

実橋の車輛走行時における溶接開先の挙動

鈴木博之*, 井元 泉**, 中西保正**

Behavior of a Weld Groove in Existing Bridges in Service Condition

Hiroyuki SUZUKI, Izumi IMOTO, Yasumasa NAKANISHI

The hot cracks, which initiate in welding under a pulsating load, are known to be evaluated by a root gap opening displacement, $\Delta \delta$, and its frequency, f , of a welded joint. Therefore, it is very important to examine a $\Delta \delta$ and its f of welded joints in existing bridges to consider a procedure to obtain a sound joint in welding in service condition.

This paper describes the $\Delta \delta$ and its f measured in the welded joints of (1) Steel deck plates, (2) Addition of a new member to a existing floor beam, and (3) Repair of a fatigue crack in a trough rib. And the maximum of a $\Delta \delta$ and its f obtained in many existing bridges is discussed.

1. 緒 言

近年、既存橋梁において車輛重量の増加ならびに重車輛の通行量の増加による損傷事例が数多く報告され、補修、補強あるいは改造が行われている¹⁾。また、交通量の増加に対応するため、拡幅、2等橋から1等橋への格上、部材の取替えあるいは部材の取付けも行われている²⁾。

このような施工を部材に作用する荷重によって分類すると次の4種類となる。

- ① 死荷重は無視できるほど小さく、活荷重は無視できるほど小さいかあるいは作用していない。
- ② 死荷重だけが作用し、活荷重は無視できるほど小さいかあるいは作用していない。
- ③ 死荷重は無視できるほど小さく、活荷重だけが作用している。
- ④ 死荷重も活荷重も作用している。

①は作業環境の違いを除けば工場における状態とほぼ同じであり、部材の接合に溶接を用いたとしてもほとんど問題はない。②は交通を規制している状態である。すなわち、橋梁は供用を制限したあるいは休止した状態にあり、溶接継手の開先には静的荷重だけが作用している。この状態での溶接施工については既にいくつかの研究がなされており^{3)・4)}、交通を規制(遮断を含む)した状態で溶接施工がなされるようになってきている。これに対して、③、④は交通を規制していない状態である。すなわち、橋梁は供用中であり、溶接継手の開先には変動荷重が作用している。なお、④では変動荷重だけでなく静的荷重も作用した状態にある。

交通を遮断しないと橋梁には走行車輛により荷重が繰返し作用し、これによって溶接継手の開先には剛体変位と相対変位が生じる。剛体変位が溶接継手の健全性に及ぼす影響についてはいくつかの研究がなされており、溶接作業性の低下によりブローホール、アンダーカットなどを生じることがあるが⁵⁾、割れを生じることはないと言われている⁶⁾。一方、開先の相対変位は凝固・冷却過程にある溶接金属にひずみを生じさせる。これが継手の健全性に及ぼす影響については、

*建設工学科 土木工学専攻 **石川島播磨重工業㈱

変動荷重を作用させた溶接割れ試験が実施され、高温割れの生じる可能性があり、この割れに静的荷重は寄与しないことが示されている⁷⁾。さらに、開先の開口変位 $\Delta\delta$ とその周波数 f を用いた割れ発生評価式が提案されている^{8)・9)}。しかし、高温割れ発生を評価するのに必要な実橋の溶接継手における開先の開口変位 $\Delta\delta$ については必ずしも明らかとなっていない。したがって、供用中の橋梁への溶接において健全な継手を得る施工法を確立するためには、実橋の部材にある溶接部の挙動を知ることが重要である。

本稿では、実橋の溶接継手における開先の開口変位 $\Delta\delta$ とその周波数 f の測定例を報告する。また、これまでに多くの実橋で得られた開先の開口変位の最大値 $\Delta\delta_{max}$ とその周波数 f について考察する。

2. 実 測 例

③鋼床版デッキプレートの溶接継手部

測定は7本主桁の3径間連続橋(3@30m)で行った²⁾。本橋においては4車線から6車線へ車線を増加させるにあたり死荷重の軽減のためにRC床版から鋼床版への張替えが行われた。この工事は常時4車線を確保しながら分割施工した。したがって、走行車輛は主桁間を継なく横桁、対傾構などを通して施工区間の部材にも影響を与えていた。本測定は実験用の車輛を走行させて行ったものではなく、一般の車輛が走行した状態で行ったものである。本橋の日交通量はおよそ65,000台であり、夜間の交通量も多かった。

測定箇所は中央径間の中央ブロックにおける鋼床版のデッキプレート間 (Fig. 1 のA~D点) である。各点において、個々のブロックの鉛直方向加速度、鉛直方向変位 δ_v 、ブロック間の開口変位 $\Delta\delta$ 、溶接線方向相対変位 $\Delta\delta_L$ および鉛直方向相対変位 $\Delta\delta_v$ を測定した。なお、 $\Delta\delta$ はクリップゲージ、 $\Delta\delta_L$ および $\Delta\delta_v$ はダイヤルゲージにより測定した。鉛直方向加速度および鉛直方向変位 δ_v の測定にはセンサーとして加速度計を用い、計器の出力モードを切替えることにより求めた。

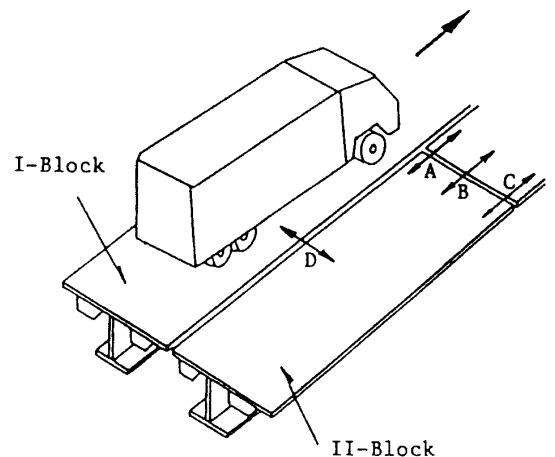
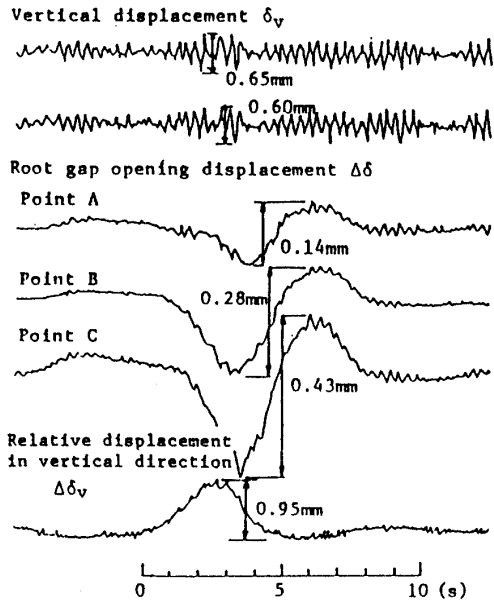


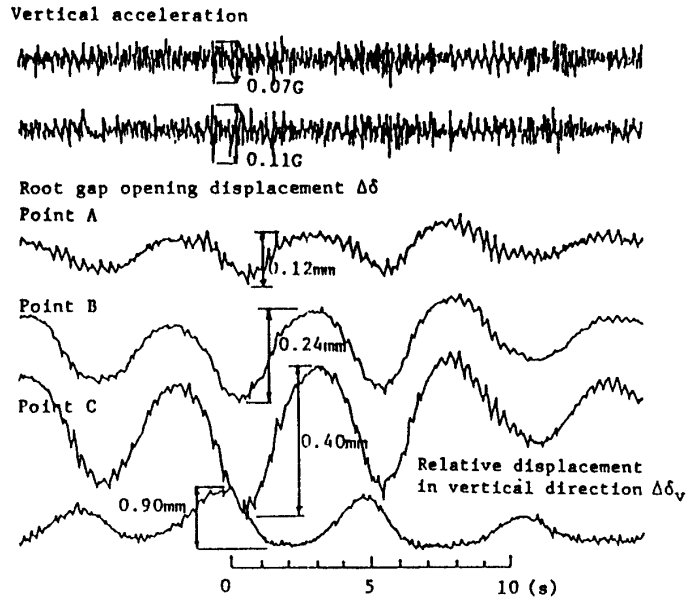
Fig. 1 Measuring points on a deck plate

測定例をFig. 2に示す。(1), (2)はA~C点の結果であり、(1)はトラック1台通過時、(2)はトラック4台連続通過時である。(3), (4)はD点の結果であり、(3)はトラック1台通過時、(4)はトラック2台連続通過時である。A~C点における開口変位の最大値 $\Delta\delta_{max}$ はトラック1台通過時のC点の0.43mmであり、D点における $\Delta\delta_{max}$ はトラック2台連続通過時の0.47mmである。いずれの測定点においても $\Delta\delta$ の波形は0.1~0.3 Hzの低い周波数で大きな振幅の波に3 Hz程度の高い周波数で小さな振幅の波が重畳した形である。高い周波数の波の振幅は低い周波数の波のそれに比べて十分小さく、 $\Delta\delta$ の大きさを考えるとき、これを無視しても差し支えないように思われる。

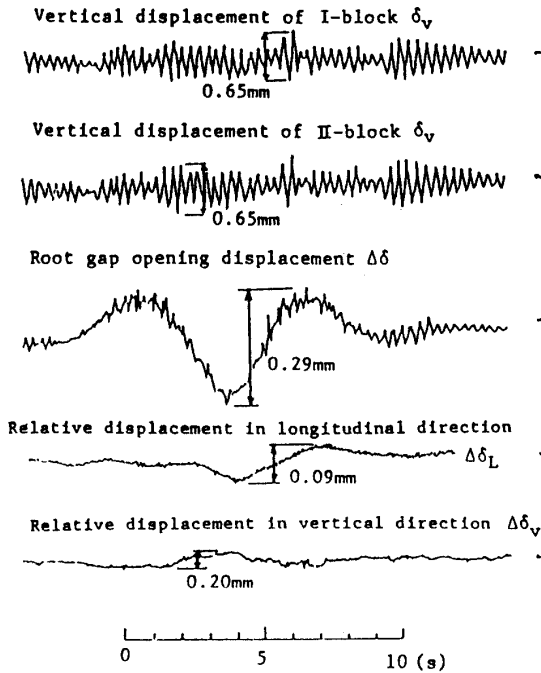
実橋の車輛走行時における溶接開先の挙動



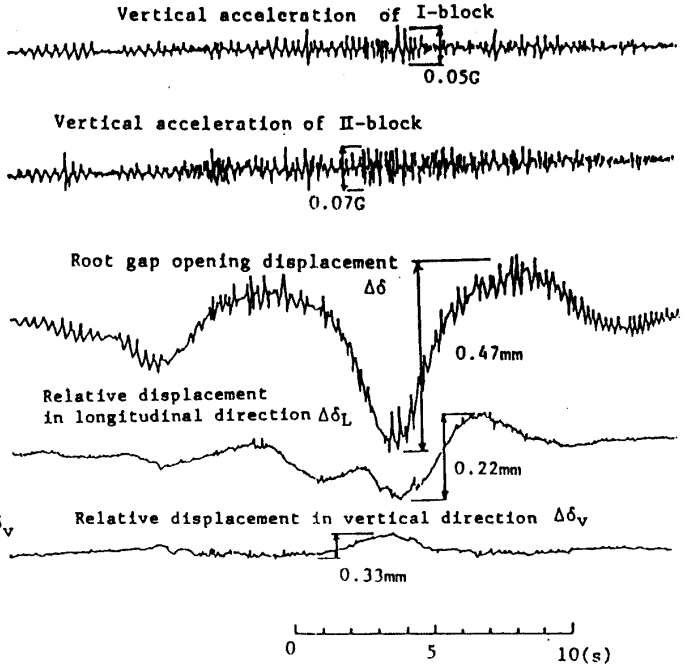
(1) In passage of one truck (at point A, B, C)



(2) In passage of some trucks (at point A, B, C)



(3) In passage of one truck (at point D)



(4) In passage of two trucks (at point D)

Fig. 2 Vertical acceleration, δ_v , $\Delta\delta$, $\Delta\delta_L$ and $\Delta\delta_v$ at point A to D in the example ㊸

0.1~0.3 Hzの低い周波数で大きな振幅の波はそれぞれの車輛によりほぼ1サイクルの $\Delta\delta$ 、 $\Delta\delta_L$ および $\Delta\delta_v$ を生じている。これは車輛の通過に伴う桁の変形に起因していると考えられる。車輛の通過による静的たわみは車輛が対象とする部材に入ってから出ていく間が一周期であるので、対象とする部材の長さをL (m)、車輛の速度をV (m/sec) とすると、車輛の通過による桁の変形の周波数f (Hz)は

$$f = V / L \quad (1)$$

で表わされる。今回の測定における車輛の速度が25~35km/hと推定され、支間が30mであるので、これらを式(1)に代入すると、周波数は $f=0.2\sim 0.3$ Hz程度となり、 $\Delta\delta$ の測定における大きな振幅の波の周波数とよい対応を示している。したがって、低い周波数で大きな振幅の波は車輛の通過に伴う桁の変形に起因しているといえる。このように部材の変形に起因する開口変位の周波数fは対象とする部材の長さLと車輛の速度Vがわかれば式(1)によって推定することができる。

A~D点のいずれにおいても、各ブロックの鉛直方向加速度、 δ_v はほぼ同じであり、各ブロック固有の挙動に大きな違いはない。また、I、IIブロックの δ_v の周波数は $\Delta\delta$ における大きな振幅の波に重なっている小さな振幅の波の周波数3Hzとほぼ同じであることがわかる。したがって、 $\Delta\delta$ における小さな振幅の波はブロックに固有の振動変位に起因しているようである。

D点における $\Delta\delta_L$ の最大値はトラック2台連続通過時の0.22mmであり、橋軸方向継手部は橋軸直角方向および鉛直方向だけでなく、橋軸方向にも相対的に変位していることがわかる。

$\Delta\delta_v$ はA~C点とD点で著しく異なっている。A~C点の $\Delta\delta_v$ はIIブロックの δ_v の約1.5倍であるのに対して、D点の $\Delta\delta_v$ はI、IIブロックの δ_v の約1/3である。これは各ブロックの δ_v の振動における位相のずれに起因するものである。

なお、乗用車が通過したときの $\Delta\delta$ 、 $\Delta\delta_L$ および $\Delta\delta_v$ は無視できるほど小さかった。

④ 横桁への部材取付け溶接継手部

主桁、横桁あるいは縦桁の剛性を高めるためにこれらの部材に新たに部材を取付けることがある。本測定においては、このような場合を想定した。測定は支間52m、横桁間隔6.5mの単純トラス橋で行った。Fig. 3に示すようにL-90x90x2100の山形鋼を補剛部材に想定し、これを支間中央の横桁下フランジにクランプで取付けた。クランプ間隔(仮付け間隔)は2mと1mの2種類とした。 $\Delta\delta$ はクランプ間隔の中央でクリップゲージを用いて測定した。

トラックが通過したときの $\Delta\delta$ の測定結果をFig. 4に示す。クランプ間隔2mの場合における $\Delta\delta$ の波形は実測例②と同様に大きな波に小さな波が重畳している波形を示している。この大きな波は $\Delta\delta$ が0.2mm程度で周波数が0.5Hz程度であり、小さな波は $\Delta\delta$ が0.05mm程度で周波数が4Hz程度である。

この例においても、周波数が低く、 $\Delta\delta$ が大きい波は部材の変形によって生じているものと考えられるので、②と同様に推定してみることとする。測定時のトラックの走行速度は約20km/hであった。 $\Delta\delta$ に影響を及ぼす変形を生じさせる部材長として測定横桁の両隣の横桁を支点とする縦桁2径間(2@6.5m=13m)を考えると、式(1)より周波数は0.42Hzとなり、測定値とよい対応を示していることがわかる。このように周波数が低く、 $\Delta\delta$ が大きい波は部材の変形によって生じ

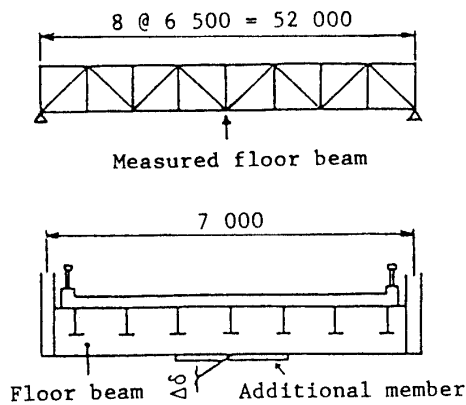


Fig. 3 Measuring point in the example ①

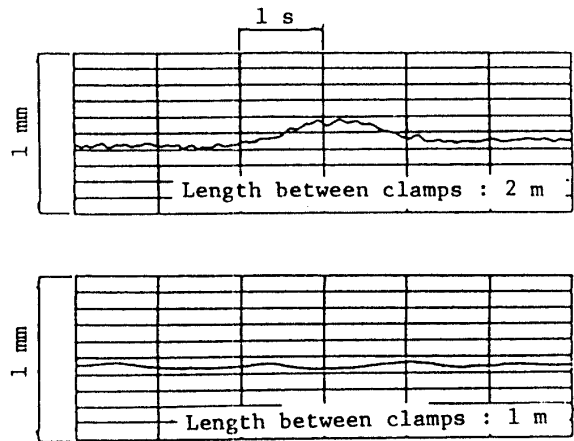


Fig. 4 Root gap opening displacement in the example ①

ているので、路面の凹凸の影響を受けることは少ない。これに対して、周波数が高く、 $\Delta\delta$ が小さい波は衝撃によっても生じるので、路面の凹凸が大きな影響を与える。

クランプ間隔1mの場合は $\Delta\delta$ が0.05mmと小さく、波の重畳は認められない。また、クランプ間隔を2mから1mにすることによって $\Delta\delta$ が低減していることがわかる。したがって、クランプ間隔（仮付け間隔）を短くすることは $\Delta\delta$ の低減に効果が大いといえる。

◎トラフリブに発生した疲労亀裂

鋼床版箱桁のトラフリブの現場溶接継手に発生した長さ 136mmの疲労亀裂中央の $\Delta\delta$ をクリップゲージを用いて測定した。

3軸トレーラ、20tトラックおよび2tトラックが通過したときの測定結果をFig. 5に示す。 $\Delta\delta$ の波形は3軸トレーラでは3サイクル、2軸の20tトラックおよび2tトラックでは2サイクルの波形を示している。これは箱桁のダイアフラム間隔が車軸間距離より短いため個々の軸重が荷重の一単位として作用し、車輛の軸数に応じた $\Delta\delta$ の波形が得られたものと推察される。本測定においては、③、④で測定されたような波の重畳は認められない。 $\Delta\delta$ の周波数は3～5 Hzであり、車種に依存していない。箱桁には4.475m間隔でダイアフラムが配置されており、ダイアフラム間が $\Delta\delta$ に影響を及ぼす部材長と考えて良いものと思われる。測定時の車輛の走行速度は60～70km/hであったので、式(1)より走行車輛による部材の変形の周波数を求めると4 Hz程度となり、 $\Delta\delta$ の周波数とほぼ一致する。したがって、本測定で得られた $\Delta\delta$ も走行車輛による部材の変形に起因していると言え

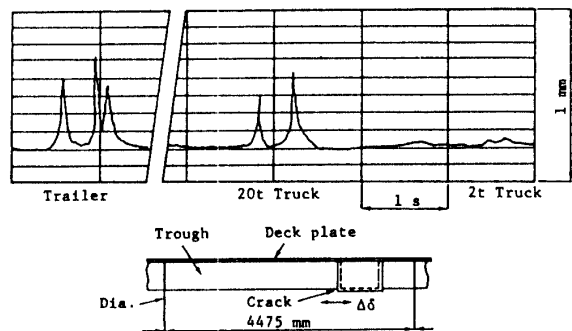


Fig. 5 Root gap opening displacement in the example ③

る。また、車種により周波数が大きく変化していないことから $\Delta\delta$ は車輛の軸重によるたわみによって生じていることがわかる。

開口変位の最大値 $\Delta\delta_{max}$ はトレーラが通過したときで約0.5mm、20tトラックが通過したときで約0.45mm、2tトラックが通過したときで約0.05mmである。2tトラックの $\Delta\delta_{max}$ は20tトラックのその約1/9である。これは軸重の違いによるものと思われる。文献10)によれば、20tトラックの満載時の後輪軸重は160kNであり、2tトラックのそれは16kNである。したがって、軸重の比は1/10となり、 $\Delta\delta$ の比にほぼ対応している。

トレーラと20tトラックの $\Delta\delta$ に大きな違いがないのは次のように考えられる。20tトラック以上の重車輛になると、車輛重量が増加しても軸重が一定になるように設計されている¹⁰⁾。したがって、この例においては軸重が荷重の一単位となっているので、トレーラと20tトラックにより生じる $\Delta\delta$ に有意な差がなかったものと思われる。

以上の測定結果から、 $\Delta\delta$ の発生要因は走行車輛による部材の変形と部材に固有の振動であると言える。しかし、振動による $\Delta\delta$ は部材の変形による $\Delta\delta$ に比べて十分小さく、 $\Delta\delta$ を評価する場合、トラックやバスのような重車輛が通過したときの部材の変形による $\Delta\delta$ を考えれば十分であると推察される。

3. 開口変位 $\Delta\delta$ と周波数 f

文献8),9)に述べられているように、変動荷重下における溶接の高温割れは $\Delta\delta$ と f を用いて発生を評価することができるので、これまでに種々の橋梁で測定したトラックやバスなどの重車輛が通過したときの開口変位の最大値 $\Delta\delta_{max}$ とその周波数 f を整理した。結果をFig.6に示す。この図には2.②,③のように $\Delta\delta$ に影響を及ぼす荷重の一単位が車輛重量であるものも、2.④のように荷重の一単位が軸重であるものも含まれている。周波数の低い領域のデータは溶接部が主桁のように部材長の長い部材にある場合に測定されたものであり、周波数の高い領域のデータは溶接部が床組部材のように部材長の短い部材にある場合に測定されたものである。 $\Delta\delta_{max}$ の最大値は約0.7mmである。これは200~300kNの車輛が通過したときの測定値であり、実際には400kNを超えるような過積載車が通過することもあるので、 $\Delta\delta_{max}$ はFig.6の1.5倍程度となる可能性がある。したがって、 $\Delta\delta_{max}$ としては約1mmを目安とすれば十分であるものと考えられる。

2.②~④の溶接部を含む部材の長さ L と開口変位の周波数 f の関係をFig.7に示す。図中に実線で示した記号は実測値であり、点線で示した記号は式(1)から求めた計算値である。②,④においては速度にバラツキがあるので、周波数 f の範囲を示してある。図中の直線は式(1)に基づいて描いたものである。部材長が2~100mであるとすれば、開口変位の周波数 f は渋滞時のように車輛がゆっくり走行する場合(速度 $V=20\text{km/h}$)で0.06~2.8Hzであり、高速道路のように車輛が速く走行する場合(速度 $V=100\text{km/h}$)で0.3~13.9Hzである。Fig.6における周波数の最大値 f_{max} はおよそ10Hzであり、よい一致を示している。したがって、開口変位の周波数の最大値 f_{max} の目安としては20Hz程度を考慮しておけばよいものと思われる。

Fig.6,7のいずれからもわかるように、溶接箇所が床組部材のように長さの短い部材にある

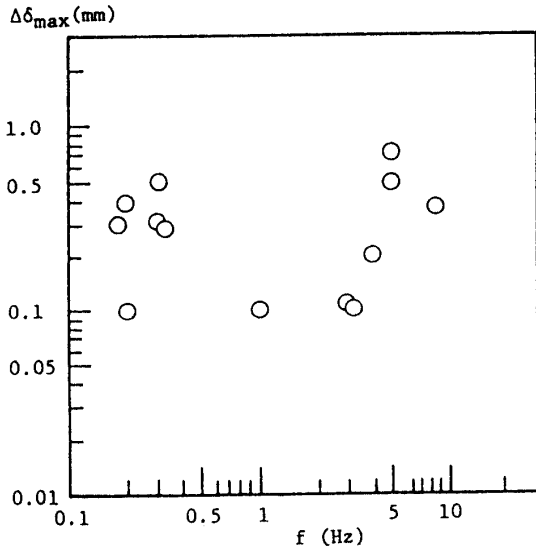


Fig. 6 Relation between maximum root gap opening displacement and its frequency of in-service bridges

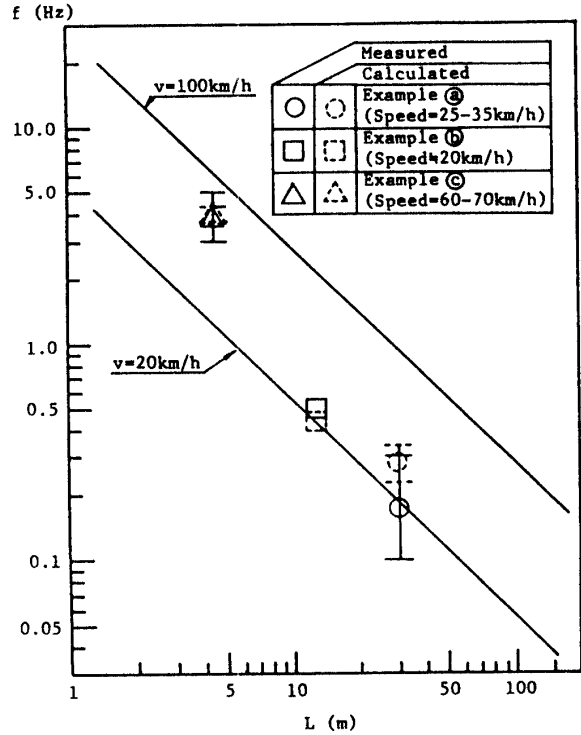


Fig. 7 Relation between frequency of root gap opening displacement and length of members

場合の開口変位の周波数 f は、主桁のように長さの長い部材にある場合のそれと比べて相対的に高くなる。加えて、割れ発生限界開口変位 $\Delta\delta_{cr}$ は周波数 f が高くなると低下すること^{9), 10)} を考慮すると、溶接箇所が床組部材にある場合は主桁にある場合と比較して高温割れに関して厳しい条件下にあることになる。

4. 結 言

本研究では、実橋の3種類の溶接継手における開先の開口変位 $\Delta\delta$ とその周波数 f を測定した。また、これまでに多くの実橋で得られた開先の開口変位の最大値 $\Delta\delta_{max}$ とその周波数 f について考察した。得られた結果は以下のとおりである。

- (1) 3ケースの現場測定の結果、 $\Delta\delta$ の発生要因は走行車輛による部材の変形と部材に固有の振動であった。しかし、振動による $\Delta\delta$ は部材の変形による $\Delta\delta$ に比べて十分小さく、また、乗用車が通過したときの部材の変形による $\Delta\delta$ は無視できるほど小さかった。したがって、 $\Delta\delta$ を評価する場合、トラックやバスのような重車輛が通過したときの部材の変形による $\Delta\delta$ を考えれば十分であると思われる。さらに、車輛（特に、大型車）の通行規制を行うことは有力な $\Delta\delta$ の低減法である。
- (2) 継手の拘束間隔を短くすることによって $\Delta\delta$ が低減した。したがって、拘束間隔（仮付け間隔）を短くすることは $\Delta\delta$ の低減に効果が大きいといえる。

- (3) 本研究の範囲において開口変位の最大値 $\Delta \delta_{max}$ はおよそ 0.7mmであった。したがって、過積載車が通過することを考慮し、 $\Delta \delta_{max}$ としては約 1mmを目安とすれば十分であるものと考えられる。
- (4) 同様に、開口変位の周波数の最大値 f_{max} はおよそ 10Hzであった。 $\Delta \delta$ が車輛の通過に伴う部材の変形に起因しているものとして f_{max} を推定したところおよそ 14Hzであった。したがって、 f_{max} としては 20Hz程度を目安とすれば十分であるものと思われる。
- (5) 溶接箇所が床組部材にある場合は主桁にある場合に比べて開口変位の周波数が相対的に高くなるので、高温割れに関して厳しい条件下にあることになる。

参 考 文 献

- 1) 堀川：橋梁の損傷と補修，溶接学会誌，Vol.52, No.7, pp.13~22, 1983.9.
- 2) 例えば，新観音橋床版張替工事，石川島播磨技報，Vol.25, No.5, 1985.5.
- 3) 鈴木ほか：応力作用下で溶接された平板の変形挙動，
土木学会論文集 No.350/I-2, pp.237~242, 1984.10.
- 4) 鈴木ほか：圧縮応力作用下にあるパイプ柱への溶接，
土木学会論文集 No.356/I-3, pp.489~497, 1985.4.
- 5) 鈴木ほか：既設橋梁の振動下における現場溶接施工実験，
土木学会第37回年次学術講演会講演概要集，I-96, 1982, 10.
- 6) 伊美ほか：供用中の橋梁の補修における溶接上の一，二の検討，
土木学会第38回年次学術講演会講演概要集，I-161, 1983, 9.
- 7) 中西ほか：変動応力載荷中の溶接施工に関する研究（第一報）－変動応力下の溶接割れ試験－
溶接学会論文集，Vol.3, No.1, pp.60~68, 1985.2.
- 8) 井元ほか：変動荷重下の凝固割れに対する力学的指標と割れ発生評価式の提案－供用下にある構造物の溶接施工に関する研究（第一報）－，
溶接学会論文集，Vol.8, No.1, pp.38~43, 1990.2.
- 9) 井元ほか：変動荷重下の凝凝固割れに対する力学的検討－供用下にある構造物の溶接施工に関する研究（第二報）－，溶接学会論文集，Vol.9, No.1, pp.43~47, 1991.2.
- 10) 日本道路協会：道路構造令の解説と運用，1983, 52.
- 11) 井元ほか：変動荷重下における溶接割れに対する実験的考察，
溶接学会論文集，Vol.7, No.3, pp.35~41, 1989.8.

(平成4年12月8日受理)