

鋼板・コンクリートサンドイッチ床版の空隙深さの検討

Study for air void thickness in steel-concrete sandwich deck

安東 祐樹*, 船谷 智浩**, 三田村 浩***, 松井 繁之****

Yuki ANDOH, Tomohiro FUNAYA, Hiroshi MITAMURA, Shigeyuki MATSUI

*ショーボンド建設株式会社 補修工学研究所 (〒305-0003 つくば市桜 1-17)

**ショーボンド建設株式会社 北海道支店 技術課 (〒003-0004 北海道札幌市白石区東札幌 4-2-1-6)

***(独)土木研究所 寒地土木研究所 寒地基礎技術研究グループ 寒地構造チーム (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1-3-1-34)

****工博 大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

Placing high-fluidity concrete in the steel-concrete sandwich slabs causes air voids between the top steel plate and concrete because of setting of concrete during the hardening and air. Air voids are likely to cause local damage to the pavement or top steel plate and reduce the durability of the slab. In this study, effects the thickness of air void that causes damage to the top steel plate was verified by fixed-point fatigue tests, and evaluating methods for investigating air void thickness in the steel plate were examined by nondestructive tests. It was found that an air void thickness of more than 3 mm in the steel plate caused cracking at bolted connections on the top steel plate. Striking the slab with a hammer with a rubber head showed a high possibility to direct air void thickness ever 0.5 mm.

Key Words: steel-concrete sandwich slab, fatigue crack, fixed-point fatigue test, air void thickness measurement, hammering method

キーワード: 鋼板・コンクリート合成サンドイッチ床版, 疲労亀裂, 定点疲労試験, 空隙探査, 打撃振動法

1. はじめに

近年、現場作業の省力化や工期短縮、耐震性向上を目的とした軽量化などのニーズにより道路橋床版の新設・更新において、鋼・コンクリート合成床版の採用が増えている。筆者らは、上下に鋼板を配置し、上下鋼板を高力ボルトにて接合した鋼板・コンクリートサンドイッチ床版（以下サンドイッチ床版）を開発し適用してきた。

しかし、鋼殻内部に高流動コンクリートを打設した際、コンクリート硬化時の体積変化や打設時のエア溜りなどにより上鋼板とコンクリートの間に空隙が発生し、その箇所を打音すると鈍い音が生じる場合がある。この空隙は、舗装や上面鋼板に局所的な損傷を発生させる要因となり、長期的にサンドイッチ床版の耐荷性能に影響を及ぼす恐れがある。

そこで、筆者らは、現地調査から得られたデータを元に定点疲労試験を行い、鋼板の損傷を引起す空隙深さを検討した。さらに、鋼板内部の空隙深さを探査する手法として、打撃振動法を用いて今まで探査不可能であった空隙深さの測定を試みた。

本論文ではその検討概要とその結果について述べる。

2. サンドイッチ床版の構造概要

サンドイッチ床版は、図-1 に示すように、上下 6mm の鋼板（SS400）と高ナットおよび高力ボルト（F10T 相当）で構成される鋼殻を工場で作成したものを現場に搬入し、主桁と一体化する。一体化が図れた後、床版上面に予め設けられた打設孔から鋼殻内部に高流動コンクリートを計画的に打設し合成床版を完成するものである。

この床版の特徴としては、高い耐荷性能を有するため、床版厚を 162mm と薄くでき死荷重を大きく低減できる。また、同じ床版厚で床版支間 4.0m まで適用することができ、経済設計が可能となる。

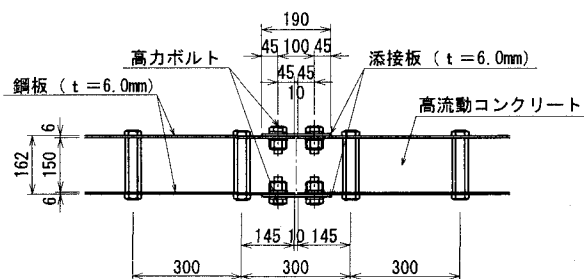


図-1 サンドイッチ床版の構造概要 (単位: mm)

3. 現地調査概要¹⁾

上面鋼板と内部コンクリートとの間にある空隙がサンドイッチ床版に及ぼす影響を確認するために、現地調査を実施した。対象となった橋梁は、平成12年に竣工した床版支間2.9mの連続合成鉄けた形式で、供用からわずか1年程度で舗装に変状が発生した橋梁である。調査は平成16年に舗装の損傷状況から①舗装に損傷がない箇所、②比較的初期の舗装の損傷箇所、③舗装損傷が著しい箇所と判断された計3箇所での舗装を撤去し、上鋼板の損傷状況を確認した。

損傷の確認方法は、浸透深傷試験（カラーチェック）により上面鋼板における変状状況を把握した。

調査の結果、本床版の上面鋼板と内部コンクリートとの空隙量と舗装および上面鋼板に与えた関係は表-1の通りであった。

表-1 現地調査の結果

調査部位	空隙深さ(mm)
損傷なし	0.11~0.30
舗装に損傷発生	2.70~4.90
舗装の損傷が著しく 上鋼板に亀裂発生	6.00~

調査結果から、空隙が6mm以上の場合に亀裂が発生していた。また、その亀裂も、ボルト接合部の上鋼板のみに亀裂が発生していた。

ここで、上鋼板ボルト接合部に亀裂が確認された箇所では写真-1のようにボルト接合部を中心として放射状に亀裂が発生しており、その亀裂長さは10~20mmであった。この箇所の周りを上鋼板から撤去すると右側写真のように上面鋼板は円状に完全に押し抜かれた状態で破断

していた。この円形部を摘出してみると、写真-2に示すように、ナット上部の円形リングと一致していた。

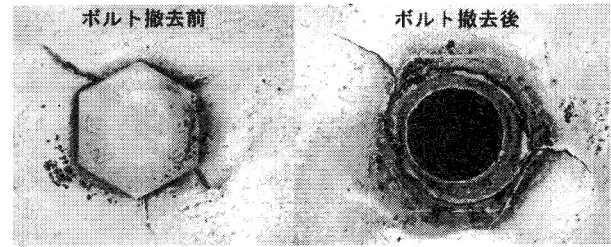
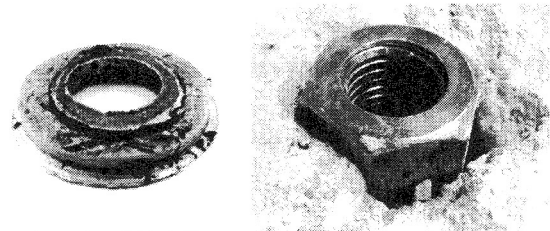


写真-1 上面鋼板ひびわれ状況¹⁾



ボルト周り摘出後 高ナット形状
写真-2 ボルト周りの状況と高ナット形状

また、事前にボルト接合部回りをモデル化した有限要素解析により、活荷重(作用荷重35kN)によって5.5mmの変位が鋼板に発生した際に、ボルト接合部周りの鋼板のひずみが降伏ひずみを完全に超えることが分かった¹⁾。

これらより、ボルト周りに空隙が存在した状態で活荷重がボルト上ないし、その周りを通じた際に接合部の鋼板が局所変形し亀裂が発生したと考えられ、床版全体の変形によって発生したものではないと考えられる。

表-3 供試体および荷重条件

	試験体A	試験体B
概要図		
検討空隙深さ	1mm, 3mm, 6mm	6mm
載荷荷重	B活荷重相当 (P=100kN, 輪体幅500mm×200mm) =1N/mm ² (載荷面積200mm×200mm)	B活荷重相当 (P=100kN, 輪体幅500mm×200mm) =1N/mm ² (載荷面積200mm×200mm)
目標載荷回数	200万回	200万回

4. 亀裂を発生させる空隙深さの検討

今回の検討では、現地調査および解析結果を基にボルト周りに限定した試験として定点繰り返し載荷試験を行い、鋼板のボルト接合部に亀裂を発生させる空隙深さの解明を行うこととした。

4.1 供試体

今回の試験に用いた供試体と載荷条件の概要を表-3に示し、使用した材料の物性を表-4示す。供試体は、現地調査と有限要素解析の結果より、ボルト周りにある程度の空隙を有する場合に亀裂が発生していたため、空隙深さに着目して供試体を決定した。また、極力、床版支間の影響を受けず、載荷荷重がボルト周りに局所的な応力を発生させることができるように最小のボルト配置を有する供試体とした。

今回は空隙深さによる検証としていたため、空隙については、範囲をボルト間(300mm角)全体とし、深さを現地調査で得られた結果を基に1mm, 3mm, 6mmに決定した。さらに、活荷重がボルト直上を走行する場合とボルト間を走行する場合を想定した2タイプの供試体とした。ただし、載荷面積については、今回は局所的な空隙の影響を把握することを目的としたため、Wタイヤ1輪当たりの接地巾程度(200mm×200mm)とした。

表-4 使用材料物性 (N/mm²)

	弾性係数	圧縮強度	耐力	引張強度
コンクリート	2.42×10^4	31.7	—	2.60
鋼材	1.84×10^5	—	362	487
ボルト類	—	—	900	1100

4.2 載荷試験の概要

試験は、写真-3に示すようにスパン中央部の1点載荷による定点疲労試験とした。試験機は、200kN油圧サーボ式疲労試験機を用いた。また、載荷方法については、B活荷重の接地圧1N/mm²に相当する荷重40kNを最大、2kNを最小とする荷重範囲で、繰り返し速度3Hzで正弦波形の一定振幅にて200万回繰り返しを目標に載荷試験を行うものとした。なお、疲労試験の途中に適宜、静的試験を行い、繰り返し荷重による影響について検討するものとした。測定項目は、ボルト頂部周辺のひずみに着目した(図-2参照)。

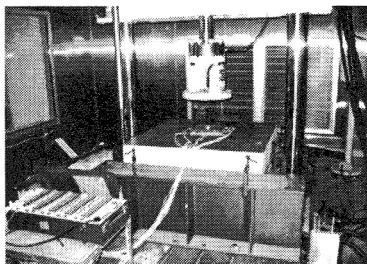


写真-3 載荷試験状況

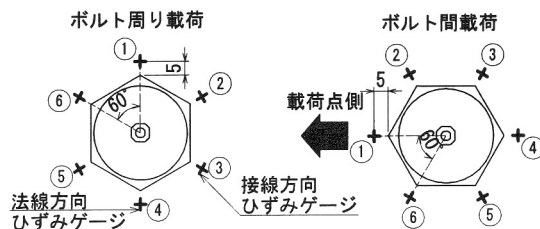


図-2 ゲージ位置図

4.3 試験結果

1) ボルト周囲載荷 (供試体 A)

ボルトの周囲を載荷した供試体Aの試験結果を表-5に示す。空隙深さ1mmでは、ボルト周りに亀裂は発生しなかったが、3mm以上では、繰り返し載荷5万回終了時にひずみゲージの一部が断線したため、試験を中止した。

その後、浸透探傷試験を行ったところボルト周りで放射状の亀裂を確認した。この亀裂の状態は、写真-4に示すように、現地で確認されたような円状に完全に押し抜かれた状態と一致した。

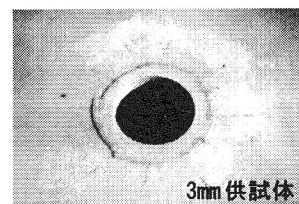


写真-4 試験終了後の状況

表-5 試験結果一覧

空隙深さ	試験結果概要
1mm	200万回終了 損傷発生なし
3mm	5万回終了時に亀裂確認
6mm	5万回終了時に亀裂確認

つぎに、ボルト周りにおけるひずみの変化の一例を図-3に示す。空隙深さ1mmでは、ボルト接線方向のひずみは初期載荷時からには200万回試験終了後も 360×10^{-6} 程度で推移し、ほとんど変化がなかった。

これに対し、空隙深さ3mm, 6mmでは、初期載荷時の接線方向のひずみが、それぞれ 3160×10^{-6} , 6900×10^{-6} と既に鋼材の降伏ひずみ(およそ 2000×10^{-6})を超えていた。また、試験を行うにしたがい、その後もひずみは徐々に漸増し続け、載荷回数1万回~2万回の間で図-4に示すようにひずみが急激に増加し、5万回終了時にひずみゲージの一部が断線していた。

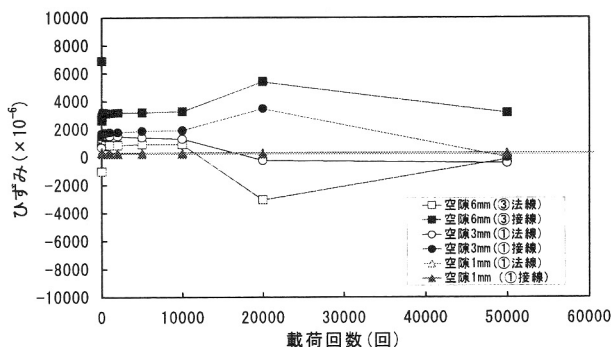


図-3 載荷回数とボルト周りのひずみ変化の関係

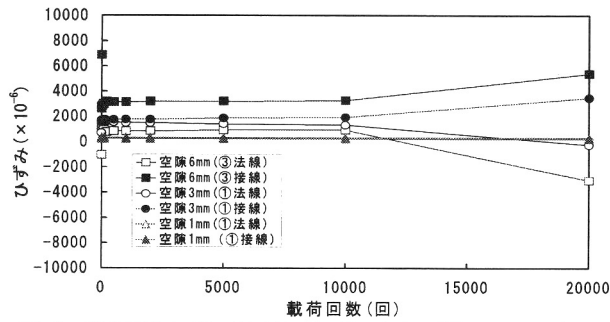


図-4 載荷回数とボルト周りのひずみ変化の関係 (2万回まで)

2) ボルト間載荷 (供試体 B)

ボルトの間を載荷した供試体 B(空隙深さ 6mm)では、繰返し載荷 10 万回終了時に載荷点付近のボルトを取り外し、浸透探傷試験を実施したところ、写真-5 に示すように、載荷

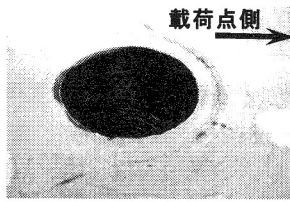


写真-5 試験終了後の状況

点側のナット接線方向に沿った亀裂が確認された。この亀裂の分布は、載荷点側のみに接線方向の亀裂が分布する結果となり、現地で確認された分布と酷似していた。

つぎに、亀裂の確認されたボルト位置での繰返し回数 10 万回までの弾性ひずみの変化を図-5 に示す。ひずみは、荷重初期段階で既に鋼材の降伏ひずみを超えていた。

その後、繰返し載荷を続けるにしたがい接線方向のひずみは減少し、図-6 に示すように繰返し回数が 100 回を越えたあたりから試験終了時まで定常状態であった。

これらの一連のひずみの減少は、鋼板の塑性変形によりボルト接合部の鋼板がすべり出した影響と考えられる。

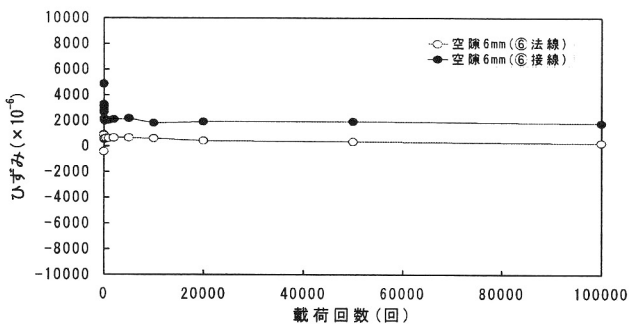


図-5 載荷回数とボルト周りのひずみ変化の関係

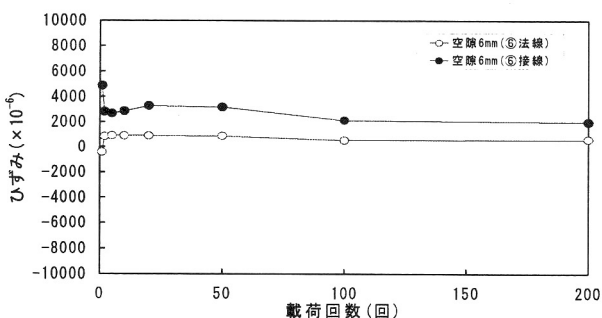


図-6 載荷回数とボルト周りのひずみ変化の関係 (200回まで)

3) 鋼板亀裂発生 の 検 討

今回の試験結果より、上面鋼板と内部コンクリートとの間にある空隙深さが 3mm を超える場合には、載荷条件に関わらず、初期段階から鋼板の降伏ひずみを大きく超えることがわかった。その後、ひずみは減少し、繰返し回数 100~2000 回の間で定常状態になることもわかった。さらに今回の試験では、ボルト周囲(供試体 A)を載荷した際に載荷回数 1 万回でひずみの増加がみられており、亀裂が 1 万回程度で発生した可能性が高い。そこで、現地調査を実施した橋梁の大型車混入量から求めた破壊回数の検討を行った。検討は鋼道路橋の疲労設計指針²⁾の式(1)に基づき、実橋での亀裂発生回数を予測した(表-6)。なお、破壊年数は、最初の舗装補修時期とした。

結果より、実橋では 8 千回程度で亀裂が発生したと試算された。この結果より、試験で確認された結果は概ね実橋と一致していると判断する。

$$nt_i = ADTT_{SLi} \cdot \gamma_n \cdot 365 \cdot Y \quad \dots (1)$$

表-6 実橋での亀裂発生 の 類 推 結 果

項 目	実橋の諸元
大型車一方向交通量: ADTT	1,125 台/日
一方向車線数: n _L	1 車線
交通量の偏り係数: γ_L	1.0 (偏りなし)
1 方向 1 車線当りの交通量: ADTT _{SLi}	1,125
頻度補正係数: γ_n	0.03 (標準値)
破壊年数(第 1 回の舗装補修時期): Y	8 ヶ月
亀裂が発生する回数: nt _i	8,213 回

5. 空隙深さの検討

上面鋼板と内部コンクリートとの間に発生する空隙深さが床版の耐久性に影響を及ぼす要因となるため、本床版の品質管理項目として重要な要素となる。また、この耐久性に影響を及ぼす空隙深さを比較的容易にかつ速やかに行う必要もあることから、空隙深さを探査する手法を検討することとした。

5.1 これまでの検討経緯

定点疲労試験結果より、亀裂を発生させる空隙深さの境界が 1mm~3mm の間にあることが判明したため、その深さを探査する方法を検討した。筆者らは、これまでに変位法、打撃振動法、ラジオアイソトープ法(以下 RI 法)での検討を実施してきた(表-7 参照)³⁾。

表-7 空隙深さ測定手法の検討結果一覧

測定手法	結 果
打撃振動法	空隙が 3mm より小さいと探査不能
変位法	空隙 0mm から測定可能 測定後に鋼板が変形するため適用不可
RI 法	空隙 1mm から測定可能 測定範囲(300mm 角)の平均となり、局所的な空隙には不向き

この時点では、RI法が最も現場向きであると考え、実際の現地にて適用を試みた。適用結果を図-7に示す。図より、現地実測に対しRI法での測定結果には±1mmほどの誤差があり、鋼板損傷の閾値となる1mm近傍では、測定値と最大で2mmの誤差があった。また、計測値も実際の値よりも大きくなったり、小さくなったりと相関が得られ難い。これらの要因は、内部の空隙が均一でないために、このような差異が生じたと類推される。さらに、今回用いた機械では得られた空隙深さが300mm角の平均値となるため、それより小さな空隙範囲を探索するには適用が難しい。以上より、RI法で本床版の不特定位置の空隙を探索することには限界があると判断した。

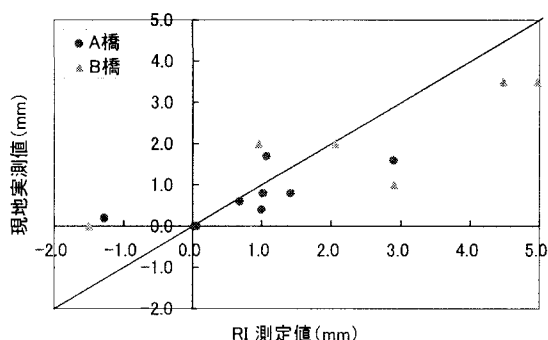


図-7 RI法による現地計測結果

5.2 打撃振動法の再検討

1) 検討方法

これらの検討結果をもとに、現場測定が比較的容易な打撃振動法の再検討を行うこととした。打撃振動法は、これまでの検討では、3mm以上までの空隙深さしか探索することができなかった(図-8参照)³⁾。そこで、この手法に対し、以下の点を変更することにより、空隙深さ3mmより小さい場合の探索を試みた。

- 打撃材を鋼製のハンマーから、ゴム付(ゴム硬度45°)のハンマーに変更
- 探索方式を集音マイクロホンから加速度計(ピックアップ10,000Hz)に変更
- 本構造の場合、300Hz付近に卓越した周波特性が見られたことより、この近傍のピークに着目した。

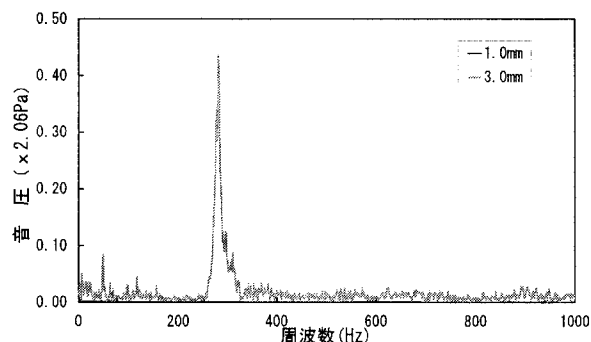


図-8 音圧によるFFT変換結果

なお、試験は今までの検討で用いてきた図-9に示す形状を有する供試体とし、空隙深さ3mm、1mm、0.5mmのものに対し検討を行った。さらに、図-10に示すように異なる空隙範囲を設けた供試体を準備し、範囲に関する応答周波数の変化についても調べた。

試験は、空隙中央部に加速度計を取付け、その周囲を打撃材にて打撃し振動加速度を計測した。その後、得られた振動加速度に対しa/d変換(サンプリング周波数12,800Hz)しFFT変換を行った。

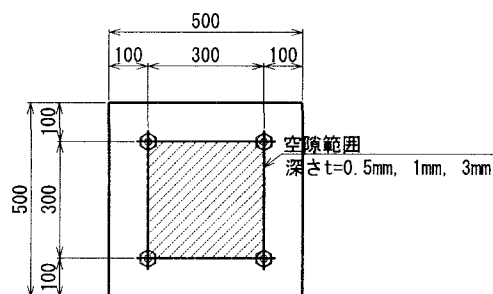


図-9 空隙深さ探索用供試体 (単位 mm)

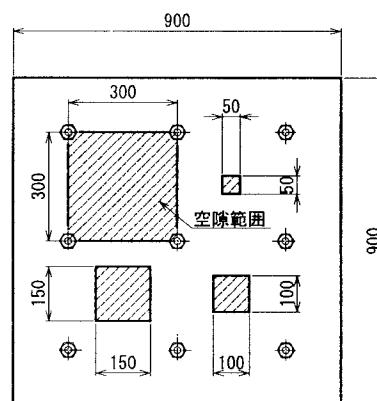


図-10 空隙範囲探索用供試体 (単位 mm)

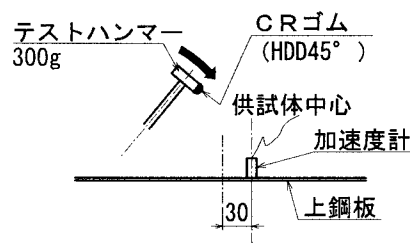


図-11 打撃方法概要 (単位 mm)

2) 検討結果

検討結果を図-12~14に示す。結果より、3mm、1mm、0.5mmの各空隙深さ全てにおいて、およそ300Hz近傍にスペクトルが顕著となる結果が得られた。この傾向は、内部にコンクリートがない鋼殻断面でも確認されており、本構造特有の周波数と考えられる。

また、空隙深さ3mmで空隙範囲を変えた場合の結果を図-15に示す。図より、空隙範囲が狭くなるにつれ、

スペクトル山の位置が高周波側へシフトする傾向にあり、空隙範囲に応じて卓越する周波数が存在する可能性が見出すことができる。ただし、10cm角と15cm角とでは、ほぼ同位置にピークが表れている。この点に関しては、ボルトを締め付けた際に、鋼板に反りが発生し、完全な空隙を確保できなかったために発生した問題と考えられ、検討の余地を残す結果となった。

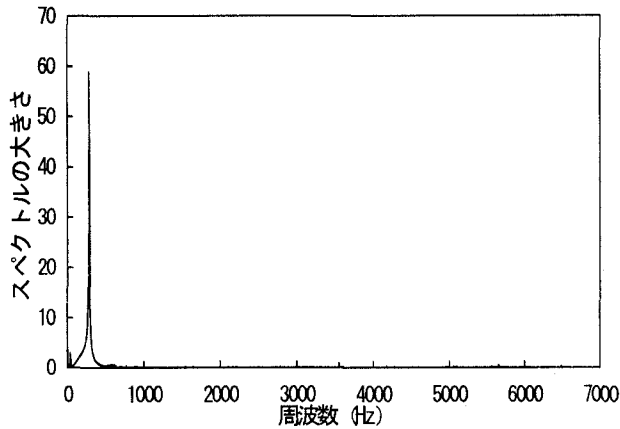


図-12 FFT 変換結果(空隙深さ 3mm)

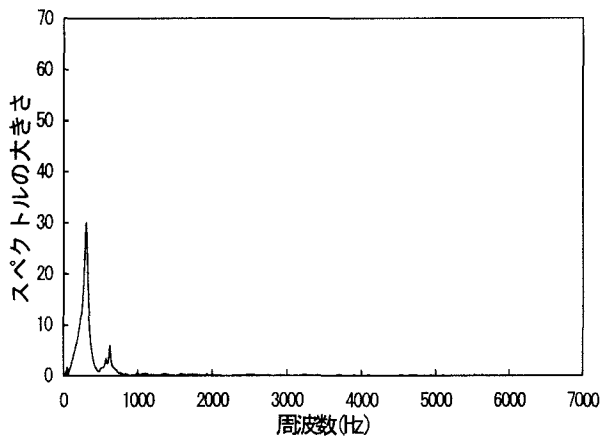


図-13 FFT 変換結果(空隙深さ 1mm)

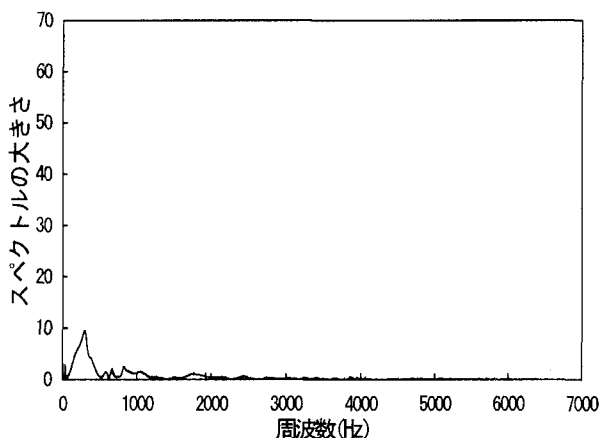


図-14 FFT 変換結果(空隙深さ 0.5mm)

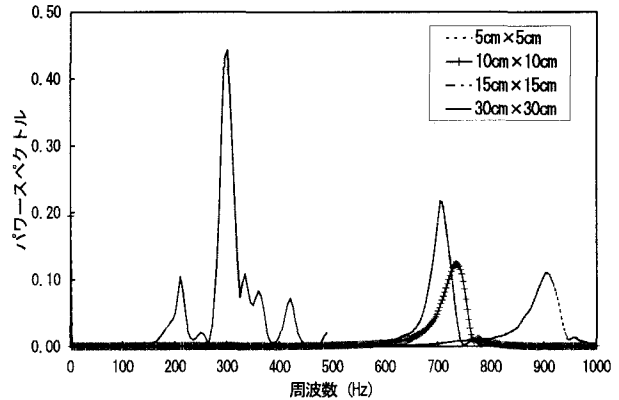


図-15 FFT 変換結果(異なる空隙範囲)

6. まとめ

サンドイッチ床版に発生する空隙が上鋼板に及ぼす影響とその空隙深さを非破壊にて探査する手法を検討した結果、以下の知見が得られた。

繰返し試験の結果、上鋼板ボルト接合部の亀裂は、ボルト部を支点とした鋼板の曲げ変形により生ずる。空隙深さが 3mm 以上になると、載荷状態に関わらず上鋼板のボルト接合部で、亀裂が発生する。亀裂の発生回数は、載荷直後の早い段階で発生していると類推される。

また、空隙探査の手法として用いた打撃振動法では、打撃材をゴムハンマー、加速度計を高感度のものに変更することにより、ボルト周囲(300mm 角)全体が 0.5mm 以上の均一な空隙深さについて探査可能であり深さに対する相関は良かった。なお、空隙範囲が異なる場合、範囲が狭くなるにつれパワースペクトルの大きさが高い周波数帯へシフトする傾向がみられたが、場合によっては同位置にピークが現れる結果となった。

7. おわりに

今回の検討では、上鋼板のボルト接合部に発生する亀裂について、空隙深さに着目して検討を行い、亀裂を発生させる空隙深さについて検討することができた。しかしながら、損傷がボルト接合部での局所的なものであるため、空隙範囲および位置も重要な要因となりうる。今後は、空隙の範囲、深さについてさらなる検討を実施していく。

【参考文献】

- 1) Mitamura, Ickawa, Okada, Yamada and Matsui : Effect of Gaps between Upper Surface Steel Plate and Inner Concrete of Sandwich Composite Deck using Bolts, 5th Japan-Korea Joint Seminar on Bridge Maintenance, 2004.11
- 2) 日本道路協会：鋼道路橋の疲労設計指針，2002.3
- 3) 山縣，小嶋，三田村，松井：鋼板コンクリートサンドイッチ床版の空隙厚さ測定法，土木学会北海道支部論文報告，2005.2