

論文 サンドイッチ型複合床版の若材齢時繰返し載荷による剛性評価

為石 昌宏^{*1}・水町 実^{*2}・金好 昭彦^{*3}・上條 崇^{*4}

要旨：サンドイッチ型複合型床版において，早期交通開放を想定して，コンクリート若材齢時 ($f_c=10\text{N/mm}^2$) から，設計曲げモーメント相当の活荷重繰返し載荷を行った。その結果，たわみは増加することなく，強度発現に伴い減少する傾向にあり，試験終了後のたわみは，設計基準強度 ($f_c=35\text{N/mm}^2$) から同試験を行ったものとほぼ同等であったため，若材令時からコンクリートの補剛効果を確認することができた。

キーワード：サンドイッチ構造，合成床版，若材齢，疲労試験

1. はじめに

近年，交通量の飛躍的な増大から，鉄筋コンクリート床版の疲労損傷が深刻化しており，交通量の多い都市部を中心に床版取替工事が実施されている。しかし，取替工事には，全面あるいは片側通行止め等の交通規制を伴うため，大都市部では渋滞による多大な経済損失が予想される。これに対し，筆者らは，図-1に示す鋼とコンクリートからなるサンドイッチ型複合床版（以下，サンドイッチ床版と呼ぶ）を用い，片側交通規制のみで常時交通開放を可能とした床版取替工法¹⁾を考案した。本工法は，劣化した既設床版を撤去し，鋼板とH形鋼から構成される鋼殻部を鋼桁上に架設後，鋼殻内に軽量高流動コンクリートを充てん打設する。サンドイッチ床版は，コンクリート未充てんの状態でも道路橋示方書²⁾記載のT荷重に対して十分な耐荷力を有しており，コンクリート充てん前から車輛走行が可能³⁾である。しかし，長期供用時における鋼材の疲労を考慮すると，充てんコンクリートによる補剛やコンクリートの荷重分担による鋼材の発生応力低減が必要不可欠となる。

そこで本研究は，床版取替工事に伴う交通規制時間を可能な限り短縮するために，充てんコンクリートが設計基準強度 ($f_c=35\text{N/mm}^2$) に到

達する前の若材齢時 ($f_c=10\text{N/mm}^2$) から橋面上を交通開放することを前提に，サンドイッチ床版の梁モデルを作製し，コンクリート若材齢時から設計基準強度に発現するまでの間，設計曲げモーメント相当の活荷重の繰返し載荷（疲労試験）を行い，早期交通開放がコンクリートおよび鋼殻に与える影響について調べた。

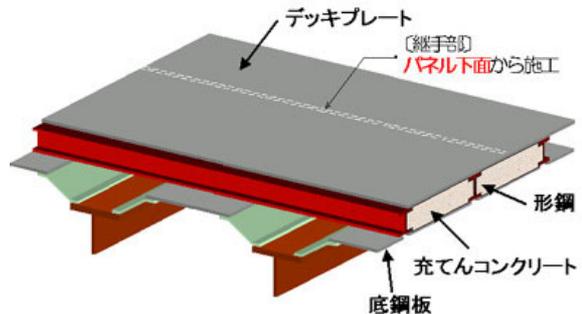


図-1 サンドイッチ床版の概要

2. 実験内容

2.1 交通開放時のコンクリート強度

サンドイッチ床版の充てんコンクリートには，部材に作用する曲げモーメントの圧縮応力度に加えて，せん断力による斜め圧縮および引張応力度が作用する。これらの発生応力を，コンクリートの強度発現に応じた弾性係数を用いて断面力の解析を行い，その結果，施工時のバラツキ等を考慮し，安全率 2 以上を確保できる 10N/mm^2 を交通開放時のコンクリート強度とした。

*1 (株) 鴻池組 大阪本店 土木技術部 (正会員)

*2 (株) 鴻池組 大阪本店 土木技術部 工修 (正会員)

*3 (株) 鴻池組 大阪本店 土木技術部 工博 (正会員)

*4 住友金属工業 (株) 鋼板・建材カンパニー 建設技術部 土木技術研究室

表－1 配合表

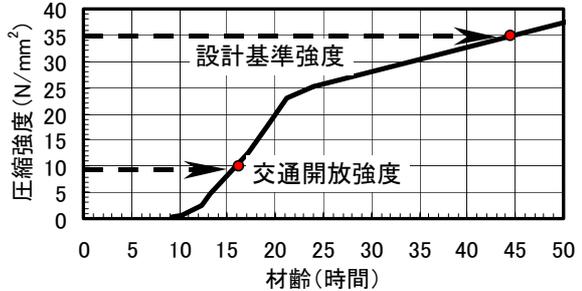
最大骨材寸法 (mm)	スランプフロー (cm)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)					
				水	セメント	混和材	細骨材	粗骨材	高性能AE減水剤
15	60±5	35.5	47	155	437	23	781	433	11.5

2.2 充てんコンクリート

表－1に示す超早強性を有する軽量高流動コンクリートを使用した。使用材料は、セメントに早強（密度 3.14g/cm³）、混和材にカルシウムサルフォート系硬化促進材（密度 2.67 g/cm³）、細骨材に山砂（粗粒率2.80, 表乾密度2.56 g/cm³, 吸水率 1.95%）、粗骨材に人工軽量骨材（最大寸法 15mm, 絶乾密度 1.26 g/cm³, 吸水率 26%）、高性能AE減水剤にポリカルボン酸系を使用した。

図－2に円柱供試体を 20℃で封かん養生した場合の初期材齢時の強度発現特性を示す。材齢約 16 時間で交通開放強度 10N/mm²に、材齢約 45 時間で設計基準強度 35N/mm²に達する。

タンデム軸)の後輪一輪に相当する 50kN に衝撃の影響(床版支間 3m として算出)を考慮した一定荷重振幅を与えた(載荷振幅 69kN, 載荷範



図－2 強度発現

表－2 試験ケース

ケース	試験体	疲労試験開始 コンクリート強度 (N/mm ²)
Case1-1	橋軸直角	10
Case1-2	方向モデル	35
Case2-1	橋軸方向	10
Case2-2	モデル	35

2.3 試験体と試験ケース

表－2に試験ケースを一覧にして示す。サンドイッチ床版はH形鋼が橋軸直角方向のみに配置されているため、橋軸直角方向および橋軸方向の二方向の曲げモーメントに対する耐荷機構が異なる。このため、橋軸直角方向(ケース1)および橋軸方向(ケース2)それぞれの床版梁モデルを用いて一定荷重振幅の定点繰返し載荷を行った。それぞれの試験体の寸法を図－3に示す。

10kN～79kN)。なお、支点間隔は、衝撃荷重(69kN)に対する発生曲げモーメントが、鋼構造物設計指針 PART B⁴⁾に記載の合成床版の設計曲げモーメント相当になるよう設定した。

(2) 載荷のピッチと回数

交通開放強度 10N/mm² から載荷を行うケース 1-1 およびケース 2-1 については、橋面上の車輛走行を模擬し、1.5Hz の正弦波(1/2 周期)を 4.3 秒間隔で載荷した。これは、一日あたり約 20,000 台の大型車輛交通量を想定している。また、載荷回数は、強度が 35 N/mm² に達するまでの間、25,000 回とした。なお、ケース 1-1 およびケース 2-1 とも、25,000 回載荷終了時のコンクリート強度は、材齢 45 時間で 35 ± 0.5N/mm² となった。

ケース 1-1 およびケース 2-1 は、予め作製した鋼殻へコンクリートを充てんした後、圧縮強度が、交通開放強度(10N/mm²)に到達した時点より繰返し載荷を始め、コンクリートが設計基準強度(35N/mm²)に達するまでの間、載荷を継続した。また、比較のため、ケース 1-2 およびケース 2-2 では、コンクリートが設計基準強度に到達した時点より、ケース 1-1 およびケース 2-1 と同荷重、同回数の繰返し載荷を実施した。

ケース 1-2 およびケース 2-2 については、コンクリートの圧縮強度が 35 N/mm² に達し次第、3Hz のパルスを連続して、25,000 回載荷した。

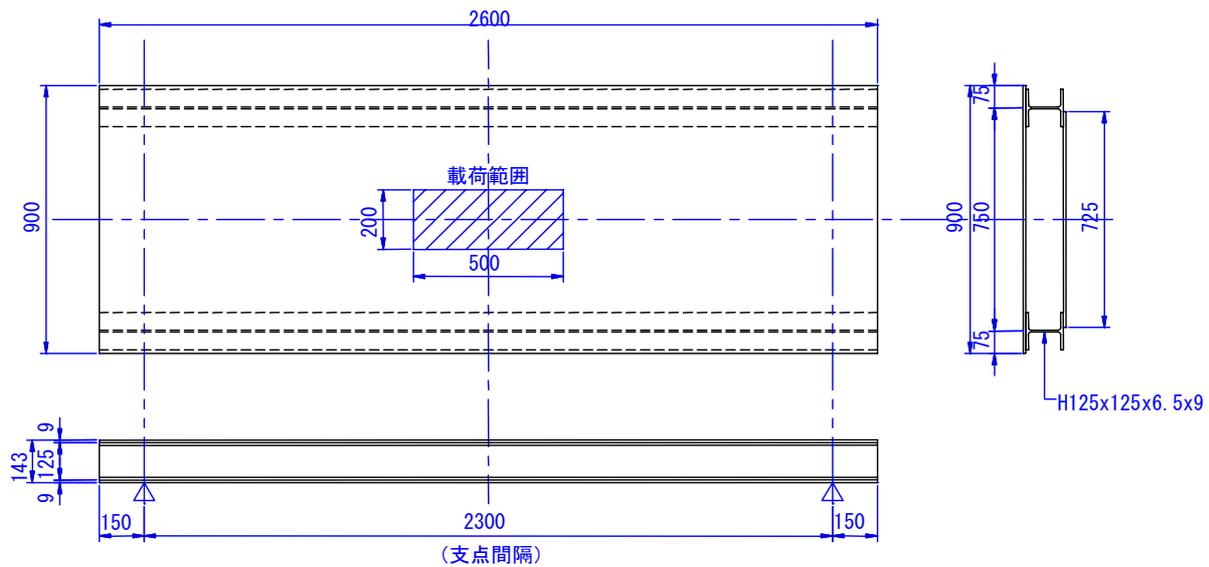
2.4 載荷方法と測定項目

(1) 荷重

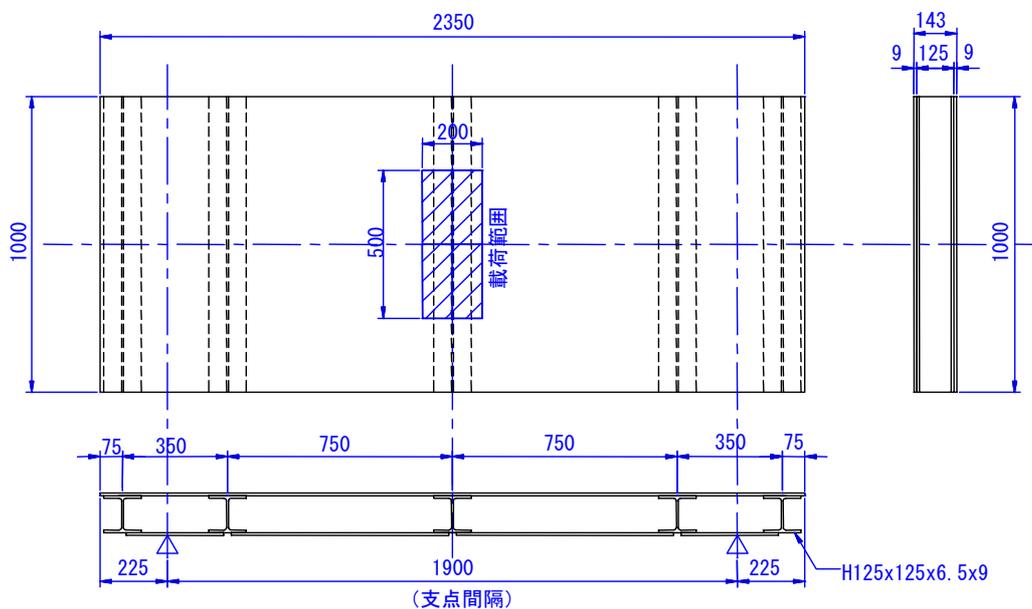
荷重は、ダンプトラック(車両重量 25tf, 後輪

(3) 測定項目

計測は、100, 1,000, 5,000, 10,000, 15,000,



(a) 橋軸直角方向試験体（ケース 1-1 および 1-2）



(b) 橋軸方向試験体（ケース 2-1 および 2-2）

図-3 試験体の寸法と載荷位置

20,000, 25,000 回の時点で、繰返し載荷を中断し、準静的に荷重を加え、たわみおよび上下鋼板びH形鋼のひずみ、コンクリートのひずみ（ケース 2 のみ）、鋼板とコンクリートのずれ（ケース 2 のみ）の計測を行った。また、疲労試験後、上鋼板を切断し、コンクリート表面を観察し、コンクリートコアを採取し、強度試験を行った。

3. 実験結果

3.1 橋軸直角方向モデル

(1) たわみ性状

図-4 にケース 1-1 およびケース 1-2 の各々の載荷回数における載荷点直下のたわみ（試験体中央）とコンクリート強度が 10N/mm^2 および 35N/mm^2 時のたわみの計算値を示す。また、図-5 にケース 1-1 のたわみ分布とコンクリート強度が 10N/mm^2 および 35N/mm^2 時のたわみの計算値を示す。これらの図の計算値は、供試体を全断面有効（引張コンクリートも考慮）の梁とみなし、コンクリート強度に応じた弾性係数を用いて算出した。なお、本実験で用いたコンクリートの若材齢時の弾性係数は、軽量粗骨材を

用いていることも考慮に入れ、文献 5)、6)を参考に次式で算出した。

$$E(t) = 0.6 \times \Phi(t) \times 4.7 \times 10^3 \times \sqrt{f'_c(t)} \quad (1)$$

$E(t)$: 圧縮強度 $f(t)$ に対応するヤング係数
 $\Phi(t)$: 温度上昇時におけるクリープの影響が大きいことによるヤング係数の補正係数 (ここでは、 $\Phi(t)=1.0$ とした)

$f(t)$: 材齢 t 日のコンクリートの圧縮強度

図-4 および図-5 より、ケース 1-1 は、荷重開始時点ではコンクリート強度を 10 N/mm^2 とした計算値とほぼ一致したたわみが生じてい

るが、その後、荷重回数が増加してもたわみは増大することなく推移し、むしろ強度発現に伴い、たわみが減少する傾向も認められ、ケース 1-1 のたわみは最終的にはケース 1-2 やコンクリート強度を 35 N/mm^2 とした計算値と同等になっている。これらのことから、若材齢時 ($f_c=10\text{N/mm}^2$) から早期交通開放を行っても、充てんコンクリートによる鋼殻の補剛効果は十分であり、若材齢のコンクリートに断面力が加わっても、その後の強度発現に与える影響は無視できる程度に小さいと考えられる。

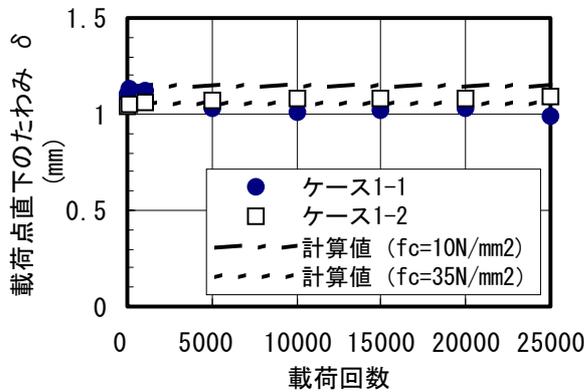


図-4 荷重点直下のたわみ [ケース 1-1 および 1-2]

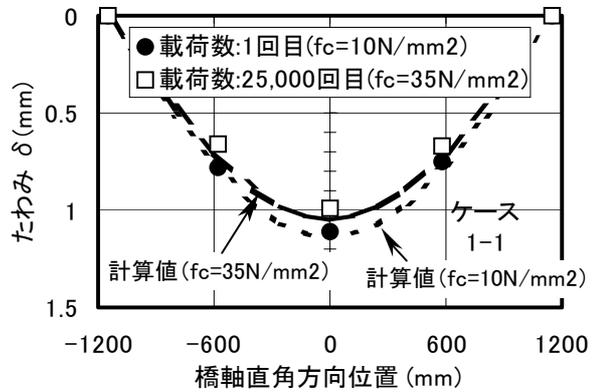
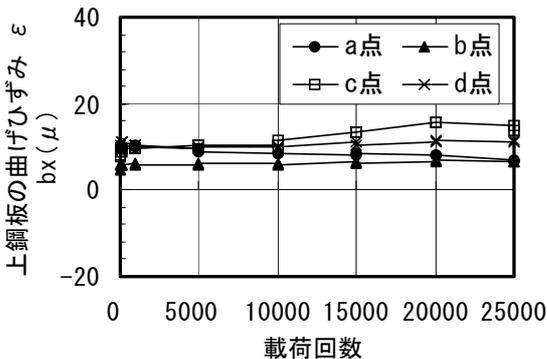
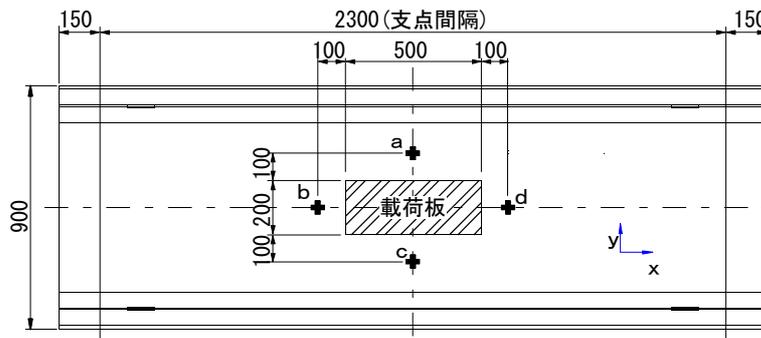
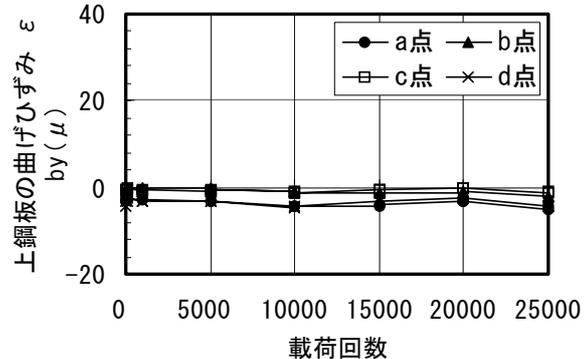


図-5 ケース 1-1 のたわみ分布



(a) 試験体長手方向 (x 方向)



(b) 試験体幅方向 (y 方向)

図-6 荷重板近傍における上鋼板の曲げひずみ [ケース 1-1]

(2)鋼殻のひずみ性状

充てんコンクリートは、輪荷重が直接載荷される上鋼板の局部変形（曲げ変形）を抑制する機能を有している。コンクリートの強度発現が不十分な場合、載荷板付近のコンクリートが損傷を受け、上鋼板に面外曲げが生じる恐れがあるため、上鋼板の内外面のひずみを測定した。

図-6(a),(b)に、載荷板縁から100mm離れた位置において測定した上鋼板の曲げひずみの履歴を示す。d点x方向については、やや増加傾向が見られるが、これは、コンクリートが若干損傷した可能性があると考えられ、上鋼板の曲げひずみは十分に小さいこと、また、載荷初期から実験終了まで概ね安定して推移していたことが確認できた。

(3)充てんコンクリートの性状

試験終了後、上鋼板を切断し、充てんコンクリート表面の観察を行うとともに、コンクリートコアを各試験体から11本採取し、圧縮強度試験を実施した。両試験体ともコンクリート表面には、充てん時に生じたと思われる気泡があるものの、ひび割れ等の損傷は見られなかった。

表-3に材齢28日のコア供試体と充てんコンクリートの打ち込み時に作製した円柱供試体（φ100mm×200mm）の圧縮強度とその比を示す。何れのケースも設計基準強度35 N/mm²を上回っており、また、円柱供試体とコアの強度がほぼ同等であったことから、強度発現段階の繰返し載荷による影響は見られなかった。

3.2 橋軸方向モデル

(1)たわみ性状

図-7にケース2-1およびケース2-2の各々の載荷回数における載荷点直下のたわみ（試験体中央）と図-4と同様に梁理論で求めた供試体たわみの計算値を示す。図-8には、試験体側面で測定した鋼板と充てんコンクリートとの相対ずれの推移を示す。

図-7の計算値から明らかなように、橋軸方向試験体では、コンクリートの強度発現に伴う弾性係数の増大が、試験体のたわみ量に与える

表-3 コンクリート強度

ケース	コア 圧縮強度 (N/mm ²)		強度比 A/B
	A	B	
1-1	52.3	55.6	0.941
1-2	49.9	52.8	0.945
2-1	49.7	48.3	1.02
2-2	49.8	48.5	1.03

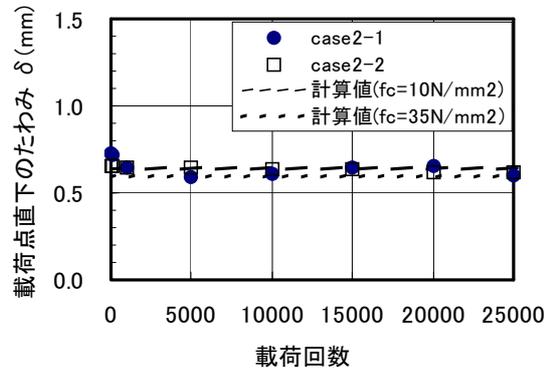


図-7 載荷点直下のたわみ [ケース2-1および2-2]

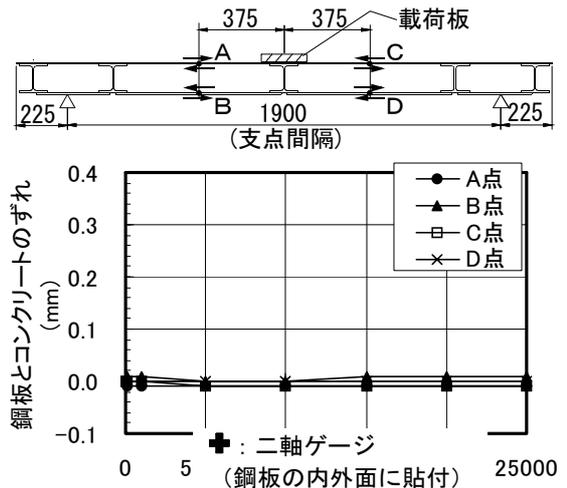


図-8 鋼板とコンクリートの相対ずれ

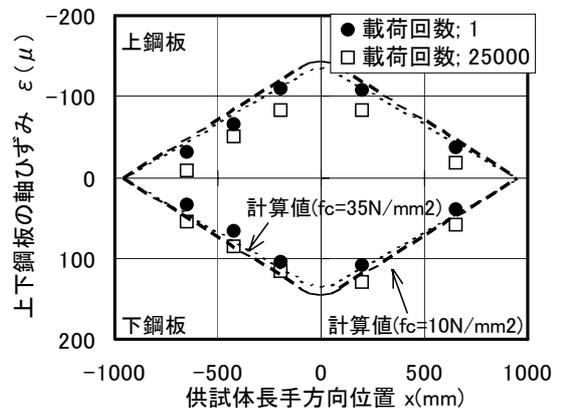


図-9 上下鋼板のひずみ分布 [ケース2-1]

影響はあまり大きくなく、ケース2-1ならびにケース2-2の実験結果の間には大きな差はなかった。また、コンクリート強度が 10N/mm^2 の時点から荷重を開始したケース2-1では、**図-4**のケース1-1の場合と同様に、強度発現とともにコンクリートの弾性係数が増大し、試験体のたわみがわずかではあるが減少していることが確認できた。

橋軸方向荷重の試験体では、部材軸方向に連続するウェブ鋼板がなく、さらに、鋼板面にはコンクリートとのずれ止めを設けていないにも関わらず、試験体のたわみは梁理論による計算値と一致していた。また、**図-8**から明らかのように、鋼板とコンクリートの間にはほとんどずれが生じていなかった。

これらのことから、コンクリート強度が十分に発現していない $f_c=10\text{N/mm}^2$ の段階でも、コンクリートと鋼板の間の付着力は十分で、上下鋼板と充てんコンクリートが一体挙動していたことが確認できた。

(2)鋼殻のひずみ性状

ケース2-1について、上下鋼板の試験体長手方向の軸ひずみ分布について荷重1回目と25,000回目で比較し**図-9**に示す。なお、同図には、全断面有効の梁として算出した上下鋼板の軸ひずみの計算値も示す。

同図より、荷重1回目では、上鋼板と下鋼板の最大ひずみはほぼ等しく全断面有効とみなし得るが、荷重25,000回目においては、圧縮縁のひずみは減少し、計算値より小さくなり、一方、引張縁のひずみはやや増加し、計算値より若干大きくなっている。これは、荷重が繰返し作用することで、充てんコンクリートの引張縁に曲げひび割れが生じたため、曲げ応力の中立軸位置が上方に移動したと考えられる。なお、荷重25,000回目においても、上下鋼板のひずみは、曲げモーメント分布に沿った分布形状を示していることから、鋼板とコンクリートとの間にはずれが生じておらず、両者はほぼ一体挙動していたものと考えられる。

(3)充てんコンクリートの性状

試験終了後、ケース1と同様に上鋼板を切断し、充てんコンクリート表面の観察を行うとともに、コンクリートコアを各試験体から9本採取し、圧縮強度試験を実施した。ケース2においても充てん時に生じたと思われる気泡があるものの、両試験体にひび割れ等の損傷は見られなかった。

コアの圧縮強度においても、**表-3**に示すように、両ケースとも設計基準強度 35N/mm^2 を上回っており、また、円柱供試体とコアの強度がほぼ同等であったことから、強度発現段階からの繰返し荷重による影響は見られなかった。

4. まとめ

本研究の結果、若材齢時 ($f_c=10\text{N/mm}^2$) より繰返し荷重を受けるサンドイッチ床版について以下のことが得られた。

- (1) 強度発現とともに床版のたわみは減少していく傾向が見られ、コンクリートは若材齢時から必要な補剛効果を有している。
- (2) 上鋼板に生じるひずみは小さく、コンクリートが鋼板の局部変形を十分抑制している。
- (3) コンクリートと上下鋼板は十分な付着力を有しており、一体化して挙動している。
- (4) コンクリート性状に若材齢時からの繰返し荷重による影響は見られない。

参考文献

- 1) 中川敏之, 上條崇, 関口修史, 井澤衛, 金好昭彦: サンドイッチ型複合床版の架替え工法適用に関する一提案, 土木学会第58回年次学術講演会, CS6-025, pp. 201-202, 2003. 9
- 2) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 I 共通編, 2002
- 3) 阿部幸夫, 井澤衛, 由井洋三, 中川敏之: 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, CS-173, pp. 346-347, 1999. 9
- 4) 土木学会: 鋼構造物設計指針 PART B 合成構造物, 1997
- 5) 土木学会: 平成8年制定コンクリート標準示方書 [施工編], 1996
- 6) 土木学会: 平成8年制定コンクリート標準示方書 [設計編], 1996