

鋼・コンクリート合成床版の膨張材によるケミカルプレストレスの評価

Evaluation on Chemical Pre-Stress by Expansive Additive of Steel-Concrete Composite Deck

杉原伸泰*, 生田目尚美*, 松井繁之**

Nobuyasu SUGIHARA, Naomi NAMATAME, Shigeyuki MATSUI

*工修, Hitz 日立造船(株), 鉄構事業本部, 技術開発部 (〒550-0002 大阪市西区江戸堀 2-6-33)

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

An expansive additive is used to increase initial cracking load of concrete in steel-concrete composite decks. It has an effect of inducing chemical pre-stress in concrete, so it results in that the fatigue durability of deck is improved. In this research, short-term measurement of the expansive action was carried out with a steel-concrete composite deck. And temperature stress analysis was carried out based on the result of short-term measurements for evaluation the chemical pre-stress in concrete of the deck. Furthermore, decrease of the stress of concrete in the composite deck was proved by consideration of chemical pre-stress with 3-D finite-element-method analysis.

Key Words: chemical pre-stress, durability, expansive additive, steel-concrete composite deck

キーワード: ケミカルプレストレス, 耐久性, 膨張材, 鋼・コンクリート合成床版

1. はじめに

近年, 道路橋に鋼・コンクリート合成床版を適用する事例が増加している。この理由として, 1)桁間隔の大きい合理化橋梁に適用できること, 2)疲労耐久性が高いこと, 3)型枠工および支保工を省略し現場施工工程の短縮に繋がること, および 4)鋼殻パネルが橋梁上面を覆うことにより現場作業上の安全性が確保できることが挙げられる。

鋼・コンクリート合成床版は, 工場で6~9mmの鋼板に補強のためのリブやトラス状の部材を溶接し, 鋼殻パネルを製作する。その後, 鋼殻パネルを現地に搬入し, 主桁上に敷設する。鋼殻パネルは, コンクリート打ち込み時に型枠兼支保工として使用され, コンクリート硬化後はコンクリートと一体化して合成床版となる。

床版コンクリートでは, 乾燥収縮によるひび割れや温度ひび割れの発生が懸念される。床版コンクリートに発生するひび割れは, 床版の疲労耐久性を低下させる。特に, ひび割れが床版コンクリートを貫通する場合, 疲労耐久性の低下は著しい。鋼・コンクリート合成床版では, 乾燥収縮によるひび割れや温度ひび割れを防止することを目的として, コンクリートに膨張材を添加することが標準とされている。現在までに実橋梁に適用された鋼・コンクリート合成床版において, これらのひび割れが発

生した事例は報告されておらず, 膨張材の使用はひび割れを防止するための有効な対策であると考えられる。

一方, 車両荷重の繰り返し载荷に対する床版の疲労耐久性は, 図-1に示す輪荷重走行試験により評価がなされる。鋼・コンクリート合成床版に対しては, 最大荷重392kN, 総走行回数52万回の厳しい試験条件の輪荷重走行試験が実施されており, その結果, 押し抜きせん断破壊に至ることなく, 道路橋床版として十分な疲労耐久性を有していることが報告されている¹⁾。

しかし, 鋼・コンクリート合成床版を含むコンクリート系床版に膨張材を使用した場合, 鉄筋や鋼殻パネルがコンクリートの膨張挙動を拘束し, 床版コンクリートにはケミカルプレストレスが導入され, その結果, 床版の

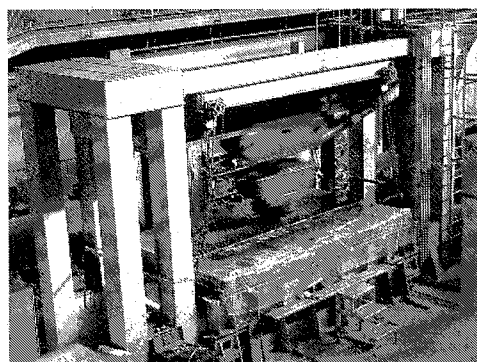


図-1 輪荷重走行試験

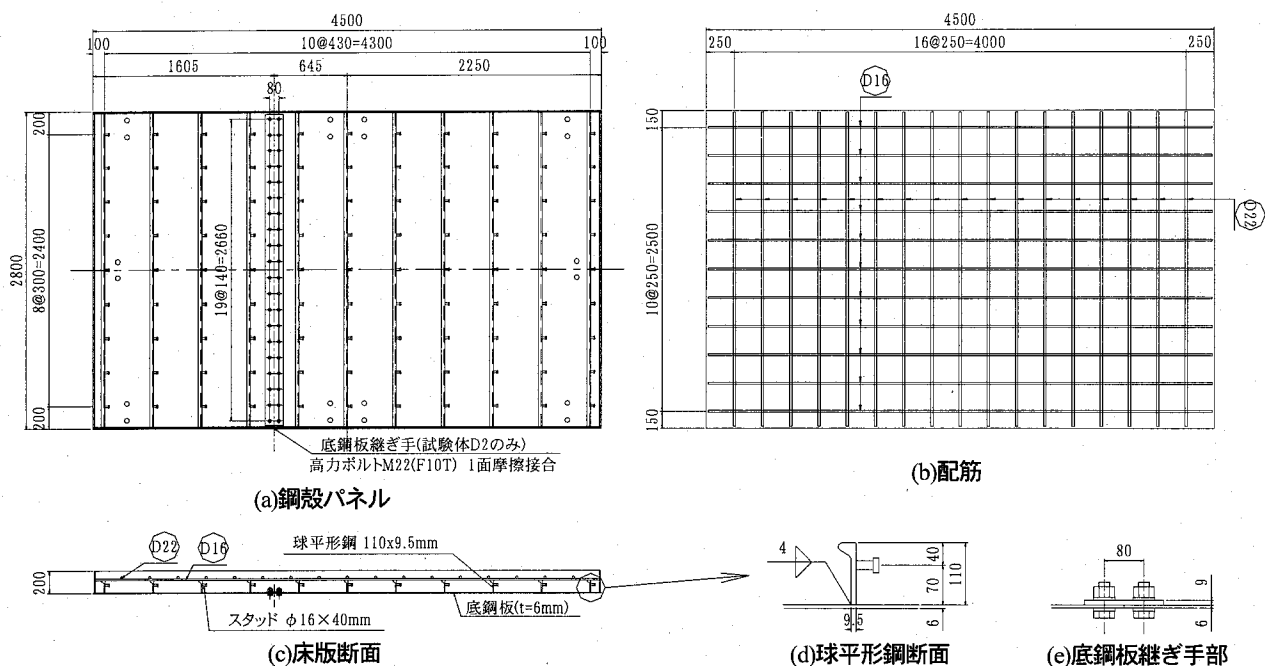


図-2 試験体形状

表-1 コンクリート配合表

呼び強度 [N/mm ²]	セメント	スランブ [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 E	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 A
27	普通	12	4.5	53	44.1	175	300	30	764	988	3.5

疲労耐久性が向上することが報告された^{2), 3)}。従って、輪荷重走行試験による鋼・コンクリート合成床版の疲労耐久性の評価は、ケミカルプレストレスによる向上効果が付与された結果であると考えられる。

そこで本研究では、膨張材により鋼・コンクリート合成床版に導入されるケミカルプレストレス量とその分布状態を明らかとし、さらに、ケミカルプレストレスによる鋼・コンクリート合成床版の疲労耐久性の向上効果についての評価を行った。

2. 試験体および試験方法

2.1 試験体

試験体は、輪荷重走行試験に使用する単純版試験体と、膨張コンクリートの自由膨張ひずみを計測する円管試験体とした。

輪荷重走行試験の対象とする床版は、球平形鋼を用いた鋼・コンクリート合成床版とした。単純版試験体の形状を図-2に示す。橋軸方向4500mm×橋軸直角方向2800mm、床版厚は底鋼板(厚さ6mm)を含み200mmとした。球平形鋼は高さ110mm、ウェブ厚9.5mmを使用し、橋軸直角方向に連続すみ肉溶接により底鋼板に設置した。球平形鋼の橋軸方向間隔は430mmである。球平形鋼には、フラット面側に頭付きスタッドφ16×40mmを

表-2 コンクリートの強度特性

材齢	圧縮強度 [N/mm ²]	引張強度 [N/mm ²]	ヤング係数 [N/mm ²]
7日	23.6	—	—
28日	29.8	3.2	31,600
91日	32.2	—	32,600

注)封緘養生した試験体の結果を示す。

表-3 鋼材の強度特性

		ヤング率 [N/mm ²]	降伏点 [N/mm ²]	引張強さ [N/mm ²]	ポアソン比
鉄筋	D16	—	390	565	—
	D22	—	387	582	—
球平形鋼		203,600	374	475	0.28
底鋼板	橋軸方向	208,100	353	471	0.29
	橋軸直角方向	207,500	304	457	0.29

300mm間隔で溶植した。主鉄筋はD22@250mm、配力筋はD16@250mmとし、球平形鋼の上側に配筋した。単純版試験体は、底鋼板に継ぎ手部の無い試験体D1と継ぎ手部を有する試験体D2の2体を製作した。

使用材料は、底鋼板および球平形鋼がSS400、鉄筋がSD345である。コンクリートの呼び強度は27N/mm²とし、普通セメントを使用した。また、コンクリートには膨張材は30kg/m³添加した。表-1にコンクリートの配合、表-2にコンクリートの強度特性、表-3に鋼材の強度特性を示す。

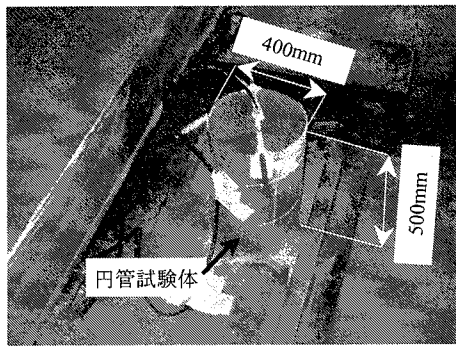
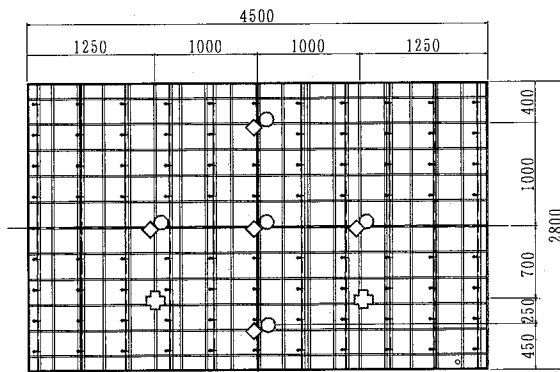


図-3 自由膨張ひずみの計測



- : 底鋼板ひずみ(2軸ゲージ)
- ◇: 鉄筋ひずみ(単軸ゲージ)
- : コンクリート温度およびひずみ(埋め込み型ひずみ計)

図4 センサー位置(単純版試験体)

図-3に円管試験体を用いた自由膨張ひずみの計測状況を示す。円管試験体は、直径40cm、高さ50cmの円管内に無応力容器を鉛直に固定し、無応力容器中に埋め込み型ひずみ計を設置した。円管試験体は単純版試験体の近傍に置き、外気温、風および日射の条件を両試験体で同じとした。試験体は打ち込みから材齢7日までシートで覆い、散水して湿潤養生を行った。

2.2 温度およびひずみの短期計測

コンクリートの打ち込み(2003年9月18日)から同年10月24日までの38日間、単純版試験体および円管試験体の温度およびひずみを計測した。単純版試験体の計測センサー位置を図4に示す。コンクリート温度および外気温の計測には、熱電対を使用した。単純版試験体では、橋軸直角方向および橋軸方向の底鋼板ひずみ、主鉄筋と配筋筋のひずみ、および床版厚さ中心における橋軸直角方向および橋軸方向のコンクリートひずみを計測した。なお、コンクリートには埋め込み型ひずみ計を使用した。

計測の期間中、単純版試験体は2.5mの支間で単純支持状態とした(図-5参照)。また、単純版試験体および円管試験体とも、日中の直射日光に曝さないよう、屋根のある屋外ヤードに設置した。

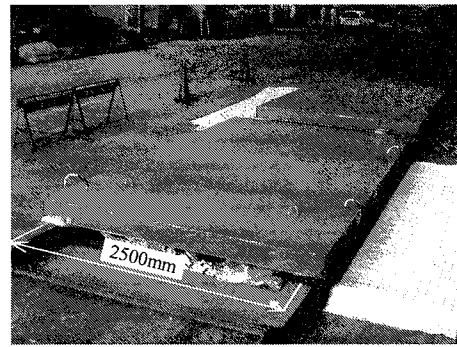


図-5 短期計測の状況

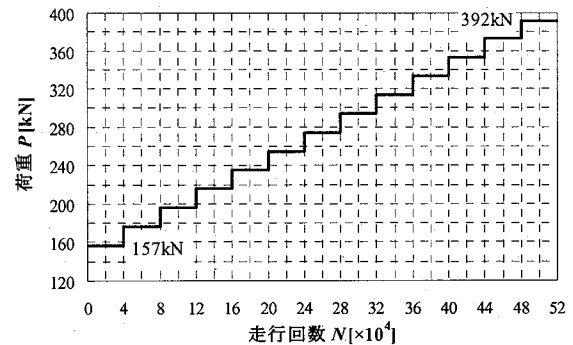


図-6 輪荷重載荷条件

2.3 輪荷重走行試験

輪荷重走行試験には、(独)土木研究所所有の試験機を用いた(図-1参照)。単純版試験体は、支間2.5mの単純支持とし、橋軸方向の試験体端部にはH形鋼(300×300mm)を設置して弾性支持条件とした。

図-6に輪荷重の載荷条件を示す。初期荷重157kNから開始し、走行4万回毎に19.6kN上昇させる階段状漸増載荷とした⁴⁾。最大荷重は392kN、総走行回数は52万回である。輪荷重は鋼製ブロック(橋軸方向200mm×橋軸直角方向500mm)を介して載荷した。走行範囲は試験体の中央より橋軸方向に±1.5mとした。

輪荷重走行試験における計測項目は、試験体のたわみ、底鋼板、鉄筋およびコンクリート上面のひずみとした。

なお、輪荷重走行試験を開始した日の各試験体コンクリートの材齢は、試験体D1が49日、試験体D2が74日である。

3. 非線形温度応力解析を用いたケミカルプレストレスの評価

3.1 解析条件

図-7に非線形温度応力解析に用いた単純版試験体モデルを示す。コンクリートおよび鋼殻パネルは8節点ソリッド要素、鉄筋はトラス要素を用いてモデル化した。短期計測期間中における試験体の支持条件を考慮し、支間2.5mの単純支持とした。なお、本検討には非線形温度応力解析プログラムASTEAMACS((株)計算力学研究センター)を使用した⁵⁾。

表4に非線形温度応力解析で用いた材料物性値を示す。

コンクリートの断熱温度上昇特性は、コンクリート標準示方書の算定式を適用した⁶⁾。終局断熱温度上昇量 Q_{∞} 、温度上昇速度に関する定数 γ 、および試験体表面と外気との熱伝達率は、単純版試験体におけるコンクリートの温度の計測結果を再現するよう決定した。

コンクリートの圧縮強度および引張強度の発現は、コンクリート標準示方書の強度算定式を適用し、材齢91日の圧縮強度を用いて決定した。

有効ヤング係数は、コンクリート標準示方書の算定式を適用し、コンクリートの材齢91日における圧縮強度より求めた。ただし、打ち込みから材齢3日までの若材齢においては図-8に示す低減係数を用いて、クリープによる有効ヤング係数の低減の影響を考慮した⁷⁾。

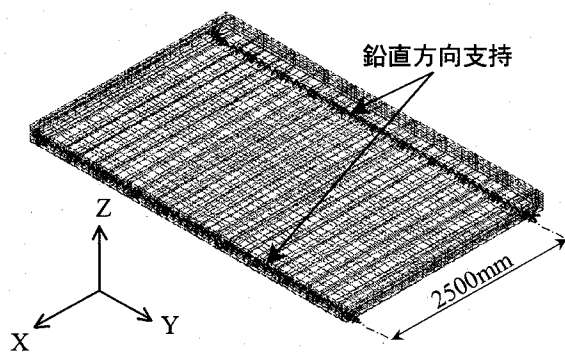


図-7 非線形温度応力解析モデル

表-4 温度応力解析に用いた材料物性値

コン ク リ ー ト	コンクリートの種別	普通コンクリート	
	熱伝導率	2.7W/m℃	
	密度	2300kg/m ³	
	比熱	1.30kJ/kg℃	
	断熱温度上昇特性	Q_{∞}	33.0℃
		γ	3.2
	ヤング係数	JSCE標準示方書簡易式	
		$E = \phi \times 4700 \times \sigma_c^{0.5} \text{ N/mm}^2$	
	圧縮強度	クリープによる低減を考慮	
		JSCE標準示方書実験式	
		a	4.5
		b	0.95
		f_{ck}	35.0N/mm ²
	引張強度	JSCE標準示方書実験式	
	ポアソン比	0.167	
鋼 殻 パ ネ ル	線膨張係数	実ひずみ-温度計測結果より決定	
	温度	外気温	温度計測結果を使用
	乾燥収縮	膨張材の効果に含む	
	熱伝導率	25W/m℃	
	密度	7850kg/m ³	
	比熱	0.4kJ/kg℃	
	ヤング係数	$2.1 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$	
	ポアソン比	0.3	
	線膨張係数	12 μ /℃	
	熱伝達率	コンクリート表面と外気	
熱 伝 達 率	底鋼板下面と外気	10W/m ² ℃	
	鋼製型枠と外気	10W/m ² ℃	

3. 2 有効膨張ひずみの決定

膨張コンクリートの有効膨張ひずみは、式(1)で求めた無拘束状態のコンクリートの実ひずみ(円管試験体で計測した実ひずみ)より、コンクリートの温度変化によるひずみを差し引いた値として決定できる。

$$\varepsilon_i = C \times \varepsilon_m + \gamma \times (T_i - T_0) - C_1 \times \chi \quad (1)$$

ここに、

ε_i : コンクリートの実ひずみ

C : 校正係数

ε_m : ひずみ計の計測(指示)値

γ : ひずみ計の線膨張係数(=11.7) [μ /℃]

T_i : 温度の計測値 [℃]

T_0 : 温度の初期値 [℃]

C_1 : ひずみ計の零点移動量に対する校正係数

χ : ひずみ計の零点移動量

図-9に円管試験体におけるコンクリートの温度と実ひずみの関係を示す。4つのステップ(図中①～④の近似直線の示す領域)に分け、各近似直線の傾きをそれぞれのステップにおける見かけの線膨張係数とした。

打ち込み後1時間から3時間(ステップ①)および3時

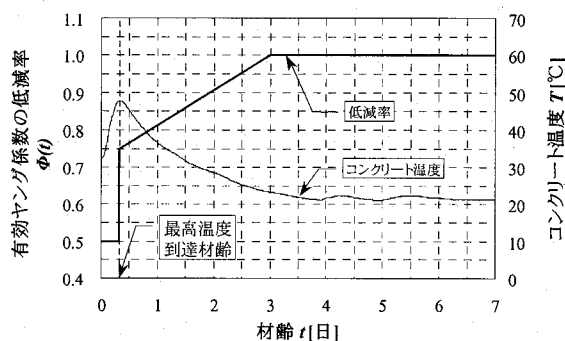


図-8 有効ヤング係数の低減係数

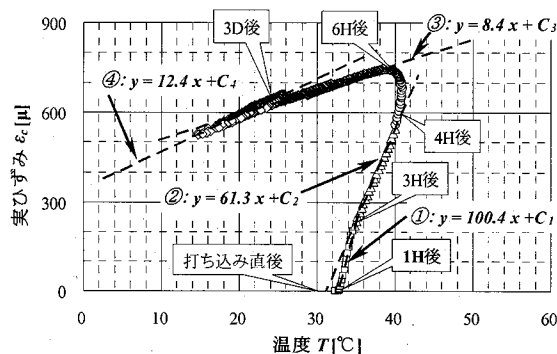


図-9 温度-実ひずみ関係(円管試験体)

表-5 コンクリートの線膨張係数

ケース	0点補正 材齢	線膨張係数[μ /℃]			
		①	②	③	④
1-A	1H	100.0	61.3	8.4	12.4
1-B	1H	20.0	20.0	8.4	12.4
3-A	3H	—	61.3	8.4	12.4
3-B	3H	—	20.0	8.4	12.4
4-A	4H	—	—	8.4	12.4
6-A	6H	—	—	—	12.4

間から4時間(ステップ②)における見かけの線膨張係数は、それぞれ100.4, 61.3 μ/C であり、大きな値を示した。最高温度に到達した後の約2時間においては、温度の変化はなく、実ひずみのみ増加した。温度の下降が始まった材齢6時間から材齢3日まで(ステップ③)は、線膨張係数は8.4 μ/C となり、普通コンクリートの線膨張係数に比べて小さい値となった。これは、温度の低下によるひずみと膨張材による膨張ひずみが足し合わされた結果、見かけの線膨張係数が小さくなったと考えられる。材齢3日以後(ステップ④)は、線膨張係数は12.4 μ/C となり、普通コンクリートとほぼ同じ値となった。

ステップ①および②におけるコンクリートの実ひずみは、温度変化によるひずみと膨張材による膨張ひずみの和である。従って、このステップにおける見かけの線膨張係数を用いて求められた温度変化によるひずみを、実ひずみから差し引くことは、膨張ひずみを過小に評価することになる。そこで、本検討では若材齢におけるセメントペーストの線膨張係数に関する過去の研究より、ステップ①および②における線膨張係数を20 μ/C として解析を行った^{8),9)}。表-5に本検討で用いた各ステップの線膨張係数を示す。

コンクリートと鋼殻パネルおよび鉄筋との付着が十分発現していない状態では、コンクリートの膨張による鉄筋および鋼殻パネルのケミカルプレストレインは発生せず、コンクリートのケミカルプレストレスが生じない。そこで、コンクリート打ち込み後、1時間、3時間、4時間および6時間までの膨張ひずみを無視することで、有効膨張ひずみを決定した。図-10に有効膨張ひずみと材齢の関係を示す。

3.3 単純版試験体の温度およびひずみの変化

図-11に単純版試験体のコンクリート温度の変化を示す。コンクリート温度は、打ち込み時の30 $^{\circ}\text{C}$ から約8時間後に最高47 $^{\circ}\text{C}$ に達した。その後、材齢3日でコンクリート温度は外気温にほぼ一致した。

コンクリート温度の解析結果は、温度上昇および冷却の過程とも計測結果によく一致しており、単純版試験体のコンクリート温度の履歴が再現できたと言える。

図-12にコンクリートの実ひずみの変化を示す。コンクリートが最高温度に達する材齢8時間で、実ひずみが最大となり、温度の下降に伴い減少し、橋軸直角方向では約50 μ 、橋軸方向では0 μ に漸近した。

コンクリートの実ひずみにおいては、ケース3-Bの解析結果が、実ひずみの計測結果によく一致した。ケース1-Aおよび1-Bの結果は、計測結果に比べ大きい。コンクリートの強度が十分に発現していない材齢における膨張ひずみを有効とした結果、有効膨張ひずみを大きく評価した。ケース3-Aおよび4-Aの結果は、ステップ①および②において、コンクリート要素に見かけの線膨張係数を用いたため、水和熱によるコンクリート温度の上昇

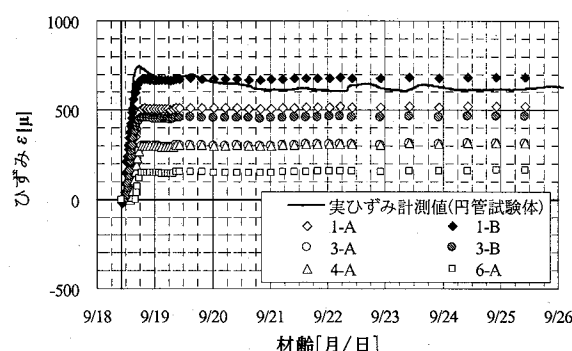


図-10 有効膨張ひずみの変化

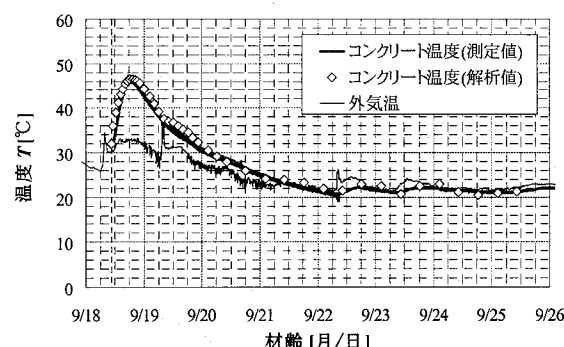


図-11 コンクリート温度の変化(単純版試験体)

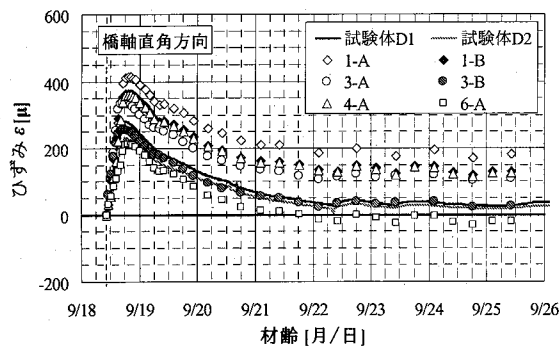
に伴う実ひずみの増加を過大に評価する結果となった。ケース6-Aの結果は、計測結果に比べ、実ひずみが若干小さい結果となった。

図-13に試験体中央の主鉄筋および配筋筋のひずみの変化を示す。鉄筋ひずみとしては、ケミカルプレストレインに相当する弾性ひずみを示し、温度変化によるひずみは含まない。鉄筋ひずみの計測結果は、材齢3日間において、主鉄筋では250 μ 、配筋筋では200 μ まで緩やかに増加し、その後、一定値にて推移した。

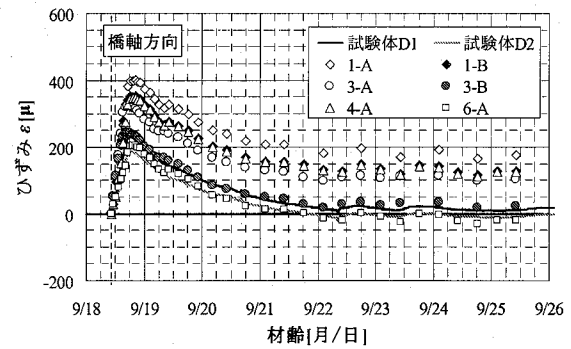
図-14に底鋼板ひずみの温度変化によるひずみを含まない弾性ひずみの推移を示す。橋軸直角方向では、底鋼板ひずみはほとんど発生しなかった。コンクリートの膨張に伴い、鋼殻パネルには軸方向の引張ひずみが生じるとともに、試験体のそりによって、底鋼板の橋軸直角方向のひずみは小さくなった。橋軸方向では、コンクリートの膨張に伴い50~70 μ の引張ひずみが生じた。

鉄筋および底鋼板のひずみは、いずれの解析結果においても、打ち込み後8時間までに急激に増加した。これは、コンクリートと鉄筋および鋼殻パネルとの付着状態を考慮していないためと考えられる。打ち込み3日以後のひずみの変化は、ケース3-Bの解析結果が最も計測結果と一致しており、鉄筋および鋼殻パネルのヤング率が変化しないことを考えると、ケース3-Bの結果は計測結果に一致したと考えられる。

以上より、ステップ①および②までの膨張コンクリートの線膨張係数を20 μ/C とし、打ち込み後3時間までの膨張ひずみを無視することによって、単純版試験体のひずみ履歴を再現できた。

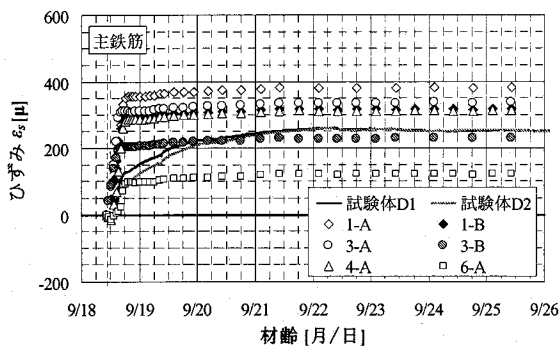


(a)橋軸直角方向

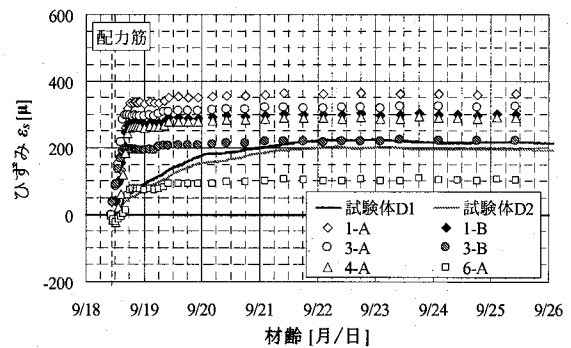


(b)橋軸方向

図-12 コンクリートの実ひずみの変化

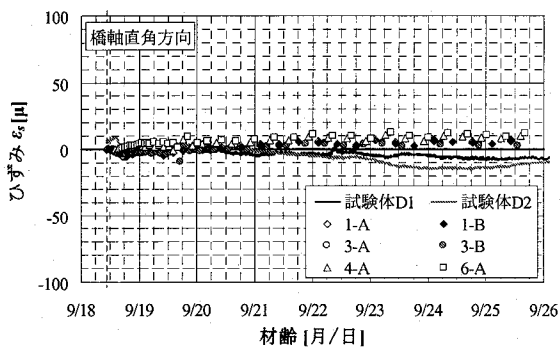


(a)主鉄筋

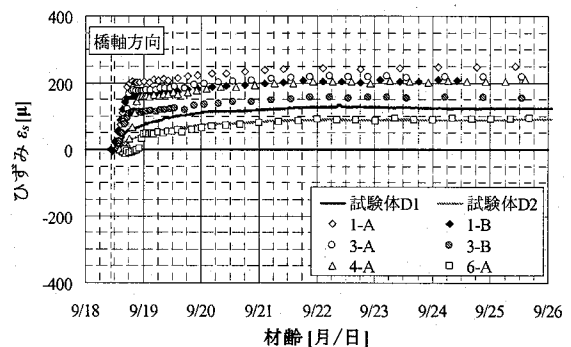


(b)配力筋

図-13 鉄筋ひずみの変化



(a)橋軸直角方向



(b)橋軸方向

図-14 底鋼板ひずみの変化

3. 4 ケミカルプレストレス量と分布状態

単純版試験体の温度およびひずみの履歴を再現したケース 3-B の結果より、コンクリートの橋軸直角方向および橋軸方向のケミカルプレストレスを算出した。着目位置は単純版試験体の中央とし、図-15 に示すように球平形鋼のフラット側の断面 I、球頭部側の断面 II、および球平形鋼より 150mm 離れた断面 III とした。

図-16 に橋軸直角方向および橋軸方向それぞれのケミカルプレストレスの床版厚さ方向における分布を示す。橋軸直角方向のケミカルプレストレスでは、ほぼ一定の傾きが生じ、底鋼板側では 2.4~2.2MPa の圧縮応力度、コンクリート上面側では 0.7MPa の圧縮応力度、球平形鋼の頂部近傍では 1.5~1.2MPa の圧縮応力度となった。

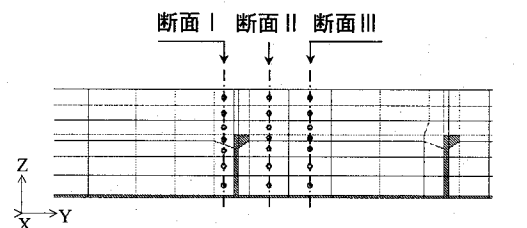
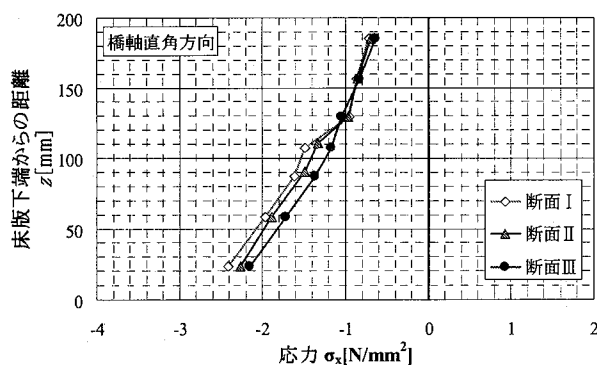


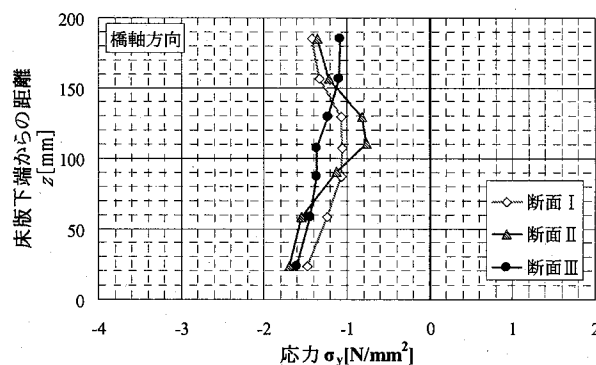
図-15 導入応力の着目断面

コンクリートの膨張に伴い、試験体が橋軸回りのそり変形が生じた結果、単純版試験体のコンクリートには、軸方向の拘束と曲げ変形によりケミカルプレストレスに勾配が生じた。

一方、橋軸方向においては、底鋼板側で約 1.6MPa、コンクリート上面側で 1.4~1.1MPa の圧縮応力度となっ



(a)橋軸直角方向



(b)橋軸方向

図-16 ケミカルプレストレス算定結果

表-6 単純版試験体の鋼材およびコンクリート断面における応力

断面	部材	断面積 A_i [mm ² /m]	応力度 σ_{si} [MPa]	軸力			比 N_s/N_c
				鋼材		コンクリート	
				N_{si} [kN/m]	N_s [kN/m]	N_c [kN/m]	
主鉄筋断面	主鉄筋 D22@250mm	1520.5	50.6	76.9	247.2	-267.9	0.923
	底鋼板 +球平形鋼	9366	4.2 (底鋼板下面)	170.3			
配力筋断面	配力筋 D16@250mm	794.4	43	34.2	145	-157.9	0.918
	底鋼板(6mm)	6000	18	108.8			

た。しかし、球平形鋼の頂部近傍のコンクリートにおいては、-1.0MPa程度まで小さくなった。配力筋断面については、曲げ変形が小さく、配力筋と底鋼板の断面積の比に応じた拘束がコンクリートに作用し、若干の勾配を生じる結果となった。

表-6に単純版試験体の鋼断面およびコンクリート断面に生じた直交2方向断面の軸力を示す。鋼断面の軸力は、ひずみの計測結果より、鋼殻パネルおよび鉄筋の中立軸とコンクリート厚の1/2高さとの距離を考慮して算出した。コンクリート断面の軸力は、図-16に示すケミカルプレストレスの分布形状より単位幅あたりの軸力として算出した。橋軸方向のケミカルプレストレスによるコンクリートの軸力には、断面Ⅲにおける結果を用いた。鋼断面とコンクリート断面の軸力の差は、橋軸直角方向(主鉄筋断面)、橋軸方向(配力筋断面)とも約8%と小さい。従って、非線形温度応力解析のケース3-Bの結果より得られたケミカルプレストレスは、単純版試験体の応力状態を再現した結果と考えられる。

4. 輪荷重走行試験結果

4.1 たわみおよびひずみの推移

輪荷重走行試験では、最大荷重392kNの繰り返し走行においても破壊の兆候が全くなかったため、52万回まで繰り返し走行を継続した後、試験を終了した。

単純版試験体の中央におけるたわみの推移を図-17、主鉄筋および配力筋のひずみの推移を図-18、底鋼板ひずみ

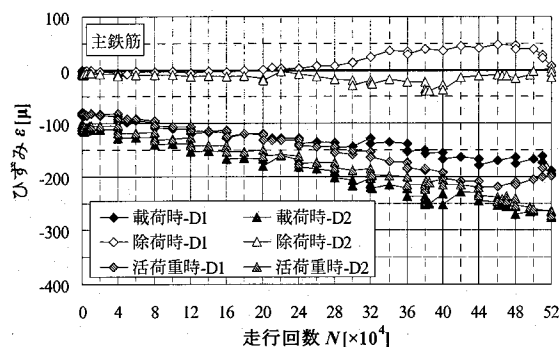
の推移を図-19に示す。図の凡例において、載荷時は荷重載荷状態の計測値を示し、除荷時は荷重を0とした状態の計測値で、たわみおよびひずみの残留成分を示す。また、活荷重時の値は、載荷時と除荷時の計測値の差を示す。各試験体のたわみおよびひずみの推移において、増減の傾向に変化が現れた走行回数を以下にまとめる。

試験体D1において、たわみは走行24万回より載荷時および除荷時の増分が大きくなった。主鉄筋においては、走行20万回より除荷時ひずみが引張側に発生し始め、32万回から除荷時ひずみの増分は小さくなった。その後、44万回よりひずみが小さくなる傾向を示した。配力筋においては、走行6万回で載荷時および除荷時ひずみが小さくなった。走行20万回で活荷重ひずみに減少の傾向が見られ、その後、32万回、36万回、48万回および51万回では、圧縮側のひずみが急激に小さくなった。底鋼板の橋軸直角方向のひずみは、走行20万回および51万回で載荷時および除荷時ひずみの傾向に変化が生じ、38万回で活荷重時の引張ひずみの増分が小さくなった。橋軸方向のひずみは試験全体を通じて、ひずみは小さい。走行回数8万回、30万回および51万回に傾向が変化した。

試験体D2においては、たわみは28万回で載荷時および除荷時の増分に若干の変化が現れた。主鉄筋においては、20万回、32万回および38万回で載荷時ひずみが小さくなる傾向が現れた。配力筋においても走行20万回、32万回および38万回でひずみが急激に小さくなった。底鋼板の橋軸直角方向のひずみは、22万回より除荷時ひずみが増加し始めた。その後、38万回で載荷時および除

荷時ひずみが小さくなり、その前後で増分が変化した。橋軸方向のひずみは、配力鉄筋のひずみと同様、走行回数 20 万回、30 万回、38 万回でひずみの変化が見られた。

単純版試験体のたわみおよびひずみの推移において、傾向が変化した走行回数をまとめると、試験体 D1 では、8 万回、20 万回、30 万回、38 万回および 51 万回の前後で傾向の変化が現れた。走行 8 万回においては底鋼板とコンクリートのはくりが試験体中央の広い範囲に進展した結果であると考えられる。試験体 D2 では、走行 20 万回、32 万回、38 万回の前後で傾向に変化が現れた。これらの走行回数において、単純版試験体のコンクリートには床版の剛性低下と応力の再分配に繋がるひび割れが発生したと考えられる。



(a)主鉄筋ひずみ

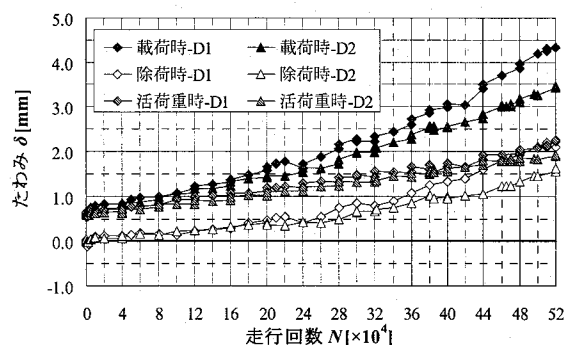
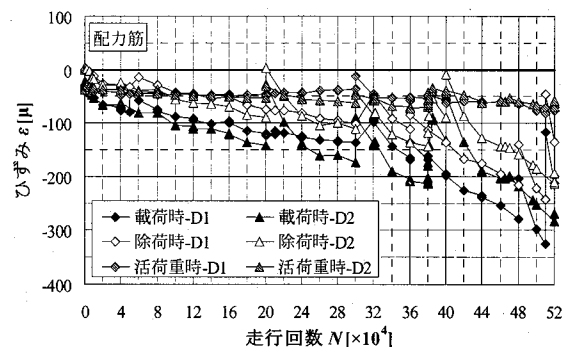
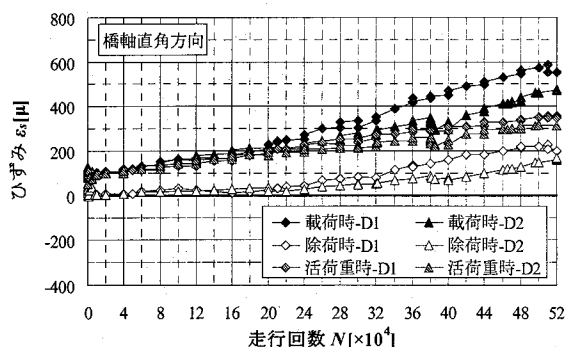


図-17 走行回数とたわみの関係

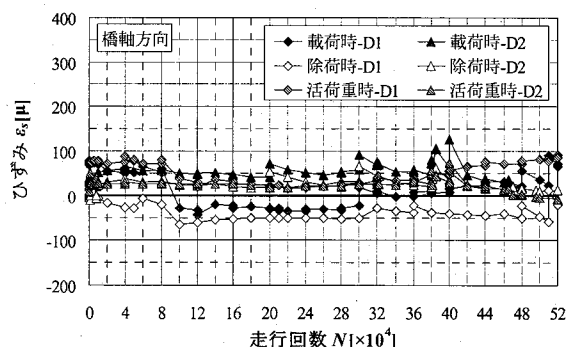


(b)配力筋ひずみ

図-18 走行回数と鉄筋ひずみの関係

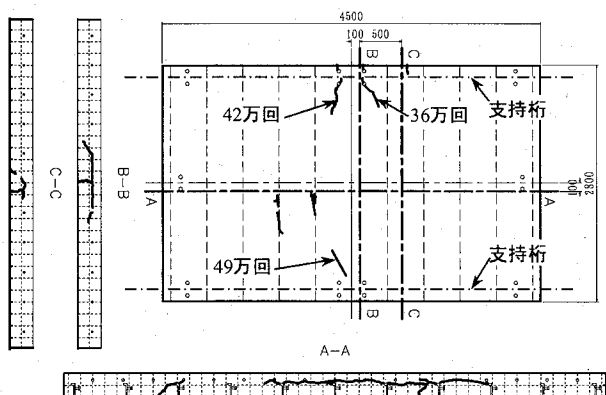


(a)橋軸直角方向



(b)橋軸方向

図-19 走行回数と底鋼板ひずみの関係



(a)試験体 D1

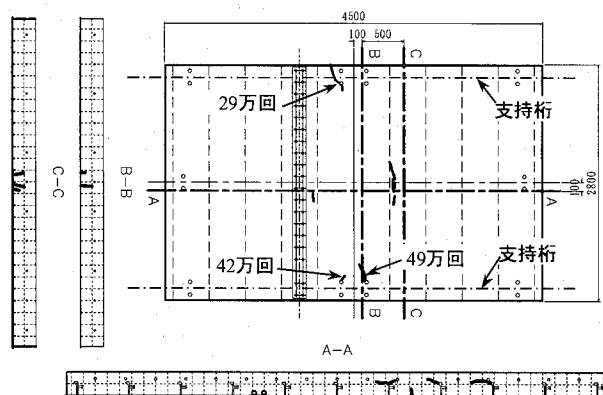


図-20 試験体コンクリートのひび割れ

4. 2 ひび割れの進展

図-20 に試験終了後の試験体ひび割れ状況を示す。図中、A-A、B-B および C-C は切断面を示す。

試験体上面では、支分部より橋軸直角方向のひび割れが発生した。ひび割れが発生した走行回数は、試験体 D1 で 36 万回、42 万回および 46 万回、試験体 D2 では 29 万回、42 万回および 49 万回であった。このひび割れは、鉛直荷重の荷重によって作用する橋軸直角方向のせん断力が、荷重が移動に伴い交番し、その繰り返し作用によって生じた疲労ひび割れであると考えられる。

切断面では図-21 に示すように、球平形鋼の頂部と鉄筋の高さで水平面状のひび割れが発生した。ひび割れは橋軸方向の荷重範囲の端部まで進展しており、橋軸直角方向には床版中央で 500mm、橋軸方向に 500mm 離れた C-C 断面では 150mm の長さ達した。

水平面状ひび割れの橋軸直角方向の端部から、コンクリート下面にほぼ 45° の角度の方向に斜めひび割れが進展しており、押し抜きせん断破壊に至るひび割れと考えられる(図-20(a)、B-B 断面参照)。

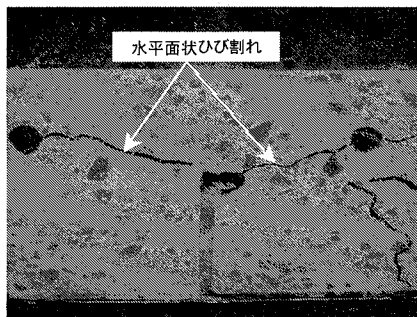


図-21 A-A 断面のひび割れ状況(試験体 D1)

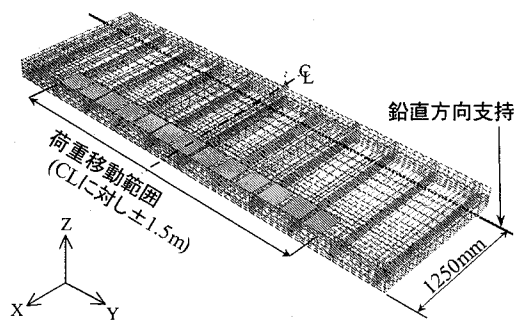


図-22 3次元 FEM 解析モデル

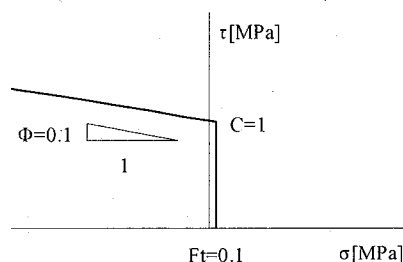


図-23 境界要素の破壊規準

5. ひび割れ発生の評価

5. 1 累積損傷度を用いたひび割れの評価

コンクリートにひび割れが発生する走行回数としては、着目するコンクリート要素において式(2)に示す累積損傷度 D_d が 1.0 に達した繰り返し荷重回数とした。式(2)中の等価繰り返し荷重回数 N_{eq} は、式(3)に示す線形被害則より求めた。分母 N_0 は基本荷重 $P_0=157\text{kN}$ において累積損傷度 D_d が 1.0 に達する繰り返し荷重回数とし、Comelissen らにより提案されたコンクリートの S-N 関係式(4)より求めた¹⁰⁾。式中の右辺第 4 項は信頼係数 90% の信頼区間を考慮するための定数項である。

輪荷重走行試験の結果から、鉄筋コンクリート床版(以下、RC 床版)および鋼・コンクリート合成床版とも、コンクリートのひび割れによって床版の損傷度が支配されることが考えられる。従って、本検討では式(3)右辺の m の値には、式(5)示す松井により提案された RC 床版の S-N 関係式(6)における係数の逆数を適用した¹¹⁾。

$$D_d = \frac{N_{eq}}{N_0} \quad (2)$$

$$N_{eq} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{P_i}{P_0} \right)^m \cdot N_i \quad (3)$$

$$\log N_0 = 9.46 - 7.71 \cdot \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{ct}} - 3.37 \cdot \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_c} \pm 1.45 \quad (4)$$

$$m = \frac{1}{0.07835} = 12.763 \quad (5)$$

$$\log \left(\frac{P_i}{P_{sx}} \right) = -0.07835 \cdot \log N + \log(1.520) \quad (6)$$

ここに、

D_d : 累積損傷度

P_0 : 基本荷重(157kN) [kN]

P_i : 荷重荷重 [kN]

P_{sx} : 押し抜きせん断耐力 [kN]

N_{eq} : 基本荷重 P_0 に換算した等価繰り返し荷重回数

N_0 : 基本荷重 P_0 において損傷度 D_d が 1.0 に達する繰り返し荷重回数

N_i : 荷重荷重 P_i の繰り返し荷重回数

$\sigma_{\max}$: 基本荷重 P_0 における引張最大応力 [MPa]

σ_{ct} : 静的引張強度 [MPa]

$\sigma_{\min}$: 基本荷重 P_0 における圧縮最大応力 [MPa]

σ_c : 静的圧縮強度 [MPa]

5. 2 非線形有限要素解析

図-22 に単純版試験体の 3 次元 FEM 解析モデルを示す。支間 2.5m の単純支持とし、対称条件により 1/2 モデルとした。コンクリート、底鋼板および球平形鋼は 8 節点ソリッド要素を用い、鉄筋はトラス要素によりモデル化し

た。鋼殻パネルの表面とコンクリートとの接触面には境界要素を挿入し、はくり状態を考慮した。図-23に境界要素の破壊基準を示す。境界要素にはクーロンの摩擦則を適用し、要素面に対し法線方向の引張力が作用した場合、せん断力を伝達しないCutoff基準を用いた。荷重の載荷範囲は、試験体中央から±1.5mとし、載荷面積は橋軸方向200mm×橋軸直角方向250mmとした。なお、本解析は、コンクリート構造物専用の解析コード「ATENA」を用いた。

ケミカルプレストレスを考慮するため、コンクリート要素に体積膨張ひずみを与えた。図-24に3次元FEMモデルの体積膨張ひずみによる初期応力の分布を示す。図中の断面Ⅰ、ⅡおよびⅢの位置は図-15と同じである。床版断面の応力状態を非線形温度応力解析の結果に一致させるには、コンクリートの強度およびヤング係数の発現やクリープの影響、温度履歴等を考慮する必要がある。ただし、後述する水平面状ひび割れの発生する走行回数の評価においては、このひび割れが配筋断面に作用する曲げモーメントおよびせん断力に起因する局所的な応力の繰返しによる疲労ひび割れであり、橋軸方向応力の影響が大きいと考えられる。また、橋軸方向ひび割れの発生する走行回数の評価においては、試験体端部に近い場合、コンクリートに導入される橋軸直角方向のケミカルプレストレスは非常に小さい。従って、本検討では、橋軸方向の応力状態を再現することとした。

5.3 橋軸直角方向ひび割れの発生の評価

単純版試験体における支点部コンクリート上面の主応力の変動を図-25に示す。試験体中央から橋軸方向に±1.4mの位置に荷重を載荷した場合に、主応力が最大となった。荷重載荷位置の変化により、この主方向は橋軸直角方向軸(X軸)に対してほぼ±45°の角度で変動し、輪荷重の繰返し走行によって、主応力の方向が変化するため、ひび割れが橋軸直角方向に進展した。

表-8に橋軸直角方向のひび割れが発生する走行回数の算定結果を示す。信頼区間を考慮しない場合、290,925回、信頼区間を考慮した場合、上限値は441,700回、下限値は164,600となった。試験体D1,D2におけるひび割れの発生した走行回数は、算定結果の範囲のほぼ中央の値となった。

繰返し走行荷重により、鋼・コンクリート合成床版にひび割れが発生する走行回数は、5.1に示した算定法を用い、コンクリートのS-N関係において信頼区間を考慮することで、おおよその推定が可能であると言える。

5.4 水平面状ひび割れの発生の評価

図-26に示す球平形鋼の頂部近傍におけるコンクリートの主応力に着目し、水平面状のひび割れの評価を行った。主応力の算定には、図-27に示す2次元FEM解析を用いた。解析モデルは、単純版試験体の配筋断面に作

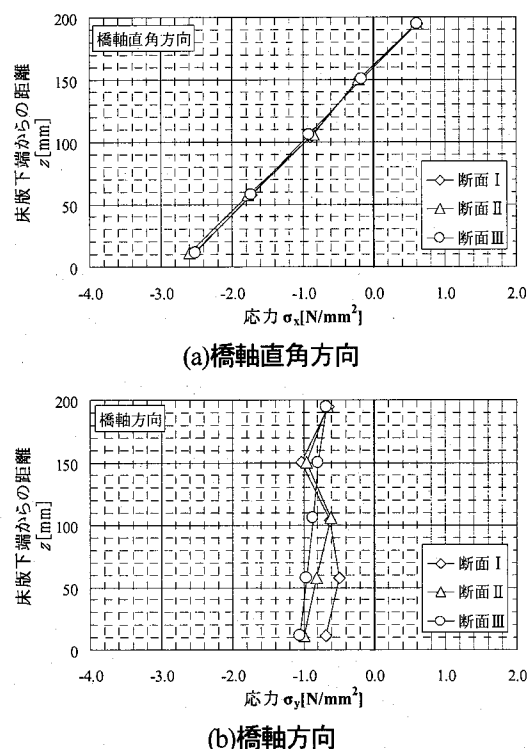


図-24 体積膨張ひずみによる初期応力

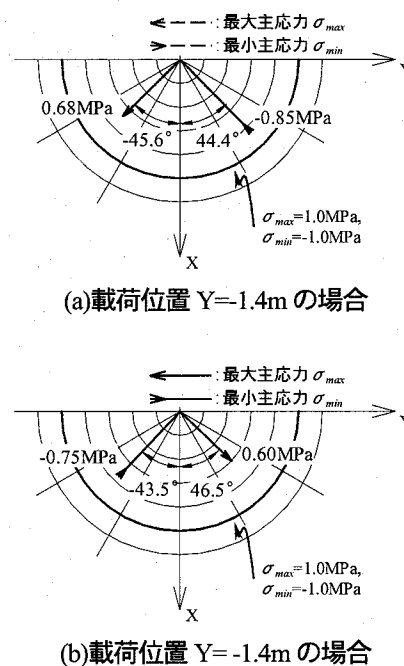


図-25 支点部コンクリートの主応力

表-8 橋軸直角ひび割れの発生する繰返し回数

基準荷重 P	157kN
最大主応力 σ_{max}	0.68MPa
引張強度 σ_{ct}	3.2MPa
最小主応力 σ_{min}	-0.8MPa
圧縮強度 σ_c	33.0MPa
等価繰返し回数 N_{eq}	113,868,553回
繰返し回数 N	290,925回

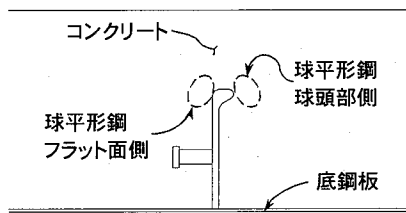


図-26 水平面状ひび割れの着目位置

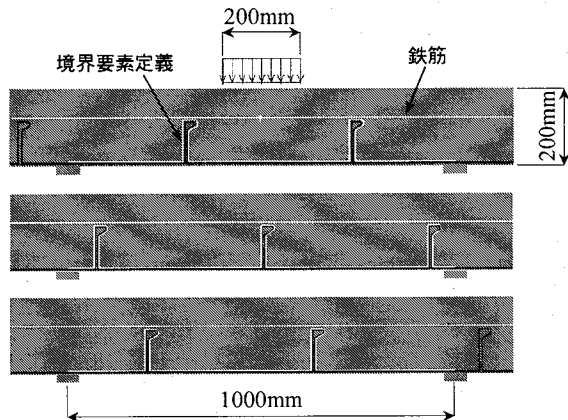


図-27 2次元FEMモデル

用する曲げモーメントおよびせん断力の分布形状が、単純版試験体を対象とした板解析の結果と一致するよう、支間1.0m、載荷幅200mmとした(図-28参照)。載荷輪荷重の移動による主応力の変動を考慮するため、支点位置に対し球平形鋼の位置を順次変化させた。球平形鋼の頂部近傍におけるコンクリートの最大主応力について、2次元FEM解析の結果は、3次元FEM解析の結果にほぼ一致しており、応力の算定における解析モデルの影響がないことを確認した(図-29参照)。

コンクリートの主応力の結果を図-30に示す。載荷荷重は157kNである。主応力は荷重の移動に伴い、鉛直軸(Z軸)に対し $\pm 35^\circ$ の角度で変動した。表-7に水平面状ひび割れが発生する走行回数の算定結果を示す。フラット面側で343,300回、球頭部側で335,600回であり、信頼区間を考慮した場合、フラット面側の載荷回数の上限値が504,700回、下限値が197,100回、球頭部側では上限値が502,700回、下限値が195,500回となった。

5.2で示した3次元FEM解析において、試験体中央部に発生した水平面状ひび割れについて境界要素を用いてモデル化し、得られたたわみおよび底鋼板ひずみの解析結果と、各走行回数において計測した結果の比較を行った。図-31にたわみ形状、図-32に底鋼板ひずみの分布を示す。比較の結果、試験体D1およびD2のそれぞれ走行18万回および走行34万回の計測値と解析値がほぼ一致した。

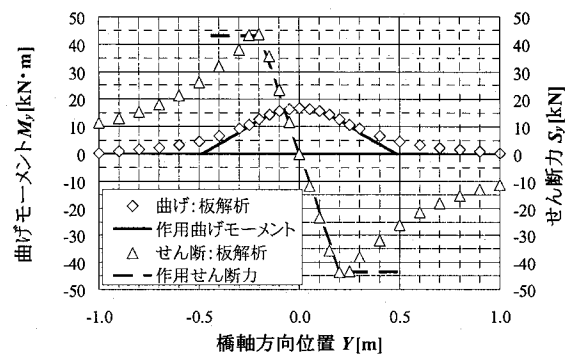
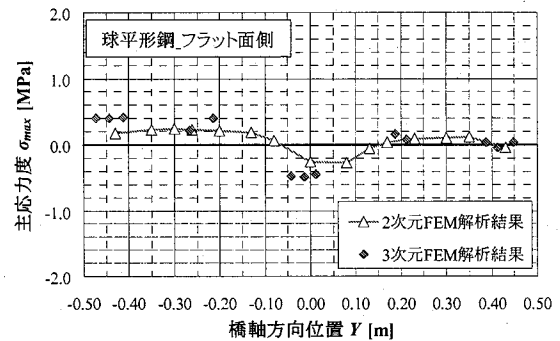
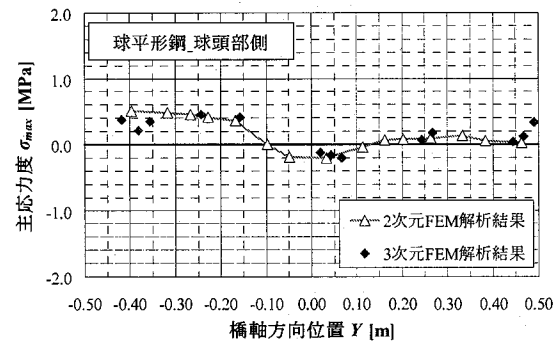


図-28 試験体の曲げモーメントとせん断力分布

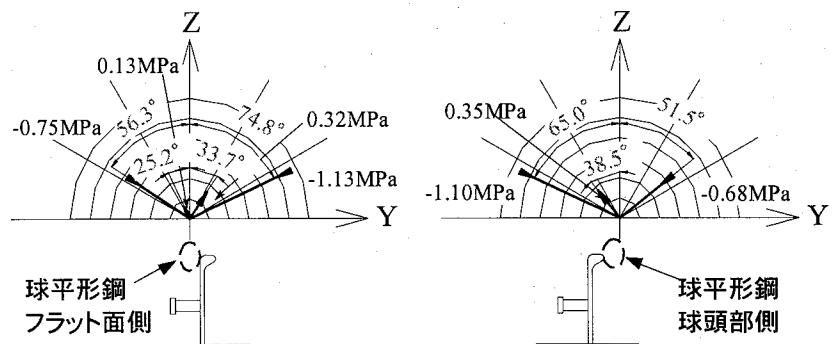


(a)球平形鋼のフラット面側



(b)球平形鋼の球頭部側

図-29 コンクリート主応力



(a)球平形鋼_フラット面側

(b)球平形鋼_球頭部側

フラット面側載荷時

← : 最大主応力 σ_{max}
→ : 最小主応力 σ_{min}

球頭部側載荷時

← : 最大主応力 σ_{max}
→ : 最小主応力 σ_{min}

図-30 球平形鋼の頂部近傍におけるコンクリート主応力変動

表-7 水平面状ひび割れの発生の評価結果

	フラット面側	球頭部側
基準荷重 P	157kN	157kN
最大主応力 σ_{max}	0.32MPa	0.35MPa
引張強度 σ_{ct}	3.2MPa	3.2MPa
最小主応力 σ_{min}	-1.1MPa	-1.1MPa
圧縮強度 σ_c	33.0MPa	33.0MPa
等価繰り返し回数 N_{eq}	364,807,100回	311,280,600回
繰り返し回数 N	343,300回	335,600回

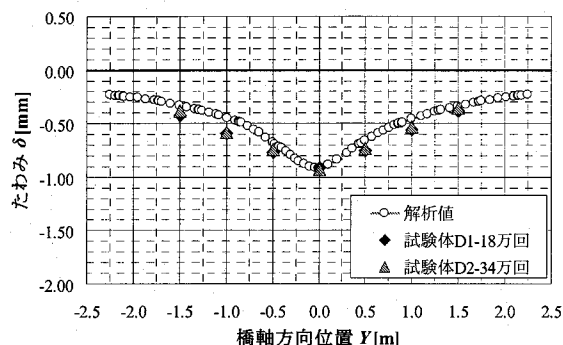


図-31 たわみ形状の比較

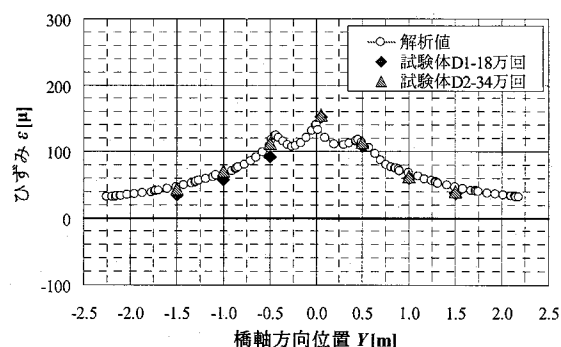
6. まとめ

本研究で得た知見を以下に示す。

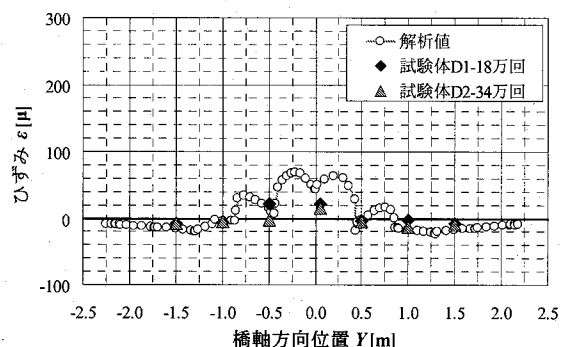
- (1) 無拘束状態における膨張コンクリートの実ひずみと温度の関係より、打ち込みから3日までの若材齢における膨張コンクリートの有効膨張ひずみを決定した。
- (2) 有効膨張ひずみを用いた温度応力解析により、単純版試験体のひずみの履歴を再現した。
- (3) 膨張材により単純版試験体のコンクリートには、橋軸直角方向では-2.4~-0.7MPa、橋軸方向では-1.6~-1.0MPaのケミカルプレストレスが導入された。
- (4) コンクリートの一軸応力状態におけるS-N関係およびRC床版のS-N関係を適用した累積損傷度によるひび割れ発生の算定法を示した。
- (5) (4)の算定法に3次元FEM解析で得られた単純版試験体の主応力および応力変動を適用した結果、コンクリート上面に生じた橋軸直角方向ひび割れが発生した走行回数にほぼ一致する結果が得られた。
- (6) (4)の算定法に2次元FEM解析より得られた球平形鋼の頂部近傍におけるコンクリートの主応力および応力変動を適用した結果、単純版試験体のたわみおよびひずみの傾向が変化した走行回数と算定結果がおおよそ一致する結果が得られた。

参考文献

- 1) 杉原, 北村, 岩田, 松井: 球平形鋼合成床版の疲労耐久性に関する実験的研究, 第4回道路橋床版シンポジウム講演論文集, pp.217-222, 2004.11.
- 2) 杉原, 大西, 松井: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.2, pp.679-684, 2003.7.



(a) 橋軸直角方向ひずみ



(b) 橋軸方向ひずみ

図-32 底鋼板ひずみの比較

- 3) Abheetha PEIRIS: Improvement of Fatigue Durability of RC Slabs by Expansive Agents, Proceedings of the Japan Concrete Institute, Vol.27, No.2, pp.505-510, 2005
- 4) 国土交通省土木研究所: 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5)ー評価編ー, 2001.3.
- 5) 原田: 温度依存性を有するセメントの水和発熱過程と熱伝導との連成を考慮した非線形温度解析, 土木学会論文集, 第426号/V-14, pp.167-176, 1991.2.
- 6) 土木学会: コンクリート標準示方書[施工編]ー耐久性照査型ー, pp.34-35, 1999.
- 7) 土木学会: 道路橋床版の設計の合理化と耐久性の向上, pp.165-166, 2004.11.
- 8) 浅井, 高橋, 新山, 伊藤: 鋼管の背面拘束を受けるRC壁の膨張コンクリートを用いた温度ひび割れ抑制に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.1, pp.1411-1416, 1997.
- 9) 国森, 島崎, 六郷, 森本: 若材齢コンクリートの熱膨張係数に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.2, pp.1033-1038, 2000.
- 10) H. Cornelissen and H. Reinhardt: Fatigue of Plain Concrete in Uniaxial Tension and in Alternating Tension-Compression Loading, IABSE Colloquium Lausanne, pp. 273-282, 1982..
- 11) 松井: 橋梁の寿命予測, 安全工学, Vol.30, No.6, pp.432-440, 1991.

(2005年9月10日受付)