論文　膨張材を使用した合成床版の走行試験による膨張効果の評価

杉原　伸泰[*1]・大西　弘志[*2]・松井　繁之[*3]

要旨：鋼・コンクリート合成床版では一般的に膨張材を添加しているが，コンクリート硬化後に残留する圧縮応力度による床版の損傷進展過程における効果については不明な点が多い。そこで本論文では，縮尺した合成床版試験体を用いて長期ひずみ計測を実施し，膨張材による残留応力度の評価を行った。さらに輪荷重走行試験を行い，残留応力度が床版の損傷進展に与える影響について考察した。

キーワード：合成床版，膨張材，残留応力度，走行試験

1.　はじめに

合成床版製作時に普通コンクリートを用いた場合，コンクリートの水和反応の過程において生じるコンクリートの収縮を鋼製の型枠材（以下，鋼殻部材）が拘束するため，引張応力度が生じ，ひび割れが発生する可能性が高い。このため，道路橋に適用される鋼・コンクリート合成床版には初期ひび割れの抑制を目的に膨張材の使用が推奨されている。さらには，コンクリートの膨張により床版には圧縮応力度が残留し，この圧縮応力度によって鋼殻部材とコンクリートとの間で付着強度が大きくなり，その結果，合成床版の損傷進展を抑制する効果をもたらすと期待されている。しかしながら，後者の効果については実験的に確認したデータが少なく，検討例も少ない。水和反応の過程において膨張材によって生じる膨張効果とコンクリートの収縮量との大小関係およびクリープの影響を明らかにすることが必要である。そこで，本研究では鋼・コンクリート合成床版試験体における温度およびひずみの長期計測を行い，温度応力解析により残留応力度の評価を行う。さらに，輪荷重走行試験による損傷促進実験を行い，膨張材によって付与される残留応力度が床版の劣化進展過程の抑制に与える効果について検討する。

2.　試験の概要

2.1　試験体の形状

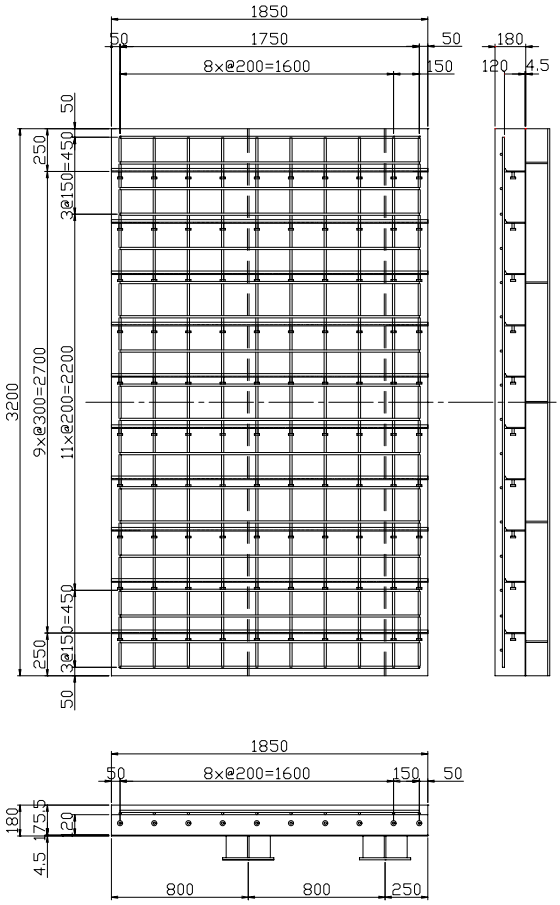
本実験で用いた試験体は底鋼板を有する鋼・コンクリート合成床版の片持版試験体である。試験体形状を**図－1**に示す。橋軸方向 3200mm ×橋直方向 1850mm，床版厚さ 180mm であり，底鋼板厚は 4.5mm である。底鋼板厚は床版厚に含むものとした。

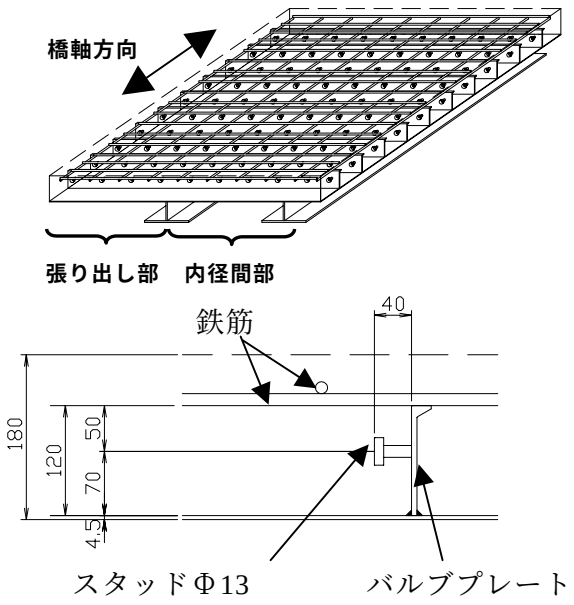
底鋼板に設置するリブ部材としては，球平形鋼（以下，バルブプレート）を使用し，さらにバルブプレートのウェブには水平方向のスタッド 200mm 間隔で設けている。バルブプレート突出部とスタッドによってコンクリートとの付着面に作用するせん断力に抵抗し，鋼殻部材とコンクリートが一体として挙動する構造である。バルブプレートの設置間隔は 300mm とした。なお，支持桁上においては，ハンチ部を設けた構造とするのが通常であるが，本試験体ではハンチを設けず，フラットな床版試験体とした。試験体に用いたコンクリートの配合を**表－1**に示す。コンクリート打ち込みは 2002 年 9 月 17 日，室内温度は約 25℃であった。また，コンクリートの受け入れ時温度は約 30℃であった。

*1 日立造船㈱　研究員　鉄構・海洋研究室　工修　(正会員)
*2 大阪大学大学院　助手　工学部土木工学科　工修　(正会員)
*3 大阪大学大学院　教授　工学部土木工学科　工博　(正会員)

表－１　コンクリートの配合表

圧縮強度 (N/mm^2)	ｾﾒﾝﾄ	ｽﾗﾝﾌﾟ (cm)	空気量 (%)	W/C +E(%)	S/a (%)	単位量(kg/m^3)					
						水 W	ｾﾒﾝﾄ C	膨張材	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 A
30	N	12	4.5	45.2	43.5	175	357	30	742	1018	3.570





図－１　試験体形状の概要

2.2　試験方法

(1)　長期ひずみ計測

ひずみの計測センサー位置を**図－２**に示す。コンクリートの実ひずみ計測として，埋込型ひずみゲージ（KM-100BT：東京測器研究所）を使用した。また，鉄筋計を用いて橋軸方向，橋軸直角方向の鉄筋ひずみを測定した。

コンクリート打ち込み後 1 週間は床版上面にマットを敷き，常時湿潤状態となるよう散水を行った。

(2)　片持版の輪荷重走行試験

大阪大学所有の輪荷重走行試験機を使用し，片持版試験体の走行実験を行う。**図－３**に実験方法の概要を示す。2 体の床版試験体を突合せた状態で設置し，2 体同時に走行載荷する方法である。この方法により床版試験体の変形によって試験機にかかる水平方向の負荷を低減することができる。

床版片持版の輪荷重走行試験では，走行開始初期および荷重上昇直後の床版のひび割れ進展が著しい状態から，その後，損傷進展が停滞し安定した状態に至る。この安定した状態を当該荷重条件における限界状態と定義し，限界状態の床版断面の評価を行う。本試験体では，総走行回数を 24 万回（12 万往復）とし，荷重を 150kN から最大荷重 240kN まで上昇させる階段載荷と

し，限界状態の創出とその時の床版断面の評価を実施した（**図－４**参照）。

3.　長期ひずみ計測結果と温度応力解析による残留応力度の評価

3.1　長期計測結果

コンクリート打ち込み直後からの外気温，床版内部温度，コンクリート実ひずみおよび鉄筋ひずみの履歴を**図－５～図－８**に示す。図中の解析値は汎用の温度応力解析プログラム（ASTEA　MACS）による解析結果を示している。温度応力解析条件を**表－２**に示す。

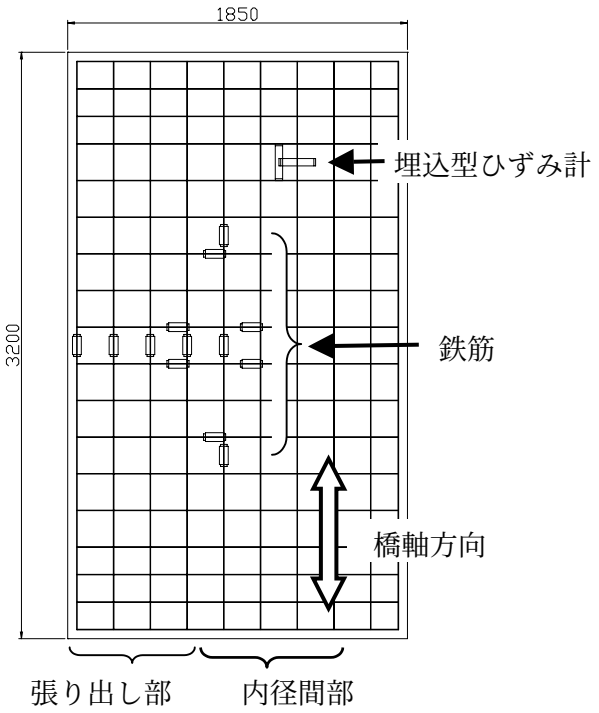
コンクリート内部温度および実ひずみとも測定値の履歴とよい一致を示しており，発熱温度上昇過程および拡散冷却過程が再現できている。さらに鉄筋ひずみの履歴についても，橋軸方向鉄筋，橋軸直角方向鉄筋とも測定値のひずみ履歴とほぼ一致している。鉄筋ひずみは測定点間で差が見られず，床版に一様に膨張ひずみが分布していると考えられる。

コンクリート実ひずみはコンクリート打ち込みから 50 日後に-100μ程度の収縮ひずみを示している。水和反応による温度膨張，収縮が材齢 3 日前後で収束したとみられることから，これ以降は外気温の変化に伴って実ひずみも変化したとみられる。

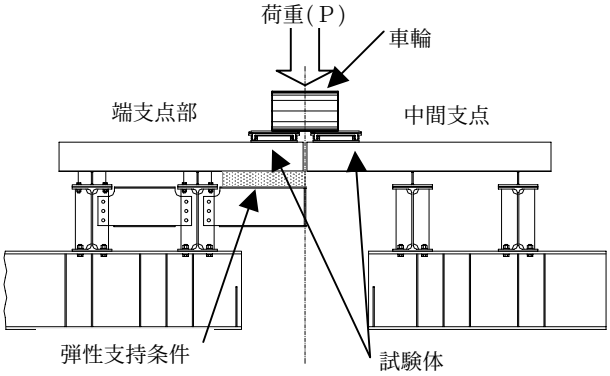
3.2　残留応力度の評価

床版コンクリートに残留する応力度について，温度応力解析により推定を行った。応力度の算出断面位置を**図－９**に示す。材齢 50 日目の残留応力度の分布状態を**図－１０**に示す。

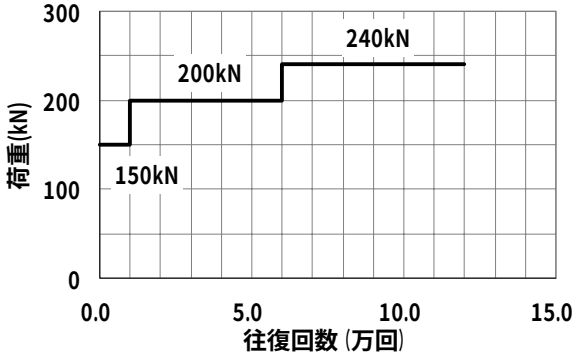
すべての算出断面位置において底鋼板とバルブプレートによる拘束が最大となる下面側のコンクリートで 1.0～1.5N/mm^2 の圧縮残留応力度が確認された。底鋼板から上面にいくにつれて一様に減少していき，床版上面では，ほぼ 0N/mm^2 となった。底鋼板，バルブプレートの拘束がほとんどない上面付近では応力度の残留がない傾向を表している。



図－２　計測センサー配置図



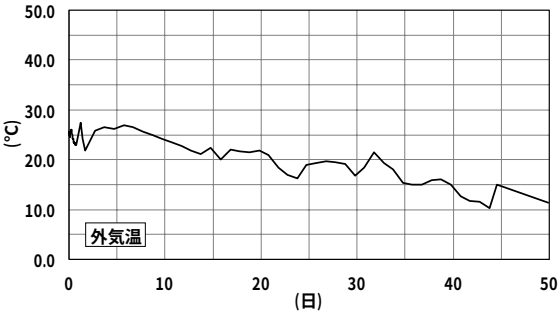
図－３　走行試験の概要



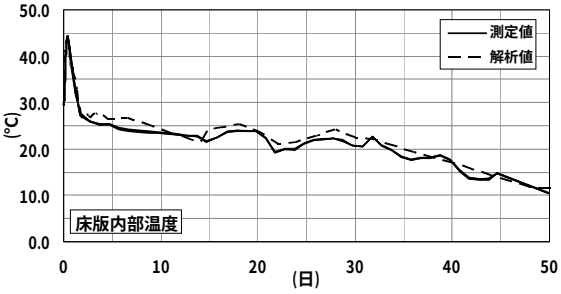
図－４　載荷荷重プログラム

表－２　温度応力解析条件

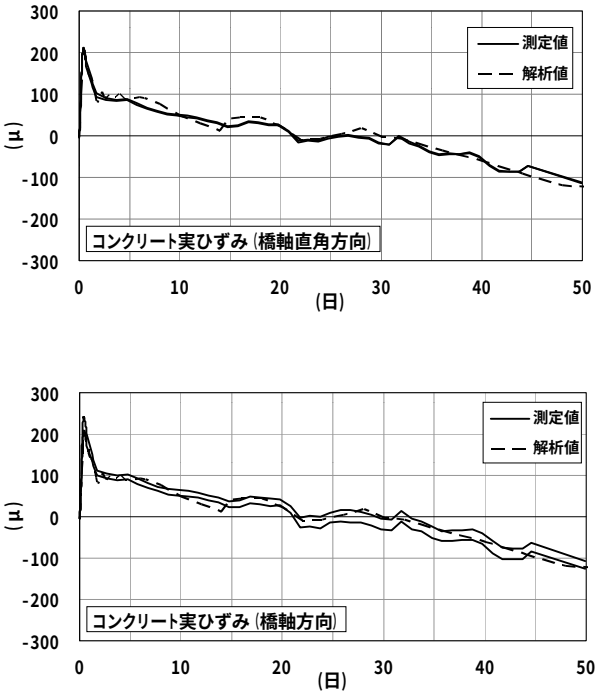
モデル	解析モデル		片持版供試体	
	モデル部分		全体モデル	
	鋼桁		板厚考慮	
物性値	コンクリート	コンクリートの種別	普通コンクリート（膨張材入り）	
		熱伝導率	2.7W/m°C（2.6～2.8W/m°C）	
		密度	2300kg/m^3	
		比熱	1.30kJ/kg°C	
		断熱温度上昇特性	Q_∞	65.0°C
			γ	1.8
		ヤング率	JSCE標準示方書簡易式	
			E=4700×$\sigma_c^{0.5}$N/mm^2	
		圧縮強度	JSCE標準示方書実験式	
			a	2.0
			b	0.95
			f(91)	41.0N/mm^2
		引張強度	JSCE標準示方書実験式	
		ポアソン比	0.167	
		線膨張係数	10μ/°C	
		温度	外気温	計測温度を考慮
		乾燥収縮	膨張材の効果に含む	
	鋼型枠部材	熱伝導率	25W/m°C	
		密度	7850kg/m^3	
		比熱	0.4kJ/kg°C	
		ヤング率	2.1×10^{5}N/mm^2	
		ポアソン比	0.3	
		線膨張係数	12μ/°C	
	熱伝達率	外気	10W/m^2°C	
		側面鋼製型枠	10W/m^2°C	



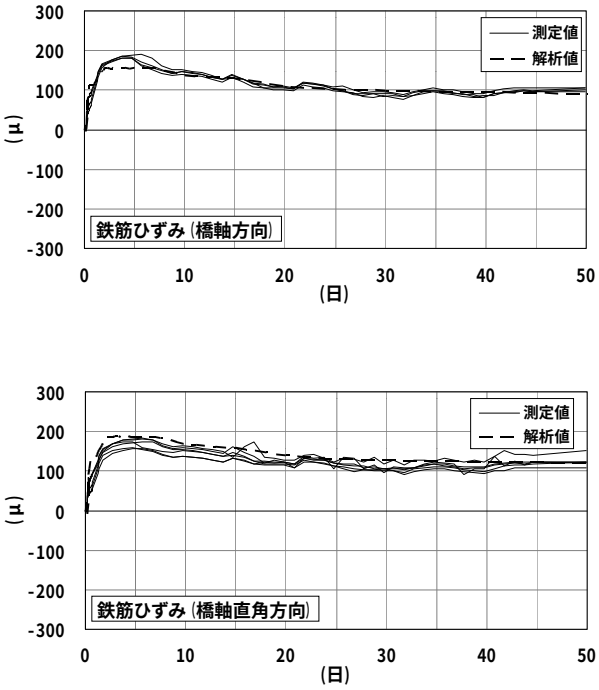
図－５　外気温履歴



図－６　床版内部温度履歴



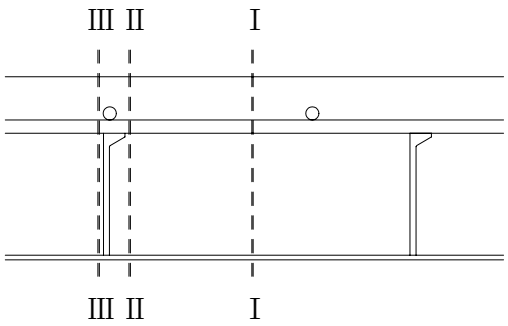
図－７　試験体実ひずみの履歴



図－８　鉄筋ひずみの履歴

４．　走行試験による膨張材効果の評価

片持ち床版片持版張り出し部先端橋軸方向中央の載荷点直下における断面内の応力度分布の推定結果を**図－１１**に，走行試験より得られた活荷重たわみの経時変化を**図－１２**に示す。た

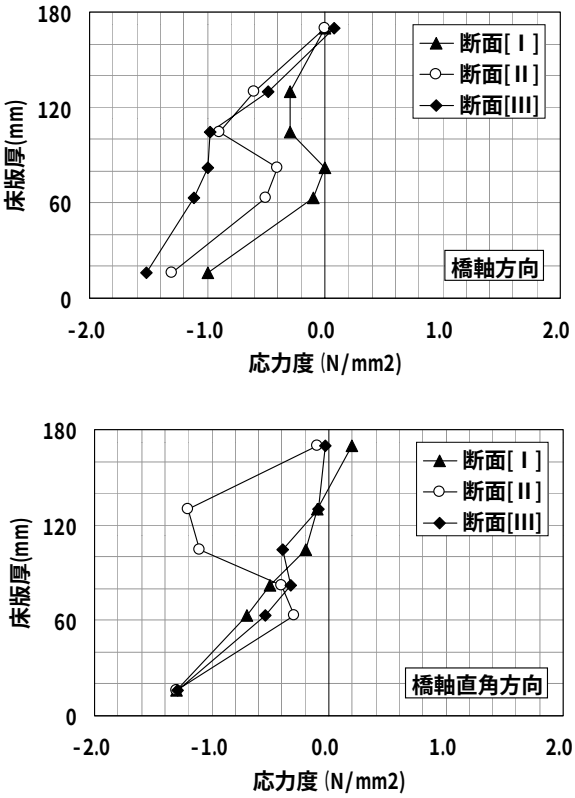


Ⅰ：バルブプレート間

Ⅱ：バルブプレート前面（球側）

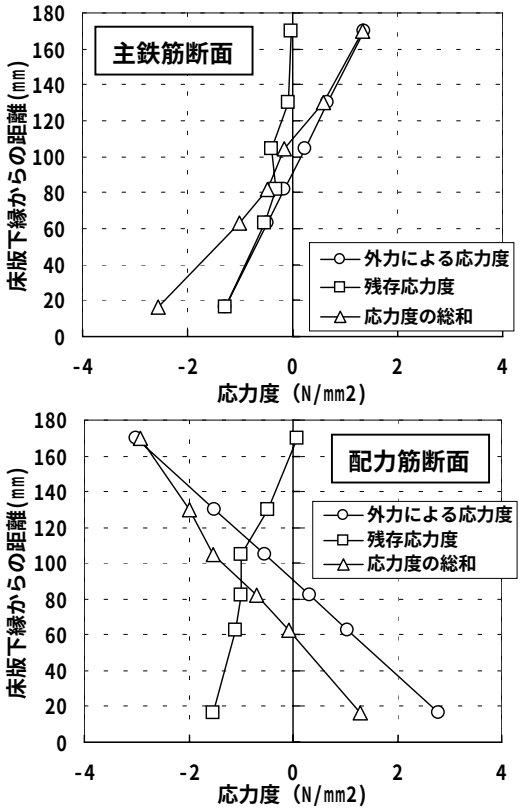
Ⅲ：バルブプレート背面

図－９　応力度分布状態の算出位置



図－１０　材齢５０日時の残留応力度分布

わみ測定は張り出し部先端橋軸方向中央の点に載荷して行った。たわみの測定位置は荷重直下の点である。図中の解析値は走行各回数に対応するＦＥＭ解析結果を示している。走行開始初期に床版上面の橋軸方向にひび割れが発生し，進展しているため，この時期のたわみ増分が大きくなっている。往復回数が７万回を超えた時点から，増加傾向が緩やかとなっており，ひび



図－１１　断面内応力度分布の推定

割れの安定した限界状態に達したものと考えられる。

残存剛性比の経時変化を**図－１３**に示す。残存剛性比は式（１）に示すように各走行回数における床版の断面剛性をひび割れのない初期の断面として全断面有効時の断面剛性に対する比として算出される値である。

$$y = Dn / Di \qquad (1)$$

Dn ：n 走行回数時の床版断面剛性

Di ：全断面有効時の床版断面剛性

張り出し部床版において，橋軸に直角な断面（配力筋断面）では劣化が進んでいないという結果が得られた。それに比べて橋軸直角軸に直角な断面（主鉄筋断面）では劣化が著しく，走行最終段階においては，全断面を有効とした時の２割程度の剛性で推移している。

配力筋断面においては，片持床版の先端は輪荷重載荷時に上面が圧縮となる正曲げ領域である。これに対し主鉄筋断面では，支持桁を支点とした負の曲げモーメントが作用し，床版上面

には引張応力度が発生する。前述した温度応力解析による残留応力度の分布状態の結果から床版の底鋼板側には 1.0～1.5N/mm^2 の圧縮応力度が残留しており，走行荷重による引張応力度を低減する効果があるといえる。床版上面側では走行試験開始の時点で残留応力度はほぼ 0N/mm^2 で活荷重による引張応力度がキャンセルされないためひび割れの発生進展につながっている。

5. まとめ

合成床版のコンクリートに膨張材を使用した場合の残留応力度の効果に関する以下の知見を得た。

(1)温度応力解析の結果

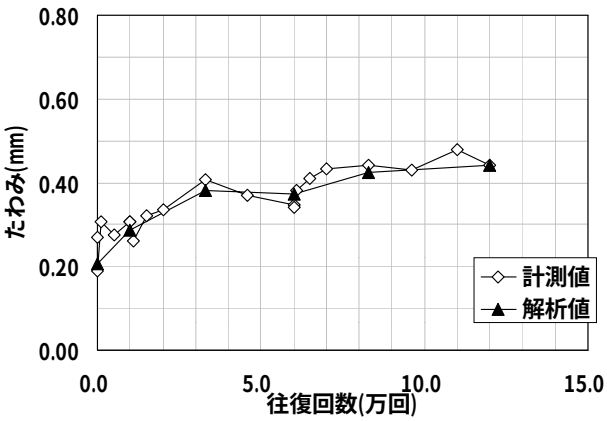
a)合成床版コンクリートに膨張材を使用することでコンクリート部には圧縮の残留応力度を付与する効果がある。その値としては，底鋼板近傍で最大となり，1.0～1.5N/mm^2 との値となった。

b)鋼製部材による拘束度が小さい床版上面においては，膨張材による残留圧縮応力度は小さく，効果は少ない。

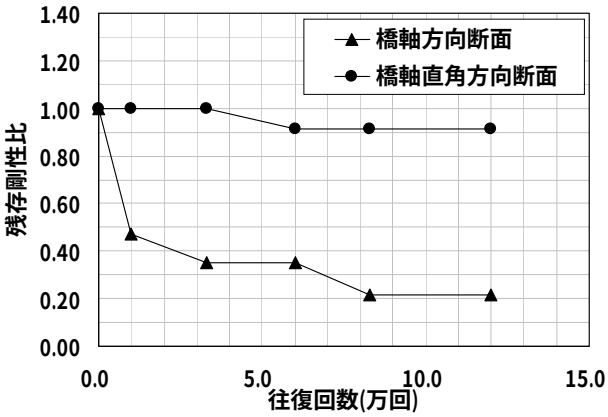
(2)合成床版片持版の輪荷重走行試験の結果

c)底鋼板側が引張域となる正曲げ領域においては，膨張材による残留圧縮応力度が有効に作用するため，断面の損傷進展を抑制する効果が期待できる。

d)逆に底鋼板側が圧縮域となる負曲げ領域では上面部分に圧縮応力度は残留しておらず，効果はない。



図－１２　走行試験時の活荷重たわみ経時変化



図－１３　床版各断面の残存剛性比経時変化

参考文献

1) 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

2) 高瀬和男，寺田典生，福永靖雄，石川敏之：場所打ちＰＣ床版の材齢初期における膨張材効果の評価方法に関する一提案，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp.549-554，2002