

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

Chemical Pre-stress by Expansive Additive of Steel-Concrete Composite Deck

杉原伸泰*, 松下裕明**, 木村政敏***, 生田目尚美****, 松井繁之*****

Nobuyasu SUGIHARA, Hiroaki MATSUSHITA, Masatoshi KIMURA, Naomi NAMATAME
and Shigeyuki MATSUI

- * 博(工) 日立造船鉄構(株) 鉄構設計部 (〒590-8331 大阪府堺市築港新町1丁5番1)
- ** 工修 日立造船鉄構(株) 鉄構設計部 (〒590-8331 大阪府堺市築港新町1丁5番1)
- *** (株)ニチゾウテック 技術コンサルティング事業本部(〒551-0023 大阪市大正区鶴町2-15-26)
- **** 工修 (株)ニチゾウテック 技術コンサルティング事業本部(〒551-0023 大阪市大正区鶴町2-15-26)
- ***** 工博 大阪大学大学院 工学研究科土木工学専攻 教授 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

Expansive additive is used for steel-concrete composite decks to prevent the initial crack. Furthermore, chemical pre-stress by expansive additive consequently overdue fatigue damage and improve fatigue durability of decks. On fatigue durability of steel-concrete composite decks, experimental and analytical verification has been advanced. However, there is little research on chemical pre-stress for steel-concrete composite decks and on improvement of fatigue durability. In this research, based on the long-term measurement used three type of specimen, nonlinear thermal stress analysis was carried out and the state of chemical pre-stress was clarified. In steel-concrete composite deck and composite girder, chemical pre-stress of -2.0 to -0.5 MPa was introduced into the deck concrete.

Key words: chemical pre-stress, composite deck, expansive additive, nonlinear thermal stress analysis

1. はじめに

鋼・コンクリート合成床版の疲労耐久性の評価において、疲労損傷の発生寿命を精度よく推定する方法が求められる。その方法のひとつとして、繰り返し走行荷重による疲労損傷機構解明が挙げられ、これまでに数多くの輪荷重走行試験が実施されている。その結果から、図-1に示すような鋼殻パネルを有する鋼・コンクリート合成床版は、高い疲労耐久性を有していることが確認されている。

鋼・コンクリート合成床版が保有する高い疲労耐久性は、(1)鋼殻パネルが荷重分散に寄与し、押し抜きせん断破壊に対して高い抵抗強度を有する、(2)鋼殻パネルとコンクリートが合成されることによりコンクリートの発生応力が低減され、コンクリートの疲労によるひび割れが抑制される、(3)鋼殻パネルの発生応力度が小さい、(4)膨張材の使用によりコンクリートにケミカルプレストレスが導入され、コンクリートの引張応力が低減される、等がその要因として考えられる¹⁾。このうち、(1)~(3)に関しては、押し抜きせん断破壊に至った鋼・コンクリート合成床版に対する輪荷重走行試験の結果や、各部材の損傷程度を考慮した疲労損傷発生寿命の検討が進められる中で解明されつつある。しかし、(4)ケミカルプレストレスの導入量や応力性状が与え

る影響に関する研究は少なく、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の疲労耐久性に与える有効性は解明されていない。膨張材により床版コンクリートに導入されるケミカルプレストレスは、床版の疲労耐久性を著しく向上させることが考えられ、鋼・コンクリート合成床版の疲労損傷発生寿命を推定するためには、ケミカルプレストレスによる応力状態の改善効果を精度よく評価する方法が求められる。

そこで本研究では、鋼・コンクリート合成床版における膨張材によるケミカルプレストレスの導入量とその分布状態を明らかにすることを目的とする。

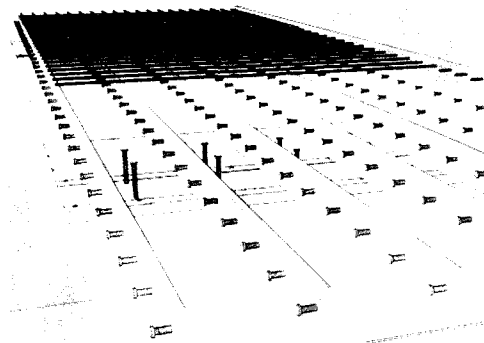


図-1 鋼・コンクリート合成床版の構造

2. 試験体および計測方法

試験体は、(a)単純版試験体、(b)合成桁試験体および(c)単純合成桁橋の3種類とした。全ての試験体の床版形式は、球平形鋼を有する鋼・コンクリート合成床版とした。図-2~4に各試験体の形状、表-1に各試験体の床版断面諸元を示す。球平形鋼は高さ180mm×ウェブ厚9.5mmの形鋼を用い、試験体床版の主鉄筋かぶり高が確保できる高さに切削加工して底鋼板に連続すみ肉溶接した。球平形鋼ウェブには、ずれ止めとして頭付きスタッドを溶植した。

コンクリートの配合を表-2に示す。コンクリートの設計基準強度は、単純版試験体および合成桁試験体で27N/mm²、単純合成桁橋で30N/mm²とした。各試験体とも膨張材を30kg/m³添加した。

試験体コンクリートの打ち込み時よりコンクリートおよび鋼材それぞれの温度およびひずみを計測した。また、試験体近傍の外気温も計測した。温度の計測には熱電対を使用し、コンクリートひずみには埋め込み型ひずみ計を用い、鋼材ひずみには単軸ゲージまたは2軸ゲージを用いた。表-3に各試験体の計測期間を示す。

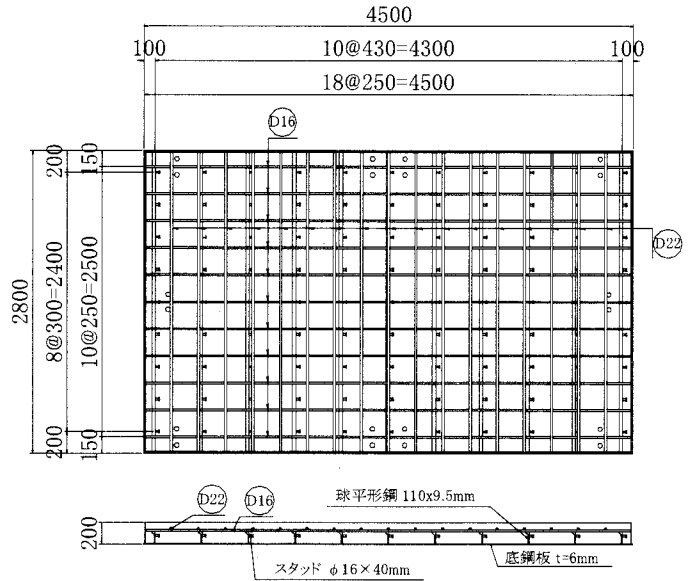


図-2 単純版試験体

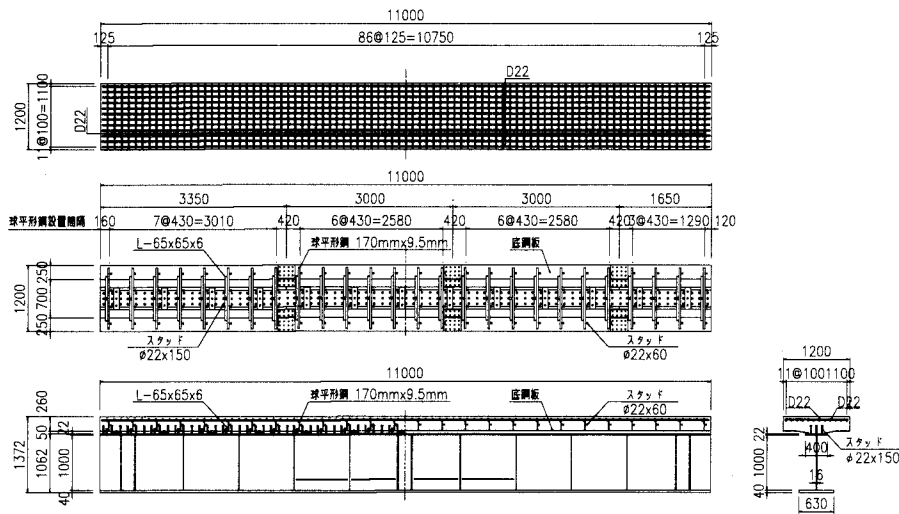


図-3 合成桁試験体

表-1 試験体床版の断面諸元

試験体	床版厚 t[mm]	底鋼板厚 ts[mm]	球平形鋼		鉄筋	
			断面 高さ・ウェブ厚 H[mm]・b[mm]	間隔 a[mm]	主鉄筋	配力筋
単純版試験体	200	6	100・9.5	430	D22@250	D16@250
合成桁試験体	260	6	180・9.5	430	D22@125	D22@100
単純合成桁橋	210 (280)	9	135・9.5	380 (400)	D19@100 (D25@100)	D16@200 (D16@100)

注:()内は端部を示す

表-2 コンクリート配合表

試験体	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
単純版試験体	53	44.1	175	300	30	764	988	3.50
合成桁試験体	53	44.2	175	310	30	768	988	3.50
単純合成桁橋	50	42.4	167	304	30	749	1041	1.05

3. 解析方法および解析条件

3. 1 非線形温度応力解析

非線形温度応力解析に用いた解析モデルを図-5(a)~(c)に示す。鋼部材およびコンクリートとも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。なお、本検討では、非線形温度応力解析プログラムASTEAMACS(計算力学研究センター)を使用した。

表-4に非線形温度応力解析で用いた材料特性を示す。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²⁾。終局断熱温度上昇量 Q_{∞} 、温度上昇速度に関する定数 γ および熱伝達率は、計測したコンクリート温度の履歴を再現するよう決定した。

コンクリートの圧縮強度、引張強度およびヤング係数の発現特性は、コンクリート標準示方書の算定式を適用し、材齢91日の圧縮強度に基づき決定した。また、打ち込みから材齢3日までの若材齢におけるクリープによるヤング係数の低減の影響も考慮することとした³⁾。

コンクリートの有効膨張ひずみは、式(1)で求められるコンクリートの実ひずみより、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算出できる。

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

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)[$\mu / ^\circ C$]
- T_i : 温度の計測値[$^\circ C$]
- T_0 : 温度の初期値[$^\circ C$]
- 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

表-3 計測期間

試験体	計測期間	設置位置
単純版試験体	36日 自)2003/9/18 至)2003/10/24	屋外(屋根設備有り)
合成桁試験体	39日 自)2004/5/20 至)2004/6/28	実験棟内
単純合成桁橋	159日 自)2005/2/23 至)2005/8/1	屋外

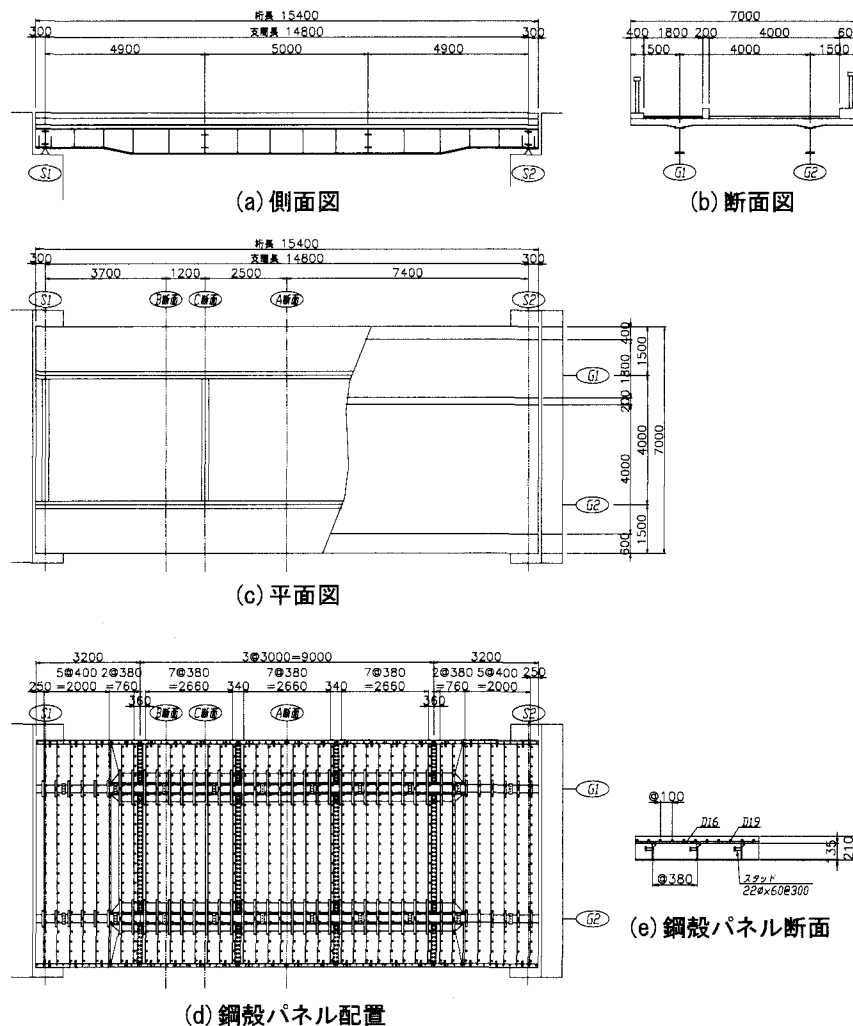


図-4 単純合成桁橋

表-4 解析条件

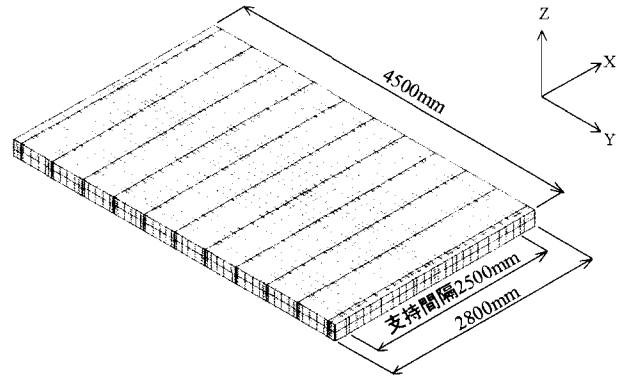
解析モデル		単純版試験体	合成桁試験体	単純合成桁橋		
モデル部分		全体	1/4対称	1/4対称		
コンクリート	種別	普通コンクリート(膨張材使用)				
	熱伝導率	W/m°C	2.7	2.7	2.7	
	密度	kg/m ³	2300	2300	2300	
	比熱	kJ/kg°C	1.3	1.3	1.1	
	断熱温度上昇特性	Q_{∞}	°C	33	36	60
		r	—	3.2	2.8	1.0
	ヤング係数	N/mm ²	JSCE標準示方書簡易式 $E=4700 \times \sigma_c^{0.5}$ N/mm ²			
	クリープによる低減		考慮する			
	圧縮強度	JSCE標準示方書実験式				
		a	—	4.5	4.5	4.5
		b	—	0.95	0.95	0.95
		f_{ck}	N/mm ²	35	35	35
	引張強度		JSCE標準示方書実験式			
	ポアソン比	—	0.167	0.169	0.169	
線膨張係数	$\mu/°C$	無拘束状態のコンクリートにおける実ひずみと温度の関係より決定				
温度(外気温)		計測温度を考慮				
乾燥収縮		膨張材の効果を含む				
鋼	熱伝導率	W/m°C	25			
	密度	kg/m ³	7850			
	比熱	kJ/kg°C	0.4			
	ヤング率	N/mm ²	2.1×10^5			
	ポアソン比	—	0.3			
	線膨張係数	$\mu/°C$	12			
熱伝達率	外気	W/m ² °C	10	10	10	
	鋼製型枠	W/m ² °C	10	10	10	
	木製型枠	W/m ² °C	—	8	—	

3. 2 コンクリート温度およびひずみ履歴の再現

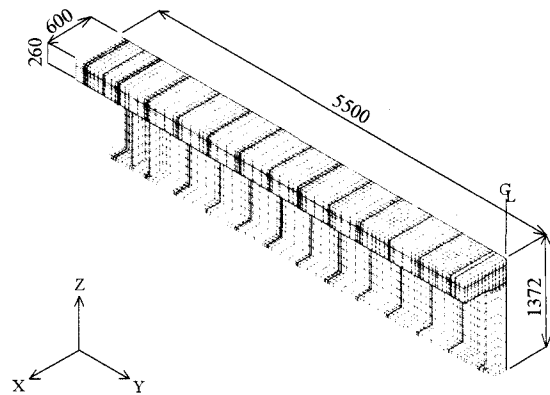
本解析では、コンクリートの線膨張係数として、材齢4時間までは $20 \mu/°C$ 、4時間以後については、実験から得られた無拘束状態における膨張コンクリートのひずみと温度の関係を用いて設定した^{4),5)}。また、ケミカルプレストレスを精度よく評価するためには、コンクリートと鋼材との間の付着強度が発現し、鋼材がコンクリートの膨張を拘束し始める材齢を有効な膨張ひずみの発現材齢と考える必要がある。そこで、コンクリートの有効膨張ひずみを、短期計測から得られたコンクリートおよび鋼材のひずみ履歴を再現した逆解析により決定した。

図-6に各試験体のコンクリート温度履歴を示す。各試験体ともコンクリートの反応性粉体量は、ほぼ同じとした。しかし、温度上昇量は単純版試験体および合成桁試験体で約 $18°C$ であるのに対し、単純合成桁橋の計測結果では $5°C$ 程度に留まった。冬季施工のため外気温が低いことに加え、風に曝されることでコンクリートの水和熱が試験体表面から急速に奪われたためである。最高温度到達材齢においても、外気温が高い単純版試験体が最も早く、冬季施工の単純合成桁橋が最も遅い結果であった。

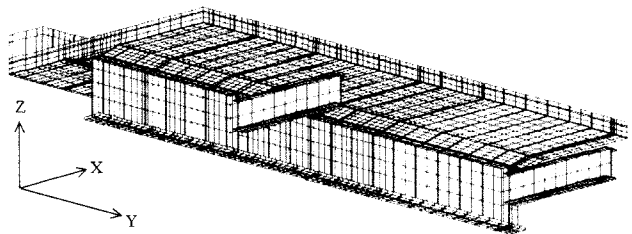
非線形温度解析により、各試験体のコンクリート温度の



(a) 単純版試験体



(b) 合成桁試験体



(c) 単純合成桁橋

図-5 3次元FEM解析モデル

推移をよく再現する結果が得られ、この温度履歴よりコンクリートの実ひずみ履歴の再現解析を行った。

図-7にコンクリートの実ひずみの推移を示す。コンクリートが最高温度に到達する材齢において、コンクリートの実ひずみは最大となり、その後の温度下降に伴い減少した。温度の履歴と同様、実ひずみの履歴においても解析結果と計測値はよく一致している。また、鋼材のひずみについても同ケースの解析結果と計測値がよく一致していることを確認している。

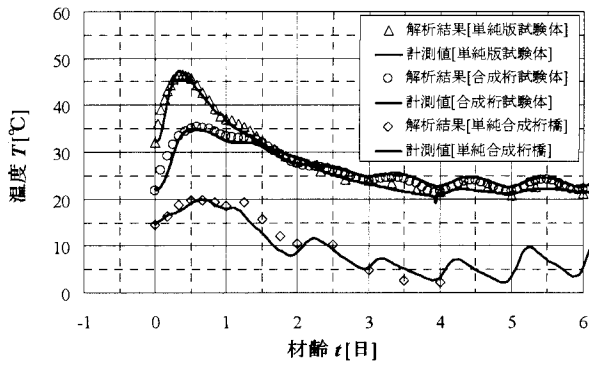
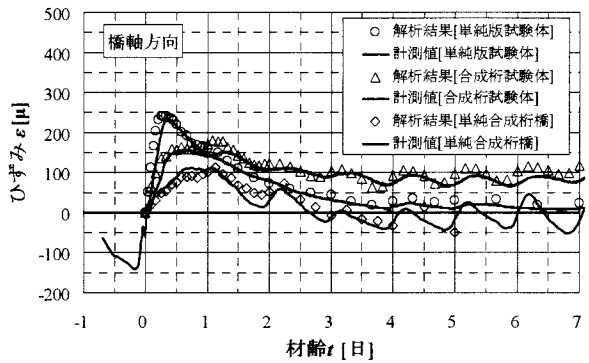
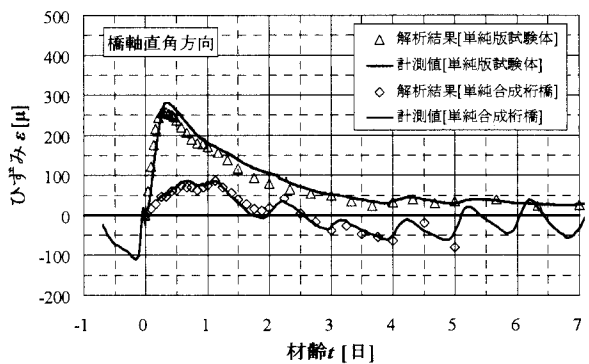


図-6 コンクリート温度の履歴



(a) 橋軸方向



(b) 橋軸直角方向

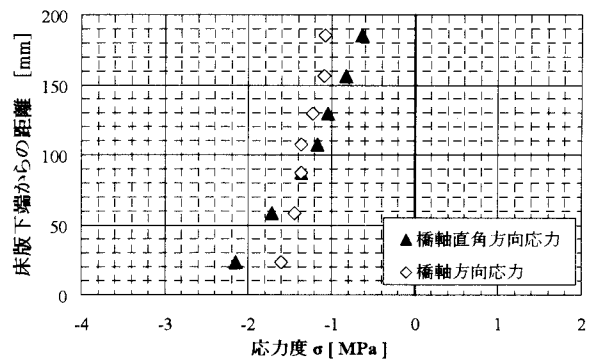
図-7 コンクリートひずみの履歴

4. 解析結果

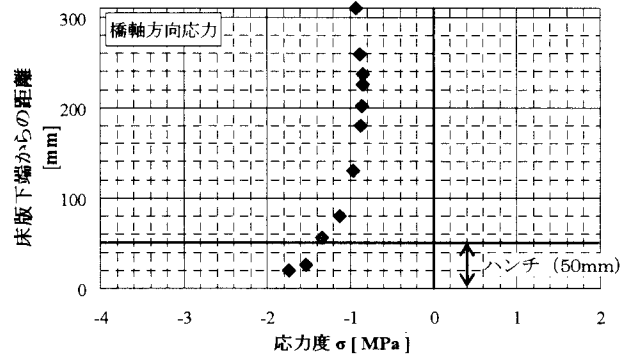
図-8 に各試験体のケミカルプレストレスの結果を示す。着目位置は単純版試験体および単純合成桁橋の床版中央とした。合成桁試験体では、配力筋断面のみ着目した。いずれの試験体においても底鋼板側で-2.0MPa程度の圧縮応力度、コンクリート上面側で-1.0~-0.5MPaの圧縮応力度であった。コンクリートの体積膨張を鋼殻パネルが拘束し、拘束体に近いコンクリート下面側で圧縮応力度が最大となった。なお、合成桁試験体においては、ハンチ部で最大の圧縮応力度が発生した。主桁、底鋼板および配力筋が拘束鋼材として作用したのに加え、ハンチプレートと球形鋼および上側鉄筋がより拘束効果を発揮したためと考え

られる。

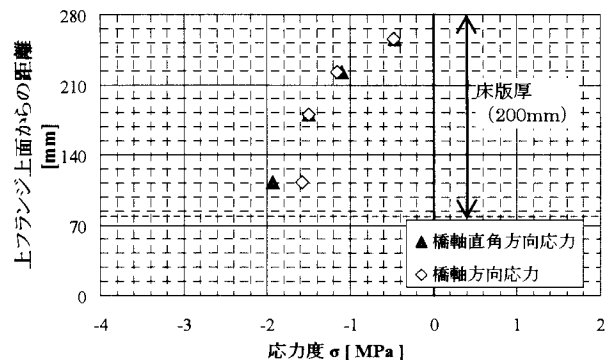
表-5~7 に鋼材のひずみから求めた鋼材の引張方向軸力と図-8 の応力分布から求めたコンクリートの圧縮方向軸力の比較を示す。コンクリートの圧縮方向軸力と鋼材に導入される引張方向軸力との釣り合い条件より、コンクリートに導入されるケミカルプレストレス量は、実験より計測した鋼材のひずみから求めることができる。単純版試験体および合成桁試験体において、コンクリートの圧縮方向軸力に対する鋼材の引張方向軸力の比は、約 8%の差に留まった。また、単純合成桁橋においては、10~15%の差に留まった。したがって、本解析より得られたケミカルプレストレスの状態は各試験体における応力状態を示していると判断できる。



(a) 単純版試験体



(b) 合成桁試験体



(c) 単純合成桁橋

図-8 ケミカルプレストレス状態 (解析値)

表-5 単純版試験体におけるケミカルプレス

断面	鋼材					コンクリート	比 N_s/N_c
	部材	単位幅あたりの 断面積 A [mm ²]	応力 σ_s [MPa]	軸力 N_s [kN/m]	総軸力 ΣN_s [kN/m]	軸力 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
	鋼殻パネル (底鋼板+球平形鋼)	9366.0	4.2 (底鋼板下面)	170.3			
配力筋断面	配力筋 D16@250mm	794.4	43.0	34.2	145.0	-157.9	0.918
	底鋼板	6000.0	18.0	108.8			

表-6 合成桁試験体におけるケミカルプレストレス(橋軸方向のみ)

断面	鋼材					コンクリート	比 N_s/N_c
	部材	断面積 A[mm ²]	応力 σ_s [MPa]	軸力 N_s [kN]	総軸力 ΣN_s [kN]	軸力 N_c [kN]	
床版	鉄筋 D22@100mm	4645	19.7	91.5	357	346.9	1.029
	底鋼板	5436	14.1	76.6			
主桁	U-Flg 400×22mm	8800	6.2	188.9	357	346.9	1.029
	Web 1000×16mm	16000	2.7 (ウェブ高中央)				
	L-Flg 630×40mm	25200	2.1				

表-7 単純合成桁橋におけるケミカルプレストレス

断面	鋼材					コンクリート	比 N_s/N_c
	部材	単位幅あたりの 断面積 A [mm ²]	応力 σ_s [MPa]	軸力 N_s [kN/m]	総軸力 ΣN_s [kN/m]	軸力 N_c [kN/m]	
主鉄筋断面	主鉄筋 D19@100mm	2865.0	13.2	37.8	246.6	-272.9	0.904
	鋼殻パネル (底鋼板+球平形鋼)	13434.0	-10.8 (底鋼板下面)	208.8			
配力筋断面	配力筋 D16@200mm	993.0	14.0	14.7	211.7	-248.5	0.852
	底鋼板	9000.0	14.8	126.0			
	主桁 U-Flg 320×15mm	4800.0	3.6	17.3			
	主桁 Web 745×10mm	7450.0	1.2	8.9			
	主桁 L-Flg 280×40mm	11200.0	4.0	44.8			

5. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- ① 膨張コンクリートを使用することにより、鋼・コンクリート合成床版には、コンクリート部にケミカルプレストレスが残留する。
- ② 無拘束状態における膨張コンクリートの自由膨張ひずみと温度の関係より、若材齢における膨張コンクリートの線膨張係数を決定し、さらにコンクリートと鋼材との付着強度発現以後を有効とする有効膨張ひずみの発現特性を示した。
- ③ 試験体コンクリートのケミカルプレストレスは、コンクリート上面で-0.5MPa、底鋼板側で-2.0MPa程度となる。
- ④ 合成桁のハンチ部は主桁、鋼殻パネルおよび鉄筋による拘束作用が大きくなる。

【参考文献】

- 1) 杉原他：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，pp.217-222，2004.11.
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書[施工編]，pp.52-53，2002.3.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 国森他：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.