

報告 建設後 50 年以上経過したポストテンション方式 P C 道路橋の耐荷性能評価

松川 嘉孝*1・安達 健太*2・山口 明伸*3・武若 耕司*4

要旨：道路橋として、50 年以上供用されてきたポストテンション方式 P C 橋の撤去に伴い、桁長約 30m におよぶ本橋撤去桁を用いて載荷試験を実施し、その耐荷性能を評価した。調査の結果、建設後 50 年経過した時点での耐荷力は、設計条件を基に解析した値と同等以上のものであり、P C 桁は十分な耐荷性能を有していることが明らかとなった。

キーワード：道路橋，ポストテンション方式 P C 橋，50 年以上供用，耐荷性能，載荷試験

1. はじめに

既設橋梁を維持管理し継続的に使用するためには、その橋梁が保有している構造性能を的確に評価・判定し、必要に応じて補修・補強などの対策を講じていくことが重要である。しかしながら、古い橋梁は、建設当時の設計図書が現在まで保管されていないことが多く、構造や部材の応力状態を十分に把握されないまま、維持管理および補修・補強設計が行われている場合がある。

本調査橋梁である曾木大橋は、「東洋のナイアガラ」として知られる鹿児島県伊佐市の観光名所である「曾木の滝」の上流に位置し、1962 年（昭和 37 年）に建設されたポストテンション方式のプレストレストコンクリート（以下、P C と称す）道路橋（写真-1）である。

我が国初の本格的なポストテンション方式 P C 橋である「第一大戸川橋梁（鉄道橋）」が 1954 年に建設されたことを鑑みると、本橋はポストテンション方式 P C 橋の創成期に施工されたものと言え、近隣住民の生活道路や観光用道路として様々な役割を担ってきた。しかし、曾木の滝の景観問題や新曾木大橋の建設等に伴い撤去されることとなった。

そこで、建設後 50 年以上が経過した橋梁が撤去されるこの機会に、本橋撤去桁を用いて載荷試験を実施し、その耐荷性能を評価した。なお、本橋の桁長は 30m にもお



写真-1 撤去前の曾木大橋

表-1 曾木大橋の橋梁諸元

橋梁名	曾木大橋
橋長	150.000m
支間割	5@29.950m
有効幅員	4.620m
設計荷重	TL-14
橋梁形式	ポストテンション方式 P C 5 径間単純 T 桁橋
竣工年度	1962 年（昭和 37 年）
撤去年度	2015 年（平成 27 年）

よび、この規模の P C 桁の載荷試験の実施例は少ないため、本桁の耐荷力を評価することは、今後の P C 橋の健全度評価技術の向上に役立つ有益な情報になるものと考えられる。本稿では、調査で得られた結果について報告する。

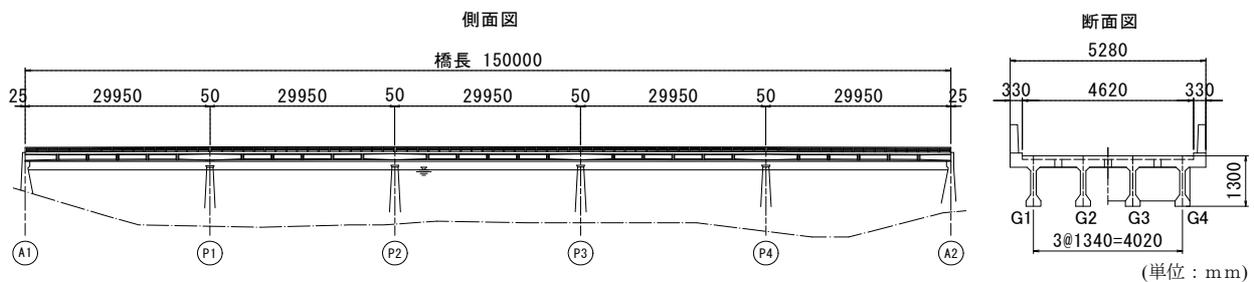


図-1 曾木大橋構造一般図

*1 コーアツ工業（株）技術開発本部技術部（正会員）

*2 コーアツ工業（株）技術開発本部技術部

*3 鹿児島大学大学院 理工学研究科教授 工博（正会員）

*4 鹿児島大学大学院 理工学研究科教授 工博（正会員）

2. 曾木大橋の概要

曾木大橋の橋梁諸元を表-1に、橋梁構造一般図を図-1に示す。曾木大橋は、橋長150.000m(桁長29.950m)、有効幅員4.620mのポストテンション方式5径間単純T桁橋であり、設計荷重はTL-14である。また、防護柵はコンクリート製、舗装はコンクリート舗装である。

本橋は、PC橋創成期に建設されたこともあり、建設当時の設計図書が保管されていなかった。当時の設計は表-2に示すように「PC設計施工指針」を基に行われていると推定されるが、ポストテンション方式PC橋の標準設計などの規格は整備されていなかったことから、設計の自由度は高かったと考えられる。

表-2 主な設計基準書の制定年

制定年	図書名	発行所
1955年(昭和30年)	PC設計施工指針	土木学会
1962年(昭和37年)	曾木大橋竣工(本調査橋梁)	
1968年(昭和43年)	PC道路橋示方書	日本道路協会
1969年(昭和44年)	ポストテンション方式PC単純Tげた橋標準設計	建設省

3. 事前調査

本橋は、建設当時の設計図書が保管されていなかったため、載荷試験に必要な当時の設計を復元する目的で事前調査を実施した。事前調査項目の一覧を表-3に示す。事前調査では、外観変状調査、形状寸法調査、PCケーブルおよび鉄筋調査、コア供試体を用いたコンクリート調査、桁から採取したPC鋼線調査を実施した。

3.1 外観変状調査

本橋の撤去に先立ち、近接目視調査および打音調査を実施した。変状評価は道路橋定期点検要領²⁾に準じて実施した。

外観変状調査の結果、主桁の一部にかぶり不足による鉄筋露出やコンクリート剥離等の変状は見られたが、い

ずれも軽微なもので耐力に直接影響するようなものはなく、主桁は概ね健全であると判断できる状態であった。

3.2 形状寸法およびPCケーブル・鉄筋調査

載荷試験に先立ち、主桁構造を復元する目的で形状寸法およびPCケーブル・鉄筋に関する調査を行った。

調査方法は、載荷試験を行わない主桁をワイヤソーにより断面切断し、その切断面において、形状寸法およびPCケーブルの規格(本数、種類等)、配置状況(位置、間隔、角度等)を巻尺やノギスを用いて直接計測することで確認した。加えて、電動ピックで鉄筋および定着具をはつり出し、鉄筋規格や定着工法の確認も行った。また、鉄筋探査機(2機種)を使用して主桁内部の鋼材位置を確認し、鋼材配置状況を復元した。

調査結果の概要を表-4に示す。PC鋼線はφ7mmの単線が12本一組として8組配置されており、4組が桁端部で定着され、残り4組が桁上縁で定着されていることが確認できた。定着工法はFKKフレシネー工法のマルチワイヤーシステムで、定着具にフレシネーコーン12φ7用(写真-2)が使用されていた。

表-3 事前調査項目一覧

調査対象	調査項目	調査方法	調査箇所
PC桁	外観変状調査	目視、打音調査	橋梁全体
	形状寸法調査	直接計測、切断面調査	P1~P2: G2桁
	PCケーブル調査(規格、配置)	直接計測、はつり、切断面調査、鉄筋探査	P1~P2: G2桁、P2~P3: G3桁
	鉄筋調査(規格、配置)	直接計測、はつり、鉄筋探査	P1~P2: G2桁、P2~P3: G3桁
コンクリート	強度特性	圧縮強度試験、静弾性係数試験	P1~P2: G3桁
	配合推定	セメント協会法F-18	P1~P2: G3桁
PC鋼線	強度特性	引張試験	P2~P3: G3桁

表-4 主桁形状およびPC鋼材調査結果

PC鋼線	規格	φ7 N=12本	主桁断面形状	
	配置本数	8本/桁		
	定着具	フレシネーコーン 12φ7用		
	定着位置	桁端部定着: 4本 桁上縁定着: 4本		
シーす	規格	φ50mm		
	材質	鋼製		
PC鋼材配置				(単位:mm)

また、図-2 に示す鉄筋探査機による探査結果から、P C鋼材の巻上げ形状と定着位置を確認することができ、これを基に鋼材配置状況を復元することができた。

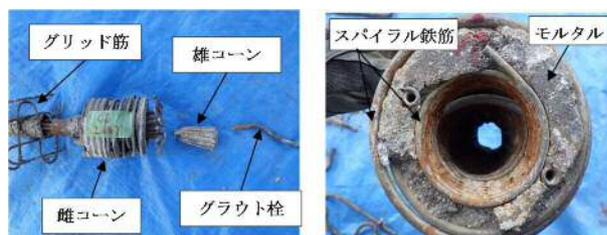


写真-2 定着具解体状況

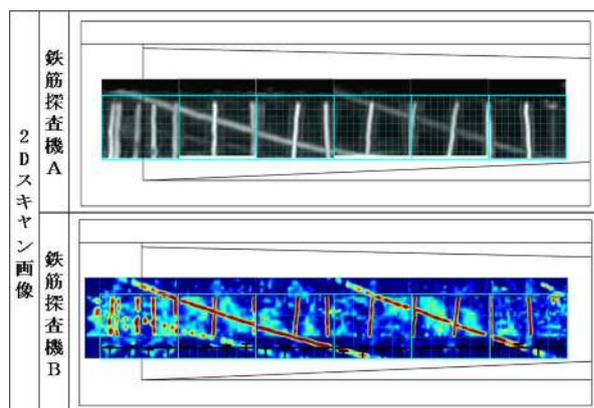


図-2 鉄筋探査結果

3.3 コンクリートに関する調査

(1) 強度特性

本橋の主桁コンクリートより φ100×200mm のコア供試体を採取し、5本の供試体で圧縮強度および静弾性係数を測定した。

主桁コンクリートの強度試験結果を表-5 に示す。

圧縮強度の平均値は 49.6N/mm² であった。静弾性係数は、現在のコンクリート標準示方書の算出式により求められる値（圧縮強度 49.6N/mm² の場合で E_c=32920N/mm²）と比較すると、妥当と判断できる結果であった。

表-5 主桁コンクリートの強度特性

	単位容積質量 (kN/m ³)	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (N/mm ²)
平均	2.29	49.6	32510

(2) 配合推定

本橋で使用されたコンクリート配合は不明であったため、強度特性と同じ主桁より採取したコア供試体を用いて配合推定を行った。配合推定は、セメント協会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³⁾」（以下、セメント協会法）に準じて実施した。

配合推定結果を表-6 に示す。推定配合量は単位セメント量 431kg/m³、単位水量 179kg/m³、骨材量 1683kg/m³

であり、水セメント比は 42% であった。なお、単位容積質量は 2293kg/m³ であり、現在の一般的なコンクリート（2345kg/m³ 程度）と比較すると幾分小さな値であった。

ここで、昭和 43 年のコンクリート配合例¹⁾ を表-7 に示す。これによると、当時はコンクリートの施工性よりも強度を優先して配合設計が行われていることが窺える。本結果では、当時の配合例と比べて水セメント比が僅かに大きくなっているが、現在の道路橋示方書⁴⁾（表-8）やコンクリート標準示方書⁵⁾（表-9）に示される耐久性上の条件を満たしており、水セメント比から良質なコンクリートであると評価できる。

表-6 主桁コンクリートの配合推定結果

項目	コア供試体	備考
単位容積質量 (kg/m ³)	2293	道路橋示方書 2345kg/m ³
水セメント比 (%)	42	
推定配合量 (kg/m ³)	セメント量	431
	水量	179
	骨材量	1683

表-7 昭和 43 年のコンクリート配合例¹⁾

	設計基準強度 (kg/cm ²)	粗骨材最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	単位水量 (kg)	単位セメント量 (kg)	単位細骨材量 (kg)	単位粗骨材量 (kg)	水セメント比 (%)
A 橋	400	25	3~5	145	380	647	1297	38
B 橋	400	25	3~6	165	440	601	1220	37
C 橋	350	25	3~6	164	397	645	1215	41
D 橋	300	25	5~8	129	328	727	1187	39

表-8 塩分浸透度合いに対する水セメント比⁴⁾

構造	(1) 工場で製作されるプレストレストコンクリート構造	(2) (1)以外のプレストレストコンクリート構造	(3) 鉄筋コンクリート構造
想定している水セメント比	36%	43%	50%

表-9 化学的腐食に対する水セメント比の目安⁵⁾

劣化環境	最大水セメント比 (%)
SO4-2 として 0.2%以上の硫酸塩を含む筒や水に接する場合	50%
凍結防止剤を用いる場合	45%

3.4 P C鋼材に関する調査

P C鋼線の劣化度を確認するため、主桁から P C鋼線を採用して引張試験を実施し、機械的性質について確認するとともに、現在の JIS 規格との比較を行った。

なお、P C鋼線は、グラウトが充填・未充填の P Cケーブル（P C鋼線 12 本）から各々採取（写真-3）し、グラウト充填状況における機械的性質の比較も行った。

PC鋼線の引張試験の結果を表-10に、荷重-伸び曲線を図-3に示す。試験体1はグラウトが充填していたPC鋼線(平均値)、試験体2はグラウトが未充填であったPC鋼線(平均値)である。なお、表中のJIS規格値は現行JISのものを示している。

試験の結果、引張強度および降伏荷重は、全ての試験体でJIS G3536-2014(PC鋼線及びPC鋼より線:SWPR1AN)に示される数値を満足した。ヤング係数にはJIS規定はないが、道路橋示方書などで200kN/mm²という規定値があり、本試験では、この規定値よりも若干低い値であった。

また、伸びについても、JIS規格値を満足しており、このことから、本橋に用いられたPC鋼線は、ブルーイング処理を施されたものであると考えられる。

上記の結果により、当時のPC鋼材は現在のものと同等の機械的性質を有していたと考えられる。

また、試験体2についてはグラウト未充填部であったため、PC鋼線に表面錆の発生が認められたが、引張強度や破断伸びの低下は見られず、機械的性質に大きな問題は生じていないと考えられた。PC鋼線の機械的性質は、PC鋼線の断面減少率が大きいほど低下すると言われており、本試験では断面の減少が微少であったため、機械的性質の低下が生じなかったと推測される。



a) グラウト充填部 b) グラウト未充填部

写真-3 採取したPC鋼線の状況

表-10 PC鋼線引張試験結果

供試体 No	素線径 (mm)	引張荷重 (kN)	伸び (%)	0.2%降伏荷重 (kN)	ヤング係数 (GPa)
1	7.05	61.9	7.6	52.5	187.4
2	7.05	61.6	7.9	52.5	183.0
JIS規格値	7.00±0.05	58.3以上	4.5以上	51.0以上	200(道示)

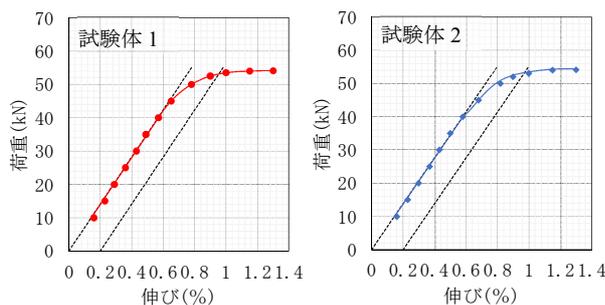


図-3 荷重-伸び曲線

4. PC桁の載荷試験

本橋のPC桁の耐荷性能を評価するために、曲げ載荷試験を実施し、耐荷力や力学的挙動の確認を行った。

また、試験に先立ち、載荷試験と同様の載荷条件で2次元のFRAME解析を実施し、試験値との比較を行った。

4.1 試験概要

曲げ載荷試験の概要を図-4に示す。試験は、P1~P2径間G2桁で行った。載荷方法は、間隔2000mmの2点載荷(支間中央から左右へそれぞれ1000mmの位置)とし、荷重は油圧ジャッキ2台を使用してPC桁に載荷し、各ジャッキ上方に敷鉄板を積上げ反力受けとした(写真-4)。なお、桁長が約30mに及ぶことから試験施設等への運搬ができなかったため、本橋梁の橋台背面の桁解体ヤードにて試験設備を構築し、試験を実施した(写真-5)。

荷重載荷は、荷重を100kNごとに増加させて、300kN(1載荷点あたり150kN)まで載荷後、これを除荷し、これを3サイクル行う繰り返し載荷を実施した。なお、3サイクル目は400kNまで載荷し、その耐荷力を確認した。

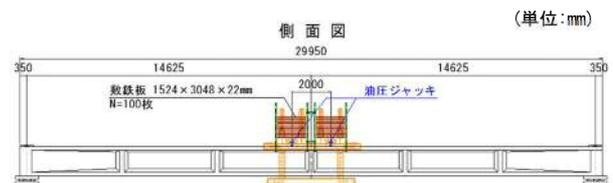


図-4 載荷試験概要図



写真-4 荷重載荷位置(支間中央部)



写真-5 載荷試験状況

4.2 試験項目

測定器の種類、設置箇所を表-11、写真-6に示す。測定項目は、各荷重段階におけるひずみ量、変位量の測定、ひび割れ発生状況、経時変化を監視・記録した。

表-11 計測器設置箇所

計測機名	設置点・方向	設置箇所
単軸ひずみゲージ	主桁側面上下 縁橋軸方向	支間中央、支間1/4点、ジャッキ位置に計36箇所
三軸ひずみゲージ	主桁中心位置 付近側面方向	せん断照査位置(桁高/2)、ジャッキ位置に計12箇所
変位計	主桁下面	支間中央、支間1/4点、ジャッキ位置に計7箇所
圧力計	荷重載荷面	油圧ジャッキ部に計2箇所



a) ひずみゲージ



b) 変位計

写真-6 測定器設置状況

4.3 試験結果

(1) ひずみ量

支間中央部下縁における荷重-ひずみ履歴曲線を図-5に示す。載荷荷重200kNに着目すると、載荷回数を重ねるごとにひずみ量が増加する傾向が見られた。なお、載荷荷重300kNにおいて、1回目が2回目、3回目と比較して大きくなっているが、これはひび割れが発生した直後に、梁のたわみの急変にジャッキのストロークが追従できず、圧力損失が生じジャッキの調整を行ったために生じたものと推測される。

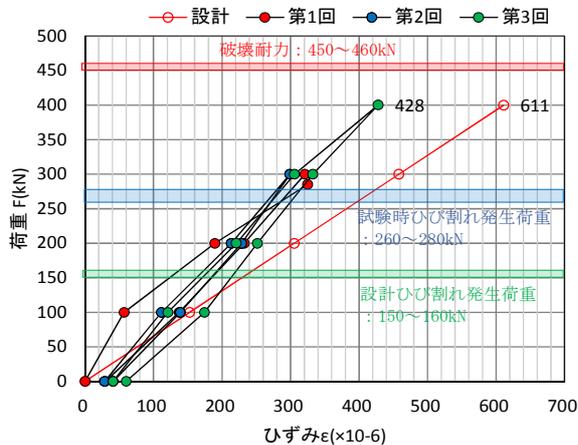


図-5 荷重-ひずみ履歴曲線

また、3回目載荷時に載荷荷重を設計破壊耐力(450kN~460kN)に近い400kNまで載荷したところ、ひずみ測定値は解析値に対して7割程度であった。

(2) 変位量

支間中央部における荷重-変位履歴曲線を図-6に示す。ここで、設計値が3つあるが、設計1は断面定数にグラウトを考慮していないもの、設計2はグラウトを考慮したもの、設計3はグラウトを考慮した上で、ひび割れ発生に対する剛性低下を考慮したBransonの提案式⁶⁾から算出したものである。

載荷荷重200kNに着目すると、前述のひずみ量と同様に、載荷回数を重ねるごとに変位量が増加する傾向が見られた。また、載荷荷重200kNまでは、変位測定値は解析値と同程度であったが、載荷荷重が200kNを超えると、ひずみの場合と違い設計1,2を上回り、設計3の値に近い変位量が発生した。なお、桁全体の変位についても同様の傾向が認められた(図-7)。

このことから、桁はひび割れ発生に伴い剛性が低下し、変位量が増加したものと推測される。また、変位量は

※設計1: グラウトなし 設計2: グラウト考慮 設計3: Bransonの式

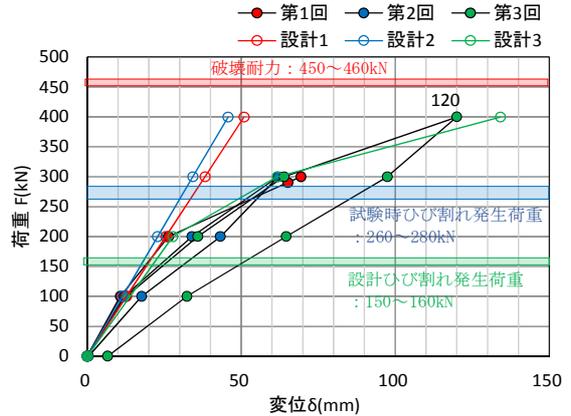


図-6 荷重-変位履歴曲線

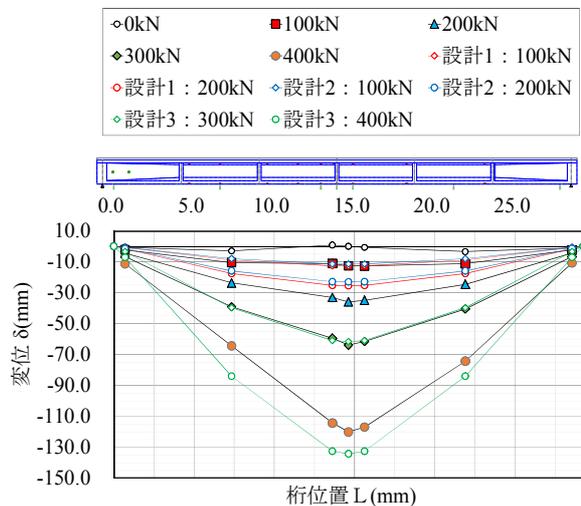


図-7 桁全体変位図

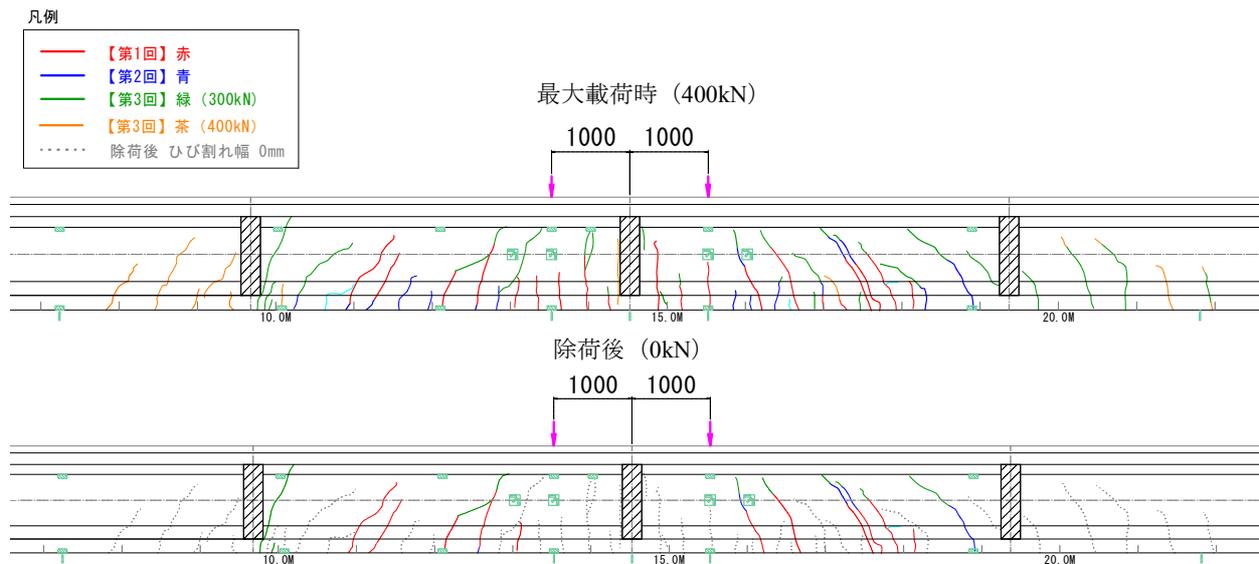


図-8 各載荷荷重状態でのひび割れ発生状況

Branson の提案式による値に近いことから、桁の挙動は正常であると判断できる。

(3) ひび割れ発生状況

各載荷荷重状態でのひび割れ発生状況を図-8 に示す。ひび割れ発生状況の確認は、目視確認にて行った。

試験の結果、目視確認によるひび割れは 200kN 載荷までは発生せず、260~280kN 載荷時に幅 0.05mm 以上のひび割れが発生しているのを確認した。解析値では、ひび割れ発生荷重は 150kN~160kN であったことから、想定していたよりも高い荷重で発生している。しかしながら、ひび割れの確認は目視確認であったため、実際は前述の図-6 に示す変位曲線が変化している 200kN を超えた付近において、目視では確認できない微細なひび割れが発生していたのではないかと推測される。

なお、発生したひび割れ幅は、400kN 載荷時において最大で 0.5mm であった。

また、ひび割れは、曲げひび割れおよび曲げせん断ひび割れの性状を示し、載荷を繰り返していくと、曲げせん断ひび割れ本数が増加するとともに、発生していたひび割れも進展していく傾向が見られた。

しかしながら、荷重を除荷すると、図-8 に示すようにひび割れのほとんどが幅の減少もしくは閉塞するのが確認された。これは、プレストレスによる復元作用であると考えられ、繰り返し載荷時もプレストレス力を保持していたことを示していると推測される。

5. まとめ

曾木大橋の耐荷性能に関する調査結果を以下に示す。

- ・試験荷重は破壊耐力(450kN~460kN 程度)に近い 400kN まで載荷したところ、ひずみは解析値に対して 7 割程

度であった。

- ・設計ひび割れ発生荷重 (150kN~160kN) に対して、試験では 200kN を超えた荷重でひび割れが発生していた。
- ・荷重を除荷すると、ひび割れのほとんどが閉塞したことから、PC 桁の復元性が確認された。

調査結果から、曾木大橋は建設から 50 年以上経過した現在においても所要なプレストレス力を保持しており、設計荷重に対して十分な耐荷性能を有していると考えられる。本調査報告が、今後の PC 橋の健全度評価技術の向上に役立てば幸いである。

謝辞

本調査の実施にあたり、鹿児島大学大学院・審良准教授よりご協力とご助言を賜りました。また、鹿児島県始良・伊佐地域振興局の皆様をはじめ、関係者各位にご協力を賜りました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) プレストレストコンクリート建設業協会：PC 構造物の維持保全，2015.3
- 2) 国土交通省道路局：道路橋定期点検要領，2014.6
- 3) セメント協会：硬化コンクリートの配合推定に関する共同試験報告，コンクリート専門委員会報告 F-18，1967.10
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅲコンクリート橋編，2012.3
- 5) 土木学会：2012 年制定コンクリート標準示方書 [施工編]，2012
- 6) 土木学会：2012 年制定コンクリート標準示方書 [設計編]，2012