

論文 合成部材でのコンクリート充填性検査としての打音法の適用性

秋山 哲治^{*1}・清宮 理^{*2}・北澤 壮介^{*3}・内藤 英晴^{*4}

要旨：合成部材でのコンクリート充填性を確認するための打音検査について，適用性を検討するため，実構造物を対象にして現地実験を行った。実験は，コンクリート充填直後から材齢28日までの間で材齢を一つのパラメータとした。また，打音波形は卓越振動数，最大振幅および振幅の減衰時間で整理し，測定者の聴覚による評価との関係を調べた。実験の結果，卓越振動数のスペクトル振幅と振動の継続時間とを指標として充填状況の良否を判定できること，材齢0日において充填性の判定が可能であることが判った。

キーワード：非破壊検査，打音法，合成部材，充填性評価，現場実験

1. まえがき

現在，合成構造沈埋函の充填検査は，未充填深さが検出可能なRI法（ γ 線などを用いた散乱型測定方法）¹⁾が採用されているが，作業性・経済性などが良いとは言い難い。そこで，充填検査の現場作業を簡素化するために，打音法に着目した。打音法により未充填範囲の特定を行い，この範囲のみRI法を適用することを想定している。

この打音法を実際の現場において適用する場合，コンクリート充填後すぐに実施することができる。全体の工程を短縮することができる。また，これまでの実験結果²⁾より，打音検査はコンクリート硬化時の収縮によって生じる鋼板とのわずかな隙間も検出してしまうという欠点があった。コンクリート充填後すぐに打音検査が実施でき，それによって未充填部の検出が可能であるならば，上述の欠点を解消できると考えられる。

本実験は実構造物を対象にして，充填直後からの若材齢で打音検査を行い，合成部材でのコンクリート充填検査としての，打音法の適用性について検討したものである。なお，実構造物

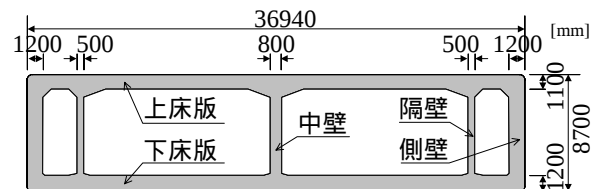


図-1 沈埋函断面図

を対象としていることから，鋼殻内へのコンクリート充填状況の良否を確認することができない。このため，本論文では測定者の聴覚による充填状況の評価と，マイクロフォンで採取した打音波形の特徴との関係を把握することに主眼を置いている。また，採取した打音波形は，最大振幅，振幅の継続時間，および卓越振動数で評価した。本実験で対象とした部材は，未充填部が部材の力学性状に及ぼす影響が大きいと予想される上床版とした。また，上床版の打音波形の比較対象として，確実に充填されていると判断できる，壁部材の側面についても打音波形を採取した。

2. 沈埋函の構造，打設方法および使用材料

沈埋函の断面は図-1に示すように，幅約37m，

*1 若築建設(株) 事業統括本部技術研究所 工修 (正会員)

*2 早稲田大学 教授 理工学部土木工学科 工博 (正会員)

*3 関西国際空港(株) 建設事務所長 工修 (正会員)

*4 五洋建設(株) 土木本部土木部 工博 (正会員)

表-1 鋼板の材質・厚さ，部材厚（厚さ単位：mm）

部位	上床版	下床版	側壁	隔壁	中壁
材質	SM490Y	SM490Y	SM490Y	SM490Y	SM490Y
鋼板厚	9	8	8	8	8
部材厚	1100	1200	1200	500	800

表-2 高流動コンクリートの配合

W/C [%]	単位量 [kg/m ³]					
	水 (W)	セメント (C)	石灰石 微粉末	細骨材	粗骨材	混和剤
50.7	175	345	199	878	757	6.6

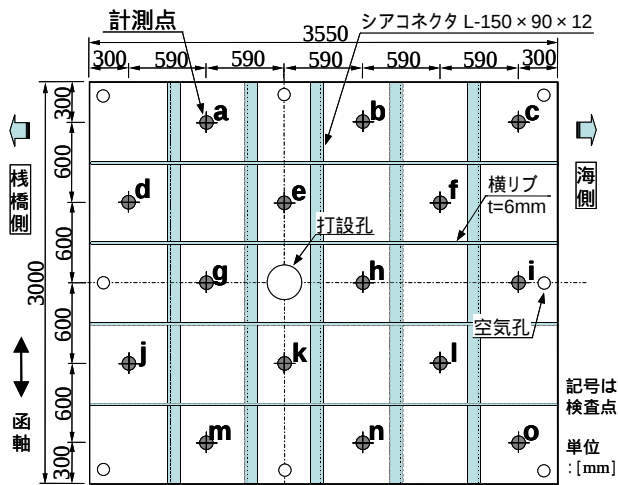


図-2 上床版での一区画の寸法 および 計測点

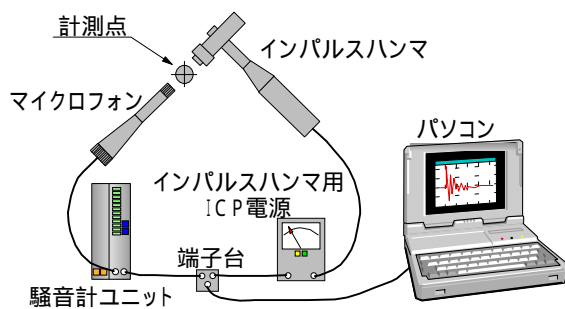


図-3 測定機器の構成

高さ8.7mであり，上床版，下床版，側壁，隔壁および中壁の各部材で構成され，各部材はそれぞれ鋼板で囲まれた区画で構成されている。打音検査面での鋼板の材質・厚さ，および各部材の厚さを表-1に示す。

上床版での一区画の寸法を図-2に示す。一区画は長さ3.0m，幅約3.5mであり，区画の中央付近に打設孔が設置してある。打設孔から充填さ

れるコンクリートは，スランプフロー650mmの高流動コンクリートである。配合を表-2に示す。

管理供試体による圧縮強度試験（JIS A1108）の結果，材齢7日は48.2N/mm²，材齢28日は55.4N/mm²であった。

なお，本構造物での打設作業は，高流動コンクリートを使用するため，締固め作業は不要であり，打設孔付近の作業人員は比較的少ない。

3. 打音実験の方法

3.1 打音波形の採取方法

測定機器の構成を図-3に示す。打撃は入力周波数範囲 8kHzのインパルスハンマーにより人力で行い，打撃点とマイクヘッドとの間隔は5cm程度とした。発生した打撃音の音圧（Pa：パスカル，N/m²）を，コンデンサー式マイクロフォンで測定した。実験に用いたマイクロフォンの特性は，測定振動数10Hz～20kHz，波形振幅30～140dBである。また，サンプリング周波数は50kHz，測定時間は0.08secとした。図-2に，上床版での計測点を示す。シアコネクタと横リブで区切られる範囲の中央を計測点（a,b,c,...,oの合計15点）とし，1箇所計測点につき3回の打撃を行いデータを収集した。

計測は，コンクリート材齢0～7日までの各1日ごと，および28日で実施した。

3.2 周辺の環境音

周辺の環境音は，計測点近傍で打設作業が行われている時に，計測点にマイクを置いた状態で計測した。当初，環境音は，音圧レベルが比較的大きいと予想された。しかし，図-4に示す打音波形と比較して1/20以下の音圧しかなく，また，卓越振動数は1kHz以下という特徴を持っていた。このことから，充填検査での打音波形の判定に影響を及ぼすものではないと考える。

その他の環境音として，函上での鋼材の溶接作業や，上床版開口部からの函内への資材搬入作業などによって生じる音があったが，これらの環境音も，打設作業中の環境音と同様の特徴を有していた。

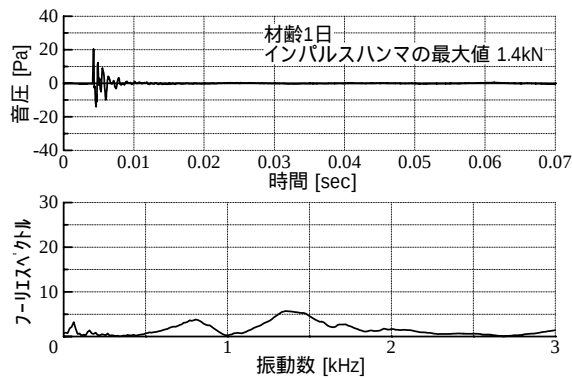


図-4 聴覚で「良い」と判定された波形

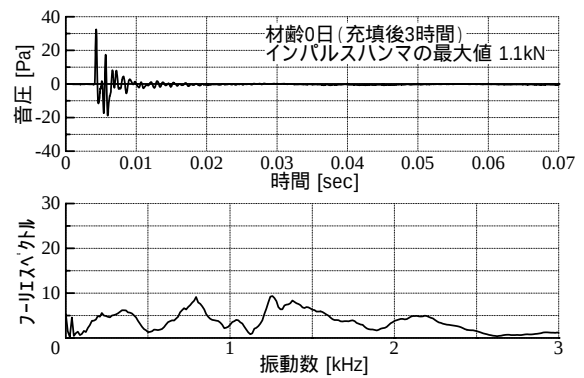


図-6 材齢0日の「良い」と判定された波形

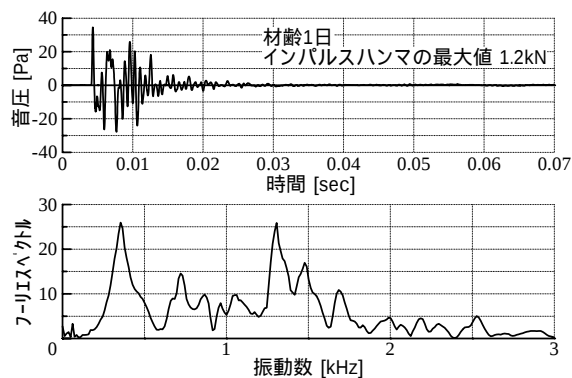


図-5 聴覚で「悪い」と判定された波形

4. 実験結果

4.1 聴覚による評価方法

本実験では、コンクリートの充填状況を直接調べる方法が無いため、打音波形の評価は測定者の聴覚による評価と比較せざるを得ない。本論文では、打撃音を聴覚によって分類することとし、充填部と評価される「良い」、未充填部と評価される「悪い」、両者の境界と評価される「中間」とした。

音色が硬い感じで「良い」と評価される波形の一例を図-4に、低い感じの音色で「悪い」と評価された波形の一例を図-5に示す。また、コンクリート材齢0日の波形の一例を図-6に示す。図-6は、硬い感じの音色とは異なるものの、未充填部と評価される音色とは明らかに異なったため、充填されている、すなわち「良い」と評価した波形である。図-4～図-6に示すように、「悪い」と評価した波形は「良い」と評価した波形と比較して、振動の継続時間が長い、卓越振動数が低く、スペクトル値が大きいという特

徴を持っていることが判る。

4.2 打音波形の整理方法

打音波形の評価指標は、卓越振動数とそのスペクトル値、振動の継続時間および最大振幅とした。採取した打音波形を、以下の方法によって整理した。

まず、ハンマ入力値の大小によって、マイクロフォンで得られる振幅の大きさが異なるため、測定した音圧をインパルスハンマ打撃力の最大値で除すことで正規化した。次に、正規化した音圧を用いて高速フーリエ変換を行い、卓越振動数を抽出した。

卓越振動数は、スペクトル値が上位から3番目までを対象とした。これは、図-4～図-6に示したように、同程度のスペクトル値を有する卓越振動数が2～3個存在したことによるものである。なお、採取した全データを通して、卓越振動数は低周波領域に集中していたことから、本論文中の図では3kHz以内を示す。

最大振幅は、正規化した音圧の最大値である。振動の継続時間は、音圧の振幅が、最大振幅の1/10になるまでの時間と定義した。

4.3 卓越振動数およびスペクトル振幅

材齢 0,1,5,28日での、卓越振動数およびスペクトル振幅を図-7に示す。同図では、計測した15点×3回のすべてのデータを示している。

材齢0日でのデータは、図-7に示すように、材齢1日以降で「良い」と評価されるスペクトル振幅と同様に、すべて小さい値となった。

充填直後ではすべて「良い」と評価されたの

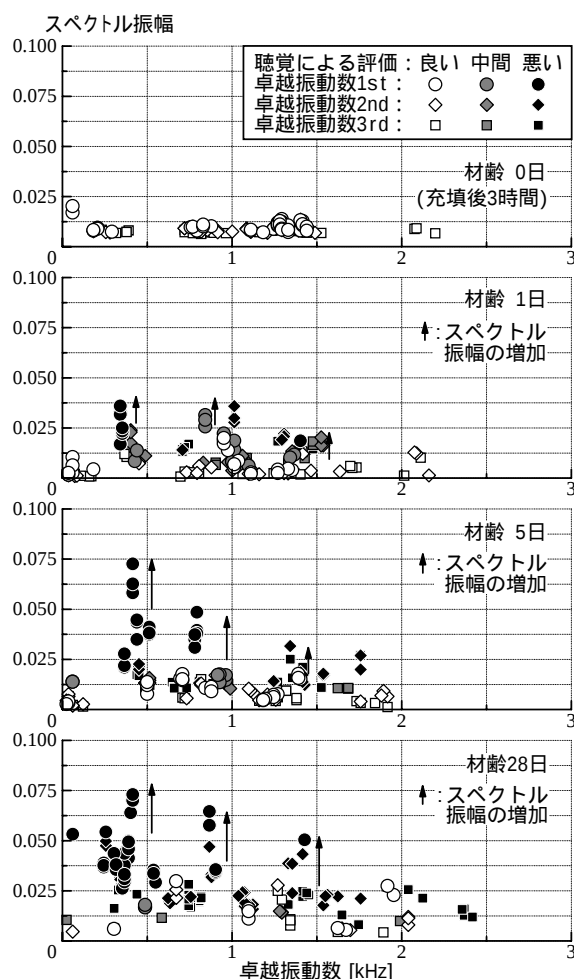


図-7 卓越振動数 および スペクトル振幅
(材齢0,1,5および28日)

に対して、材齢1日以降では、計測点の半分程度が「中間」および「悪い」と評価された。また、「悪い」と評価されるスペクトル振幅が増加する傾向を示した。これは、材齢の経過に伴ってコンクリートが収縮・沈下し、そのために出来た鋼板とのわずかな隙間を、本実験で行った打音法では検出してしまうためであろう。

スペクトル振幅が増加する傾向は、材齢1日程度までは明確であるが、それ以降では顕著な増加が認められなかった。また、上位から3番目までの卓越振動数は、0.3, 0.8, 1.4kHz付近に集中する傾向があり、材齢1日以降はあまり変化しない様であった。

4.4 振動の継続時間および最大振幅

材齢 0,1,5,28日での、振動の継続時間および最大振幅を図-8に示す。

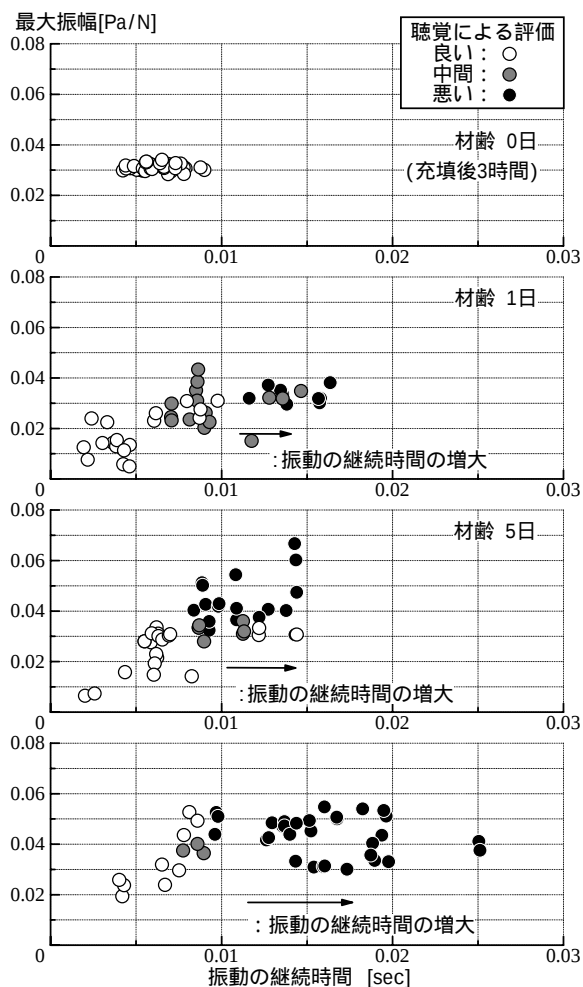


図-8 振動の継続時間 および 最大振幅
(材齢0,1,5および28日)

材齢0日では、振動の継続時間がすべて0.01sec以内、最大振幅は0.02～0.04Pa/Nの範囲内となり、聴覚によっても全計測点で「良い」と評価された。

また、材齢1,5および28日の結果から、材齢の経過に伴って「悪い」と評価される振動の継続時間が大きくなることが判る。材齢28日の振動の継続時間は、最大で0.025sec (= 材齢0日の3倍程度) になった。未充填部と評価される箇所では、コンクリートに接していないため、鋼板が自由振動し、その継続時間が長くなったと推測する。一方、「良い」と評価されるデータの中には、材齢0日と比較して、振動の継続時間が短くなるものがあった。

最大振幅については、「良い」と評価した計測点と「悪い」と評価した計測点とに明確な差

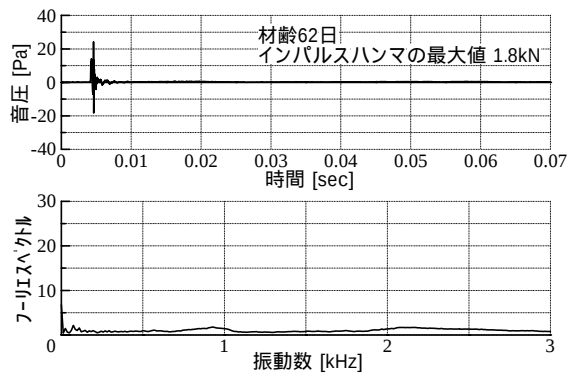


図-9 壁部材での波形の一例

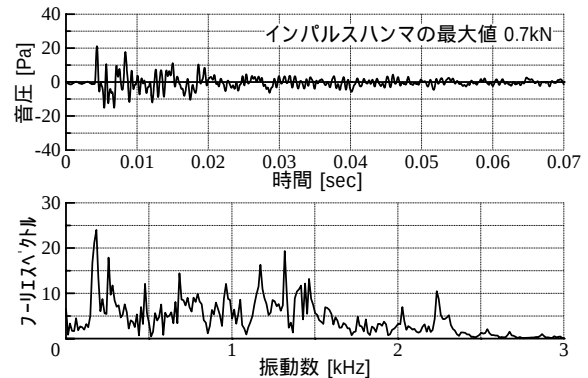


図-12 未充填区画での波形の一例

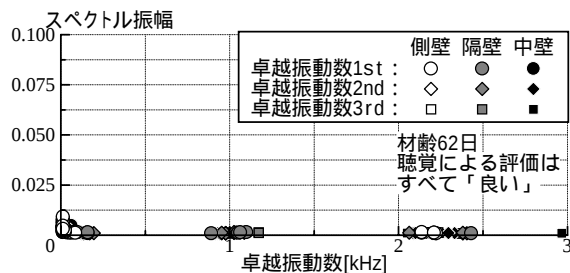


図-10 卓越振動数とスペクトル振幅の関係

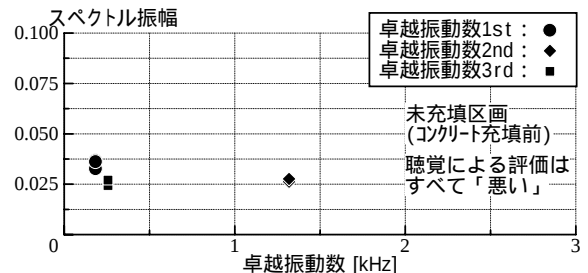


図-13 卓越振動数とスペクトル振幅の関係

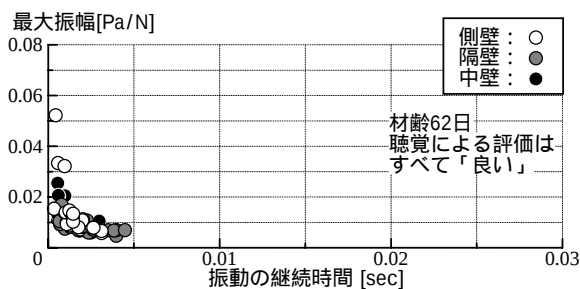


図-11 壁部材での振動の継続時間 および最大振幅の関係

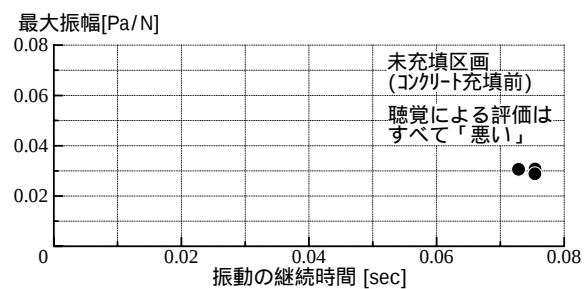


図-14 未充填区画（コンクリート充填前）の振動の継続時間および最大振幅

が認められないものがあり、充填性の評価指標には適していないようである。

聴覚による評価がある程度正しいものとするれば、振動の継続時間がおよそ0.01secを境界線として、充填状況の「良い」と「悪い」を区別することができる。この境界線付近では、「中間」と評価されるデータが位置することとなる。

4.5 壁部材側面の打音波形

側壁、隔壁および中壁の側面での打音波形について述べる。これら壁部材の側面は、コンクリートが充填されていることが明らかな箇所であり、すべての計測点で「良い」と評価された。

図-9に代表的な波形、図-10に卓越振動数およびスペクトル振幅、図-11に振動の継続時間および

最大振幅を示す。壁部材においても、上床版と同様にシアコネクタとリブによって区切られた範囲の中央を計測点とした。計測点は壁部材ごとに合計9点で、1点につき3回の計測を行った。計測時のコンクリート材齢は62日である。

スペクトル振幅は図-10に示すように、すべて小さい値となり、上床版での材齢1日以降で「良い」と評価した打音波形と同様な傾向を示した。上位から3番目までの卓越振動数は0.1、1.0、2.2kHz付近に集中する傾向があった。

振動の継続時間は図-11に示すように、極めて短く0.005sec以内であった。上床版での、コンクリート硬化後の「良い」と評価される結果と同じ傾向であった。

4.6 未充填区画（コンクリート充填前）の打音波形

コンクリート充填前における未充填区画での打音波形を図-12に、図-13に卓越振動数およびスペクトル振幅、図-14に振動の継続時間および最大振幅を示す。

当然ではあるが、聴覚による評価は全計測点において「悪い」である。上床版で「良い」と評価された結果と比較すると、図-13ではスペクトル振幅が大きい値となり、上床版での材齢28日の「悪い」と同様な傾向を示した。卓越振動数は0.2, 1.4kHz付近に集中する傾向であった。

振動の継続時間は図-14に示すように、極めて長く0.07sec以上であった。上床版でのコンクリート硬化後の「悪い」と判定された打音波形と同じ傾向であった。

5. まとめ

合成部材でのコンクリート充填性検査としての打音法の適用性を検討するため、実構造物での実験を行った。以下に結論を示す。

- 1) 聴覚によって「悪い」と評価される打音波形は「良い」と評価される打音波形と比較して、卓越振動数が低く、スペクトル振幅の値が相対的に大きく、かつ振動の継続時間が長い。
- 2) 打音法により、鋼殻内の充填状況を確認する場合は、振動の継続時間0.01sec程度を判定基準にできそうである。
- 3) 充填性評価における判定指標として、スペクトル振幅を用いることができそうであるが、その閾値について今後検討する必要がある。
- 4) これまでの報告²⁾と同様に、打音検査では、鋼板とコンクリートのわずかな隙間も検出し、コンクリート硬化時の収縮も未充填部と評価するので注意が必要である。
- 5) 「悪い」と評価される打音波形は、鋼板の振動に由来するものであり、コンクリートとは無関係と考えられる。このため「悪い」という打音波形は、材齢に関わらず同一のものと考えて問題ないとする。また、材齢0日の打音波形が、「良い」と判定したものと類似して

おり、「悪い」と判定したものとは異なる。このことから、材齢0日の打音波形は「良い」とみなせる。したがって、鋼板とコンクリートが剥離していない材齢0日において打音検査による充填性の判定ができそうである。

6. あとがき

コンクリートと鋼板とのわずかな隙間について、コンクリート硬化時に収縮がどの程度あるのかを試算した。本構造物において、考えられるコンクリートの収縮原因を抽出して試算した結果、温度収縮ひずみは最大で497 μ 、自己収縮ひずみは最大で393 μ となった。これらの和を上床版の厚さ1100mmに換算すると、0.98mmとなる。この収縮量自体は、本構造物に要求される未充填部の深さ5mm²⁾と比較して小さく、構造上問題となるものではない。

今後は、小型供試体を用いた要素実験によって、卓越振動数などの評価を詳細に行い、今回の実験結果の再評価と、具体的な判定基準の検討を行う予定である。

なお、本研究は、国土交通省国土技術政策総合研究所、(独)港湾空港技術研究所、早稲田大学理工学部清宮研究室、(財)沿岸開発技術研究センター、五洋建設(株)、佐伯建設工業(株)、東亜建設工業(株)、東洋建設(株)、若築建設(株)による共同研究の一環として実施した。

参考文献

- 1) 高橋秀樹、西田徳行、園山哲夫、城代高明：サンドイッチ構造施工実験における高流動コンクリートの充填性とその検査方法，土木学会論文集，No.651/VI-47，pp.11～26，2000.6
- 2) 秋山哲治、清宮理、北澤壮介、白石修章：合成部材での未充填部の打音法検査に関する実物大実験，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.24，No.1，pp.1677～1682，2002.6
- 3) 壹岐直之、清宮理、星野聡志、越村幸直：合成部材での未充填部の打音法検査，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.23，No.1，pp.595～600，2001.7
- 4) 魚本健人、伊東良浩：打音法によるコンクリートの非破壊検査，コンクリート工学論文集，Vol.7，No.1，pp.143～152，1996
- 5) 清宮理、押山宏晃、北澤壮介、坂井直人、佐野清史：打音法による合成部材の未充填部の空洞検査，第55回土木学会年次学術講演会，VI-130，2000.9