

論文 アルカリ骨材反応により被害を受けたプレテンションホロー桁の力学的特性

北園英明*¹・井上浩*²・西尾浩志*³・添田政司*⁴

要旨: 交通量の多い道路橋として供用されたスラブ橋のプレテンションホロー桁がアルカリ骨材反応による被害を主に受けた。今回、そのスラブ橋が架け替え工事に伴い撤去されたため、そのプレテンションホロー桁を用いて、静的載荷試験を行い、力学的特性を確認した。なお、このプレテンションホロー桁は、1978年の製品検査時において、静的載荷試験を行っていたため、その結果と今回の静的載荷試験結果とを比較し考察した。その結果、本プレテンションホロー桁の剛性は低下していること等が判明した。

キーワード: アルカリ骨材反応, PC 桁, 静的載荷試験, たわみ量

1. はじめに

アルカリ骨材反応によりコンクリートにひび割れが発生している構造物は、外観上はあたかも耐荷力が低下しているかのように思われる。しかし、既往の研究からは、構造物としての耐荷力は通常のものと比較して増加する、あまり変わらない、低下するといった種々の結果が得られている¹⁾。そして、PC 桁に関しては、小林らの研究²⁾により、室内実験の部材レベルにおいては、ある程度明らかにされてきているが、実物の PC 桁にこれらの影響を推測するのは現状では困難であり、また、報告が少ない。

筆者らは、アルカリ骨材反応による被害を主に受け、実際に 19 年間 B 交通の道路橋として供用された橋長 26.4m、全幅員 18.8m、桁本数 26 本のスラブ橋が架け替え工事に伴い撤去されたため、そのスラブ橋から切り離したプレテンションホロー桁を用いて、静的載荷試験を行った。なお、1978年の桁製作時の製品検査の際に、桁の挙動、ひび割れ発生荷重および破壊荷重の把握を行う目的で静的載荷試験を行っていたため、その時の試験結果と今回の試験結果とを比

較し、アルカリ骨材反応による被害を主に受け劣化した PC 桁の力学的特性について述べる。

2. 試験桁の概要

2.1 本橋梁の履歴

本試験桁を採取した橋梁の履歴を表-1に示す。本橋梁は、供用後 8 年を経過した 1986 年

表-1 橋梁の履歴

1978 年	・製品検査：静的載荷試験 ・竣工
1986 年	・橋軸方向ひび割れ確認：ひび割れにエポキシ樹脂注入を行う。 ・たわみ量の計測を開始する。 (以後、基本的に年 2 回計測する。)
1991 年	・実橋載荷試験を行う。
1993 年	・コア採取によるひび割れ原因判定調査を実施する。
1994 年	・ひび割れ原因をアルカリ骨材反応であると判定する。
1997 年	・本橋梁の架け替え。 ・撤去桁による静的載荷試験を実施する。

* 1 榊安部工業所技術本部技術部メンテナンス課課長補佐 (正会員)

* 2 榊安部工業所福岡支店工務部設計課課長

* 3 榊安部工業所技術本部技術部部長 工修 (正会員)

* 4 福岡大学講師 工学部土木工学科 工博 (正会員)

に桁下面橋軸方向にひび割れが発生していることが確認された。当時の最大ひび割れ幅は 1.0 ～ 1.5mm 程度であり、支承側両端部、耳桁および漏水が比較的多い箇所ほどひび割れ数が多く認められる傾向にあった。また、本橋梁の耳桁側面のコンクリート表面は茶褐色に変色していた。このひび割れ発生状況や変色は、既往の文献等にも多く報告されているような、アルカリシリカ反応によって生じた現象と類似の傾向を示していることが明らかとなったが明確にはひび割れの原因を判定できなかった。

そこで、本橋梁の PC 鋼材防食のため、1986 年にそのひび割れにエポキシ樹脂注入による補修を行った。その後、桁の挙動を把握するために、スラブ橋の PC 桁全数の桁下面たわみ量を継続的に計測した。桁下面たわみ量については、1 桁毎に桁下面の両端と中央部とをレベルにて計測して、相対たわみ量を算出した。本橋のたわみ量の変化については、本試験桁のたわみ量計測結果を代表として図-1 に示す。なお、本試験桁の No.1 桁は車道部の G11 桁、No.2 桁は歩道部の配水桁が設置してある G3 桁として供用されていた。図-1 から分かるように、本橋のたわみ量は、年平均にして 4 ～ 5mm 程度のたわみ量が増加し続けていることが判明した。よって、本橋梁の安全性の確認とこの原因を究明するために、1991 年には実橋載荷試験を行った。実橋載荷試験の結果、設計荷重時の範囲においては、桁は、弾性的挙動を示し、除荷後は、たわみ、ひずみともに復元し、曲げひび割れ等の異常は生じないことを確認している。さらに、1993、1994 年にはコンクリート材料の中にアルカリ骨材反応を起こす材料が含まれているかどうかを確認するための化学的試験、物理学的試験、岩石学的観察、反応生成物分析および強度特性の調査を行った。その結果を表-2 に示す。これより細骨材は化学法試験により無害でないこと、岩石学的観察より一部有害鉱物が確認されたことおよび反応生成物を確認したこと等より、総合的に判断してアルカリ骨材

反応の疑いが強いと判断した。

2.2 試験桁の概要

本静的載荷試験に用いた試験桁の概要を表-3 に、静的載荷試験前の試験桁の桁下面ひび割れ状況図を図-2 に、試験桁のコンクリート配

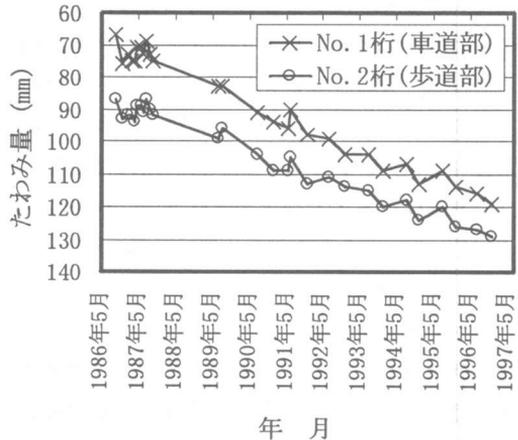


図-1 本橋のたわみ量の変化

表-2 アルカリ骨材反応に関する調査結果

調査項目	調査結果	
化学法試験 (JIS A 5308 付属書 7)	粗骨材	Rc 20 mmol/l
	無害	Sc 13 mmol/l
	細骨材	Rc 116 mmol/l
	無害でない	Sc 142 mmol/l
モルタルバー法 (JIS A 5308 付属書 8)	粗骨材	無害 0.042 %
	細骨材	無害 0.028 %
コア膨張量試験 (JCI-DD2)	膨張	0.04%
岩石学的観察 偏向顕微鏡観察	粗骨材	有害鉱物無し
	細骨材	有害鉱物有り 火山ガラス、安山岩等
反応生成物分析 (EPMA 分析)	白色結晶	シリカゲル SiO ₂ 85 % (参考値)
圧縮強度試験* (JIS A 1107)	17.5 ～ 26.5 N/mm ² 外観：コアにひび割れ有り	
静弾性係数試験 (JSCE-G 502-1988)	0.94 ～ 1.60 × 10 ⁴ N/mm ²	

※ JCI-DD1 「コンクリート構造物からのコア試料の採取方法 (案)」

合表を表-4に示す。

図-2に示すように試験桁の桁下面には2桁とも橋軸方向ひび割れが発生している。なお、桁側面には桁の端部に橋軸方向ひび割れが若干確認できたが、その他についてのひび割れはなかった。

3. 試験概要

3.1 載荷方法

載荷方法については、図-3に示すようにJIS B 7733に準拠した2点集中載荷とした。

3.2 計測方法

計測は、載荷荷重、たわみ量、コンクリートのひずみ量および等曲げモーメント区間の曲率を測定する目的で図-3に示すように行った。なお、等曲げモーメント区間内のひずみゲージ貼り付け位置は、1978年の製品検査時と同じ位置とした。また、両載荷点に対するスパン中央の相対変位をPC桁の頂版上面に設置した鋼製ビームを介して高感度変位計により計測することで、等曲げモーメントスパン内の曲率を求めた。さらに、桁下面橋軸方向ひび割れのひび割れ幅の変化を計測する目的で、代表的な桁下面橋軸方向ひび割れ2カ所にPI型変位計を取り付けた。

表-3 試験桁の概要

形式	プレテンションホロー桁
桁長	26.340 m
桁高 (中央部)	0.850 mm
桁高 (支点部)	0.700 mm
載荷試験スパン	25.000 m
設計荷重	TL-20
斜角	左 84° 30' 30"
PC鋼材	1S12.4mm - 24本
施工年	1978年
載荷試験桁数	2桁 (No.1桁, No.2桁)

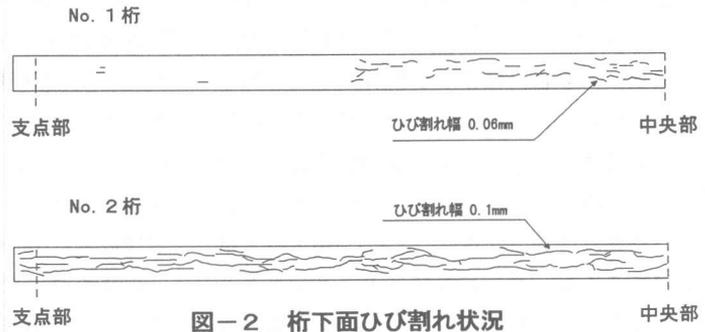


図-2 桁下面ひび割れ状況

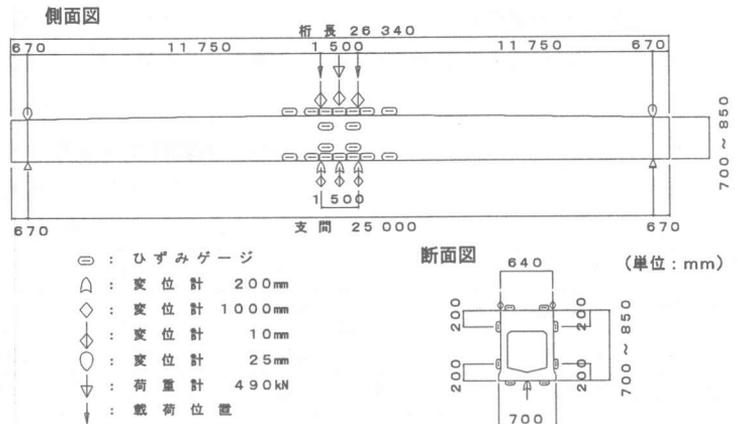


図-3 桁形状、載荷位置および計測器取り付け位置

表-4 試験桁のコンクリート配合表

粗骨材の最大寸法 (mm)	スラブの範囲 (cm)	空気量の範囲 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤
20	3~5	1~3	36	37	162	450	631	1278	4.5

3.3 荷重の載荷方法

荷重の載荷方法については、静的に載荷し、ひび割れの発生荷重を確認、その後 147kN、216kN にてひび割れ状況を確認、そして最後に破壊に至るまで載荷を行った。

4. 試験結果および考察

表一5に設計値と1978年の製品検査時および今回の試験結果値とを試験結果一覧表として示す。なお、製品検査時の試験桁をS桁とする。以下に各項目について示す。

4.1 破壊に至る挙動

S桁、No.1桁の破壊に至る挙動は、底版に曲げひび割れが発生し、その曲げひび割れがウェブに進展、その後、曲げひび割れからせん断ひび割れに移行し、最後にせん断スパン内の載荷点近傍の頂版コンクリートの圧縮破壊とせん断破壊とが同時に生じた。なお、No.2桁についてのひび割れの発生状況は、S桁、No.1桁とほぼ同様であるが、最後に等曲げモーメントスパン内の載荷点近傍の頂版コンクリートが圧縮破壊した。

4.2 曲げひび割れ発生時

曲げひび割れ発生荷重の設計値が 118kN

に対して、No.1桁は 78kN、No.2桁は 43kN であった。S桁は、137kN にて曲げひび割れの発生が確認された。曲げひび割れの発生に関しては、PC桁が劣化することにより、健全なものより小さな荷重にて曲げひび割れが発生することを確認した。

4.3 破壊時

破壊荷重に関しては、中央断面の破壊抵抗曲げモーメントから算出した設計値 314kN に対して、No.1桁は 275kN、No.2桁は 344kN であり、S桁は 346kN であった。それぞれの破壊荷重は、設計値に対して No.1桁は 88%、No.2桁は 109% であり、S桁に対して No.1桁は 80%、No.2桁は 99% であった。これより、劣化したPC桁の破壊荷重の低下は、最大で 20% 程度であった。なお、小林らの研究²⁾によれば、普通コンクリートはりに対して、アルカリ骨材反応を受けたコンクリートはりの終局曲げ耐力の低下は最大で 10% である。

破壊たわみ量に関しては、設計値 259mm に対して、No.1桁は 242mm、No.2桁は 400～460mm (推定値) であり、S桁は 264mm であった。この No.2桁のたわみ量 400～460mm (推定値) は、試験時のレベル計測でのたわみ量、

表一5 試験結果一覧表

		設計値	S桁 製品検査時	No.1桁	No.2桁
コンクリート強度	N/mm ²	49.0	50.7	21.5 (注1)	
コンクリート静弾性係数	× 10 ⁴ N/mm ²	3.92	3.96	1.26 (注1)	
PC鋼材引張荷重	kN	160	169	171	171
曲げひび割れ発生時	荷重 kN	118	137	78	43
	たわみ量 mm	50	45	30	15
破壊時	荷重 kN	314	346	275	344
	たわみ量 mm	259	264	242	400～460 (注2)

(注1) : 1993, 1994年の調査時の数値を示す。

(注2) : 桁のたわみ量が大きくなり、変位計を取り外したため、この数値は変位計にて計測した最大値 (荷重 294N, たわみ量 300mm) 以降を推定した。

4.5にて述べるモーメントー曲率曲線の関係および既往の研究^{3), 4)}のPC桁の破壊特性等を参考として推定した。それぞれの破壊たわみ量は、設計値に対してNo.1桁は93%, No.2桁は154~177% (推定値)であり、S桁に対してNo.1桁は92%, No.2桁は152~174% (推定値)であった。

4.4 荷重ー中央点変位曲線

図-4に荷重ー中央点変位曲線図を示す。図-4より、No.1桁とNo.2桁とは、ほぼ同様な軌跡を画いている。No.1桁、No.2桁の軌跡とS桁の軌跡とを比較すると、弾性域、塑性域共にS桁の軌跡の方が急勾配である。これより、劣化したPC桁の剛性は、健全なPC桁より小さくなる事が分かる。

4.5 モーメントー曲率曲線

図-5にモーメントー曲率曲線図を示す。図-5中のS桁の曲率は桁に貼り付けたひずみゲージから算出しており、S桁は載荷荷重274kNまでしかひずみを測定していないため、破壊時(346kN)までの軌跡がない。No.1桁、No.2桁の曲率については、破壊直前の曲率まで計測できた。図-5からも図-4と同様にNo.1桁、No.2桁とS桁の剛性の違いが読みとれる。

4.6 桁下面橋軸方向ひび割れ幅

載荷荷重と桁下面橋軸方向ひび割れ幅の変化についての関係を荷重ーひび割れ幅曲線図として、図-6に示す。図-6より載荷荷重140kN付近から桁下面橋軸方向ひび割れ幅が変化し始めていることが分かる。また、この載荷荷重140kN付近はPC桁の剛性が変化し始める点とほぼ一致する。

No.1桁、No.2桁ともに載荷荷重の増加に伴い、桁下面橋軸方向ひび割れ幅の変化量が増加している。この現象は、アルカリ骨材反応による被害を主に受け、桁下面橋軸方向にひび割れの発生したPC桁の特色であると考えられる。この桁下面橋軸方向のひび割れ幅の変化は、本試験桁の破壊形式の特徴の一因になっていると考えられる。

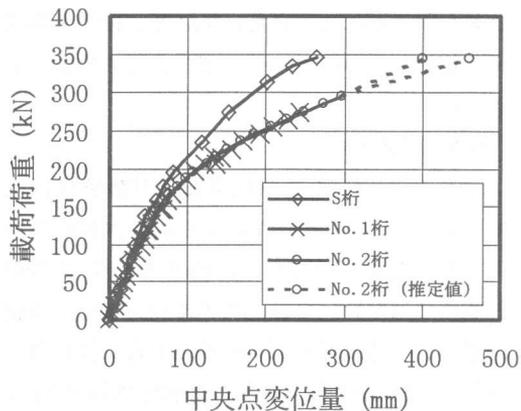


図-4 荷重ー中央点変位曲線

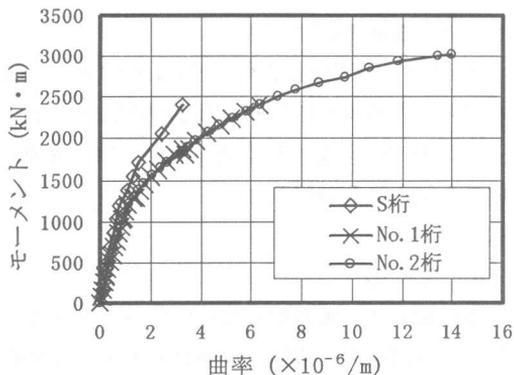


図-5 モーメントー曲率曲線

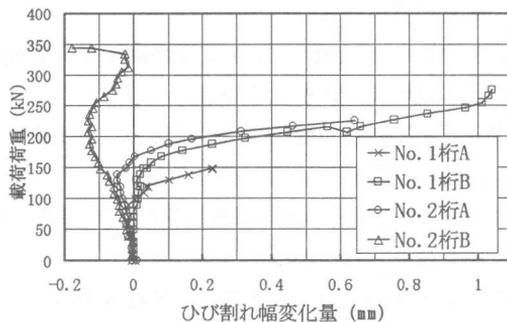


図-6 荷重ーひび割れ幅曲線

4.7 コンクリートの鉛直方向ひずみ分布

桁に貼り付けたひずみゲージから計測した鉛直方向ひずみ分布図を図-7に示す。図-7中の鉛直方向ひずみ分布図はいずれも載荷荷重235kNまでのものである。図-7よりNo.1桁は載荷荷重39kN、No.2桁は載荷荷重20kN、S桁は載荷荷重157kNにてひび割れが発生した

ことが読みとれる。また、No.1 桁、No.2 桁は S 桁と比較して、小さい荷重で中立軸の位置が上昇した。

4.8 物性値

コンクリートの圧縮強度および静弾性係数は、1993 年に同橋梁の桁からコア供試体を採取し計測したものであり、No.1 桁、No.2 桁の計測値ではない。なお、コアについては、伸縮継手付近の桁端部上面から採取した。設計値に対して、圧縮強度が 44 %、静弾性係数が 32 % であった。

No.1 桁、No.2 桁のコンクリートの中性化深さは 1 ~ 3mm 程度であった。

PC 鋼材の引張荷重に関しては、No.1 桁、No.2 桁から載荷試験後に採取したものを測定した。引張荷重に関する劣化は見られず、PC 鋼材の腐食も見られなかった。

5. まとめ

本試験により明らかになったアルカリ骨材反応による被害を主に受けた本プレテンションホロー桁の特性をまとめ、以下に示す。

- ①健全な PC 桁よりも小さい荷重にて曲げひび割れが発生する。
- ②健全な桁と比較して、PC 桁の剛性が、弾性域、塑性域共に小さくなる。
- ③ PC 桁の剛性が変化するのに従い、桁下面の橋軸方向ひび割れ幅も変化する。
- ④ひび割れが多いのにも関わらず、PC 鋼材の腐食は見られなかった。
- ⑤破壊荷重の低下は最大で 20 % 程度である。
- ⑥破壊荷重が健全な PC 桁と比較して低下しない場合がある。
- ⑦健全な PC 桁と比較して、破壊時のたわみ量が増える場合がある。

最後に、本 PC 桁の劣化は、アルカリ骨材反応以外の劣化や疲労にも影響を受けていると思われる。今後は、これらの複合的な影響を定量的に評価する技術が望まれる。

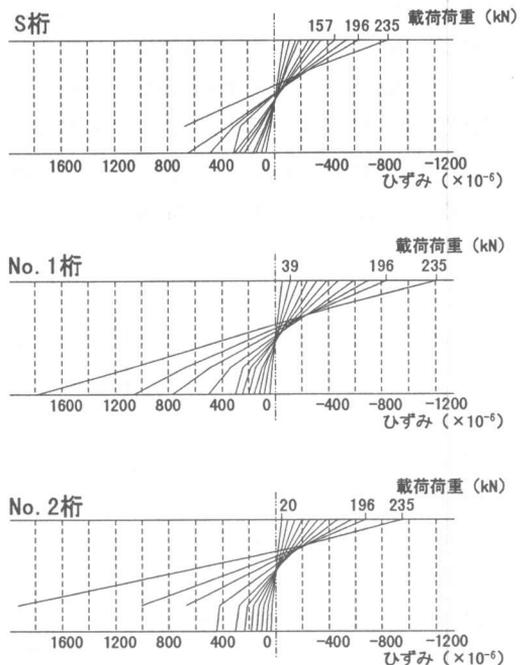


図-7 鉛直方向ひずみ分布

参考文献

- 1) (社) 日本コンクリート工学協会 兵庫県南部地震に関する耐震技術特別研究会：兵庫県南部地震に関する耐震技術特別研究会報告書(1997.4)，(社) 日本コンクリート工学協会，pp.28-41，1997.4
- 2) 小林和夫・井上 晋・山崎鷹生・中野錦一：アルカリ骨材反応を受けた PC はり部材の耐荷性状に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.9，No.1，pp.615-620，1987.6
- 3) 北園英明・葛西康幸・今尾勝治・内田裕市・小柳 洽：27 年間供用されたプレストレストコンクリート T 桁の破壊載荷試験について，土木学会第 53 回年次学術講演会講演概要集第 5 部，pp.794-795，1988.8
- 4) 北園英明・西尾浩志・内田裕市・小柳 洽：炭素繊維補強した PCI 桁の破壊特性について，第 8 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp.643-648，1988.10