

論文 モノレール合成鋼軌道桁の RC 床版のひびわれ制御に関する研究

数藤 久幸*¹・岩田 節雄*²・西村 剛*³・森田 浩隆*⁴

要旨: 跨座型モノレール軌道桁の構造形式のうち、鋼軌道桁の上部のタイヤ走行部分を RC 床版として構造的に鋼桁とをスタッドジベルで一体化させた合成鋼軌道桁がある。この合成鋼軌道桁の RC 床版は、従来の道路橋 RC 床版と比較して鋼桁の断面が大きいため、温度差応力に対するひびわれが懸念されている。このため、ひびわれの抑制を行うために、コンクリート材料と配筋方法の検討を行った。この結果、早強・膨張コンクリートを使用する場合、温度差応力に対するひびわれ抑制に有効な RC 床版を設計することが可能となった。これを実験及び FEM 解析によって検証を行った結果を報告する。

キーワード: 合成鋼軌道桁, 熱応力, 乾燥収縮, 膨張コンクリート

1. はじめに

大阪モノレールは、大阪空港から門真市、そして万博公園から阪大病院前の区間に敷設され、現在、国際文化公園都市への延伸が実施されようとしている。モノレール軌道桁は、従来の鋼製軌道桁の使用の場合、走行面の摩擦の関係で縦断勾配が3%以上では、鋼板の特殊ブラストあるいは溝付き鋼板等の対策が必要であった。

そこで、大阪モノレール合理化軌道桁研究会（技術審査：大阪大学西村宣男教授）では、鋼軌道桁の走行面部分に鉄筋コンクリート（以下 RC）床版をスタッドジベルによって取り付けて走行面の摩擦を増加させると共に軌道桁の圧縮側に圧縮強度の高いコンクリートを用いて合成桁とする合成鋼軌道桁を検討し、合理化構造として優れていることを見出した。

しかし、モノレール合成鋼軌道桁は一般の道路橋の合成桁と比較すると、RC 床版の断面積が鋼桁に比べて相対的に小さいために、コンクリートの乾燥収縮に対する鋼桁の拘束及び鋼桁の熱応力による RC 床版の引張応力、それに伴うひびわれの発生に対する懸念が設計課題として考

えられた。

本研究は、RC 床版に用いるセメントの種類、混和材料、配筋、鉄筋比及びスタッド配置などをパラメータとしてひびわれ制御に最も良い組み合わせについて試験体を作成し、熱応力に相当する荷重を作用させた実験によって検討した。また、これらの構造的パラメータを考慮した FEM 熱応力解析を実施し、内部の応力状態について検討した。

2. 実験供試体及び実験計画

実験供試体は、図-1 に示すようにモノレール合成鋼軌道桁として設計された実物大の RC 床版、また鋼桁として H 形鋼を用い、表-1 に示す仕様の供試体を3体製作した。

コンクリートの設計基準強度は 50N/mm^2 とした。その配合を表-2 に示す。使用セメントは、普通及び早強の2種類とし、早強には膨張材を添加した。また、スランプは 5cm としたが、高性能 AE 減水剤を使用し 15cm となった。

軸鉄筋量は、通常の 0.8% と 2% の2種類とした。スタッドは $19\phi \times 150\text{mm}$ を使用し、その

*1 日立造船(株)鉄構・建機事業本部橋梁設計部 工修（正会員）

*2 日立造船(株)技術研究所鉄構・建機技術研究センター 工博（正会員）

*3 松尾橋梁(株)設計部第一課 工修

*4 日本橋梁(株)橋梁本部技術部大阪設計課 工修

ピッチを 150mm と 300mm の 2 種類とした。実験は、次のステップで行った。

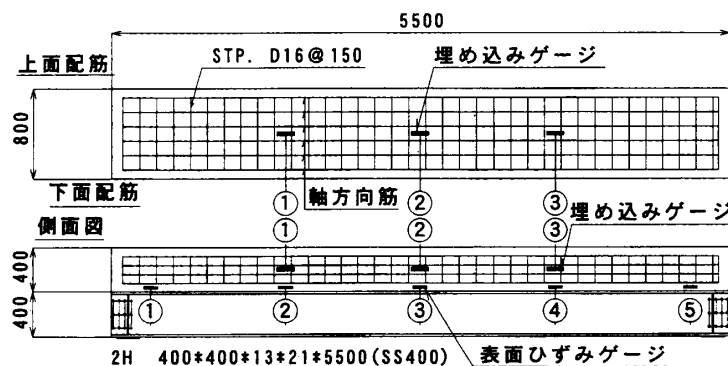
(1)コンクリートの材料特性試験（自己収縮・乾燥収縮）

(2)熱応力相当加力試験

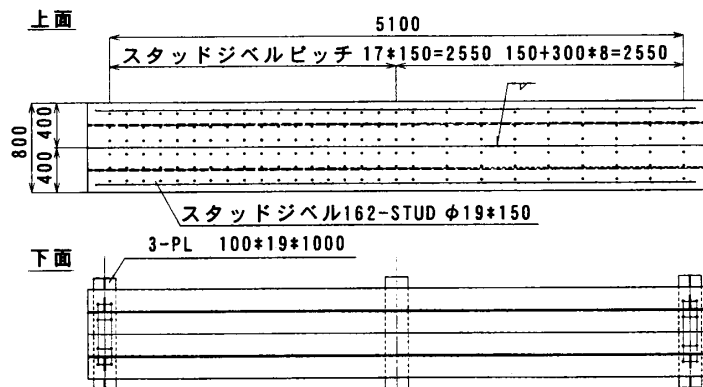
2.1 コンクリート素材の材料特性試験

(1) 自己収縮試験

コンクリートの水和過程で生じる自己収縮は、圧縮強度が高くなるに従って大きくなる傾向がある。ここでは、 50N/mm^2 と強度の高いコンクリートと膨張材との相互影響を調査するために供試体 A 及び B のコンクリート材料について、 $100\times 100\times 400\text{mm}$ の試験体にひずみゲージを貼



(1) 床版配筋図

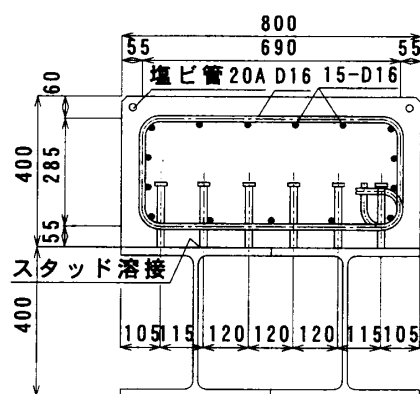


(2) 受桁平面図

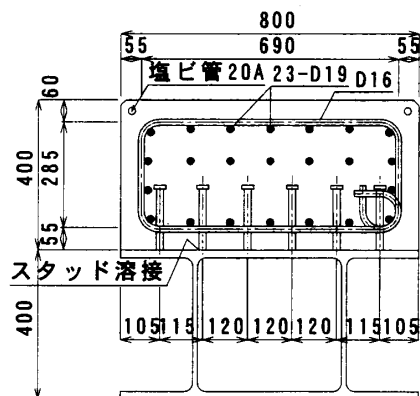
付し、恒温室（室温 $20\pm 3^\circ\text{C}$ ）に設置して、自己収縮試験を行った。供試体の養生は、シート養生を行い、材令 3 日から計測を開始し、計測中は乾燥しないようにラップで覆った。

表—1 供試体概要

供試体	コンクリート	混和材	混和剤	鉄筋量
A	普通	—	高性能 AE 減水剤	少 (0.8%)
B	早強	膨張材	高性能 AE 減水剤	少 (0.8%)
C	早強	膨張材	高性能 AE 減水剤	多 (2.0%)



(3) 供試体 A, B 断面図



(4) 供試体 C 断面図

図—1 実験供試体

表—2 供試体配合表

供試体	Gmax (mm)	スランプ (cm)	W/C (%)	空気量 (%)	粗骨材率 (%)	単位量 (kg/m^3)					
						水	セメント	混和材	細骨材	粗骨材	混和剤
A	20	15	32	3	39.7	165	516	—	654	1014	6.0
B, C	20	15	32	3	39.4	165	486	30	654	1014	6.5

混和剤に高性能 AE 減水剤（チューポール HP—11）を使用。

混和材に膨張材（デンカ CSA100R）を使用。

(2) 乾燥収縮試験

コンクリートの乾燥収縮は、内部の水分が蒸発散して体積収縮を生じる現象である。

乾燥収縮ひびわれ試験は、JIS 原案「乾燥収縮ひび割れ試験」に準じて行い、試験体を供試体 A 及び供試体 B のコンクリート材料について各 2 体ずつ合計 4 体製作し、表面にひずみゲージを貼付し、恒温室に設置して行った。

2.2 実物大 RC 床版供試体乾燥収縮試験

3 種類の供試体 A, B, C について、コンクリート打設後にテストベッドに鋼桁を固定し 28 日間放置し、コンクリートの乾燥収縮及び自己収縮によってひびわれが発生するかどうかを調査した。

2.3 熱応力相当加力試験

モノレール合成軌道桁では、コンクリートと鋼桁の温度差によって発生するコンクリートの引張応力がコンクリートの引張強度を超えるとひびわれが発生する。

ここでは油圧ジャッキを用いて熱応力に相当する軸力を模擬的に試験体に加え、コンクリートにひびわれが発生するかどうかを調査した。試験は 2 種類の熱応力相当軸力について行った。

最初の軸力 1 は、コンクリートの許容引張応力度及び照査時割り増し 1.15 を考慮して求めたコンクリートの引張応力 2.9N/mm^2 から、材令 28 日の乾燥収縮による引張応力 0.7N/mm^2 を差し引いた応力に鋼とコンクリートのヤング係数比 $n=7$ としたコンクリートと鋼桁の合成桁の断面積 A_v (88600mm^2) を乗じた軸力とした。なお、乾燥収縮による引張応力は、文献¹⁾の合成桁の乾燥収縮の床版応力算定式(1)より求めた。

$$\sigma_c = \frac{1}{n_2} \left(\frac{P_2}{A_{v_2}} + \frac{M_{v_2} y_{v_2}}{I_{v_2}} \right) - E_{c_2} \cdot \varepsilon_s \quad (1)$$

ここで、計測結果より、 $\varepsilon_s=60\mu$ 、クリープ係数 $\phi_2=1.0$ として、収縮による桁の曲げは供試体をテストベッドに固定したため考慮しないとして床版の引張応力を算定した。

$$P_1 = \sigma_c \cdot n \cdot A_v = (2.9 - 0.7) \times 88600 \times 7 = 1370 \text{ kN}$$

2 番目の軸力 2 はコンクリートの引張強度から収縮による引張応力 0.7N/mm^2 から差し引いた応力に断面積を乗じた軸力とした。

$$P_2 = \sigma_c \cdot n \cdot A_v = (3.6 - 0.7) \times 88600 \times 7 = 1800 \text{ kN}$$

ジャッキによる軸力導入順序は、次のように行った。

(1) 軸力 P_1 で 100 回繰り返し

(2) 軸力 P_2 で 1 回

各荷重載荷繰り返し段階でひびわれの発生状況を目視で観察した。

3. 実験結果

3.1 コンクリートの打設施工性

コンクリートの受け入れ検査結果を表-3 に示す。このうち、供試体 A, B のコンクリートのスランプは、工場出荷後分のデータで 13.5cm であるが、その後、30 分後で 9cm と大きく低下した。その原因として、水セメント比が 32% と低いことや早強セメントの使用等が考えられる。

3.2 コンクリートの自己収縮・乾燥収縮の試験結果

実験結果について図-3 及び図-4 に示す。自己

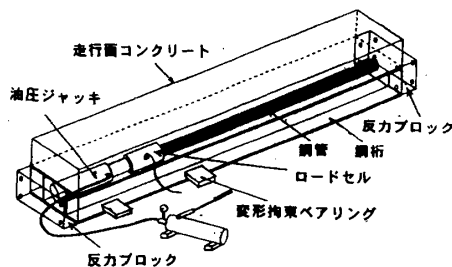


図-2 熱応力相当軸力加力試験

表-3 コンクリートの受け入れ検査結果

試験項目	供試体 A	供試体 B, C
スランプ(cm)	18	13.5
温度(℃)	33	33
空気量(%)	2.8	2.2
塩化物含有量(kg/m ³)	0.053	0.037

供試体 A：普通コンクリート

供試体 B, C：(早強+膨張) コンクリート

表-4 コンクリートの材料特性試験結果

	供試体 A		供試体 B,C	
材令 (日)	7	28	7	28
圧縮強度 $\sigma_c(\text{N/mm}^2)$	64.9	75.8	72.6	82.4
ヤング係数 (10^3N/mm^2)	32.8	36.3	33.7	36.9
引張割裂強度 $\sigma_t(\text{N/mm}^2)$	-	5.67	-	5.33
σ_c / σ_t	-	13.4	-	15.5

収縮試験結果から、普通コンクリート（供試体 A）は自己収縮ひずみが見られた（ $-30 \sim -70 \mu$ ）が、早強+膨張コンクリート（供試体 B, C）はほとんど見られない。また、乾燥収縮試験結果から、両方共にひずみの増加が見られたが、特に早強+膨張コンクリートはひずみの増加が大きく、膨張効果が確認された。

3.3 合成鋼軌道桁のコンクリートの乾燥収縮ひずみ計測結果

計測結果について図-5 に示す。図中の番号は埋め込みゲージの番号を示す。

その結果、次のことがわかった。

- (1) 供試体 A のひずみ量は減少（ -60μ ）し乾燥収縮ひずみであることがわかった。
- (2) 供試体 B は初期に膨張効果（ $+70 \mu$ ）が見られ、打設 7 日から乾燥収縮が進行した。乾燥収縮量は -50μ である。
- (3) 供試体 C も初期に膨張効果（ $+60 \mu$ ）が見られ、打設 7 日から乾燥収縮が進行した。コンクリート打設からのひずみ量は増加しているが、供試体 B より膨張効果は小さいが乾燥収縮も小さい。（ -40μ ）これは鉄筋の拘束効果であると考えられる。

従って、膨張材は乾燥収縮の低減に効果が大いことがわかった。

3.4 熱応力相当加力試験結果

熱応力相当加力試験順序は供試体 C→B→A の順であった。計算によれば、ジャッキ軸力 1370kN の繰り返し導入でひびわれが発生し始めると考えられた。このときのコンクリートのひびわれ発生状況を図-6 に示す。供試体 C はジャ

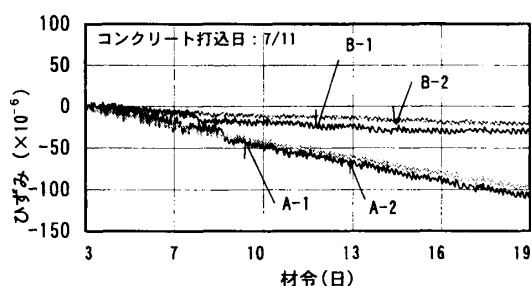


図-3 コンクリートの自己収縮ひずみ

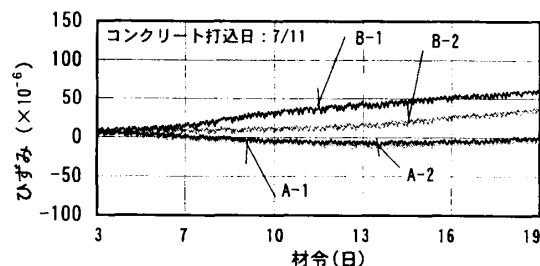
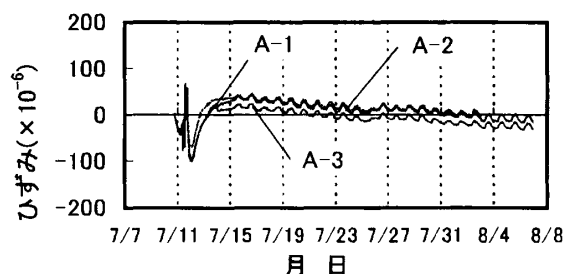
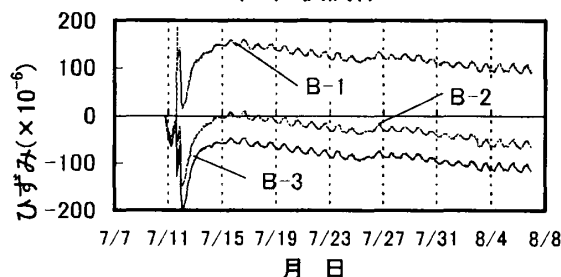


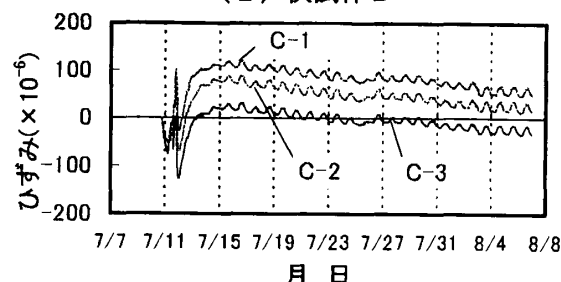
図-4 コンクリートの拘束ひずみ



(1) 供試体 A



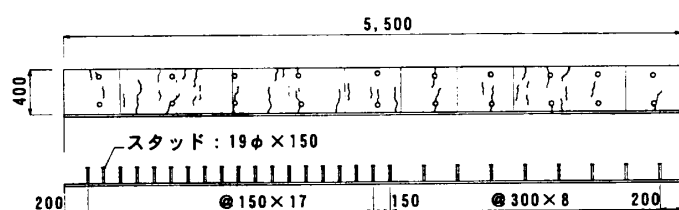
(2) 供試体 B



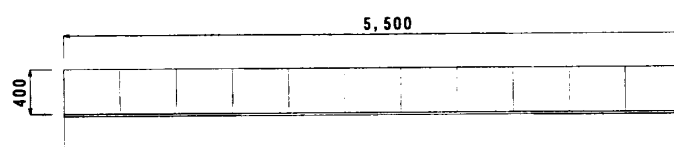
(3) 供試体 C

図-5 実物大 RC 床版供試体乾燥収縮試験結果

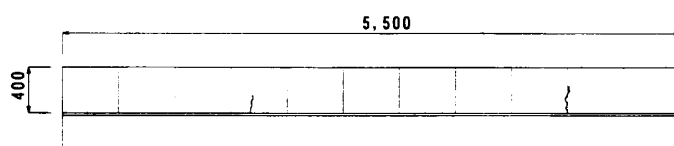
ッキ軸力 1370kN ではひびわれの発生はなくジャッキ軸力 1800kN で、床版の下面に微小なひびわれが発生し、ひびわれ幅は 0.05mm であった。



(1) 供試体 A (普通, 鉄筋小)



(2) 供試体 B (早強+膨張, 鉄筋小)



(3) 供試体 C (早強+膨張, 鉄筋多)

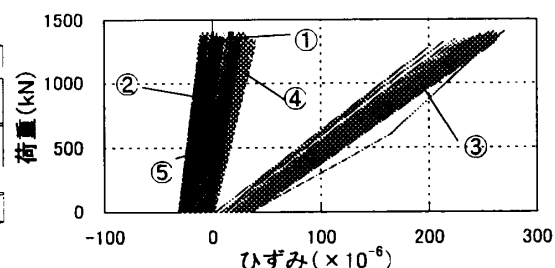
図-6 ジャッキ軸力導入試験による
RC 床版のひびわれ発生状況

供試体 B はジャッキ軸力 1370kN 及び 1800kN 共にひびわれの発生はなかった。

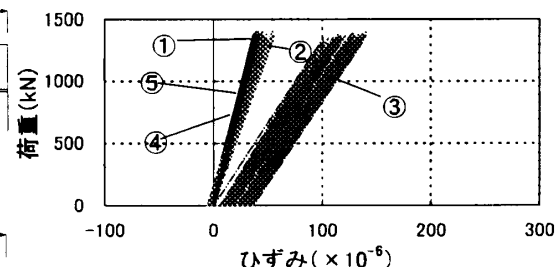
供試体 A はジャッキ軸力 1370kN の数回の軸力導入にて、床版の側面の下部セパ孔にひびわれが発生し、繰り返しの軸力導入により、しだいにひびわれの箇所が増加した。そのひびわれ幅は 0.1~0.3mm である。また、スタッドジベルのピッチの差によるひびわれ発生状況はピッチの細かい方がひびわれ本数は多かった。ジャッキ軸力導入時 1370kN のコンクリート側面下部のジャッキ軸力ひずみを図-7 に示す。図中の番号は RC 床版側面の表面のひずみゲージの番号を示す。供試体 A はジャッキ軸力 1370kN でコンクリートのひびわれ発生のため、ひずみが大きくなっていることがわかる。ただし、供試体 B、C とでは明解なひずみの差は見られなかった。

以上により、模型実験では、早強+膨張コンクリートは普通コンクリートより、コンクリートと鋼材の温度差応力に対するコンクリートのひびわれ抑制に効果的であることがわかった。

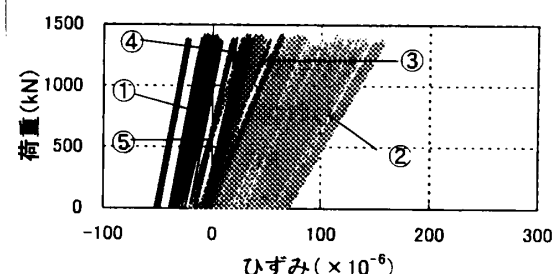
従って、合成鋼軌道桁の RC 床版のコンクリート材料として適していると言える。



(1) 供試体 A (普通, 鉄筋小)



(2) 供試体 B (早強+膨張, 鉄筋小)



(3) 供試体 C (早強+膨張, 鉄筋多)

図-7 ジャッキ軸力導入時の RC 床版側面下部のひずみ (軸力 1370kN)

ただし、温度差応力による引張応力に対する RC 床版の軸鉄筋量の多少によるひびわれ抑制効果には明解な差は見られなかった。

4. 熱応力 FEM 解析

4.1 FEM 解析のモデル化

FEM 解析のモデル化は、コンクリートはソリッド要素、鋼材はシェル要素、スタッドは主筋及びスターラップはバー要素とする。コンクリートと鋼材とは、2 材料間に圧縮力がある場合には接触して同一の変位条件で変形するが、引張力が作用する場合にはすき間が生じて力の伝達が行われず変位が独立するような、ギャップ要素（接触要素）を用いた。ジャッキ軸力は温度差による軸力を鋼材に与えることによって行うものとする。図-8 に予備実験の FEM 解析のモデル化を示す。FEM 解析のジャッキ軸力は

1370kN とした。

4.2 FEM 解析結果

熱応力実験の FEM 解析結果を図-9 に示す。この結果とジャッキ軸力試験の結果を比較すると、次のことがわかった。

- (1) コンクリートの桁中央部の引張応力は、解析値では、引張応力は 2.3N/mm^2 であり実験値の応力にほぼ一致する。
- (2) スタッドジベルのピッチは密のほうが FEM 解析ではスタッド近傍に応力の集中が見られ、実験のひびわれ状況にほぼ一致した。

5. まとめ

合成鋼軌道桁の RC 床版のコンクリート材料は、早強+膨張コンクリート使用の場合、普通コンクリートより乾燥収縮及び熱に対する引張力に対し、ひびわれ抑制の効果が大きいことがわかった。ただし、RC 床版の鉄筋量の多少については、実験結果に差異は見られなかった。今回の合成桁の模型による乾燥収縮の計測期間は 28 日であり、早強+膨張コンクリートと普通コンクリートとの長期の場合のひびわれ抑制効果、あるいは RC 床版の鉄筋量の差によるひびわれ抑制効果の検討が今後の課題である。

謝辞

この実験を計画・実施するにあたり大阪大学西村宣男教授からご指導を頂きました。心から感謝の意を表します。

なお、本論文は、大阪モノレール合理化軌道桁研究会（日立造船(株)、松尾橋梁(株)、日本橋梁(株)、片山ストラテック(株)、(株)栗本鐵工所、駒井鉄工(株)、(株)酒井鉄工所、高田機工(株)、(株)春本鐵工、三井造船(株)、(株)横河ブリッジ）の研究成果である。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編，丸善，1996.12
- 2) 岡田 清，六車 熙編：コンクリート・ハンドブック，朝倉書店，1981

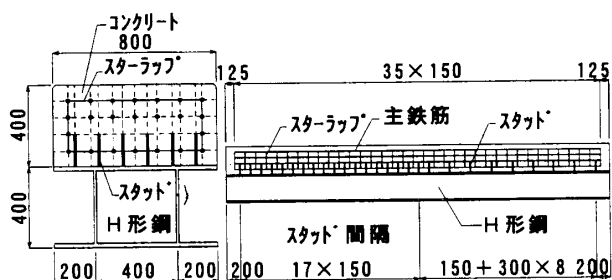


図-8 実験模型の FEM 解析のモデル化

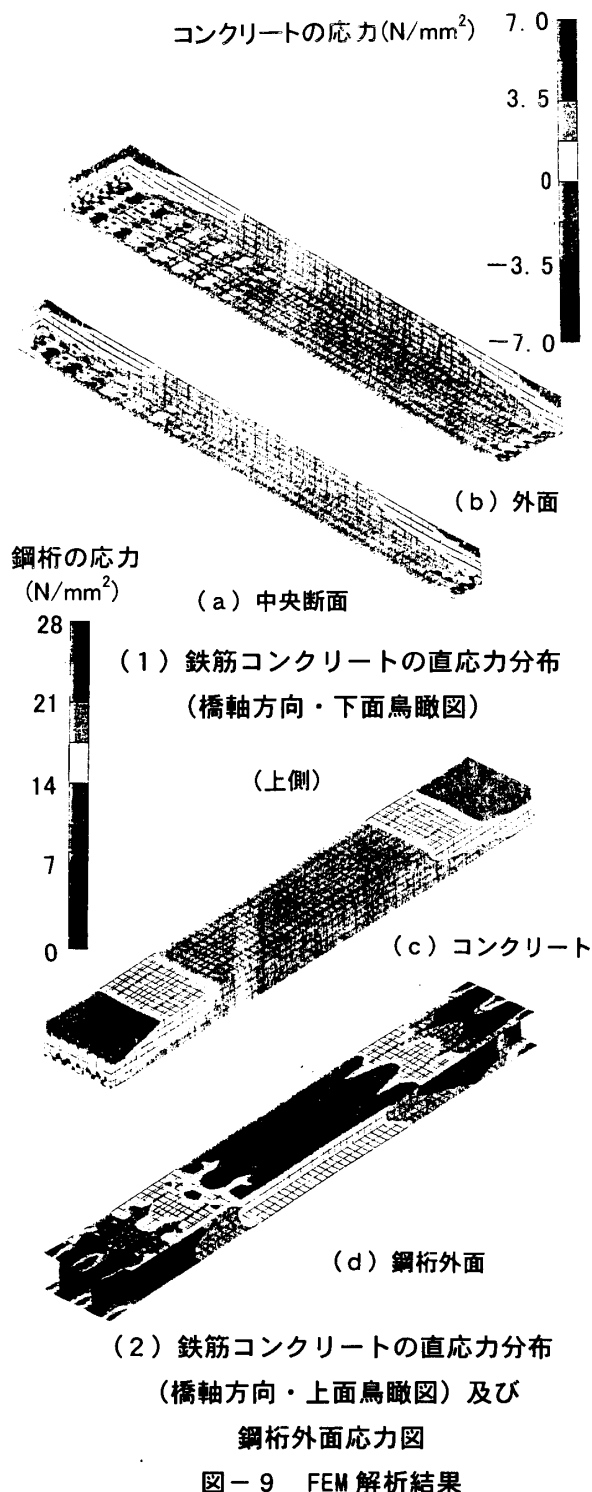


図-9 FEM 解析結果