材の曲がりによる腹圧力を考慮しても1～2 kg/cm²程度であり、直接的にひびわれを発生させる要因とはなりがたい。
- (3) PC梁においては、緊張力、緊張時期は施工上きわめて重要な要素であり、所定のコンクリート強度が発現していない時期に緊張したり、過大な緊張力を与えるとひびわれ発生の主原因となる。

2. ひびわれ発生防止と抑制

同一材料、同一条件での施工であっても、ひびわれが発生している橋脚と発生していない橋脚がある。ひびわれの状態もごくわずかのものから大規模なものまで種々ある。これらのバラツキは、温度応力をはじめとした、いくつかのひびわれの発生要因が組合せ相乗されたものと考えられる。

使用材料や施工段階におけるひびわれの発生要因の検証は、コンクリート構造物の場合にはきわめて難しいことである。しかし、実橋のコア採

取による物理的性状測定や化学分析の結果からすると、一部に設計条件に合致しないものが確認された。

コンクリート材料の特性を十分に活用するためには、その特性を熟知した入念な施工が基本であり、記録に残らないような小さな要因であっても、鉄筋の配筋不備、スランプ過多、締固め・打設不良、打継目の処理不良、型枠・支保工の不備、養生不足、気象条件の悪化などの要因が相乗して、ひびわれが発生するものといえよう。

特に、大断面で高強度コンクリートを使用する場合には、単位セメント量、単位水量が多い。加えて、近年においては碎石骨材、ポンプ車の利用、JIS改定による割増し係数の増加などで、一層単位セメント量、単位水量が多くなる傾向にある。このため、コンクリート内部の温度上昇が大きくなり、温度応力及び乾燥収縮応力に対する配慮がさらに必要となっている。

コンクリートの温度上昇を制御し、ひびわれの発生を防止または抑制する方法には次のようなものがある。

- (1) プレクーリング
- (2) パイプクーリング
- (3) 中庸熟ポルトランドセメント、フライアッシュセメントの使用
- (4) 単位セメント量の低減

また、型枠は保温性のある木製型枠を使用し、天端もシートなどで保温するなど、構造物内部の表面の温度差を大きくしないように工夫することが必要である。

乾燥収縮を制御するには、一般に次のような方法がある。

- (1) できるだけ硬練りコンクリートとし、単位水量を減らす。
- (2) 混和材料を有効に使用する。
- (3) 乾燥収縮量の少ないセメントを使用する。

型枠脱型にあたっては、一般にコンクリートの湿潤養生期間は少なくとも5日間と定められているが、構造物表面と外気温の温度差が大きい場合には、温度衝撃によるひびわれの発生を防止する対策を講じなくてはならない。また、PC橋脚梁部は、梁幅、梁高、梁長が大きくなり、コンクリー

ト打設量が 200 m^3 を越える場合がある。したがって、ポンプ車を使用する場合であっても、時間当り打設量を抑えて人念確実な打設・締固め・養生を行うよう配慮することが、ひびわれの発生を防止する有効な手段となる。

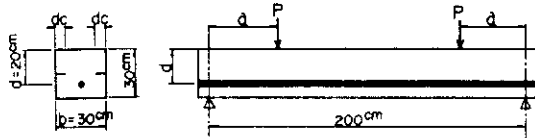
3. 健全度の把握

ひびわれが発生している P C 橋脚梁であっても、現時点では目立った機能低下はなく十分な役目を果している。しかしながら、ひびわれの存在が長期的な観点に立った構造物の安全性にどのように関与するかを把握し、信頼のおける構造物保全を行うことが道路管理者としての義務であるといえよう。このため、ひびわれの存在がどの程度の剛性低下につながるか、どの程度の剛性低下が構造物の機能耐力の低下に結びつくかを中心に評価し、構造物の健全性を把握することとした。

これにより、補修や補強による機能回復あるいは機能耐力を低下させないための手当を行うための安全管理基準を設定することとした。

3-1 剛性の低下とひびわれの影響度

ひびわれの存在がひびわれ深さとせん断スパン比 (a/d) との相関において、どのように破壊性状、剛性低下を異にするかを小型模型にて、実橋に近いもの ($a/d = 2.3 \sim 2.5$) を含めて確認した。図-7 はひびわれ深さ (人工的模擬) と a/d の相違による破壊形式の領域を示すものである。同一模型によるひびわれ発生状況と破壊荷重の実測値は表-3 のとおりである。



(a) 小型模型図

図-7 模型寸法及び破壊の形式と領域

ひびわれ深さ 50% の場合、 $a/d > 2.0$ では曲げ破壊が起こり 1.5 ではせん断破壊となるようである。ひびわれのないものは曲げせん断破壊となり、ひびわれが貫通しているものは、初期の段階からずれが生じ、ずれ破壊し、破壊荷重も $1/2$ 程度に低下している。

小型模型において 50% 程度の深さのひびわれについては、大きな曲げ剛性の低下は認められないことが確認されたので、 $1/2$ 大型模型を用いてひびわれ深さの深いものについて、その破壊状況を確認した。図-8 に大型模型における人工ひびわれの

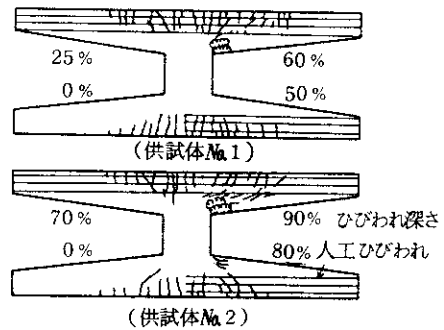
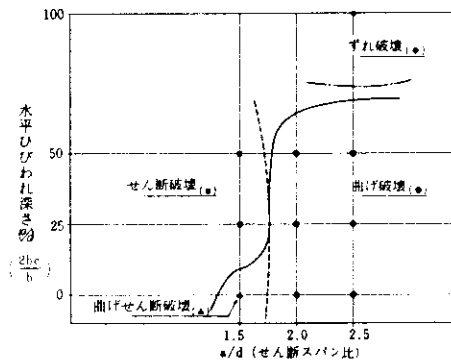


図-8 ひびわれ発生状況図
(人工ひびわれは 1cm 厚の塩ビシートを使用)

配置と、表-4 に曲げ破壊荷重まで載荷した場合のひびわれの発生状況を示す。

これらの結果によると、曲げひびわれ発生荷重はひびわれ深さととは相関なく幾分低下するが、破壊時の測定最終耐力と計算上の耐力では、ひびわれ深さが断面の 90% であってもあまり大きな低下



(b) 破壊形式の変化

表-3 ひびわれ発生及び破壊荷重の実測値

ケース番号	a/d	ひびわれ深さ $\frac{2dc}{b}$	ひびわれ発生荷重 (ひびわれ形式) P_{cr} (t)	曲げひびわれ発生モーメント M_{cr} (t·m)	$\frac{M_{cr}}{M_u}$	$\frac{M_{cr}}{M_u}$	破壊荷重 (破壊形式) P_u (t)	破壊時の曲げモーメント M_u (t·m)	$\frac{M_u}{M_u^*}$
1	1.5	0	34.0 曲げひびわれ	5.1	1.02	0.44	77.0 曲げせん断破壊	11.6	1.14
2	2.0	0	22.0 曲げひびわれ	4.4	0.88	0.40	54.7 曲げ破壊	10.9	1.07
3	2.5	0	19.8 曲げひびわれ	5.0	1.00	0.50	40.0 曲げ破壊	10.0	0.98
4	1.5	1/4	28.0 曲げひびわれ 54.0 斜めひびわれ	4.2	0.84	0.37	75.0 せん断破壊	11.3	1.11
5	2.0	1/4	22.0 曲げひびわれ	4.4	0.88	0.44	50.3 曲げ破壊	10.1	0.99
6	2.5	1/4	16.0 曲げひびわれ	4.0	0.80	0.41	38.8 曲げ破壊	9.7	0.95
7	1.5	1/2	28.0 曲げひびわれ 60.0 斜めひびわれ	4.2	0.84	0.44	64.0 せん断破壊	9.6	0.94
8	2.0	1/2	20.0 曲げひびわれ	4.0	0.80	0.42	48.0 曲げ破壊	9.6	0.94
9	2.5	1/2	16.0 曲げひびわれ	4.0	0.80	0.44	36.0 曲げ破壊	9.0	0.88
10	2.5	1	13.0 曲げひびわれ	3.3	0.66	0.67	19.4 ずれ破壊	4.9	0.48

計算値
 ○ 曲げひびわれ発生荷重 $a/d=1.5$ $P_{cr}^*=33.4$ t
 $a/d=2.0$ $P_{cr}^*=25.0$ t
 $a/d=2.5$ $P_{cr}^*=20.0$ t
 ○ 曲げひびわれ発生モーメント $M_{cr}^*=5.0$ t·m
 ○ 曲げ破壊モーメント ($\sigma_e = 349 \text{ kg/cm}^2$, $\sigma_{pu} = 11,500 \text{ kg/cm}^2$) $M_u^* = 10.2$ t·m

表-4 曲げひびわれ発生及び破壊の概要

水平ひびわれ深さ (%)	曲げひびわれ発生荷重 (t)	曲げひびわれ発生時曲げモーメント (t·m)	鉄筋ひずみより得られた曲げひびわれ発生荷重 P_{cr} (t)	鉄筋ひずみより得られた曲げひびわれ発生曲げモーメント M_{cr} (t·m)	$\frac{M_{cr}}{M_{cr}^*}$	$\frac{M_{cr}}{M_u^*}$	曲げ破壊荷重 P_u (t)	曲げ破壊モーメント M_u (t·m)	$\frac{M_u}{M_u^*}$
90	143	265	132	244	0.89	0.45	301	523	0.95
80	157	293	131	242	0.89	0.44	—	—	—
70	141	264	130	240	0.88	0.44	—	—	—
60	146	264	124	229	0.84	0.42	300	559	1.02
50	161	291	148	274	1.00	0.50	—	—	—
25	152	280	129	239	0.88	0.44	—	—	—
(供試体 No.1) 0	167	324	145	268	0.98	0.49	—	—	—
(供試体 No.2) 0	171	319	150	278	1.02	0.51	—	—	—

計算値 (水平ひびわれ無し)

- 1) 曲げひびわれ発生荷重 ; $P_{cr}^* = 148$ t
- 2) 曲げひびわれ発生モーメント ; $M_{cr}^* = 273$ t·m
- 3) 曲げ破壊荷重 ; $P_u^* = 296$ t
- 4) 曲げ破壊モーメント ; $M_u^* = 548$ t·m

ここに、

コンクリート圧縮強度 ; $\sigma_{cu} = 30.0 \text{ kg/cm}^2$

コンクリート曲げ強度 ; $\sigma_{cb} = 47.0 \text{ kg/cm}^2$

鉄筋引張強度 ; $\sigma_{su} = 5,600 \text{ kg/cm}^2$

P C 鋼棒引張強度 ; $\sigma_{pu} = 11,600 \text{ kg/cm}^2$

は認められない。ひびわれの発生状況は、曲げひびわれが中立軸付近まで進展し、人工ひびわれから斜めひびわれが発生し、最終的には圧縮縁のコンクリートの圧壊に至っている。

全体的にみて、この実験のような静的荷重下においては、ひびわれの存在が曲げひびわれの発生を早めたり、最終耐力を低下させるような傾向は顕著ではない。コンクリート断面内のひずみ分布からすると、ひびわれ深さの深いもの程、ひびわれ面からのずれ量が大きくなり、荷重の増大と共に全断面有効から中立軸が圧縮側に移りRC断面化の傾向を示す。

図-9にひびわれ深さ別の荷重～梁先端たわみ量の関係を示す。これらの測定値から、ひびわれのない梁の断面剛性E1に対する剛性比を算定したものが図-10である。荷重～たわみ量を実橋との対比で換算すると図-9に示すように全設計荷重に対して5～6mm程度であり、全てのひびわれ深さに対して直線領域にある。また、図-10によると、ひびわれ深さによる差は顕著でなく、剛性低下に着目するとひびわれの存在により20～40%程度の変化がみられる。

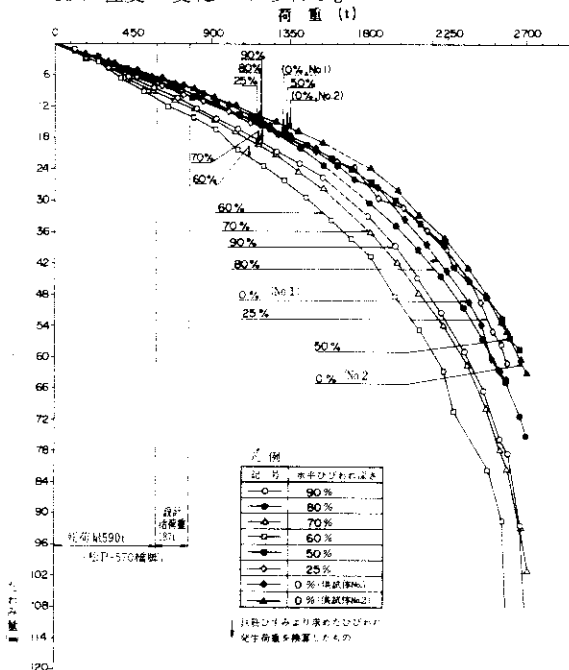


図-9 荷重～たわみ量
(測定値を実構造物スケールに換算したもの)

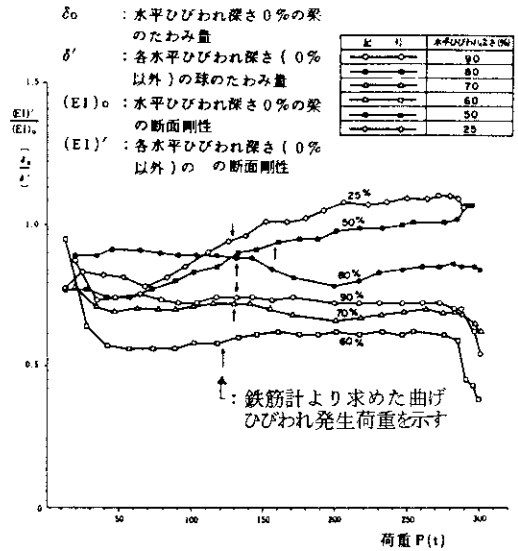


図-10 ひびわれによる断面剛性の低下と載荷荷重の関係

3-2 実橋におけるひびわれの影響度

実橋において、ひびわれの存在がどのような影響を与えるかを確実に把握することは難しい。しかしながら、静的荷重に対する実験結果を単純に実橋に評価することは、荷重の性状の違いを考慮するときわめて危険なことである。そこで、試験荷重(20t)を用いて梁先端のたわみ量を測定して、ひびわれの存在による差をとらえて影響度を把握することとした。

たわみ量の測定は、路下条件等を考慮して試験車と一般通行車に対する静的及び動的たわみを非接触電子光学式変位測定装置(オプトフォローと呼んでいる。)を用いて遠方より光学的に行った。図-11に代表的橋脚における実測値とコア採取により推定した弾性係数を用いて算定した計算値の比較を示す。

実橋のたわみ量のごくわずかな量であり、測定精度との関係もあって部分的に微妙な値もみられるが、全体的にひびわれの存在がたわみ量を増大させている傾向にある。一般交通による動的たわみについては明らかな差がみられ、ひびわれの存在が30～45%程度の剛性低下に影響しているようである。

凡例

実験値		試験車による静的変位値	荷重 20 t
		一般車両による動的変位値	荷重 20 t
計算値		弾性係数実測値(コア試験結果より)	P-147: $28.7 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ P-151: $23.7 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ P-152: $30 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ 荷重 20 t
		弾性係数	$30 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ 荷重 20 t

但し計算値のうち

回転角による変位値は下図のモデルによる。

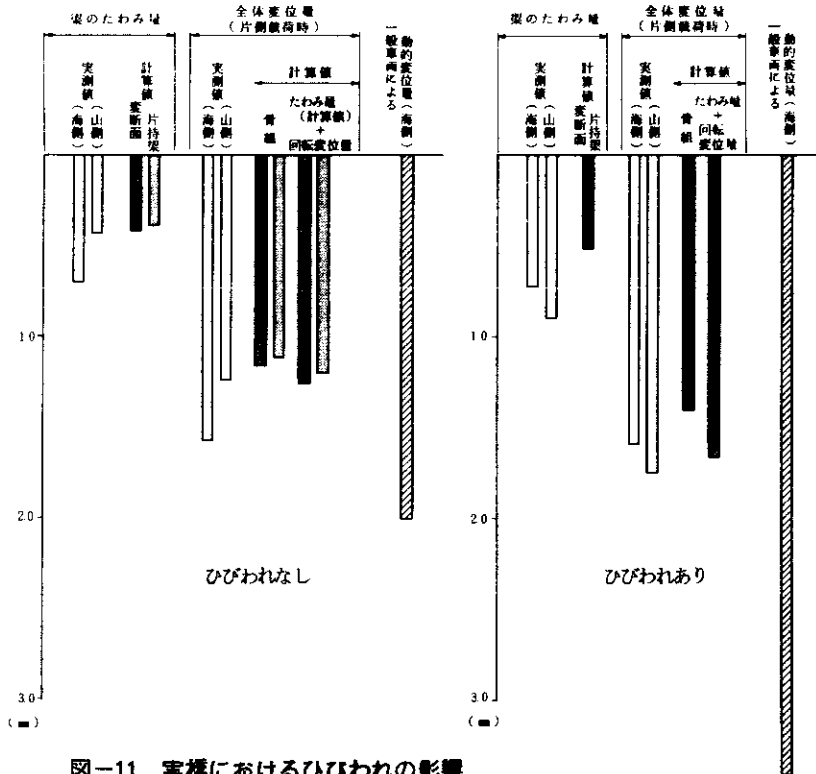
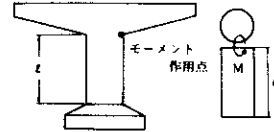


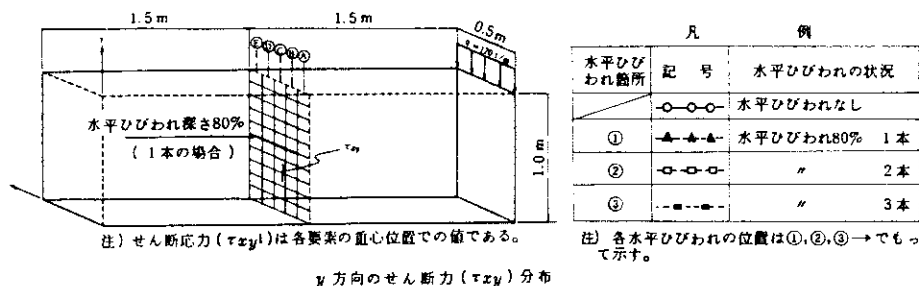
図-11 実橋におけるひびわれの影響

コア採取によるコンクリート強度及び橋脚の固有振動数も同時に調査したところ、ひびわれの存在するものは全体として低下している傾向がみられる。この理由は、ひびわれが発生すると低下するものか、材料特性の悪化がひびわれを発生するものかは判別しがたい。いずれにしても、ひびわれの存在が構造物の剛性に関与していることは明らかである。

3-3 セン断疲労に対するひびわれの影響度
曲げに対する評価では、ひびわれが断面の80~90%程度の深さまで進行していなければ、顕著な耐力低下につながらないようである。しかしながら、断面内応力のうち、ひびわれの存在は曲げ応力よ

りもせん断応力に対して大きく関与する。当然のことながら、ひびわれ部近傍においてはせん断応力が集中することになる。図-12 はひびわれの存在を考慮した3次元有限要素法による解析結果であるか、ひびわれの影響によりせん断力の分布が大きく変化することがわかる。

ひびわれが存在しない梁のたわみ剛性を1とした場合、ひびわれ深さが80%程度のものが存在すると、1~2本の場合0.93、3本の場合0.88程度に低下するようである。ひびわれ近傍におけるせん断応力がどの程度の大きさになるかは、解析手法の精度上あまり明確ではないが、少なくともひびわれがないとして計算した場合のせん断応力を、ひびわれによる断面欠損に応じた割合で割増した



y方向のせん断力(τ_{xy})分布

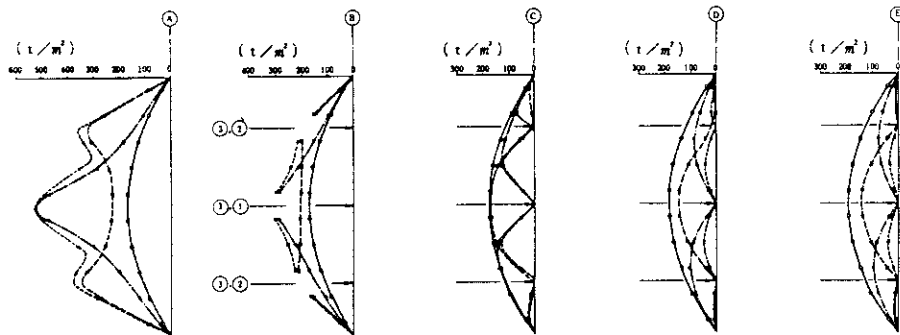


図-12 水平ひびわれの有無によるせん断応力分布の比較

程度の値となるようである。ひびわれ面内のせん断力はスターラップと残存コンクリートによって受け持たれるが、繰返し荷重を受けるPC梁のせん断破壊の寿命は、作用するせん断力の大きさがわずかに変化しても大きく変化する。⁴⁾すなわち、作用せん断力の大きさが静的せん断強度の60%以下であれば、疲労破壊を生じにくい、ひびわれがスターラップを横切っている梁では、ひびわれがないものに比べて寿命が著しく短くなるようである。

実橋の水平ひびわれの存在する梁における、最大せん断耐力に対する作用せん断力の割合は、静的せん断強度の23~26%程度の値となる。

実橋のひびわれ深さは深くても断面の30%程度と推定されるが、ひびわれ深さが80%程度の深さになると、静的せん断強度の65%に達するせん断力が作用することになり、繰返し荷重により疲労寿命が短くなる可能性がある。

この点を小型模型(300×150×2,000mmせん断スパン比2.5)により確認すると図-13に示すように、梁中央たわみについて実橋荷重に相当する

死荷重=Pmin、死荷重+活荷重=Pmax、とした繰返し荷重にあって、ひびわれ深さが75%以下の梁では繰返し回数で20%程度の剛性低下にとどまっている。しかし、ひびわれ深さが90~100%の梁では、設計荷重程度でN=5×10⁵程度繰返されると55~65%程度の剛性低下を生ずる。ひびわれ深さが90%程度になると、梁端のずれ量、コンクリート内部のひずみ、スターラップ応力も増大し重ね梁の傾向が顕著になる。ひびわれ深さの進行と共に曲げ破壊から、ずれせん断破壊に破壊形式が変化して、その破壊形式に応じて明確なひびわれの発生が確認される。

これらの調査からすると、実橋においては通行車両の繰返し荷重(特に過積載荷重)荷重について、ひびわれ深さとの相関で厳重な監視が必要であり、最大のポイントはひびわれ深さを進行させないことにあるといえる。

4. パイプクーリングによるひびわれ発生防止効果

ひびわれを発生させる主要因が明瞭になり、実

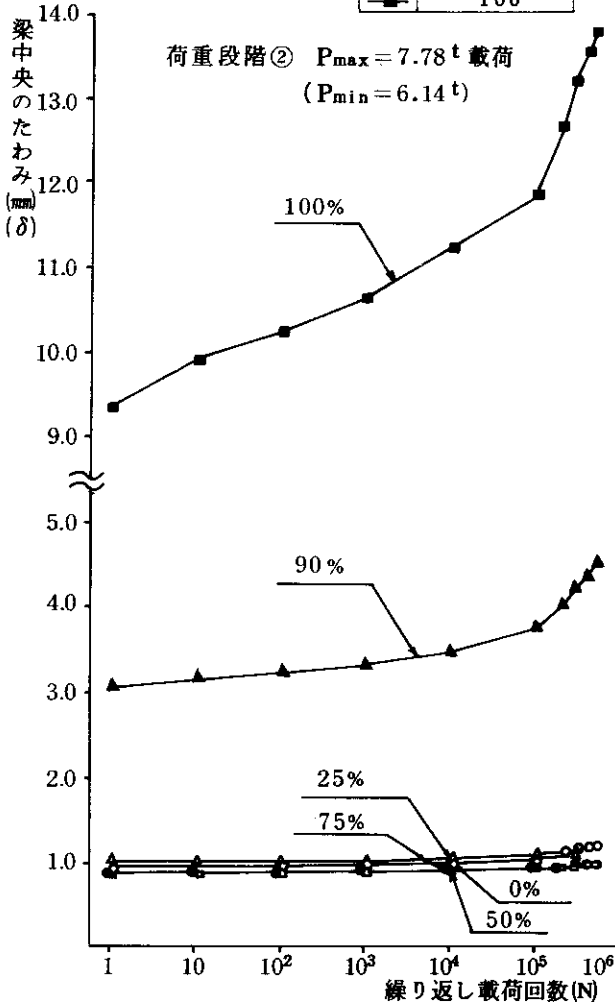
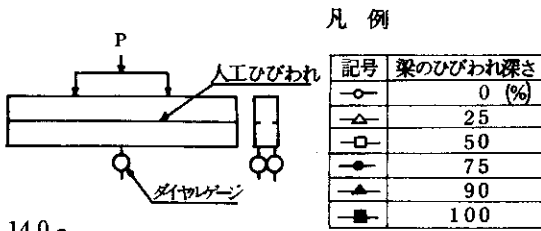


図-13 ひびわれ深さ別 $\delta - N$ 曲線

橋においてひびわれの発生防止を図るにはどのような方策があるかを検討した。ひびわれ発生の主要因と考えられる温度応力(勾配)の低減を図るべく、次のような方法について検討したが、現場での施工性、実現性などを考慮してパイプクーリングによる内部温度の降下を期待した。

- (1) 材料のブレッカーリング
- (2) 発熱量の少ないセメントの使用
- (3) コンクリート表面部のヒーティング
- (4) ひびわれ防止鉄筋の配置
- (5) パイプクーリング

パイプクーリングの設計は表-5に示す配合の

表-5 使用コンクリートの配合表 (m^3 当り)

セメント	水	細骨材	組骨材	混和剤	s/a	w/c
kg 420	kg 172	kg 655	kg 1,078	kg 1.05	% 38.4	% 41

- 設計強度 $\sigma_{28} = 350 \text{ kg/cm}^2$
- スランブ 8cm
- 空気量 4%
- 最大粗骨材寸法 20mm

コンクリートに対して内部温度を推定し次のとおりとした。

- (1) コンクリート打設温度 10℃
- (2) 初期水温 5℃
- (3) クーリングパイプ
 $\phi 25.4 \text{ mm}$ 配管ピッチ 80cm
- (4) 通水量 20 l/min (28.8 $m^3/\text{日}$)
- (5) 施工時期 昭和56年3月

コンクリート内部の断熱温度上昇を正しく把握することは難しいが、推定計算値と比較すると図-14に示すように、断面中央部の温度は24時間経過後より降下し始めている。最高温度も50℃程度であり、24時間経過時の発生温度応力を推定すると12.9~13.1 kg/cm^2 程度であり、材料の許容引張応力の推定値12.5~15.0 kg/cm^2 を下回っている。

型枠脱型後のひびわれの発生状況を観察したところ、一部の橋脚について梁天端部と側面にわずかなひびわれが発見された程度である。

温度応力をパイプクーリングにより制御することは、PC橋脚梁のひびわれ発生防止に対してきわめて大きな効果のあるものといえよう。

5. ひびわれ深さの抑制と補修

ひびわれの存在するPC橋脚梁は、そのひびわれ深さがある程度の深さにとどまっている間は、構造物の健全度を保持しうる事が確認された。そこで、これらの構造物の保全にあたっては、ひ

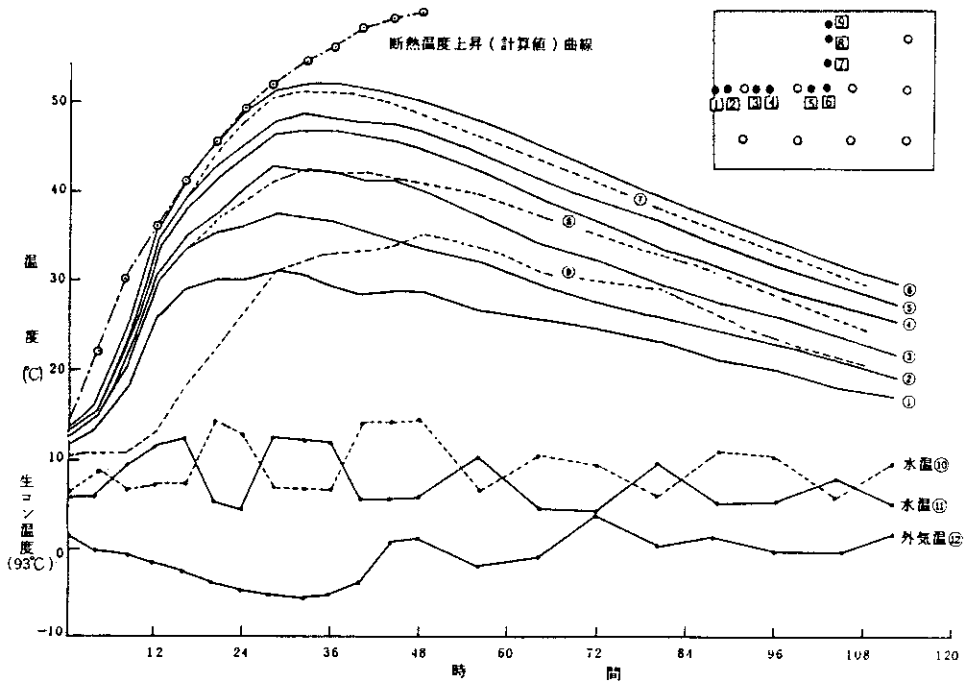


図-14 パイプクーリングによる内部温度の降下状況

ひびわれ深さを抑制することが最も大切なことである。

これらのコンクリート構造物は、点検計画に基づいて一定の期間ごとに当該構造物に接近して点検を実施し、表-6の判定基準により損傷の状況及び健全度を把握する。この判定でひびわれ幅を中心に行うこととしたのは、ひびわれ幅はひびわれがコンクリート構造物に与える影響を判定するにあたって、重要かつ簡明なパラメータである。曲げひびわれを発生させた供試体において、超音波法を用いてひびわれ深さを、表面の最大ひびわれ幅との相関を調べたところ、図-15に示すように、

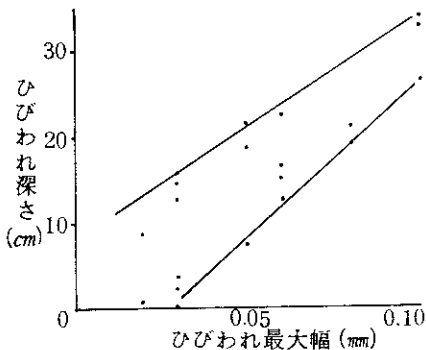


図-15 曲げひびわれにおける深さと幅の関係

ある程度の比例関係が認められる。

ひびわれ深さの抑制は最大ひびわれ幅を観察することにより、適切な時期に適切な補修などの対応が可能である。現実にはひびわれの存在するPC橋脚梁においては、①鉄筋、シース、PC鋼材の防錆、②支承まわりの局部破壊防止、③コンクリート片落下防止などを目的としたエポキシ樹脂注入による補修を行っている。

過去の実例によると、ひびわれに対するエポキシ樹脂注入は、接着効果はあまり期待できない。注入による補修を行っても、再度ひびわれが開いている橋脚もいくつか発生している。これはコンクリートとエポキシ樹脂の弾性係数や熱膨脹係数が異なること、樹脂が硬化収縮することにより、ひびわれの動きに追従しないことによるものと考えられる。ひびわれの伸縮に追従するやわらかい注入材料、接着テープ、塗布材などの開発が望まれるものである。

点検によりひびわれの存在あるいは進行の著しいものは、ひびわれの進行を追跡するとともに、必要に応じて梁のたわみ量を測定することにより、

表一6 コンクリート構造物の点検判定基準

判定項目		判定区分		
		A	B	C
ひびわれ幅	RC桁, RC橋脚, 橋台, 擁壁	ひびわれ幅 ≥ 0.3 mm	0.3 mm $>$ ひびわれ幅 ≥ 0.2 mm	ひびわれ幅 < 0.2 mm
	PC桁, PC橋脚	ひびわれ幅 ≥ 0.2 mm	0.2 mm $>$ ひびわれ幅 ≥ 0.1 mm	ひびわれ幅 < 0.1 mm
はく離, 鉄筋露出および錆流出, 漏水, 遊離石灰の流出, 空洞, 跡埋コンクリートの損傷, 沓座コンクリートの損傷, 異常音の発生, 欠落の有無, その他の損傷		主筋またはPC用シースが露出している場合	Aに該当しない鉄筋および主筋が露出している場合	損傷はあるがBランク以下の程度である場合
		PC鋼材の定着体が露出している場合		
		主筋が腐食している場合		コンクリートの表面が錆により変色している場合
		ひびわれ部よりの漏水で遊離石灰が多く流出している場合	ひびわれ部またはコンクリート打継部よりの漏水で遊離石灰の流出はほとんどない場合	
		沓座が沈下して沓座コンクリートが割れているかまたは, 沈下が予測される場合	沓座コンクリートが割れているが沈下の恐れがない場合	
		コンクリート片が落下する恐れがある場合	コンクリートのはく離跡がある場合	
		大きな断面欠損がある場合	小さな断面欠損がある場合	
		異常音が著しい場合		

判定区分	状 況
A	損傷が著しく, すみやかに補修する必要がある場合
B	損傷があり, 早い時期に補修する必要がある場合
C	損傷が軽微であり, その進行状態を観察する必要がある場合
OK	上記以外の場合

剛性低下の有無を観測し健全度を確認するものである。

おわりに

PC橋脚梁部は断面の大きなマスコンクリートであり, 使用セメント量の増大と共にセメントの水和反応の発熱によってコンクリート内部ではかなりの温度上昇がある。さらに, マスコンクリートのため熱拡散がおくれ, 中心部と表面部との間に大きな温度差(勾配)を生じ, 内部拘束により表面部に引張応力が作用する。この引張応力が初

期材令時のコンクリートの引張強度ときわめてクリティカルな関係にあり, 何らかの要素により強度の発現が遅れたり, 熱衝撃などが生じた場合には, 断面中心部より水平状のひびわれを発生する。また, 発生した初期ひびわれは時間の経過とともに乾燥収縮により拡大することなどが判明した。

しかしながら, 道路構造物としての健全度という意味からも, ひびわれ深さがある程度の範囲に抑制するように管理すれば, 静的・動的な剛性の低下はそれ程顕著なものとはならないことが確認できた。従って, ひびわれの存在するものについては, ひびわれの拡大防止を目的とした補修を行

い定期的な観察をつづけることを基本とした構造物保全に努めている。

設計・施工上やむを得ずひびわれが発生する場合もあるが、基本的には建設時にひびわれを発生させないことが、構造物の寿命を長くすることにつながる。この点、パイプクーリングなどの方策は、ひびわれ発生防止の効果が十分期待できるものであり、これらのマスコンクリートとしての性格を十分に考慮した入念な施工が強く望まれるものである。

おわりに、この報告は、「P C 梁橋脚の健全度検討委員会」(委員長岡田清京大教授)にて2年間にわたって検討された成果である。委員長をはじめ御尽力をいただいた各委員及び調査実験業務を担当された各幹事諸兄に対し感謝の意を表すものである。

参考文献

- 1) 「P C 梁橋脚の健全度検討委員会報告書」
S 56.3 P C 梁橋脚の健全度検討委員会
- 2) 「マッシュなコンクリート構造物の温度・乾燥収縮応力及びP C 緊張による梁部応力報告書」
S 56.3 阪神高速道路公団
- 3) 「単柱式(T形)橋脚はり(P.C.)の水平ひびわれ調査、原因・構造形式別のひびわれ分類と検査・補修の考え方」 S 50.4 (社)建設コンサルタント協会
- 4) Price, K.M., Edwards, A.D., "Fatigue Strength in Shear of Prestressed Concrete I-Beam" Proceedings, ACI Journal, Vol. 68, No. 4, Apr., pp. 282 ~ 292.
- 5) 「P C 梁橋脚の温度応力について」
加藤幹夫、高橋正克、島田功、第 36 回土木学会年次学術講演会論文集
- 6) 「水平ひびわれを有するP C 橋脚梁の耐荷力について」 石塚幹剛、今井宏典、小野紘一、第 36 回土木学会年次学術講演会論文集
- 7) 「水平ひびわれのあるP C 梁の理論的挙動」
石塚幹剛、嶋村貞夫、篠田淳二、第 36 回土木学会年次学術講演会論文集

8) 「P C T 型単柱橋脚のひびわれの原因と耐荷力」今井宏典、千代憲司、加藤幹夫、第 14 回日本道路会議論文集

9) 「小型模型載荷試験報告書」 S 57.3 阪神高速道路公団

10) 「道路構造物の点検標準」 S 56.3 阪神高速道路公団