

論文

[1158] 既存鉄筋コンクリート橋の劣化・損傷について

正会員 ○今井富士夫 (宮崎大学土木工学科)
 正会員 中沢 隆雄 (宮崎大学土木工学科)
 枝元 宏彰 (国土開発コンサルタント)
 赤木 正見 (宮崎大学土木工学科)

1. はじめに

近年、構造物の耐久性設計の必要性が認識され、耐用年数の向上が重要な課題となっている。耐久性を向上させるには、既存構造物の維持管理技術ならびに新規構造物の耐久性設計・施工技法の確立が必要となるが、耐久性を検討する過程で最も基本的な要因、すなわち既存構造物の劣化や損傷状況の調査ならびにそれらの要因についての研究は不可欠であると言えよう。

本報告は、著者らがこれまでに行ってきた鉄筋コンクリート橋を中心としたコンクリート構造物の劣化や損傷の実態調査の結果を基にして、コンクリートの中性化や塩分浸透状況についてまとめるとともに、竣工から51年経過した鉄筋コンクリート橋の静的・動的試験から得られた構造性状についても併せ報告するものである。

2. 調査の概要

調査対象とした構造物の概要を表-1に示す。これらの構造物はすべて鉄筋コンクリート構造で、昭和2年から昭和41年にかけて竣工されており、調査時点での経過年数は24年から63年に亘っている。

なお、構造物EとFの材料試験は、それらの床版について行った。

3. ひびわれ調査

ひびわれ調査は構造物AとDを除く、5つのものについて行われた。

床版についてみれば、構造物B、E、Gに過大な損傷がみられ、それぞれのひびわれが集中しているパネルでのひびわれ密度は、 $5\text{m}/\text{m}^2 \sim 8\text{m}/\text{m}^2$ となっており、遊離石灰も析出している。これらのひびわれに基づく損傷度をランク評価 [1] すると、ランク3~5に相当する。また、構造物Eとほぼ同一年次に竣工され、しかも同じ鉄筋コンクリートT桁橋である構造物Fの床版のひびわれ密度は $0.5\text{m}/\text{m}^2$ 程度である。これは、両者の環境条件によるものと考えられる。構造物Eが河口からわずか200mの所に位置するのに対し、構造物Fは500m離れている。次いで、経過

表-1 調査対象構造物

構造物	竣工年 (昭和)	調査時点での経過年数	構造物の種類	所在地
A	28年	28年	鉄筋コンクリート橋脚	宮崎県宮崎市
B	25年	25年	鉄筋コンクリート床版(*1)	宮崎県宮崎市
C	41年	24年	鉄筋コンクリート棧橋	宮崎県日向市
D	2年	63年	鉄筋コンクリートT桁橋	鹿児島県鹿屋市
E	13年	53年	鉄筋コンクリートT桁橋	宮崎県宮崎市
F	15年	51年	鉄筋コンクリートT桁橋	宮崎県日南市
G	30年	36年	鉄筋コンクリート床版(*1)	宮崎県日南市

注) *1はプレートガード橋の床版である。

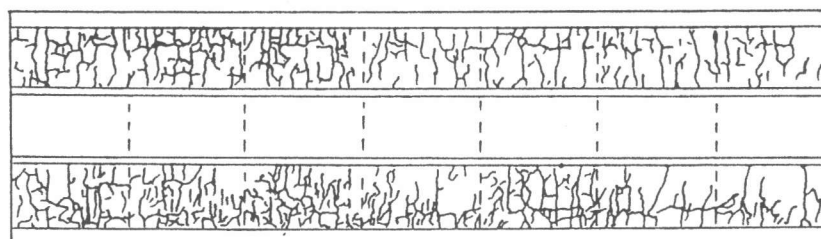


図-1 構造物Bのひびわれ発生状況

年数と構造形態の関係について考察すれば、プレートガーダ橋の床版（G）が鉄筋コンクリートT桁橋（F）に比べ、損傷が早く進行しており、これは主桁の桁高差と桁の剛度の違いに起因するのではないと思われる。

代表的なひびわれ発生事例として、最も損傷を受けている構造物Bを図-1に示す。なお、幅員中央部は、ガス管などの設置でひびわれの観察はできなかった。

鉄筋コンクリートT桁橋の主桁（構造物EとF）において、構造物Eでは多数の曲げひびわれが生じているのに対して、構造物Fにはそれほど発生していなかった。しかしながら、主鉄筋に沿うひびわれは構造物Fに多く観察され、そのひびわれ幅も0.5mm～2mmと大きかった。

4 材料試験

4.1 コンクリートの強度

それぞれの構造物から直径10cmのコアを採取し、高さがほぼ20cmとなるよう成形した後に、圧縮試験を行い、圧縮強度や弾性係数を測定した。いくつかの構造物においては打撃法や超音波法の非破壊試験ならびに日本建築学会で示されている両者の複合法〔2〕による圧縮強度の推定も行った。これらの各構造物の平均値および吸水率を表-2に示す。コンクリートの強度は97kgf/cm²～421kgf/cm²と各構造物で大きく異なっている。打撃法と超音波法による推定圧縮強度は実強度に近い結果も見受けられるが、一般的に実強度との差異が大きく、推定精度は低い。

表-2 コンクリートの圧縮強度、弾性係数および吸水率

構造物	圧縮強度(kgf/cm ²)				弾性係数 (×10 ⁵ kgf/cm ²)	吸水率 (%)
	圧縮試験	打撃法	超音波法	複合法		
A	162	-	-	-	1.51	6.6
B	137	-	-	-	1.85	7.5
C	421	321	329	535	3.40	5.5
D	97	168	-	-	0.59	8.1
E	203	188	297	260	2.16	5.9
F	-	275	-	-	-	4.9
G	-	-	-	-	-	5.7

図-2に弾性係数と圧縮強度との関係を示す。

図中の実線はコンクリート標準示方書〔3、4〕に規定されたものである。圧縮強度に対する弾性係数についての示方書の規定は、実弾性係数よりも高めに評価していること

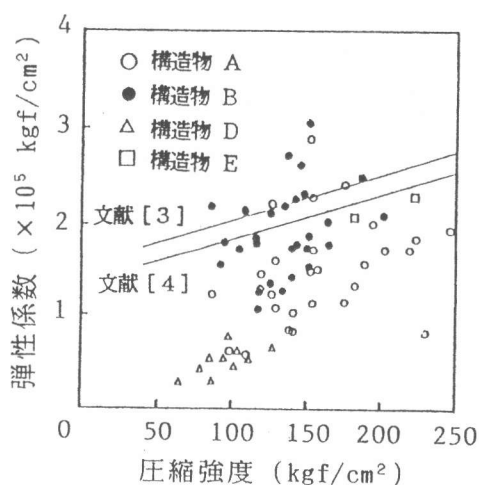


図-2 圧縮強度と弾性係数

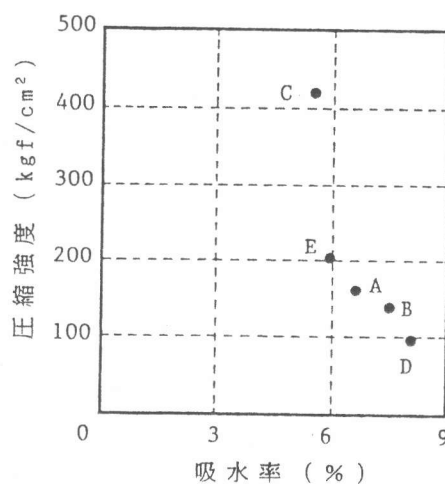


図-3 圧縮強度と吸水率

になる。各構造物の材料試験結果のデータはバラツキが大きいため、以下の考察では、各構造物のデータを整理し、それらの平均値をその構造物の特性値として取り扱うことにする。図-3は圧縮強度と吸水率の関係を示したものである。吸水率の増大に伴って、圧縮強度は急激な低下を示しており、吸水率はコンクリートの強度を決定する重要な要因であることが確認できる。

4. 2 コンクリートの配合推定

各構造物の設計当時の配合推定試験を文献[4]の方法で行った。構造物別の各単位量を示した表-3から明らかなように、推定水セメント比は70%を超えるものが多く見受けられ、なかには100%を超過したものがある。このことから、水セメント比を良く推定できたとは言いがたい。この理由として、使用材料の性質が不明であることや単位水量はコンクリート中の水分の移動がコンクリートの環境によって異なるなどの種々の要因が複雑に連成するため、直接推定することは困難なようである。

表-3 コンクリートの配合推定結果

構造物	単位量 (kg/m ³)			水セメント比 (%)
	セメント	骨材	水	
A	232	1838	193	83
B	270	1893	157	58
C	213	2012	143	67
D	217	2036	153	71
E	252	1893	163	65
F	143	2026	147	103
G	224	1793	204	91

表-4 コンクリートの中性化深さ

構造物	平均中性化深さ (cm)	最大中性化深さ (cm)	中性化速度係数
A	1.7	5.7	0.338
B	3.4	7.6	0.678
C	1.5	2.5	0.311
D	8.4	10.1	1.060
E	3.7	5.6	0.512
F	2.7	4.0	0.371
G	3.3	6.0	0.544

4. 3 コンクリートの中性化深さ

構造物から抜き取った、直径5cmおよび10cmのコア供試体の割裂面にフェノールフタレイン1%溶液を噴霧して中性化深さを測定した。構造物別の平均中性化深さ、最大中性化深さおよび中性化速度係数(=平均中性化深さ/√経過年数)を表-4に示す。中性化速度係数とひびわれ発生状況とを比較した結果、ひびわれ密度が大きいもの(構造物B、EやG)ほど、中性化速度係数は高い値となっている。このことから、ひびわれはコンクリートの中性化に影響するものと考えられる。

図-4は中性化深さと経過年数の関係を示したものであり、図中の実線は岸谷式[6]による推定値である。4.2では各構造物に関する水セメント比を十分に得ることができなかったと判断して、岸谷式には水セメント比を60%を適用した。岸谷式は、構造物Dを除く、他の6つの構造物の中性化深さの中間に位置するようである。構造物Dの中性化深さが大きな値となった理由としては、圧縮強度が小さいこと、吸水率が大きいことなどが挙げられる。

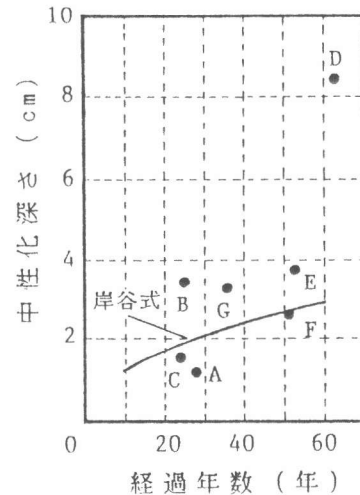


図-4 経過年数に対する中性化深さ

図-5には中性化深さと圧縮強度の関係を、図-6には中性化深さと吸水率の関係を示す。

吸水率の増加に伴って、中性化深さは増大している。また、圧縮強度が増大すれば、中性化深さは双

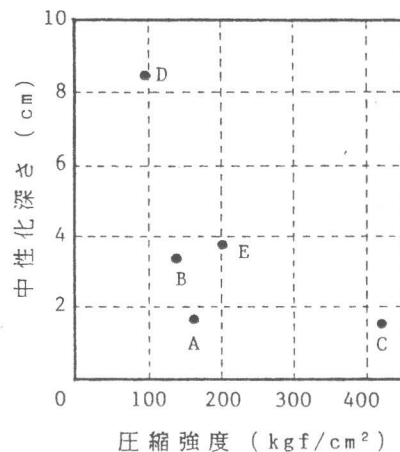


図-5 中性化深さと圧縮強度

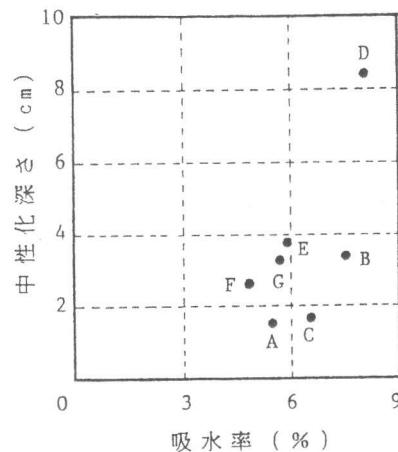


図-6 中性化深さと吸水率

曲線状に減少するという傾向が明瞭に表れている。

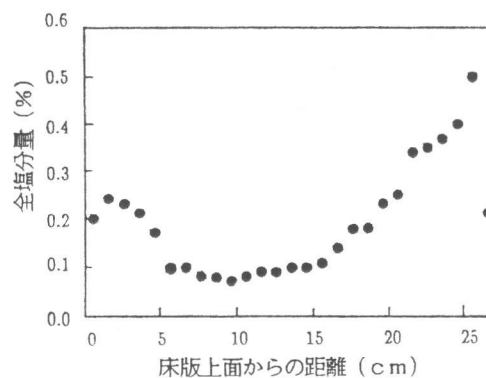
4. 4 コンクリート中の塩分量

構造物Cは荒天時には直接海水がかかる感潮部付近の飛沫帯に位置する栈橋床版（床版厚：27cm、海面から床版下面までの高さ：1m程度）であり、また構造物Gは河口部に架かるプレートガーダー橋の鉄筋コンクリート床版（床版厚：30cm、水面から床版下面までの高さ：6m程度）であり、海岸に近接した位置にあるため、コンクリート中への塩分の浸入があると判断される。よって、硝酸銀滴定法〔7〕を用いて全塩分量（NaCl換算値）を測定した。測定にあたっては、それぞれの構造物から抜き取った直径10cmのコアを1cmの厚さにスライスし、各スライス部の塩分量を測定した。

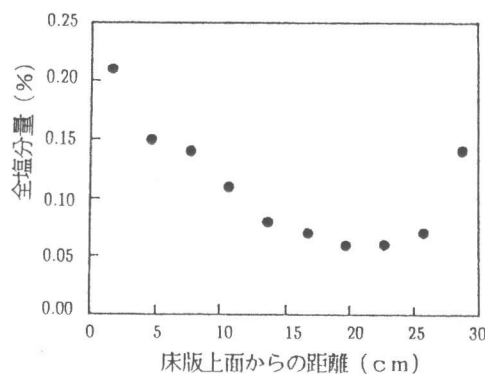
測定結果は図-7に示すとおりである。構造物Cでは床版下面の塩分量が上面よりも多くなっている。これは、床版が海面に近いため、常に飛沫が付着するためと考えられる。逆に、構造物Gにおいては床版の位置が高いため、塩分の供給は海水による直接的なものでなく、風による飛来塩分によるものと考えられる。よって、この塩分がコンクリートに浸透するには雨などの水が最も大きな因子となることから、ここでの塩分は下面よりも上面が多くなっているのではないと思われる。構造物Cの栈橋床版中の塩分量は、文献〔8〕にみられる栈橋床版の塩分量に近いものとなっている。

5. 静的および動的実験の結果

表-1に示した構造物F（6径間単純T桁橋）の第3径間（支間長10m）に対して行った、20tfトラック（ホイールベース5.3m、前輪軸重4.82tf、後輪軸重15.27tf）による静的載荷実験と2tfの重錘落下実験による結果を報告する。なお、本橋の断面形状は図-8に示すとおりで、実験は本橋の高欄撤去の前後について行われた。トラックの載荷形式は幅員中央載荷と偏載荷とし、載荷は各形式について5回行った。その際、たわみは主桁の



(a) 構造物Cにおける全塩分量分布



(b) 構造物Gにおける全塩分量分布

図-7 コンクリート内部の塩分量

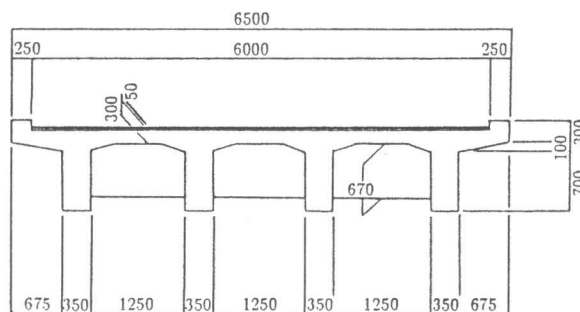


図-8 構造物Fの断面形状

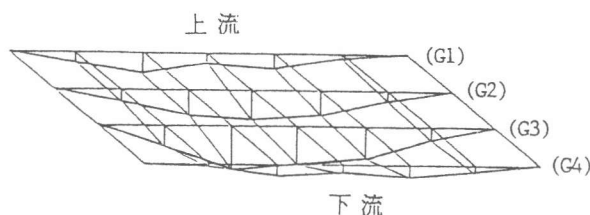


図-9 構造系全体のたわみモード（高欄有り）

6等分点の各点で測定した。図-9は、高欄撤去前の幅員中央載荷に関するたわみモードである。本橋は短支間であるので、桁中央点の後輪を載荷した場合には後輪のみによる対称載荷となる。図から明らかなように、荷重は対称であるにも関わらず、たわみモードは対称となっていない。G2桁とG3桁のたわみを比較してみると、G3桁のたわみが大きく、G3桁でのたわみの最大は中央点とはなっていない。さらに、両耳桁のG1桁とG4桁の中央点たわみは、両側の隣接点のたわみよりも小さくなっている。

図-10は各桁のたわみを個々に図示したものである。解析は有限要素法によるもので、3自由度の棒要素による格子モデルと、6自由度の厚肉版要素と棒要素の偏心結合を考慮したモデル[9]の両者について行ったが、両者の結果にはあまり差異は認められなかった。図中の理論値は版要素を用いた結果である。理論値には、実験によって生じた両耳桁やG3桁のような挙動は生じていない。また、理論値と実験値を比較すると、実験での中桁のたわみが理論値を大きく上回っている。本橋の格子曲げ剛度は約24となり、横桁は本来、十分に荷重分配桁として機能するものと考えられる。よって、このような現象が生じた理由は、横桁や中桁の剛性低下によるものと思われる。格子モデルによるSI解析を試みたが、満足な結果は得られていない。高欄撤去による主桁の剛性低下を理論的に検討したところ、耳桁で約10%、中桁で約7%となった。これらの値は、たわみモードが比較的一致しているG2桁の実験値とほぼ一致した。

次いで、落錘実験による結果を報告する。落錘実験は、2tfの重錘を図-11(a)に示す点①~点④の4箇所に高さ10cmの位置から、5回落下させた。そのとき、各主桁の4等分点で加速度を測定した。図-11は前述の格子モデルによる固有モードを示したものであり、実験で得られた加速度から推定した振動モードは、これとほぼ一致した。表-5に固有振動数を示す。高欄撤去による剛性低下は、実験値では17%、理論値では15%とほぼ一致している。しかしながら、解析における静的剛性低下と動的剛性低下と

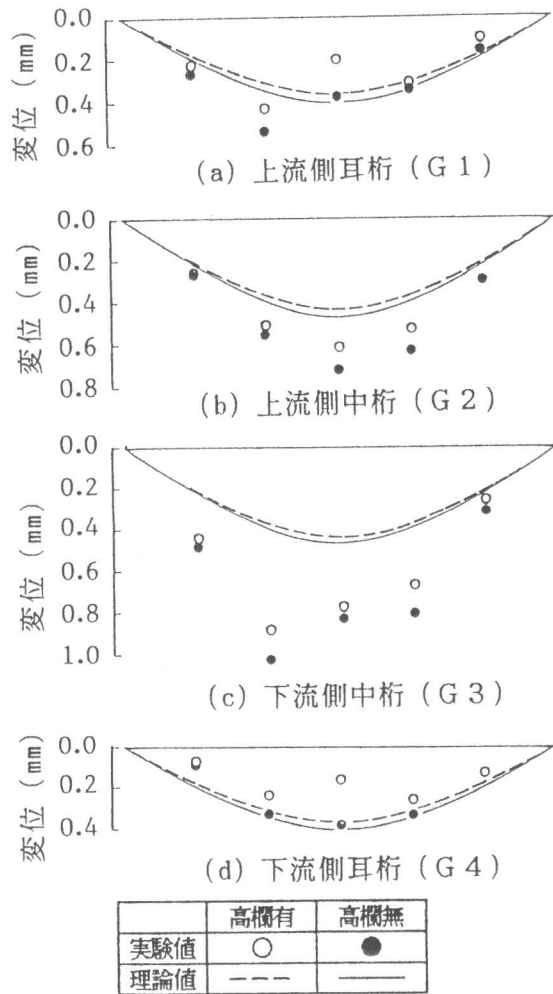


図-10 各主桁のたわみモード

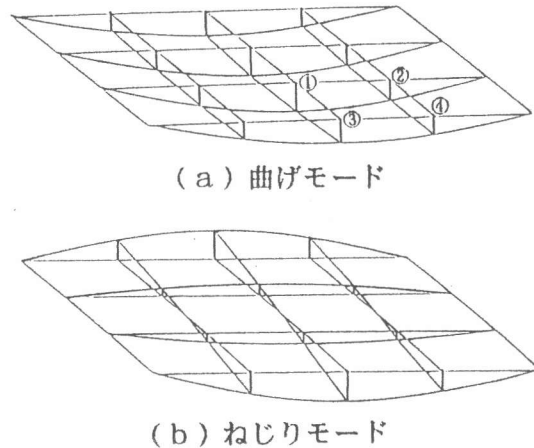


図-11 固有モード

の間には大きな違いが生じている。これは、橋軸直角方向に広がりをもつような構造物では、橋軸方向に配置された部材の

表-5 固有振動数 (Hz)

次数	実験値		理論値		α		β	
	高欄有	高欄無	高欄有	高欄無	高欄有	高欄無	実験値	理論値
1	13.5	12.3	14.1	13.0	0.92	0.94	0.83	0.85
2	18.0	16.4	18.8	16.9	0.92	0.90	0.83	0.81

注) α = 実験の曲げ剛性 / 理論の曲げ剛性
 β = 高欄無の曲げ剛性 / 高欄有の曲げ剛性

剛性が、静的挙動よりも動的挙動に大きく影響を与えることを示唆するものである。また、実験と理論の固有モードがほぼ一致していることから、損傷による剛性低下を実験と理論から得られた固有振動数の比較から考察してみると、6~10%の低減となっている。

6. まとめ

本報告では、25~63年経過した鉄筋コンクリート橋を主体とした構造物の劣化、損傷度調査結果について検討を加えたが、その結果、以下のような事が認められた。

- (1) 圧縮強度は現行の設計荷重に対してかなり低いものが見受けられ、また、弾性係数は圧縮強度に対して幾分低めの値を示した。
- (2) コンクリートの配合推定では単位水量を精度良く推定することができなかった。
- (3) コンクリートの中酸化にはひびわれや圧縮強度ならびに吸水率が大きく影響する。
- (4) 塩分はコンクリート床版の上下両面より浸透するが、水面からの高さがある床版では下面よりも上面から浸透が多い場合がある。
- (5) 固有振動数のみで構造系全体の剛性評価をすれば、過小となる傾向がある。

参考文献

- 1) 耐久性設計研究委員会：コンクリート構造物の寿命予測と耐久性設計に関する技術の現状、日本コンクリート工学協会、p.91、1988.4
- 2) 日本建築学会：コンクリート強度推定のための非破壊試験方法マニュアル、pp.41~55、1985.3
- 3) 土木学会：昭和49年版コンクリート標準示方書、p.23、1975.3
- 4) 土木学会：昭和61年制定コンクリート標準示方書、設計編、p.21、1986.10
- 5) コンクリート専門委員会報告F-18：硬化コンクリートの配合推定に関する共同試験報告、セメント協会、1967.9
- 6) 岸谷孝一他編：コンクリート構造物の耐久性シリーズ、中性化、p.36、技報堂、1988.3
- 7) 腐食防食研究委員会：硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法(案)、コンクリート工学、Vol.22, No.12, pp.5~9, 1984.12
- 8) 大即信明、森好生、関博：海洋環境におけるコンクリート中の塩素に関する一考察、土木学会論文報告集、第332号、pp.107~118, 1983.4
- 9) 尾下里治・金子俊一：直線、曲線および斜角の合成I桁橋の立体解析、土木学会論文集、第374号/I-6、pp.339~348、1986.10