

サンドイッチ型複合床版の品質管理に関する試験

Experiments on quality control of Steel-Concrete Sandwich Slab

中川 敏之*, 斉藤 忠雄, 土田 昌美**, 遠山 義久*, 田代 治**, 柳本 泰伴***

Toshiyuki NAKAGAWA, Tadao SAITOU, Masami TSUCHIDA, Yoshihisa TOOYAMA, Osamu TASHIRO, Yasutomo YAGIMOTO

*住友金属工業株式会社 土木橋梁部(〒104-6111 東京都中央区晴海一丁目8番11号)

**住友金属工業株式会社 土木橋梁部(〒314-0255 茨城県神栖市砂山16番1号)

***住友金属工業株式会社 土木橋梁部(〒541-0041 大阪市中央区北浜4-5-33)

Recently, the continuous composite girder with composite slabs has been attracting attention because of economical efficiency, roadability and strength. By applying steel-concrete sandwich slabs with both upper plate and bottom plate to continuous composite girders, the durability of the slabs can improve and the design of superstructure becomes more rational. It is necessary to control the filling up the panels with Self-Compacting concrete and the quality control of the welding point on the upper steel plate on the field. This paper describes the results of experiments of the execution of filling the Self-Compacting concrete and the quality of the welding point on the upper steel plate.

キーワード: 鋼道路橋床版, サンドイッチ構造, 高流動コンクリート, 溶接, 施工管理, 品質管理

1. はじめに

近年、鋼道路橋においては建設コストの縮減・施工の省力化・疲労耐久性の向上などを目的として、合成床版を用いた少数主桁橋や細幅箱桁橋等の新形式橋梁が提案され、積極的に実橋に適用されている。鋼・コンクリートサンドイッチ型複合床版（以下、サンドイッチ床版）は、上下に鋼板を有する床版構造のため、床版剛性が大きく、大きな主桁間隔（最大主桁間隔15m程度）に適用でき、また主桁の設計に上下鋼板を有効に出来るため、新形式橋梁の提案に当たっては、より経済的な設計が可能となる。

この際、サンドイッチ床版の上下鋼板は床版機能のみでなく、主構造の一部として機能する。また内部コンクリートに関しては、主桁作用の正曲げ部に対しては有効断面に考慮され、また床版作用に対しても橋軸方向曲げモーメントに対して有効断面に考慮した設計がなされている。

以上より、サンドイッチ床版の品質管理および施工管理上のポイントとしては、a) サンドイッチ床版に充填される内部コンクリートの充填性とその検査方法、b) デッキプレートの溶接部の仕様と施工が挙げられる。

本文においては、a) サンドイッチ床版に充填される内部コンクリートの充填性に関しては、コンクリートの充填性の向上と、充填性の確認方法としての効率的な検査方法を再検証する目的で、実物大の供試体において、各種施工実験を実施した。具体的は、充填性の向上を目的として、高流動コンクリートに膨張剤を添

加した配合（高流動膨張コンクリート）や、セル内部に空気抜き構造を施し、どの程度充填性の向上に寄与するかを確認・検証した。また、充填性確認試験方法に関しては、従来のハンマーによる打撃音検査に対して、検査手法自体を見直し、かつ非破壊検査による手法も検討した内容について報告する。またb) デッキプレートの溶接部の仕様と施工に関しては、連続合成桁への適用の際、特に主桁作用における負曲げ区間では、デッキプレートを有効断面として考慮するため、溶接部の疲労耐久性の向上を目的に、また舗装等の施工性に配慮して、従来のすみ肉溶接仕様から突合せ溶接仕様に改良した。床版作用と主桁作用に対して、当該部位の疲労照査を行い本溶接仕様における疲労照査の事例を紹介する。また溶接施工においては、施工性・品質の向上を目的に、各種溶接方法も検討しており、サブマージアーク溶接を適用した事例も併せて紹介する。

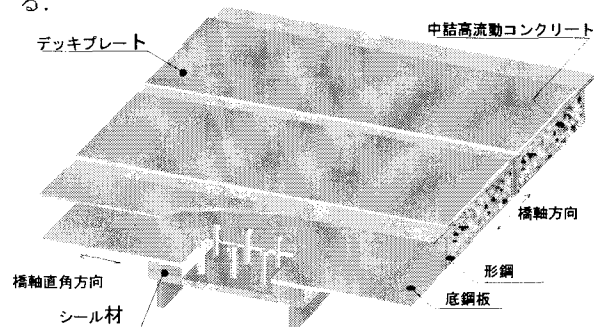


図-1 サンドイッチ型複合床版

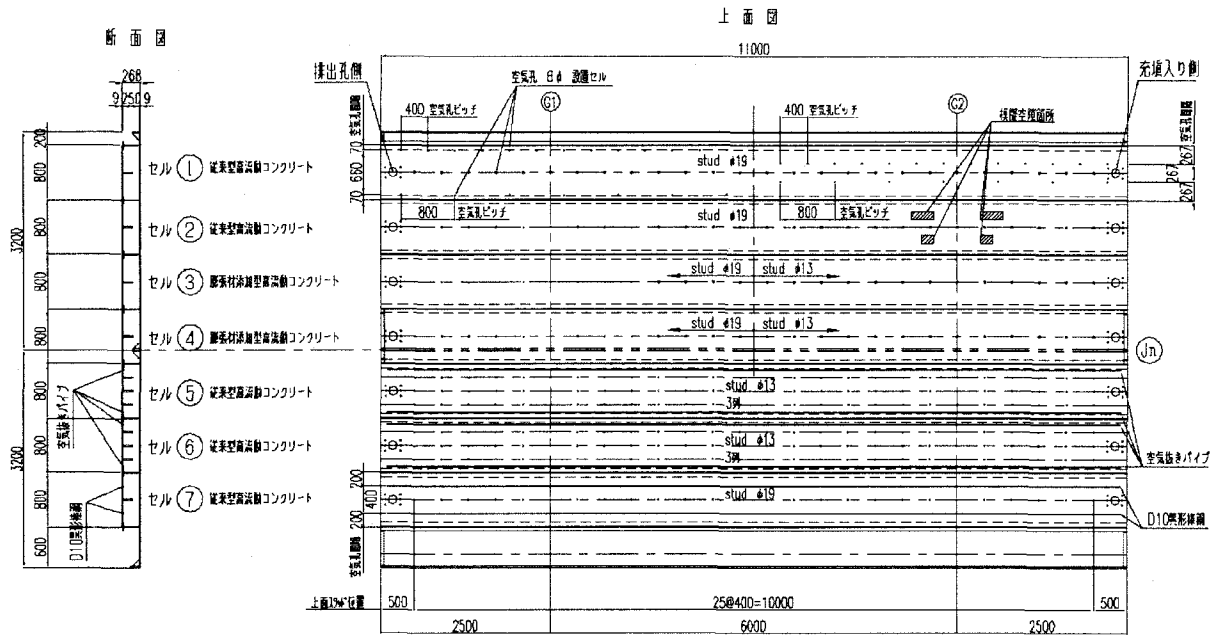


図-2 施工実験供試体形状

2. 実物大供試体による施工実験

床版機能および上部構造の一部としての機能を満足するには、鋼殻内コンクリートが確実に充填されていることが前提となる。また従来の検査方法は判定が困難であり必要以上の検査工数を費やしていた。

そこでコンクリートの充填方法、充填確認検査方法について実物大供試体による施工実験を実施し、充填性を向上させるための最適な方法、効率的な充填検査手法の検討を行った。また充填検査手法として非破壊検査による手法も検討した。実験に使用するコンクリートは、高流動コンクリートと高流動コンクリートに膨張材を添加したケースを実施し、高流動膨張コンクリートのフレッシュ性状や、充填性の向上効果に関して確認した。

2.1 高流動膨張コンクリートの性状

2.1.1 コンクリートの配合

コンクリート配合は普通骨材を用いた従来の高流動コンクリート配合を基本とし、低添加型膨張材 20kg/m³を添加し、コンクリート性状の確認を行った。高流動膨張コンクリート配合を表-1に示す。

2.1.2 コンクリートのフレッシュ性状

スランプフローは、高性能 AE 減水剤を使用量 1.6%

で試験練り時（練上り時）は、現地着時を想定して目標スランプフロー60cm に対して 61cm、施工実験時（現地着時）の目標スランプフロー65cm に対して 66cm とワーカブルなコンクリートを得ることができた。サンドイッチ床版に使用するコンクリートとして満足できる性状であることが確認できた（表-2）。

2.1.3 圧縮強度

圧縮強度は、材齢 28 日で 60N/mm²を超える値を示している。また材齢 28 日の封緘養生の圧縮強度は、水中養生とほぼ同程度であり、封緘による水分強度低下は極めて小さい。これは鋼殻内部に密閉されたコンクリートにおいて有効な性状と言える（表-2）。また膨張コンクリートの膨張量は材齢 7 日で 238μであり、収縮補償用コンクリートとして標準である膨張量 150μから 250μの範囲であり品質として問題無いことを確認した。

2.2 施工実験供試体

施工供試体形状は図 2・1 に示すとおり幅員方向は 11m、幅 3.2m の 2 パネルを引張継手構造で接合した供試体とした。形鋼間隔は 800mm とし形鋼毎に区切られた区画（以下、セル）は、セル①からセル⑦まで

表-1 コンクリートの配合

配合 No.	セメント種類	※目標フロー (cm)	水結合材比 (%)	細骨材率 (%)	単位水量 (kg/m ³)	単位セメント量 (kg/m ³) 上段セメント 下段膨張材	混和剤		MA775S (C×%)	SFCA 2000 (kg/m ³)
							種類	(C×%)		
1	高炉B	65 (60)	40	50	175	418 20 (438)	8SBM (X2)	1.60	0.0005	0.200

表-2 フレッシュ性状及び圧縮試験結果

コンクリート仕様		スランプフロー (cm)	空気量 (%)	材齢28日 (N/mm ²)	膨張量 (μ)
試験練り時	膨張材添加型高流動コンクリート	61	4.4	62.2 (61.5)	238
施工実験時	膨張材添加型高流動コンクリート	66	3.1	—	—
施工実験時	従来型高流動コンクリート	68	3.2	—	—

目標スランプフローは、現地着時65cmとし、練り上がり時(試験練り時)は60cmとした。

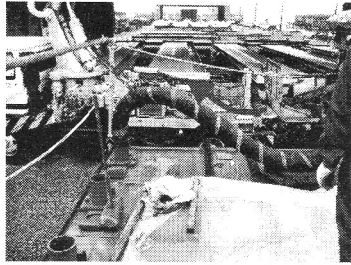


写真-1 入側充填状況



写真-2 空気孔処理状況と充填検査計測点

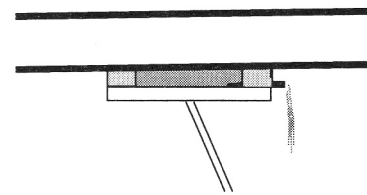


図-3 主桁上の滞水処理方法

表-3 セル毎の構造及び充填コンクリートの種類

セル番号	コンクリートの種類	スタッド配置	その他
セル①	従来型高流動コンクリート	1列	空気抜き孔設置
セル②	従来型高流動コンクリート	1列	従来の施工方法
セル③	膨張材添加型高流動コンクリート	1列	-
セル④	膨張材添加型高流動コンクリート	1列	-
セル⑤	従来型高流動コンクリート	3列	空気抜きパイプ設置
セル⑥	従来型高流動コンクリート	3列	空気抜きパイプ設置
セル⑦	従来型高流動コンクリート	1列	鉄筋設置

ある。充填度を比較するためセル②については、従来型の構造及び高流動コンクリートを充填した。また充填検査手法の妥当性を確認するため、セル②へは模擬空隙を設けた。またその他のセルについては、従来型との充填度を比較するため表-3に示す方法で施工した。

- 1)高流動膨張コンクリートを充填：セル③，④
- 2)デッキプレートのスタッド配置を従来1列配置から3列配置とし、セル内に空気抜きパイプを設置：セル⑤，⑥
- 3)デッキプレート幅員方向に空気孔を設置：セル①
- 4)セル内に鉄筋を配置：セル⑦

また供試体は、主桁を模擬した架台上に設置し、2%の横断勾配を設けた。

2.3 コンクリートの充填施工

コンクリートの充填は、横断勾配の低い方側から充填する。右端に設けた充填孔より圧入して左端に設けた排出孔よりオーバーフローさせる方法で1セルずつ充填した。入り側充填孔付近での配管方法は、空気の巻き込みをを最小限に防止するため、写真-1のようにホースを下方に一旦下ろして充填孔に取りつけた。

従来は架台上（主桁上）に滞水がある場合は、充填コンクリート先端部をセル外部へオーバーフローさせ排水していた。図-3のように充填前に主桁上のシール材側面にアルミパイプを設置することで桁上排水が可能になることで、直接隣接セルへのオーバーフローが可能となり、廃棄コンクリートの削減が実現出来る。また既往の実験においてもオーバーフローを実施することで未充填の発生し易い排出側付近の充填性が向上することを確認しているが、今回の充填試験において

もオーバーフロー量を200%程度(約30秒)実施し、充填性向上度を再確認することとした。またセル①のデッキプレートには空気孔を設けているがその充填方法は、空気抜き孔全箇所からセメントミルクが出てくるのを確認した時点で順次ボルトで塞いで施工した(写真-2)。

2.4 充填性確認検査

2.4.1 充填検査方法

従来の検査方法は、打音による確認方法を採用していた。デッキプレート上を無作為に打撃し、ハンマーの打音による確認を行い、空隙と思われる範囲をマーキングし、その部位をシュミットハンマーで測定し合否を判定していた。しかしながらハンマー打音検査による判定基準が明確でなく、かつ検査員による判定のばらつきが生じるため検査工数を必要以上に費やしていた。

本実験においては、まずデッキプレート上に橋軸方向80mm、幅員方向200mm間隔に計測点を野書き(写真-2)検査シートとして活用し易い方法を試みた。またハンマーによる打撃検査は反発度で判定することとし、不合格部位について実施するシュミットハンマー検査も判定基準が不明確であったため単体供試体により基準値を明確化した。図-4に検査フローを示す。

検査範囲：有効幅員内(工荷重載荷範囲)
(充填後3日経過以降検査)

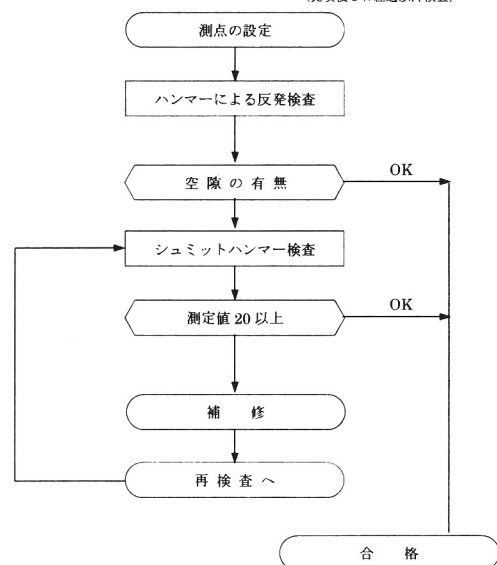


図-4 充填検査フロー

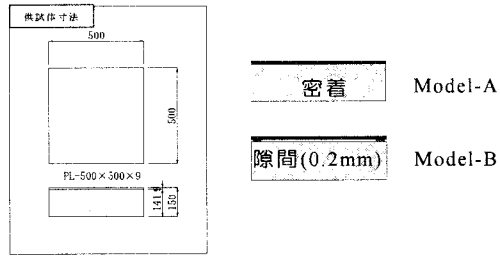


図-5 単体供試体図

model-A 鋼板とコンクリート面【密着】					model-B 鋼板とコンクリート面【隙間0.2mm】						
1	2	3	4	5	1	2	3	4	5		
a	46	46	45	48	49	a	10	0	0	0	0
b	47	47	48	49	49	b	0	0	0	0	0
c	45	45	41	46	44	c	18	15	0	0	0
d	48	47	46	48	48	d	0	0	5	0	0
e	48	48	48	50	51	e	0	5	0	0	0

図-6 単体供試体シュミット計測結果

2. 4. 2 ハンマーによる打撃検査判定基準

ハンマーによる反発検査の判定基準は、検査ハンマーを約10cmの高さから床版面に垂直に落下させ、ハンマーが跳ね返り反発した測点を合格、反発しない測点を不合格とした。

2. 4. 3 シュミットハンマー検査判定基準

シュミットハンマーにより、反発度を測定して判定を行う。判定値は20以上を合格、20未満を不合格と設定した。判定値の設定にあたっては、キャリブレーション用の単体供試体500mm×500mm(図-5)を製作し、80mm程度間隔に反発度を測定した。供試体は鋼板とコンクリート面が密着したモデル、鋼板とコンクリート面に隙間0.2mmを設けたモデルの2モデルで測定を行った。計測結果を図-6に示す。計測結果よりモデル1の計測値は45から51の値、モデル2は計測値0から18となっていることが解る。このことより0.2mm以上の隙間はシュミットハンマーで明確に判別できることから、測定値20を合否判定基準とした。また実用上0.2mmの隙間はほぼ密着状態に近く、輪荷重によってデッキプレートに有害な曲げ応力が作用することは考えられないため安全側の判定値と考えられる。

2. 4. 4 空隙の許容条件

サンドイッチ床版のデッキプレートとコンクリート界面に空隙が存在することにより、輪荷重によってデッキプレートに局部変形が生じ繰り返し応力が発生する(図-7)。この繰り返し応力は空隙の深さによって異なると考えられるが、応力振幅と疲労強度との相関関係が明確にされていないため、許容空隙面積を超える形状に関して、空隙の深さはあってはならないも



図-7 空隙による応力振幅

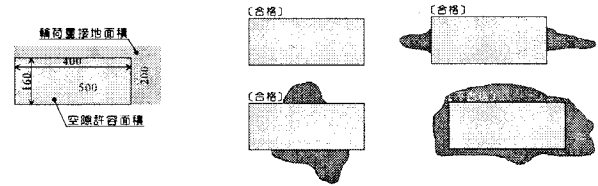


図-8 空隙の大きさ

のと規定した。空隙とは、シュミットハンマーの検査判定基準より0.2mm以上を空隙とした。空隙の許容面積は、輪荷重設置幅(200mm×500mm)の両辺の80%(160mm×400mm)と規定した(図-8)。空隙部において輪荷重接地面積内で一部コンクリートとデッキプレートが接触していれば輪荷重はコンクリートに伝達されるため、上記を許容空隙面積とした。また各種形状の空隙を設けた供試体により定点疲労載荷実験を実施し疲労強度を十分に有していることを確認し許容値の妥当性を確認している。

2. 5 施工実験供試体充填検査結果

シュミットハンマー計測による各セル毎の不合格部位を図-9に示す。施工実験においては、ハンマー反発検査、シュミットハンマー検査は全測点実施した。

セル②において、模擬空隙部付近のハンマーによる反発度検査、シュミットハンマー検査共に不合格と判定され検査方法の妥当性が確認できた。

充填結果は a)セル②従来構造に比べてセル⑦の鉄筋配置した効果は特に見られなかった。 b)セル⑤、⑥は従来型高流動コンクリートにスタッド3列配置と空気抜きパイプを設置したことによる充填性向上の効果が認められた。 c)セル①は、若干不合格部位が見られたが空気抜き孔の効果が若干認められた。 d)セル③、④はほぼ不合格部位がなく高流動膨張コンクリートの効果が認められ7セル中充填度が最も良好だった。

以上より充填性に効果があるものとしては、膨張材の使用、空気抜きパイプの使用が効果的となるが、実施工においては施工が最も容易である高流動膨張コンクリートを使用することとする。

検査については計測点の設定をすることで効率的に作業を進めることができ、かつハンマーの検査を打音から反発度に変えたことにより、検査員による検査のバラツキもなく非常に効率的な検査方法を構築できた。

2. 6 非破壊検査

ここまで紹介した判定基準は、安全側の判定であり合否判定精度をさらに向上させる目的で、赤外線サー

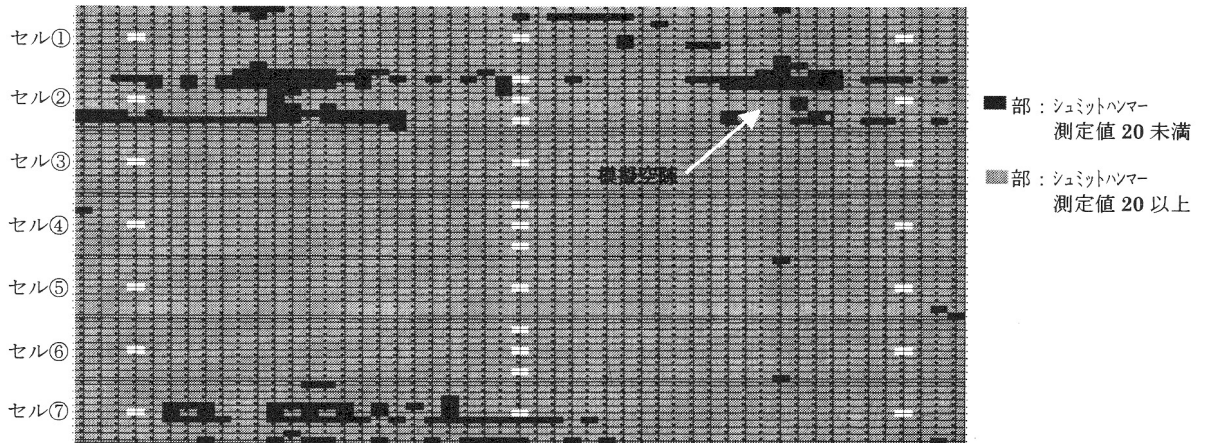


図-9 施工実験供試体充填検査結果

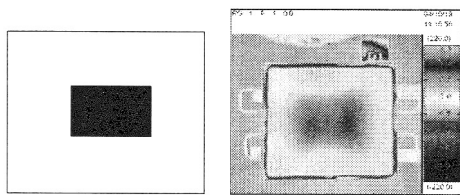


写真-3 空隙深さ3mm 加熱直後-5分後

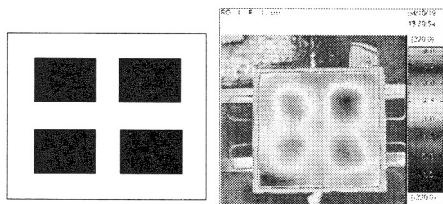


写真-4 空隙深さ1.5~3mm 加熱直後-5分後

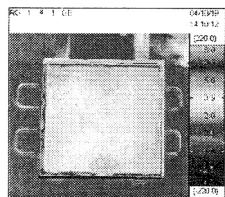


写真-5 密着状態 加熱直後-5分後

モグラフィ²⁾による検査方法を検討中である。測定方法は、ヒーターにより床版上面を均等に加熱することで、空隙が断熱層となり直上の鋼板は高温になる原理を利用して赤外線カメラを用いて撮影を行い、空隙形状を把握する方法で行った。

供試体は500mm×500mmの小型供試体を製作し、空隙深さ3mm、浅い空隙0.5~1mm、密着状態で撮影を行った。測定結果を写真-3、写真-4、写真-5に示す。

計測結果は、何れも空隙部の鋼板表面温度は、密着部より高温側を示し抽出可能であることが解った。密着状態では、温度分布が均一となった。今後は実施工におけるデータを蓄積し、検査方法を確立したい。

3. デッキプレート溶接部の品質

3.1 デッキプレートの溶接仕様

連続合成桁形式にサンドイッチ床版を適用する場合には、デッキプレートは主桁作用負曲げモーメント(合成後荷重)に対して、主構造の一部として設計が可能となる。従来、非合成桁形式等においては、すみ肉溶接を採用していたが、突合せ溶接仕様に改善することで設計上・施工上、主に以下の内容の改善が図られる。

- ①すみ肉溶接仕様で生じる橋面上のデッキPL段差による防水層・舗装の施工性の改善
- ②同上、段差部への滞水を改善
- ③疲労強度等級が向上

図-10にデッキプレートすみ肉溶接仕様と突合せ溶接仕様の標準構造図を示す。

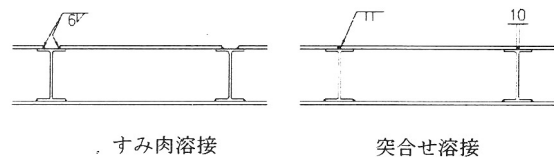


図-10 溶接仕様

3.2 デッキプレート溶接部の疲労耐久性

デッキプレートの溶接仕様を突合せ溶接とした場合の疲労照査事例を紹介する。

3.2.1 検討概要

疲労照査は全幅員12m、主桁間隔W=6.0m、サンドイッチ床版厚t=268mm(コンクリート厚250mm、上下鋼板9mm)を対象に実施実施。

3.2.2 最大応力範囲の算出

床版作用に対しては、サンドイッチ床版本体をシェル要素でモデル化(図-11)した弾性有限要素解析により断面力の理論値を算出し、全断面有効とした断面係数より最大応力範囲を算出した。また、載荷荷重は図3-3に示す作用位置にT60に相当する車両荷重を2台載荷して実施した。

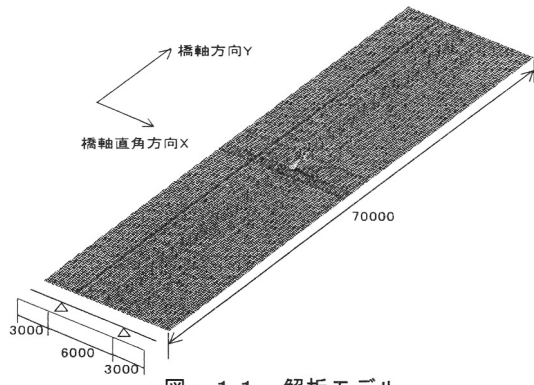


図-1-1 解析モデル

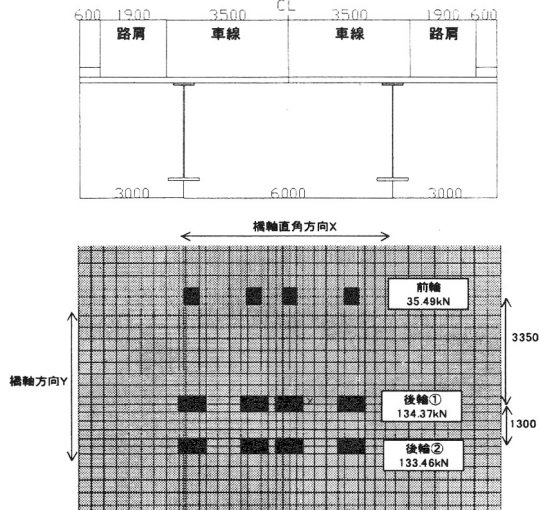


図-1-2 荷重載荷図

主桁作用に関しては、計算の煩雑さを避けるために、別途骨組み解析により、4径間連続合成桁(支間長65m+80m+80m+65m)を想定し断面力を算出し、全断面有効とした断面係数より最大応力を算出した。

3. 2. 3 最大応力範囲と打ち切り限界の比較

表3-1にデッキプレート突合せ溶接部の最大応力範囲と一定振幅応力打ち切り限界³⁾を示す。④は主桁作用正曲部、⑤は負曲部の値を示し、正曲部に関しては②+④で足合せの照査を実施した。いずれの作用断面力に対しても、打ち切り限界に対して十分な余裕量が確認でき、突合せ溶接仕様においては十分な疲労強度¹⁾⁴⁾を有していることが確認できる。

表-4 突合せ溶接部の最大応力範囲

照査項目	作用断面力	最大応力範囲 (N/mm ²)	一定振幅応力打ち切り限界 (N/mm ²)	継ぎ手疲労強度等級	余裕量	
床版作用	① Mx (kNm/m)	127	35.5	62	E	43%
	② My (kNm/m)	71	22.1	46	F	52%
	③ Qx (kN/m)	128	17.6	67	S	74%
主桁作用	④ My (kNm/m)	7279	13.6	46	F	70%
	⑤ My (kNm/m)	3856	11.8	46	F	74%
②+④		35.7	46	F	22%	

Mx: 橋軸直角方向曲モーメント, My: 橋軸方向曲モーメント, Qx: 橋軸方向せん断力

3. 3 デッキプレートの現場溶接施工

現場溶接施工状況を表3-1に示す。サブマージアーク溶接の適用が可能であり、品質と施工速度が向上することを実施で確認した。

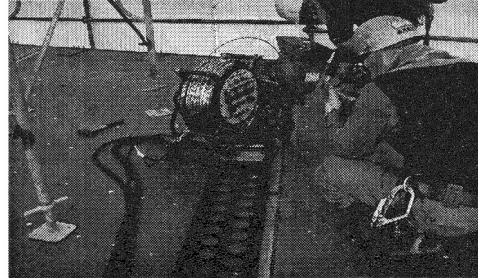


写真-6 現場溶接 (サブマージアーク溶接)

4. まとめ

以上、サンドイッチ床版の品質確保に関して、各種検査を実施した内容を述べた。得られた知見を以下にまとめる。

- (1)高流動膨張コンクリートのフレッシュ性状が確認でき、サンドイッチ床版に適用可能であることが検証できた。
- (2)充填性の向上には、空気抜きパイプの使用、高流動膨張コンクリートの適用が効果的である。今後の実施工においては、配合のみで対応できる高流動膨張コンクリートを標準仕様とする。
- (3)検査方法は、ハンマーによる打音判定に対して、打撃反発度で合否判定する検査がより効率的であることが確認できた。
- (4)シュミットハンマーによる合否判定基準値としては、計測値 20 が安全側な判定基準値であることが検証できた。
- (5)連続合成桁に適用するデッキプレートの溶接仕様としては、つき合わせ溶接仕様を採用することで、疲労耐久性の向上及び施工性の向上が実現できた。

【参考文献】

- 1)阿部, 井澤, 中川: サンドイッチ型複合床版の中詰めコンクリート充填前鋼殻状態の疲労強度特性, 土木学会第54回年次学術講演会, CS173, 1999
- 2)小林, 上條, 北浜: 赤外線サーモビューアを用いたサンドイッチ型複合床版の強制加熱によるコンクリート充填度検査, 土木学会第60回年次学術講演会, CS10-029, 2005
- 3)鋼道路橋の疲労設計指針, 日本道路協会, 2002.3
- 4)建設省土木研究所: 道路橋床版の輪荷重走行試験における疲労耐久性評価手法の開発に関する共同研究報告書(その1), 共同研究報告書第221号, 1999