

沈下ひびわれ防止によるコンクリート構造物の耐久性向上 (表面締固めバイブレータ使用の標準化の提案)

ENHANCEMENT ON DURABILITY OF CONCRETE STRUCTURES BY PREVENTING CRACKS DUE TO SETTLEMENT —THE PROPOSAL ON STANDARDIZATION OF USAGE OF SURFACE TAMPING VIBRATOR—

國島正彦*・小沢一雅**

By Masahiko KUNISHIMA and Kazumasa OZAWA

In reinforced concrete structures the surface layer has an important role to prevent external attacks which can make causes for corrosion of reinforcing bars. For realizing dense and non-porous concrete on unformed surfaces a surface tamping vibrator has been developed and applied in practical construction procedures. Effects of the equipment has also been verified by some experimental works with checking a ratio of flexural strength of specimen between with and without tamping procedures. According to the practical and experimental results standard usages of the surface tamping vibrator is proposed for surface finishing to enhance durability of concrete structures.

Keywords: surface tamping vibrator, settlement crack, durability, concrete slab, construction procedure

1. 序 論

コンクリート構造物の施工に携わる現場の技術者・作業員・監理者は、いずれの立場であっても耐久的なコンクリート構造物を実現することを目指しているといえよう。しかし、コンクリート構造物の耐久性を向上させるためには、現場における施工過程に注意を払っただけでは不十分である。材料の仕様の選択および耐久性を考慮した設計詳細すなわちかぶりの選択、鋼材の配置方法あるいは部材断面形状寸法等をいかに決定するかも重要である。材料の仕様の決定から設計および施工への過程を総合的に評価して、現実的な工学的判断をすることが耐久的なコンクリート構造物を実現するために必要となる^{1),10)}。

近年、建設時点で想定した時期より早期に劣化が顕在化したコンクリート構造物の事例が報告され、その劣化状況および原因の推定について数多くの調査研究が報告されている^{2)~4)}。コンクリートが多種多様な構造物において、主要な建設材料として使用されてきたことと相まって、劣化の状況も、構造物の種類、部材の種類や位

置および想定できる劣化外力の種類によってさまざまであり、それに伴ってさまざまな劣化の原因が挙げられている。

劣化の状況およびそれによる耐久性低下の要因を大別すると、以下に示すように分類できる¹⁰⁾。

① コンクリート構造物の内部の補強鋼材が発錆しているもの。これによって、鋼材の補強効果が低減したり、コンクリートと鋼材との一体性が失われたりして、設計時点で想定した部材の終局耐力を下回る状態となって、構造物の安全性が保証できなくなる。また、補強鋼材の発錆・膨張によって部材表面付近のコンクリートが剥落落下して、飛来落下による第三者災害を招くおそれも生ずる。

② コンクリート構造物の部材表面あるいは断面に、さまざまな様式(パターン)のひびわれが、設計時点で想定した位置、数量、ひびわれ幅以上に発生しているもの。設計時点で予期した以上のひびわれの発生は、構造物内の補強鋼材の発錆を促進させるとともに、部材表面付近のコンクリートの剥落のおそれが生じ、①に論じた場合と同様の耐久性の低下を生じさせる。さらに、これらのひびわれは、構造物の美観を損なうとともに、それを供用する一般の人々にとって好ましくない不安感(誤解されている場合もある)を与える。

* 正会員 工博 東京大学助教授 工学部土木工学科
(〒113 文京区本郷7-3-1)

** 正会員 工修 東京大学助手 工学部土木工学科(同上)

③ 部材を構成するコンクリートが、溶解、切削、擦り減り、衝撃、打撃、振動等の連続あるいは繰り返される化学的作用や物理的作用で、その一部あるいは全部が消滅したり欠損欠落しているもの。温泉地帯や産業廃棄物埋設地帯等の強酸性土壌環境からの化学作用によって基礎・下部構造が溶解する場合、流水や波浪の物理的作用によって橋脚が切削・欠損したりテトラポットが消失する場合、道路橋コンクリート床版が輪荷重の繰り返し作用によって部分的陥没が生じる場合等の劣化が顕在化すると、構造物の安全な供用という機能を損なうとともに、部材の終局耐力を低下させることになる。

これらの多種多様なコンクリート構造物の耐久性の低下をすべて防止あるいは緩和するためには、材料の選定、設計方法および施工方法にかかわる総合的な建設の過程を考慮した方策を検討する必要がある。

本研究は、構造物の耐久性が低下する部分として、コンクリートを打ち込んで仕上げた表面付近に着目し、その部分に発生する顕在化したひびわれおよび潜在的欠陥による密さきの不足によって生ずる補強鋼材の発錆および繰り返し輪荷重等の物理的作用によるコンクリートの部分的陥没・欠損という劣化現象が生ずる誘因としての沈下ひびわれの影響を定量的に明らかとした。コンクリート打ち込み面の沈下によって生ずる沈下ひびわれを防止あるいは緩和することができ、沈下ひびわれが顕在化しない場合であっても存在する仕上げ面付近の潜在的欠陥を低減できる施工方法、すなわち表面締固めバイブレータを用いた仕上げを今後の標準的な施工方法とすることを提案したものである。

2. 表面締固めバイブレータの開発

(1) 施工現場におけるひびわれ対策の一般的状況^{2)~4)}

コンクリート構造物の現場における施工の過程で、設計計算においてあらかじめ想定されたものと異なるさまざまな種類のひびわれが、しばしば発生するものである。

この種のひびわれ発生が顕在化して、施工管理が劣っていたと問題にされる時期は、コンクリートを打ち込んだ直後から数日後あるいは数週間後の範囲内であることが多い。コンクリートは、圧縮強度に比較して引張り強度が小さく、ひびわれが発生しやすい構造材料であり、ひびわれ発生が直ちに構造物の機能と耐力の著しい低下に結びつくとはいえないにもかかわらず、供用開始前の全設計荷重が作用する前のコンクリート構造物にひびわれが発生することは、なんらかの施工不良が存在したことの証明であるという一般的通念があるのが現状である。したがって、現場技術者は、ひびわれが発生した事実を公にすることを好まない傾向となり、それが施工不

良以外の原因であって、構造物の機能と耐力に悪影響を及ぼさないことを主張することが多くなると思われる。

施工中に発生するひびわれについては、これまでの数多くの調査研究によって、主に以下に示すような原因が挙げられている^{8),9)}。

① プリージング、型わくのばらみ、不等沈下等による沈下に起因するひびわれ

② 水分の蒸発による収縮に起因するひびわれ

③ セメントの水和熱による温度上昇および温度勾配に起因する温度ひびわれ

構造物中で観察できるひびわれ発生箇所は、沈下ひびわれは部材仕上げ表面、温度ひびわれと収縮ひびわれは部材仕上げ表面、部材側面および部材底面であるのが一般的である。

この種のひびわれの発生のメカニズムは、コンクリート打ち込み直後から生ずる内部応力あるいは内部ひずみが、その材令におけるコンクリートの引張り強度あるいは引張り伸び能力を越えた場合に、ひびわれが発生すると考えるのが自然である。

現在のところ、これらの基本的知見をもとに、コンクリート標準示方書には、施工中のひびわれを防止あるいは悪影響のない範囲に制御するための施工方法についての規定、すなわち材料の選定方法、打ち込み方法、仕上げ方法、養生方法等についての注意事項が示されている⁵⁾。

それにもかかわらず、相変わらず施工中のコンクリート構造物に「ひびわれは発生している」のである。

現場技術者にとって、現時点において解決されていない最も基本的な問題点は、この種のひびわれについて、「どのような場合に、どの位置に、どのような幅、長さ、本数、形状、分布状況のひびわれが発生するのか」ということと、示方書に示された規定との関係が不明であることである。すなわち、「なにかをすればひびわれが本当に防止できるのか」ということが不明確なのである。

これは、この種のひびわれが発生するという現象に影響を及ぼす要因が多岐にわたるため、これを定量的に把握して表示するということが不十分であり、ひびわれの原因と発生との因果関係を解明してその対策技術を確立するということを諦めている場合が多いためであると思われる。

温度上昇や温度勾配による温度応力および乾燥収縮による収縮応力の解析を数学的に解明することが重要であることは当然のことである。しかし、解析の前提としたコンクリート構造物の均一性が、実構造物で著しく異なっているような場合には、その解析結果だけからは有効なひびわれ防止対策を提示することができないことも当然である。コンクリート部材の一部が他の部分に比較

して、強度、伸び能力、空隙の状態および密実さ等が著しく異なっている場合には、その部分は、数学的解析におけるひびわれ発生条件以下であっても、予想外の弱点としてひびわれ発生の起点となる可能性がある。

これらの弱点が生じる可能性があることは、現在のコンクリート工学に携わる研究者も技術者も十分に認識していると思われる。しかし、それを施工方法に起因していると限定した場合に、標準的努力をもってする普通の施工方法でも弱点が生じるのか、標準以下の劣った施工方法の場合のみ弱点が生じるのか、非常に優れた施工方法によれば、これらの弱点が防止できるのか、ということが不明なのである。したがって、示方書では、ひびわれを防止するのに有効であると思われる個々の要因についての注意事項を、相互に関連づけずに羅列するにとどまらざるを得ない状況となる。その結果、施工中のひびわれ発生は、いかなる場合も好ましくない現象であり、公にしたいくないという非合理的な考え方が現場を支配することも起こり得ると考えられる。

コンクリート構造物に携わる現場の発注者側および受注者側の技術者にとって、コンクリート自体の品質について注意を払うことは、全体の工事にかかわる仕事量のごく一部分である。品質、コスト、工程、安全等についての総合的努力が必要な多忙な現場技術者のために、普通の施工努力で容易に理解・実行できる施工方法を体系的に提示・規定することが、一般の数多くのコンクリート構造物の品質を全体的に改善・向上させるために必要といえる¹⁾。

(2) プレストレストコンクリートT桁道路橋のひびわれ発生例

a) 工事概要

群馬県桐生市付近の渡良瀬川を渡河する、支間40mのプレストレストコンクリート（以下PCと称する）T形単純桁橋上部工を5径間にわたって製作架設する工事において、主桁上フランジ表面に発生した沈下ひびわれに対処しなければならない問題に直面した。上部工の構造一般図、鉄筋・PC鋼材配置形状等は、図-1に示すようであり、わが国の全国各地で一般的に採用されている建設省標準設計タイプのPC橋梁である。

施工にあたっては、架橋位置付近の主桁製作ヤードに4基の製作台を設け、1か月間に約8本の製作を目標に合計40本の主桁を製作架設した。

コンクリートの施工は、表-1に示す仕様と配合のレデーミクストコンクリートを現場までトラックアジテータによって運搬し、コンクリートバケットを用いて、図-2に示す要領でコンクリートを打ち込んだ。コンクリートの締固めは、直径60mmの高周波棒状バイブレータを使用し、主桁上フランジの表面仕上げは、打ち込み

直後に木ごてで荒仕上げを行い、15～30分経過後に金ゴテで仕上げ、柔らかい刷毛を用いてハケ引きを行った。養生は、主桁上フランジ表面に、市販のポリウレタン製養生マットを敷き、これに適宜散水して、約2日間にわたって湿潤養生した。

これらの作業は、この種のPC桁を製作ヤードで製作する場合の標準的な施工方法と考えられるのである。

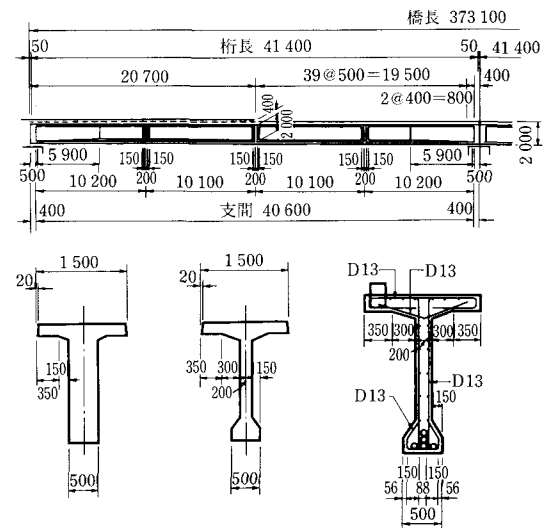


図-1 PC桁の構造一般図、鉄筋・PC鋼材配置

表-1 コンクリートの配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				
					水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
25	8	4	37.5	32.7	172	早強セメント 459	551	1 150	AE減水剤 1.14

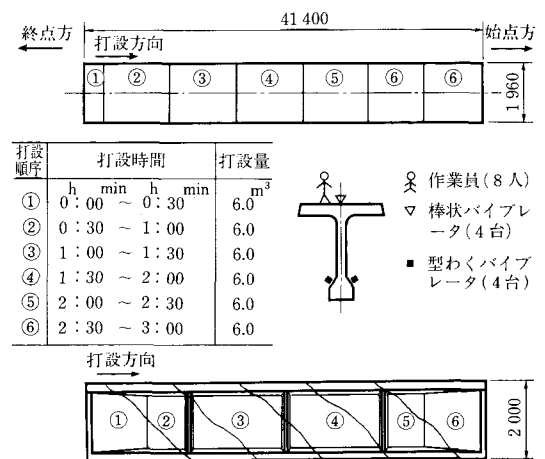
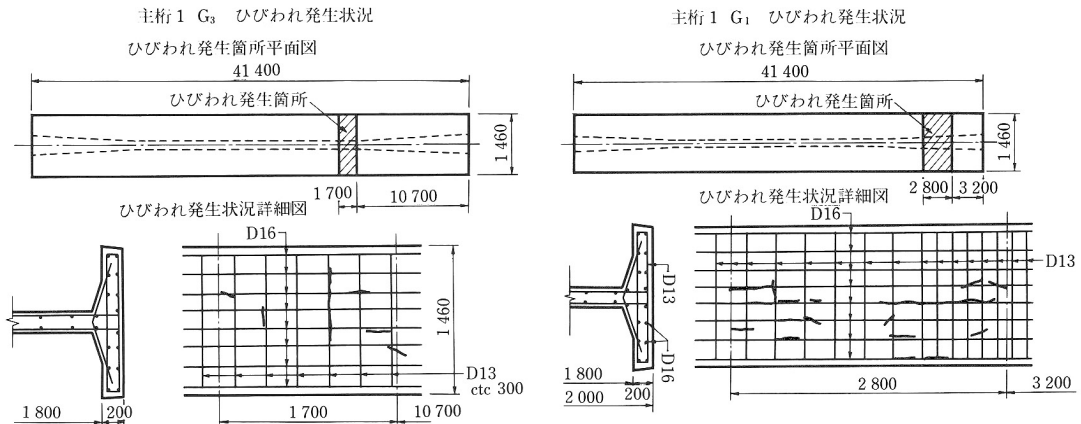


図-2 コンクリート施工要領図



図—3 ひびわれ発生状況

b) ひびわれの発生状況

主桁製作の開始後、当初の5本の主桁について各施工段階で検査を行っているが、2日間のコンクリートの養生を終了して型枠を取り外した時点で、2本の主桁上フランジの表面にひびわれが発生しているのを発見した。

ひびわれ発生状況は、図—3に示すようであって、上フランジ表面の鉄筋に沿って、ひびわれ幅が、約0.2 mm、ひびわれ長が、数cm～十数cmのひびわれが、幅約1.5 m、長さ約41 mの上フランジ全表面のごく一部に発生したのである。それと同時に、上フランジ側面に、上側鉄筋からフランジ表面に至る、ひびわれ幅0.1 mm以下でひびわれ長が数cmの微細なひびわれも認められた。

わが国の一般的状況では、この程度のひびわれが構造物の安全性や耐久性の低下に著しい悪影響を与えると判断されることはまれであると考えられる。したがって、その対策は、何もしないか、丁寧な場合はエポキシ樹脂を塗布する等の事後処理方法が採用されるにとどまり、「今後は一層注意深い入念な施工をする」という精神規

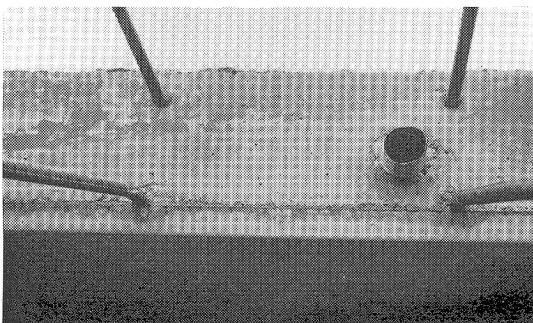
定を確かめるだけで工事を続行することが大部分であると思われる。しかし、この現場では幸か不幸か、発注者側の監督官から、ひびわれ発生原因の解明と防止とを強く要求されたのである。

c) ひびわれ発生原因の検討と対策

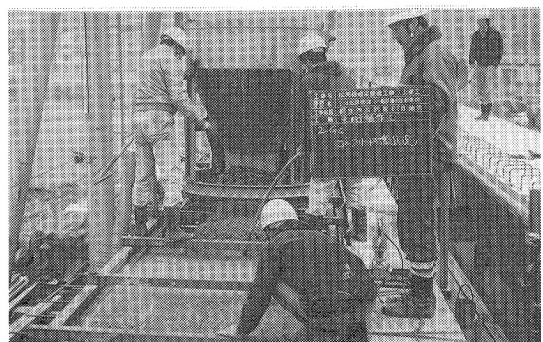
鉄筋に沿った部材表面部のひびわれ発生状況と、既往の施工報告や研究報告を参照すれば、このひびわれが、コンクリートの乾燥収縮による収縮応力、セメントの水和熱に起因する温度応力とコンクリートの打ち込み直後の沈降に伴う沈下ひびわれ発生のおそれ等の要因が複合して発生したという説明は、容易に行うことができる。

しかし、「なぜ表面の一部だけに、しかも2本の主桁だけに発生したのか」「今後いかなる具体的対策を講ずるのか」という問いかけに対して、「その部分が、たまたま悪影響要因が大きかったからである」という説明では、監督者が満足する回答にならなかった。

困り果てて、ひびわれの発生した主桁を入念に観察していたときに、写真—1に示すように、部材厚さ20 cmの上フランジ側面の表層側5～10 cm程度の範囲のコンクリートの色調が、型枠材料や剝離剤が同様であるに



写真—1 上フランジ側面の色調



写真—2 コンクリートの打込み状況

もかわらず、他の部分と異なっていることに気づいたのである。その時点で、上フランジ表面付近のコンクリートに、十分に締固められた部分と幾分締固めが不十分で密実でない部分が混在する品質のばらつきがあったのではないかという仮説をたてた。その仮説に基づいて、コンクリートの打ち込み・締固め作業について、特に上フランジの施工方法の作業手順に着目して検討すると、以下に示す事項が明らかとなった（写真-2参照）。

① 上フランジのような部材厚さが小さくて面積の大きなスラブ部材では、バケツから排出されたフレッシュコンクリートは部材厚さより大きな高さを有する山状となりがちである。

② このコンクリートは、部材厚さより長い振動部をもつ棒状バイブレータを作用させることによって、横方向へ容易に移動する。

③ 所定の基準高さにコンクリート表面を仕上げるために、スラブ部材の表層数 cm から十数 cm の部分へのコンクリートの供給は、作業員が人力によってスコップやコテによって敷き広げられることが多くなる。

④ その後、棒状バイブレータの振動締固めの影響を受けずに仕上げ作業が行われてしまい、締固めが十分に行われない部分が一部に生ずる可能性がある。

以上を要するに、締固めが十分行われたかどうかを定量的に判断する方法がまだないうえに、上フランジのような部材厚さが小さく広い面積を有するスラブ部材を締固める場合に、普通作業員と棒状バイブレータという締固め器具を組み合わせる標準的な施工努力をするだけでは、部分的な締固め不足すなわち不均一な締固め結果が容易に発生する可能性があると考えられるのである。

この問題点を解決するために効果的な具体的方策の1つは、スラブ部材の表面部付近に均一な締固めを実現する「道具」を開発して使用することである。すなわち、棒状バイブレータと形状が異なり、広い表面積全体を均一に締固めることのできる「表面締固めバイブレータ」が必要なのである。これは、同様の部材形状寸法を有する舗装コンクリートの施工には、専用のコンクリートフィニッシャーという機械を使用することが標準となっていることを鑑みても自然な考え方といえよう。

（3）表面締固めバイブレータの仕様と効果

現場で考案して設計製作した表面締固めバイブレータは、写真-3に示すようであり、金網（エキスパンドメタル）をL形鋼のフレームに溶接し、これに小型佐管用バイブレータ（一般のレンタル機械）を取り付けたものである。

通常の木ゴテによる表面仕上げが終了した後、30分程度経過してから表面締固めバイブレータを使用して再度締固め、金ゴテによる仕上げ作業とハケ引きを行った。

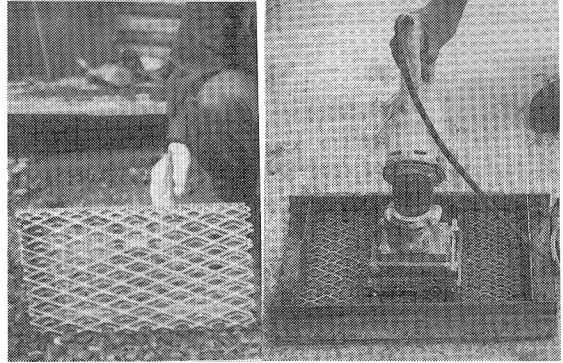


写真-3 表面締固めバイブレータ

その結果、新しい「道具」を使用することを標準とすることだけを作業手順として追加することによって、それ以降に製作したPC桁の上フランジ表面に同様のひびわれを発生することを防止することができたのである。また、上フランジ側面の色むらも生じなくなったのである。

この表面締固めバイブレータの特徴と効果を整理すると、以下に示すようである。

① 表面締固めバイブレータは、部材表面部を平面的に振動締固めることができる。このバイブレータを使用した箇所は、コンクリート表面に金網格子による文様の跡が残るので、それを確認することによって、表面部が均一に締固め作業が行われたかどうかを容易に確認できる。

② 表面締固めバイブレータを、コンクリート打ち込み終了後の適切な時期に使用することは、均一な締固め結果が得られると同時に、沈下ひびわれを防止するのに効果があるタンピングの効果を期待できる。すなわち、作業員が金ゴテで強い力を加えて仕上げ作業を行わなくても同様の効果を期待できる。

③ コンクリート打ち込み後相当の時間が経過しても、表面締固めバイブレータを使用すると、滑らかなコテ仕上げに必要なモルタルを表面に浮き上がらせることができるので、早強ポルトランドセメントを使用した場合や単位水量の小さいコンクリートを用いた場合の仕上げ作業を余裕をもって行うことができる。

道路橋のコンクリート床版は、著しいひびわれの進展や床版の抜け落ちが生ずる等の耐久性低下の顕在化が、しばしば報告される部材である。その劣化機構の説明の1つとして、輪荷重が作用する以前の施工中に発生するひびわれあるいは何らかの内部の欠陥が、供用後の繰返し輪荷重の影響とひびわれ中の水分のくさび作用が相まって構造的欠陥に結びつくという研究報告もある^{3),4)}。しかし、コンクリート標準示方書に規定されているにも

かわかわらず、これまで実際の現場では仕上げ面の締固めと沈下ひびわれに対する配慮という観点からは、必ずしも十分な対応がされてこなかったと思われる。施工中に外気に広く曝されるスラブ部材の表面部付近を「均一に締固め」「タンピング」できる「表面締固めパイプレータ」という「機械器具」を使用することを標準とすることは、コンクリート構造物特にスラブ部材の耐久性を向上させるために有効な「具体的方策」であると考えられる。

3. 沈下ひびわれの定量化に関する実験的研究^{8)~10)}

(1) 概 論

沈下ひびわれは、ブリージングに伴いコンクリート上面が沈下する際、表面付近に存在する鉄筋等の影響により沈下が不均等になり、鉄筋上面のコンクリートに引張応力が働いて生じる。この沈下ひびわれが、コンクリート構造物特に外気に広い面積を曝されるスラブ部材の耐久性に大きな影響を与える要因の1つであることは論をまたない。コンクリート標準示方書施工編においても、沈下ひびわれが発生した場合は、タンピングを行うことによって修復しなければならないことが規定されている。しかし、実際のコンクリート構造物の施工にあたっては、沈下ひびわれの影響は注目されているが、具体的な対応は十分ではなかったのが現状であったと思われる。

スラブ部材の表面に施工中に発生するひびわれは、現場技術者が悩まされることが多いものである。しかし、そのひびわれの発生する原因が、沈下ひびわれの影響とともに乾燥収縮や温度応力等の要因が複合したものであると考えられることから、いかなる具体的な対策を講じることが、それぞれのひびわれ発生を防止するのに効果的なのかを定量的に明らかにしていないのが現状といえよう。すなわち、コンクリート構造物のひびわれについての研究や調査統計資料が蓄積されても、ひびわれ幅のほか、深さ、長さ、本数、形状および分布状態等についての共通した定量的な表示が十分に確立されておらず、これらの諸元をどのように数量化したらよいかについての研究が少ないのである。

本研究では、沈下ひびわれを定量化する手法として、その影響を大きく取り入れることができ、供試体の断面に沈下ひびわれの発生過程を容易に再現できる矩形供試体の曲げ強度試験を採用することとした。そして、表面締固めパイプレータによる均一な締固めとタンピングの沈下ひびわれに対する効果を定量的に明らかにしようとした。さらに、実構造物の上フランジ表面全面ではなく、一部の領域にひびわれが発生するという状況から推定できる、以下に示す3つの状態が存在するのではないかと

いう考え方を検証しようとした。

① 沈下ひびわれの影響によって、ひびわれが発生する。

② 沈下ひびわれの影響によって、タンピングを行わなくてもひびわれは発生しないが部材仕上がり表面部付近に何らかの潜在的欠陥がある。

③ 沈下ひびわれの影響は、タンピングによって修復されている。

沈下ひびわれの発生に影響を及ぼす要因は、①材料およびコンクリートの配合に影響されるコンクリートのブリージング(沈下量)、②コンクリートの打ち込み高さ、③かぶり厚さ、④鉄筋の剛性、等があり、それらの要因の影響の程度についての実験も行ったが、本論文では、タンピングの効果に着目した実験結果について整理したものである。

(2) 実験概要

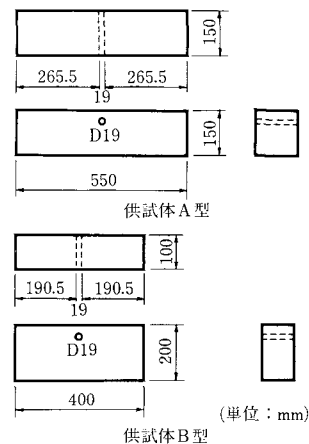
a) 定量化の指標

沈下ひびわれの影響を定量化する指標として、沈下ひびわれの影響を受ける供試体の曲げ強度を、鉄筋を配置しない沈下ひびわれの影響を受けない供試体(普通供試体と称す)の曲げ強度で除した値(曲げ強度比と称す)を用いた。

b) 供試体の形状寸法および作製方法

供試体の形状寸法は、図—4に示すように、幅15 cm、高さ25 cm、長さ55 cmとしたA型供試体および幅10 cm、高さ20 cm、長さ40 cmとしたB型供試体とし、所定の位置に直径19 mmの横ふし異形鉄筋を配置した。

鉄筋を配置した面をコンクリートの打ち込み面とし、棒状パイプレータによる一層締固めを行った。一部の供試体は、コンクリート打ち込み後2時間でタンピングを行った。7日間20°C水中養生した後、図—5に示すように、コンクリート打ち込み面を引張縁側として、B型



図—4 供試体の形状寸法

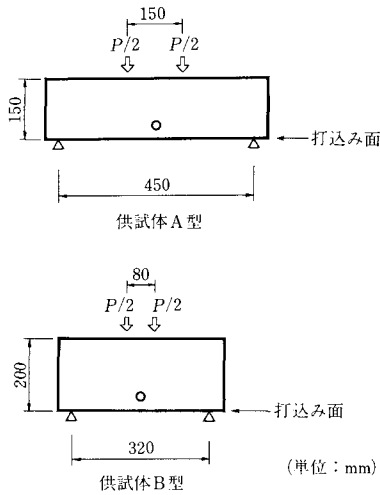


図-5 曲げ強度試験の荷重方法

表-2 実験に使用したコンクリートの示方配合

No.	MS (cm)	Slump (cm)	Air (%)	W/C	s/a	単位量 (kg/m ³)				
						W	C	S	G	Ad
1	15	8±1	5±1	65	50	167	257	913	916	0.642
2	15	5±1	5±1	65	50	159	245	921	932	0.612
3	15	15±1	5±1	65	50	180	277	880	890	0.692

供試体の場合は、スパン 32 cm，荷重幅 8 cm，その他の規定は JIS A 1106 の規定に従って曲げ強度試験を行った。

c) コンクリートの配合

コンクリートは、表-2 に示す流動性（スランプ）を変化させた 3 種類の配合を使用した。セメントは普通ポルトランドセメント、骨材は、富士川産の川砂および川砂利、水は、水道水、混和剤は、標準型 AE 減水剤ポゾリス No. 70 を使用した。練りませには、可傾式ミキサーを用いた。

d) 実験方法

本実験では、沈下ひびわれに対する鉄筋のかぶり厚さおよび単位水量の影響因子とタンピングの影響とを組み合わせ定量的に評価することとし、以下に示す 2 種類について実験を行った。

① 鉄筋のかぶり厚さを、4~8 cm の 6 種類に変化させ、水セメント比を 65%，スランプを 8 cm（配合 No.1）で一定として B 型供試体を使用して、一部の供試体（かぶり厚さ 7 cm）については、沈下ひびわれが発生しなくてもコンクリート打ち込み後 2 時間でタンピングを行った場合に効果を調べたもの。

② 単位水量が、159 および 180 kg/m³（配合 No. 2, 3）の 2 種類の配合を使用し、水セメント比 65%，鉄筋のかぶり厚さは 3 cm と一定にして A 型供試体を使用し、コンクリート打ち込み後 2 時間でタンピングを行った場

表-3 鉄筋のかぶり厚と曲げ強度比の関係

(W/C=55%, スランプ 8cm)

供試体 No.	A [かぶり厚] (cm)	B (kg/cm ²)	C (kg/cm ²)	D (kg/cm ²)
1	4	27.2 (0.72)	38.0	204
2	5	34.6 (0.83)	41.8	224
3	6	35.2 (0.85)	41.4	208
4	6	38.2 (0.92)	41.4	208
5	7	35.3 (0.90)	39.2	198
6	7	35.8 (0.99)	36.0	174
7	7.5	34.6 (0.88)	39.2	198
8	8	35.4 (0.90)	39.2	198

注) 供試体 No.4~8 は沈下ひびわれが発生しなかった。また、供試体 No.6 はコンクリート打設 2 時間後にタンピングを行った。

表-4 曲げ強度試験結果

(W/C=65%, 鉄筋のかぶり厚 3cm)

供試体 No.	A [単位水量] (kg/m ³)	B (kg/cm ²)	C (kg/cm ²)
1	159	19.9 (0.70)	28.3
2	159	27.5 (0.97)	28.3
3	180	18.8 (0.62)	30.4
4	180	29.9 (0.98)	30.4

注) 供試体 No.2, 4 は、コンクリート打設 2 時間後にタンピングを行った。

- A. 影響因子
- B. 鉄筋入り、あるいは亀裂入り供試体の曲げ強度 (kg/cm²)
- C. 普通供試体の曲げ強度 (kg/cm²)
- D. 曲げ強度試験時の圧縮強度 (kg/cm²)

曲げ強度値の後の () 内の値は、普通供試体の曲げ強度との比をとったものである。

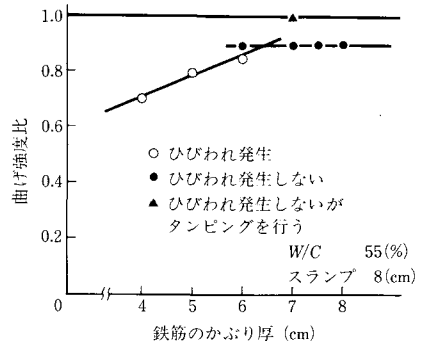


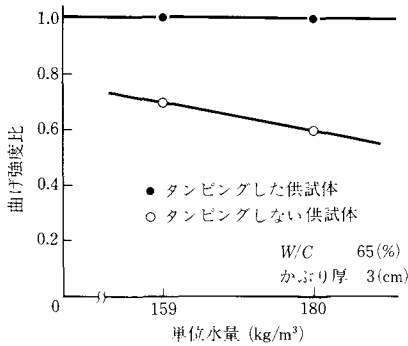
図-6 鉄筋のかぶり厚と曲げ強度比の関係

合の効果を調べたもの。

(3) 実験結果および考察

a) タンピングの効果

タンピングに関する曲げ強度試験の結果を整理すると、表-3 および 4、図-6 および 7 に示すようである。表-4 および図-7 に示すように、沈下ひびわれの発生により単位水量 159 kg/m³ で約 30%，180 kg/m³ で約 40% の曲げ強度の低下が認められるが、タンピングを



図一七 単位水量と曲げ強度比の関係

行うことにより、それぞれの曲げ強度比が、0.97 および 0.98 と、普通供試体の曲げ強度とほぼ変わらない値を示している。これは、タンピングによって、沈下ひびわれがほぼ完全に修復されたことを意味しており、実構造物におけるタンピング作業の重要性と効果の程度を知ることができる。また、表一三および図一六をみると、かぶり厚さ 7 cm の場合、沈下ひびわれが発生しなくても、約 10 % の曲げ強度の低下が認められ、それをタンピングを行うことによって曲げ強度比が、0.99 にまで回復させることができるというきわめて興味ある結果が得られたのである。これは、目視できる沈下ひびわれが発生しなくても、コンクリート打ち込み面の沈下が鉄筋等によって妨げられる場合には、コンクリートに潜在的内部欠陥が発生していると考えられ、コンクリート表面に沈下ひびわれが発生しなくても、タンピングを行うことは、この潜在的内部欠陥を解消するために有効であることを示している。

この実験結果から、前章で述べた PC 桁上スラブ表面のひびわれ性状の特徴、すなわち部分的にひびわれが発生したことで、表面締固めバイブレータの使用による均一な締固めとタンピングの作業が、ひびわれを防止することに効果があったと判断しても大きな誤りではないと考えられる。

b) 沈下ひびわれの耐久性に及ぼす影響

施工中のスラブ部材表面部における、コンクリートの若材令時のひびわれは、乾燥収縮と温度応力の影響に沈下ひびわれの因子が複合して発生すると考えるのが自然である。沈下ひびわれが発生しないからといってタンピングを行わない場合、曲げ強度の約 10 % に相当する 3 ~ 4 kg/cm² 程度の強度低下がみられ (表一三参照)、潜在的内部欠陥が生じている可能性がある。これに、収縮応力と温度応力を合計した引張応力と若材令時の引張強度 (10 数 kg/cm²) との関係がひびわれ発生に影響すると考えられるので無視できない影響要因といえる。

コンクリートの曲げ強度比の低下は、予備実験の結果

より、ひびわれ深さの影響が支配的であり、ひびわれによる断面減少が曲げ強度を低下させる大きな原因となっていると考えてよいことが明らかになっている。したがって、曲げ強度比の低下は、鉄筋上部のかぶりの減少を意味し、耐久性にとって重要な鉄筋を保護するかぶりコンクリートの機能の減少につながるものと考えられる⁸⁾。

コンクリート構造物の耐久性に及ぼす材料、設計詳細および施工方法に関するさまざまな要因を、総合的かつ定量的に取り扱った「コンクリート構造物の耐久設計指針 (試案)」が土木学会より最近刊行されている⁶⁾。そこで、曲げ強度が約 10 % 低下することを圧縮強度が低下する値に換算し、圧縮強度の低下を水セメント比の変化量に換算する試算を行ってみた。その結果、曲げ強度が 10 % 低下した場合は、水セメント比が 6 ~ 7 % 程度大きくなること、20 % 低下した場合は、12 ~ 13 % 程度大きくなるという計算結果が得られるのである。これは、「コンクリート構造物の耐久設計指針 (試案)」において、タンピング作業を行わない場合は、耐久性にとって水セメント比が 5 ~ 10 % 大きいことと同様の悪影響があると評価していることが、ほぼ妥当であることを裏付けているものである。もちろん、鉄筋の腐食を念頭においてコンクリート構造物の耐久性を論じる場合に、曲げ強度比が小さくなるのが、他の影響因子と比較してどの程度の悪影響を及ぼすかについて不明な事項も多い。しかし、これまで比較的注目されることがなく、実際の施工にあたって無視されがちであったタンピング作業の効果が定量的に明らかとなり、安価な道具と軽微な労力によって均一で欠陥の少ないコンクリートを実構造物で実現できたことを考慮すれば、タンピング作業の重要性を強調して実施することが、コンクリート構造物特にスラブ構造物の耐久性を向上させる有効な手段の 1 つと考えられるのである。

4. 結 論

沈下ひびわれは、コンクリート構造物、特に外気に広い面積が曝されるスラブ部材の耐久性に大きな影響を及ぼす要因の 1 つである。スラブ部材表面部を均一に締固め、容易にタンピングを行える表面締固めバイブレータを開発し、有効な沈下ひびわれ対策として現場で実施するとともに、その効果を定量的に確認した。

本研究の範囲内で、以下に示すことがいえるものと考えられる。

(1) コンクリートの打ち込み作業にあたっては、部材各部を均一に締固めることが重要である。しかし、部材厚さが小さく広い面積を有するスラブ部材に、棒状バイブレータで締固めてコテ仕上げをするという作業手順

を実施すると、スラブ表面部付近に、相当の締固めの不均一が生じる可能性が大きい。

(2) スラブ表面部付近に、均一な締固めを実現するためには、平面的な振動部を有する表面締固めパイプレータのような器具を使用することが有効である。

(3) 表面締固めパイプレータを用いて、コンクリート打ち込み後の適当な時期に締固め作業を行うことによって、均一な締固めと同時にタンピングを行うことが容易にできる。

(4) タンピングを省略すると、施工直後の沈下ひびわれが発生しなくても、スラブ表面部付近コンクリートに潜在的内部欠陥が生ずる可能性がある。

(5) 潜在的内部欠陥の影響の程度は、コンクリートの曲げひびわれ強度が、約10%低下することに相当する場合がある。この、3~4 kg/cm²程度の強度低下は、施工直後の若材令時のコンクリートが、乾燥収縮や温度応力と相まって発生するひびわれの特性に、無視できない影響があると考えられる。

(6) 沈下ひびわれが顕在化したスラブ部材(部材厚さ15~20 cm程度)では、鉄筋上部のコンクリートの曲げひびわれ強度が、20~40%低下する場合がある。

(7) コンクリートの曲げ強度比の低下は、主に沈下ひびわれの深さの影響により、かぶりコンクリートの断面減少を意味するものと考えられるが、スラブ部材のタンピングの効果の程度を相対的評価するために、曲げ強度の改善を圧縮強度の変化として算定し、これを水セメント比の変化に換算すると、沈下ひびわれが発生しない場合でも、水セメント比の6~7%程度の変化、沈下ひびわれが発生した場合は、12~13%以上の変化に相当すると考えられる。したがって、土木学会「コンクリート構造物の耐久設計指針(試案)」において、タンピングを行わない場合は、水セメント比が、5~10%大きくなったことと同様の悪影響があると評価していることは、本実験の範囲内と同様の断面形状の部材では、ほぼ妥当であると思われる。

本論文は、筆頭著者が、昭和63年10月付けで、東京

大学より工学博士の学位を授与された学位論文の内容の一部である。

本研究を進めるにあたり、東京大学工学部 岡村 甫教授に懇切丁寧なご助言とご指導を賜りましたことを厚く御礼申し上げます。また、現場において有益なご示唆と多大なるご協力を頂きました。群馬大学工学部 辻 幸和教授、清水建設(株)、群馬県桐生土木事務所の方々に心より感謝いたします。

参考文献

- 1) 國島正彦・岡村 甫：総合評価に基づくコンクリート構造物の耐久性設計、コンクリート構造物の寿命予測と耐久性設計に関するシンポジウム論文集、1988年4月。
- 2) 小林茂敏・河野広隆・丹野 弘：耐久性の優れたコンクリート構造物—道路構造物—、土木学会論文集、第378号/V-6、1987年2月。
- 3) 豊福俊泰・西田 巖・藤田栄三・寺井幸吉：鋼道路橋RC床版のひびわれと膨張コンクリートによるその改善に関する研究、コンクリート工学、Vol.27, No.9, pp.91~106, 1989年9月。
- 4) 後藤祐司・高橋 隆：鋼橋床版の破損原因とその補修・補強ならびに防止対策、日本道路公団試験所、試験所報告、昭和57年度、pp.39~56, 1983年12月。
- 5) 昭和61年制定コンクリート標準示方書施工編、土木学会、昭和61年10月。
- 6) コンクリート構造物の耐久設計指針(試案)、コンクリート・ライブラリー、第65号、土木学会、平成元年8月。
- 7) 國島正彦・小沢一雅・山中克夫：設計レベルが異なるコンクリート部材の耐久性能の評価、土木学会第43回年次学術講演会講演概要集、第5部、pp.188~189, 1988年10月。
- 8) 小沢一雅：沈下ひびわれの定量化に関する研究、東京大学工学部土木工学科卒業論文、1984年。
- 9) 下村 匠：沈下および収縮によるかぶりコンクリートの内部欠陥に対する時系列評価、東京大学工学部土木工学科修士論文、平成2年3月。
- 10) 國島正彦：密実なコンクリート構造物を実現する設計・施工方法に関する研究、東京大学工学部土木工学科博士論文、昭和63年10月。

(1990.4.17・受付)