

92年経過したコンクリートアーチ橋の修復工事の 前後の超音波速度計測

ULTRASONIC VELOCITY MEASUREMENTS BEFORE AND AFTER REPAIR
OF A 92-YEAR-OLD CONCRETE ARCH BRIDGE

○森 伸一郎 森本 大貴 江見和泰
SHINICHIRO MORI DAIKI MORIMOTO KAZUHIRO EMI

愛媛大学
Ehime University

伊藤 弘樹
HIROKI ITO

西条市役所
SAIJO CITY

海野 豊数 藤川 正己
TOYOKAZU UMINO MASAMI FUJIKAWA

ウエスコ
Wesco

加川 順一
JUNICHI KAGAWA

SG エンジニアリング
SG Engineering

愛媛県西条市にある大宮橋は建設後 92 年経過したコンクリートアーチ橋で、土木学会選奨土木遺産指定の歴史的建造物である。この橋は損傷が進み区分 III と判定された。全部材について超音波速度 V_p を計測した。修復前のコンクリートの V_p は 4km/s 以上の健全部材は少なく、一部では 3km/s を下回った。修復は内圧充填接合補強工法 (IPH) を採用した。アーチリブ端部では低い V_p 値が修復工事後に大幅に増加し良好状態に改善した。

KEYWORDS : Concrete arch bridge, Repair, Heritage structure

1. 緒言

愛媛県西条市にある大宮橋は建設後 92 年経過したコンクリートアーチ橋で、土木学会より選奨土木遺産と認定されているが、損傷が早期措置段階の III と判定され、内圧充填接合補強工法によって補強されて、インフラとしての機能と歴史的価値の両方が保全された。この橋の補強前後に超音波速度計測を実施したので、その方法と結果について報告する。

管理対象となる全道路橋梁は、約 72 万 6 千橋に及ぶ。最新の道路メンテナンス年報¹⁾によれば、5 年に

1度の定期点検が実施された橋梁は、2014～2019年度で717,993橋に及び健全性区分判定でIII（早期措置段階）が9%、IV（緊急措置段階）が0.1%となっている。橋齢51年以上では、IIIは17%、IVは0.2%となっている。一方、道路メンテナンス年報¹⁾のデータよれば、建設後50年以上の橋は20.4%（148,072橋）、80年以上は1.9%（13,997橋）、90年以上は0.7%（4,888橋）、100年以上は0.1%（783橋）を占める。文化庁の登録有形文化財の登録基準²⁾は、建設後50年以上で、国土の歴史的景観への寄与、造形の規範、再現困難の3要件に相当するものには、歴史的・文化財的価値にも配慮する必要がある。

一方、コンクリート製橋梁のメンテナンスでは、近接目視点検の結果、補修・補強が必要とされる場合には、調査・評価を経て適切な工法が選択される。健全性の判定区分がIVに近いIIIやIVに判定された場合には、撤去・架け替えが選択される傾向が強くなる。したがって、評価の精度を高めるための、きめ細かな調査と評価が望まれる。

以上の観点から、コンクリート製橋梁の調査、評価、補修・補強の事後検証などでは、非破壊検査法が有望である。

2. 大宮橋の概要

2.1 橋梁概要

大宮橋は、愛媛県西条市の管理する橋梁で、1927年（昭和2年）に架設された鉄筋コンクリート製の開腹式上路アーチ橋で、土木学会選奨土木遺産³⁾に指定されている。図-1に大宮橋の側面図と平面図を示す。図は上流側から見ており、左が県道12号側（起点A1橋台）、右が大宮神社側（終点A4橋台）である。橋長45.02m、幅員4.0m、アーチ支間長28.0mであり、3本のアーチリブ（AR）が主構で、そこに17本の鉛直支柱が立ち、A1側に3本、A4側に1本の独立鉛直支柱（VC）とともに縦桁（LG）・横梁（TB）・床版（DS）を支持している。図-2に大宮橋の修復前（2019年11月）と修復後（2020年10月）の写真を示す。大宮橋の位置は石鎚山系の標高432mであり、年間降水量は約2700mmであり多雨地域と言える。コンクリート構造物が長期間供用された場合、水に接することでセメント水和物中のカルシウムイオン等が溶出し、組織が粗になる溶脱現象がある。コンクリート中への降雨の浸み込みはひび割れの存在でその効率を増幅させ、その結果として溶脱現象が発生して、その進行が促進されて多孔化が促進されるという劣化メカニズムによる損傷が危惧される。近接目視だけでは、内部での損傷進展を評価することが難しく、超音波試験の有効性が期待される。

2.2 初期性能の想定

大宮橋は、固定アーチでアーチリブ構造の上に鉛直支柱を立てるというもので、RCアーチ橋の設計ができる者は限られている。当時の事情から鑑みて愛媛県によって構築、愛媛県技師によって設計がなされたと想定するのが妥当である。阿部（1916年）⁴⁾や二見（1917年）⁵⁾によって教科書が作成され、RCアーチ

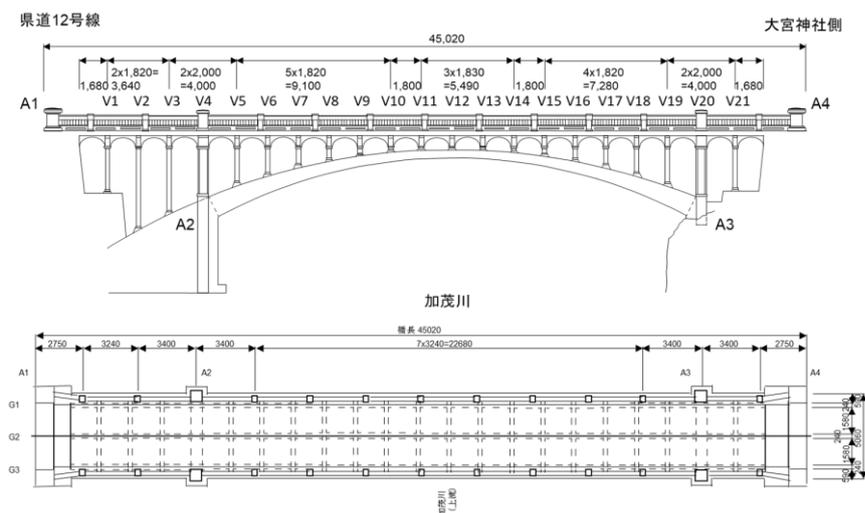


図-1 大宮橋の側面図と平面図



橋（鉄筋混凝土拱橋）について理論と設計例が掲載された。また、大宮橋竣工（1927年）から4年経過して出版された1931年（昭和6年）のコンクリート標準示方書⁶⁾ がある。以上の背景から大宮橋では、設計基準強度は2000 lb/in²（140 kgf/cm²、13.7 N/mm²）程度であったものと仮定する。

畑中ら⁷⁾は、低強度コンクリートを「劣悪コンクリート」と称して実験的研究を行い、低強度コンクリート発見の判断基準として、反発硬度（N型シュミットハンマー、材齢1~6年）で30以下、超音波速度で3.2 km/s以下という目安を示した。これは、現在の要求性能からみた判断基準と言える。

2.4 調査と評価の主眼

開腹アーチ橋であるため、主桁となるアーチリブが主要構造部材であり、圧縮部材となるためにアーチリブの圧縮耐荷性能を左右する圧縮強度評価が重要である。その次に、柱部材、水平繋ぎ梁部材、床版の評価が重要である。

2.5 損傷状態と修繕方法

2008年12月と2012年2月に定期点検がなされており、2012年点検での点検結果は2014年の道路橋定期点検要領⁸⁾を適用すれば判定区分Ⅲ（早期措置区分）となった。2015年著者らによる点検でもその判定結果の妥当性を確認した。図-4に大宮橋の損傷状況（アーチリブ上面）と調査コアおよび超音波測定（2016年10月分）箇所を示す。損傷は、床版コンクリートで漏水・遊離石灰がEレベル30%とひどく、ひび割れはBレベル10%、主構であるアーチリブコンクリート（AR）では、浮きはEレベル100%、剥離・鉄筋露出はEレベル10%、漏水・遊離石灰がEレベル10%、ひび割れDレベル10%、鉛直支柱と高欄では漏水・遊離石灰がEレベル30%、ひび割れはCレベル10%と評価されていた。歴史的価値を考慮し、架け替えではなく、補強修繕する方向で工法候補を選定した。修繕は、強度回復を図る目的で内圧充填接合補強工法（IPH）を候補として挙げた。この工法は、低粘度・高流動性のエポキシ樹脂をばねの力で自動低圧注入する（0.06 N/mm²以下）するものである¹⁴⁾。渡邊ら¹⁵⁾は、実験的研究に基づいて、微細なひび割れに樹脂が充填され安定的な注入効果を得られること、剛性については一般的注入工法よりもIPH工法の方が1割ほど高いことを報告している。

現状の構造強度の定量的評価と内圧充填接合補強工法を採用した場合の強度回復の実効性確認を目的とする調査が計画され、2015年（平成27年）に詳細調査が実施された。調査内容は、1)はつり調査、2)一軸圧縮試験、3)静弾性係数試験、4)塩分含有量試験、5)中性化深さ調査、6)ジャンカ確認調査、7)床版内部状況電磁波探査、8)舗装内調査（金属反応部）、9)超音波測定、10)IPH工法試験施工である。

3. 損傷の定量評価

3.1 対象とする特性と評価方法

リバウンドハンマー試験と超音波測定により強度を、すでによくまとめられた文献^{16), 17)}参照して推定した。超音波試験は、1箇所あたり3点とし、20 cmの間隔を開けて3点設けた。このうち1点はリバウンドハンマー試験の25点または9点の中心点と位置を合わせている。

3.2 超音波試験の方法

超音波試験は、東横エルメス製の超音波測定器ESI-10（エルソニックメーター）と超音波センサーESP-10を用いた。発信器は公称周波数28kHzの超音波を発信し、1,000 mm以下で精度±0.3 μsで伝播時間が

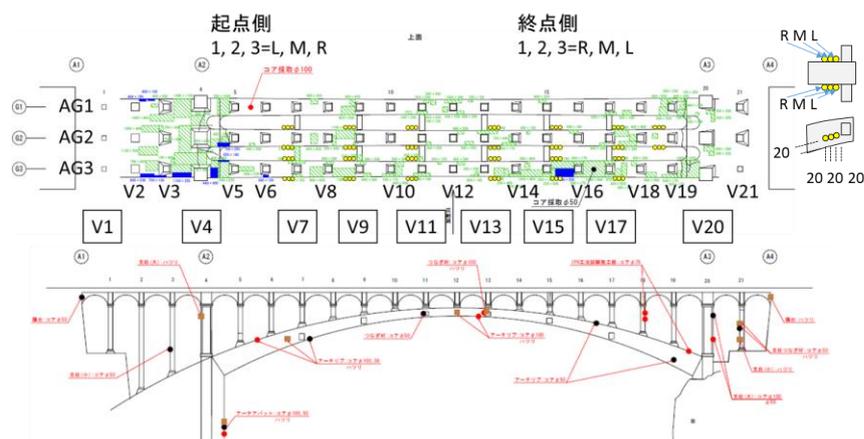


図-4 大宮橋の損傷状況（アーチリブ上面）と調査コアおよび超音波測定（2016年10月分）箇所

測定できる。発信パルス電圧は厚いアーチリブ（AR）では 870～1100 mm、鉛直支柱（VC）では 260 mm 前後と 600 mm 前後などであり、高圧べて 1.0 kV とした。受信信号感度は閾値を決め、最も高い 0.5 とした。

コンクリートの表面は、修繕工事の前には木製角材片で苔類をこそぎ取り布で清掃して、修繕工事の最中では表面を布で清掃して、多めのグリースをコンクリート表面に塗布して発信器を 1～4 kgf の力で圧着した。

この装置では 1 秒間に 10 回測定して結果を表示する。鋼製型枠など表面が滑らかな型枠で新たに打設したコンクリートの場合、安定して一定値を示すか、もしくは、1 μs 程度の幅でふれることが多い。しかし、経年コンクリートの場合には、伝播時間の表示値は、一定の幅でふれて、劣化の程度が大きいほどふれ幅も大きくなる。ふれ幅の中で時間経過とともに収束していく場合、収束せず振動が続く場合、ふれ幅が収束することなく発散して測定不能なる場合さえある。測定は原則として 3 名 1 チームで実施し、1 名が発信器と測定器、1 名が受信器、1 名が記録を担当した。装置の読み取り担当者は、連続的に声を出して表示値を読むことでふれ幅をチーム内で共有した。測定値は、安定した値、もしくは、ふれ幅の中間値とした。ふれ幅の表示値が狭い範囲（1 %程度の両振幅）に安定した場合には「安定」と評価、ふれ幅が大きい場合には中間値を読み切って「読み切り」と評価して、値とともに評価を記録した。1 点での超音波試験は、原則として発信器・受信器ともに 1 回ごとにコンクリート表面から離して 3 回測定したが、「読み切り」評価の場合には、そのたびに 1 回新たに測定した。最大測定回数は 6 回とした。ふれ幅が大きい場合には、新たに測定点の位置をずらして、改めて測定した。

3.3 調査の内容・量と状況

表-1 に実施した調査とその目的・内容を示す。超音波測定（US）は、2015 年の詳細点検前から 2020 年の修繕工事完了までの 6 年間に、事前調査、補修前調査、補修後調査、修繕後調査、舗装調査として合計 10 回にわたって実施した。特に、アーチリブ（AR）、鉛直支柱（VC）、水平継ぎ材（HT）、高欄支柱（BC : barrier column）については、系統的な変化を網羅的に調べるため、AR の VC 交差部、VC 中央部、HT 中央部、BC 中央部を、修繕前・修繕後に全数調査した。また、床版（DS）も別途、調査した。

調査の状況として、図-5 に修繕工事前と修繕工事中（補修工事完了後）の超音波測定の様子を示す。修繕前では、橋梁点検車のゴンドラに乗ってアーチリブの調査を行い、橋台付近の鉛直支柱とアーチリブ基部については直接、歩いて近づき調査した。修繕工事中は、全面に架けられた吊り足場の上で調査作業を実施した。2020 年度については、新型コロナウイルスの防御のため、早春から秋に至る期間、調査時は常時マスク着用と事前事後の装置のアルコール消毒を徹底した。

3.4 強度推定

2015 年 12 月に採取・試験したコア供試体のコンクリート強度（Fc）と弾性係数（E30）は、ばらつきが大きい、正の相関があった。密度ρとポアソン比をν一定値に仮定すると Vp がわかれば E を推定できる。日本建築学会¹⁶⁾では、コンクリート非破壊試験法研究小委員会が得た Vp（km/s）と Fc（kgf/cm²）の関係を実験式（Fc=215×Vp-620）とを示している。強度推定にはこの実験式を用いる。設計基準強度を 1

表-1 実施した調査とその目的・内容

調査日	調査内容	BV	US	RH	DM	UAV
2015年11月18日	大宮橋、点検前視察					
2015年12月16日	橋梁点検、点検車で内部近接目視、橋台A4周辺AR・VCの数点でUS調査	○	○			
2016年10月3日	補修設計に伴う調査。補修法確認。補修工事前、AR調査は橋梁点検車で	○	○	○		
2019年11月11,12日	補修工事前、AR調査は橋梁点検車で	○	○	○		○
2020年3月10,11日	補修工事開始後、足場あり、橋梁高圧洗浄直後、AR・VC・HT全数調査		○	○		
2020年5月29日	足場、補修工事（断面修復後、注入前）		○	○		
2020年6月2日	足場、補修工事（AR注入工開始直後）		○	○		
2020年6月13日	足場、補修工事（VC注入工開始直後）		○	○		
2020年6月23,24日	足場、補修工事（AR固化完了、VT注入工実施中）、AR・VC・HT全数、DS一部調査		○	○		
2020年7月19日	足場、補修工事（AR固化完了、DS注入工実施中）、AR・VC・HT全数、DS一部再調査		○	○		
2020年8月17日	足場、補修工事完成検査、振動測定、アーケード寸法測定	○			○	
2020年9月22日	足場解体済、舗装撤去工事、アスファルト調査、床版コンクリート調査		○	○		
2020年10月10日	修復完成記念渡り初め式					

BV	振動測定 (bridge vibration)
US	超音波測定 (ultrasonic testing)
RH	リバウンドハンマー (rebound hammer)
DM	寸法測定 (dimension measurement)
UAV	ドローン撮影 (unmanned aerial vehicle)
AR	アーチリブ (arch rib)
VC	鉛直支柱 (vertical column)
HT	水平継ぎ材 (horizontal tie beam)
DS	床版 (deck slab)

40 kgf/cm² (13.7 N/mm²) 程度と、先に推定したが、コンクリートコアの推定強度はこの推定設計基準コンクリートをすべて上回っていた。

4. 超音波測定の結果

4.1 事前調査

図-6 に事前の 2016 年 10 月に実施した超音波測定によるアーチリブコンクリートの超音波速度のリブ桁別分布 (アーチリブ (AR) の G2, G3) を示す。G2 と G3 で傾向が似ており、起点側から中央部を経て終点部に向かって減少する傾向がある。全体での平均値は 3.84 km/s、変動係数は 3.4% であった。平均値は大きく、いずれの部位も推定設計基準強度 140 kgf/cm² に相当する $V_p=3.53$ km/s を上回っており、90 年近く経過していても全体的には良好なコンクリートであることが確認できた。

図-7 にアーチリブコンクリートの超音波速度の平均値と変動係数の関係を示す。平均値が大きいほど変動係数が小さく 3%未満となる。

床版コンクリートについては、アスファルト舗装上面と床版コンクリート下面に超音波センサーを当てて透過法により測定した。アスファルト舗装の厚さと V_p を仮定して、測定した床版厚さを求め V_p を推定した。10 か所で測定し、推定値は 1.85~3.84 km/s の間を分布し、平均値は 3.24 km/s であり変動係数は 21%であった。推定精度は高くないと考えられるが、低強度コンクリートであることが懸念された。

4.2 修繕の前後における全数調査

図-8 に修繕工事の前 (2020 年 3 月 10 日) と後 (2020 年 7 月 19 日) のアーチリブコンクリートの超音波速度 V_p の鉛直支柱基部に相当する位置での橋軸方向分布を示す。修繕工事前の V_p の軸方向分布は、図-11 と図-12 に示した G2, G3 のアーチリブ桁の結果では、図-6 の結果 (2016 年) の傾向と値はおおむね同等である。これより、事前調査で行ったような方法は妥当であったと理解できる。

一方、樹脂注入の IPH 工法施工後は、修繕工事に V_p が低い値を示していた箇所ほど V_p の増加がみられ、ほぼすべての箇所で $V_p=3.5$ km/s を上回っていた。また、補修工事の施工後はほとんどの箇所で V_p が増加していた。すなわち、修繕前に低い V_p を示していたアーチリブコンクリートは、もともと施工品質が良くないか、雨水の侵入、風化と溶脱 (カルシウム溶出) などによりコンクリートの多孔化が進むなどして損傷が進んでいて、 V_p が低く測定されていたものが、IPH 工法による樹脂注入が全般・細部に至るまで行きわたり、亀裂や空洞が硬質樹脂で充填されたために直線的な波動伝播が実現したためであると考えられる。さらに、ほとんどの箇所で伝播速度の増加の割合は、渡邊ら¹⁵⁾の結果と調和的である。

床版については、修繕前後の 2 回、いくつかの箇所で、下面に対して送信器を固定し、10 cm 間隔で受信器を遠ざかるように設置する表層探査法によって測定した。その結果、およそどの箇所でも良好な走時曲線が得られた。大半では 3.5 km/s 以上あり IPH 工法で十分に必要性能に回復できることがわかった。



図-5 修繕工事前 (左) と工事中 (右) の超音波測定の様子 (上: アーチリブ、下: 鉛直支柱)

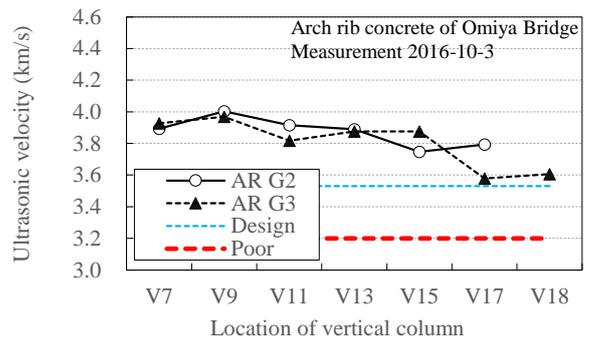


図-6 事前に実施した超音波測定によるアーチリブコンクリートの超音波速度

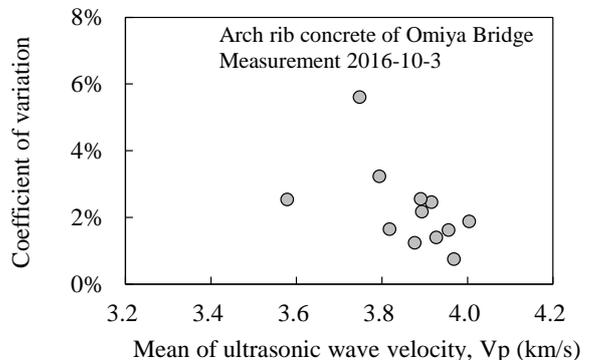


図-7 アーチリブコンクリートの超音波速度の平均値と変動係数の関係

5. 結論

建設後 92 年経過した鉄筋コンクリート製 (RC) アーチ橋である大宮橋において、種々の詳細な調査がなされ、橋梁全体の耐荷性能を高い精度で確認するためには、橋の構造性能を支配する主構であるアーチリブコンクリートと鉛直支柱の強度特性を定量的に把握することが必要であった。また、修繕には確実に初期の設計耐荷性能を確実にものとするために、補修工事の前後での部材の強度特性を評価する必要があった。それらに応えるために各段階での詳細な超音波測定を実施した。得られた成果は以下の通り。

- 1) 老朽化したコンクリート橋梁の部材での超音波測定では、新設建造物の条件と比して表面に付着物が多く足場の悪い劣悪な測定条件であっても、適切な準備とやり方で良好な条件で測定した結果と同等の結果を得た。測定器指示値のふれ幅を適切に考慮することが重要である。
- 2) 実物から採取したコアの強度と弾性係数には相関がみられ、測定した超音波速度から既往の実験式で推定される強度と調和的な結果が得られた。
- 3) アーチリブおよび鉛直支柱という重要構造部材については、超音波測定により得られた P 波速度値と推定強度値は、建設当初の推定設計基準強度を上回っていた。
- 4) 床版コンクリートについては、当初、アスファルト舗装を挟んだ格好での透過法による超音波速度の推定結果では、推定設計基準強度を下回ることがわかり、床版コンクリートの解体・打設替が必要となる可能性が出てきた。しかし、足場ができた直後に表面走査法による測定で得られた V_p の結果では、大半は同強度を上回ることがわかった。さらに、補修工事後は V_p は増大した。したがって、アスファルト舗装がある状態でのコンクリートの V_p 推定は、有効であり、精度向上のためには、精度の高いアスファルト舗装の V_p 推定方法が必要であると言える。

参考文献

- 1) 国土交通省：道路メンテナンス年報，2020.9.
- 2) 文部科学省：登録有形文化財登録基準，平成 17 年 3 月 28 日文部科学省告示第 44 号
- 3) 土木学会：土木学会選奨土木遺産 大宮橋，<https://committees.jsce.or.jp/heritage/node/404>
- 4) 阿部 美樹志：鉄筋混凝土工学，丸善，東京，529p.，1916.
- 5) 二見 鏡三郎：鋼拱橋及鉄筋混凝土拱，工学社，233p.，1917.
- 6) 土木学会コンクリート調査会：昭和六年土木學會 鉄筋コンクリート標準示方書，1931.9.
- 7) 畑中 重光，和藤 浩，谷川 恭雄：劣悪コンクリートの簡易診断に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，Vol. 573，pp.29-35，2003.11.
- 8) 国土交通省道路局：道路橋定期点検要領，2014.
- 9) 一般社団法人 IPH 工法協会：IPH 工法（内圧充填接合補強）とは，<http://www.iph-v.com/pg371.html>
- 10) 渡邊 祥庸，瀬野 健助，加川 順一，二羽 淳一郎：内圧充填接合補強工法によるコンクリート中への樹脂充填性能と補修効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.2，pp.1465-1470，2012.
- 11) 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，77p.，1983，
- 12) 明石 外世樹，尼崎 省二：コンクリートの非破壊試験の現状と趨勢，コンクリート工学，23 巻，12 号，p.11-20，1985.

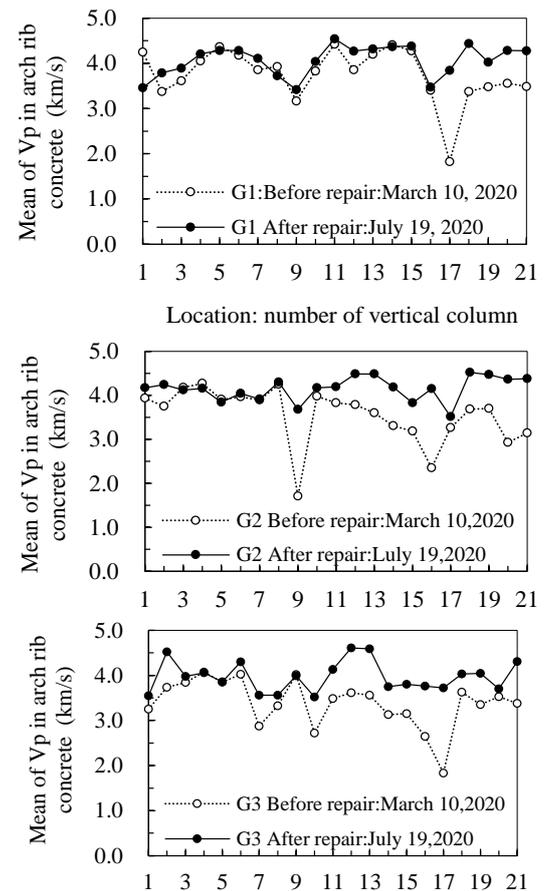


図-8 修繕工事の前後のアーチリブコンクリートの超音波速度の橋軸方向分布 (上：G1、中：G2、下：G3)