

1. はじめに

航空機が大型化するとともに交通量が増加していることから、供用中の空港では基本施設である舗装の補修が必要とされる事態も増え、しかもその工事においては急速施工性が求められている。これは、空港が埋立地や軟弱地盤上に建設される等、地盤沈下に起因する補修が必要となる場合も同様の状況になっている。

このような状況に対処できるものとして、空港エプロンで一般的に用いられているコンクリート舗装の場合、現状では、プレキャストプレストレストコンクリート（PPC）版を用いた補修工事が多く行われている。この補修工法は、工場製作の PPC 版を現場に運搬して路盤上に敷設したのち、隣り合う版を連結するという手順になっている。PPC 版の連結には、供用開始後破損が生じた場合にその版のみを交換できるように、丸鋼を円弧状に加工したホーン鉄筋による方法、いわゆるホーンジョイントが用いられている¹⁾。しかし、この方法による PPC 版舗装にはポンピング等連結方法に起因すると考えられる破損が見られるようになってきて、最近では緊張材を 2 枚の隣り合う版をまたいで配置して連結部に圧縮力を導入して結合する圧縮ジョイントも開発されている²⁾。

PPC 版舗装は多くの空港で採用され、特に圧縮ジョイントによれば供用後も安定した挙動を示すことが確認されているが、その一方で、建設ならびに補修費用の改善が望まれていた。そこで、プレストレス力の導入を必要としないコンクリート版を用いるとともに、荷重伝達機能に優れ、しかも施工の容易な連結方式を有する工法について研究を行った。具体的には、コンクリート版として高強度コンクリートを用いた鉄筋コンクリート版（高強度 RC 版）を用い、それらの連結方法としてコッター式継手を用いるものである。これは、道路で一部採用された事例がある³⁾ ことから、空港への適用についても可能性が高いと判断した。

本研究においては、空港舗装を対象として設計した高強度 RC プレキャスト版舗装の試験施工を行い、版構造ならびに継手の性能確認を行った。本資料では、その過程を詳細に記述し、実用に供するために必要となるいくつかの改善点を示した上で、空港への適用性について明らかにしている。

2. RC プレキャスト版舗装の概要

ここでは、高強度 RC プレキャスト版舗装の設計ならびに施工について、道路で得られた知見を一部含めて紹

介するとともに、RC プレキャスト版舗装を空港へ適用する上で解決すべき問題について検討する。

2.1 RC プレキャスト版舗装の設計

(1) RC プレキャスト版

RC プレキャスト版の構造を写真-1に示す。RC プレキャスト版にはその強度・剛性を高めるため、高強度コンクリート（設計基準強度 $f'_{ck} = 60\text{N/mm}^2$ ）と圧縮鉄筋・引張鉄筋を部分的に連結させたラチストラス鉄筋（写真-2、写真-3）を使用している。これによりコンクリート版を薄くできるので、運搬が比較的容易になるとともに、路床・路盤の工事量が低減可能になる。

RC プレキャスト版に作用する外力は、航空機荷重ならびに環境要因による荷重、すなわち温度変化に起因する荷重である。両者が作用したときに発生する RC プレキャスト版の応力度の算定については、空港舗装構造設計要領⁴⁾に記載されている PC プレキャスト版に関する方法を基本的には踏襲すればよいと考えられる。具体的には、荷重による応力度に加え、温度の上昇時と下降時に分けて、軸方向の温度変化に起因する路盤摩擦による応力度と版厚方向の温度勾配変化に起因するそり拘束応力度を考慮した、合成応力度を計算する必要がある。このほか、ひび割れ発生後の RC プレキャスト版の増加応力度についての検討も必要である。

路盤以下の構造健全部については、航空機荷重が作用したときのたわみに注目して検討すればよい⁵⁾。

(2) 継手構造

RC プレキャスト版は、写真-4に示すコッター式継手を用いて相互に連結されている。これにより、弱点である目地部の剛性を高めることが可能になる。コッター式継手は、あらかじめ設置してある C 型金物の位置が合致するように 2 枚の RC プレキャスト版を並べ、両方の C 型金物を 1 個の H 型金物で連結する構造になっている。これにより継手面に圧縮力が導入される。H 型金物はボルトで固定することにより、荷重が繰返し作用した場合でも抜出さないような構造となっている。このボルトならびに H 型金物を取り外せば、RC プレキャスト版の部分交換を行うことも可能である。

RC プレキャスト版舗装を空港へ適用する場合、その区画は道路への適用時に比較して広がる。そのときには、コッター式継手の設計法としては、これが無筋コンクリート舗装に用いられている一般的なスリップバーと同等と考えて、空港舗装構造設計要領に記載されているスリップバーのものを踏襲すればよいものと考えた。

表-1 高強度コンクリートの示方配合

粗骨材 の最大寸法 (mm)	スランプ の範囲 (cm)	空気量 の範囲 (%)	W/C (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和材 C×1.5%
20	8.0±2.5	1.5±1.0	31.0	41.0	149	480	734	1071	7.2

(3) 長大ブロック化に伴う温度応力

RCプレキャスト版舗装では、RCプレキャスト版を相互に連結して1枚の大きなブロックとし、その周囲の舗装の接合部には枕版を施工するといった措置が必要になる。空港においては、道路に比較して、ブロックが必然的に大きくなるので、温度変化に起因する応力度の検討においてはこの点を考える必要がある。具体的には、RCプレキャスト版における軸方向応力度すなわち路盤摩擦力による応力度の増加、コッター式継手における水平力の増加への対応策である。

2.2 RCプレキャスト版舗装の施工

道路でのRCプレキャスト版舗装の施工事例に基づき、RCプレキャスト版舗装の施工方法について概要をまとめる。

(1) RCプレキャスト版舗装の製作

道路における事例で使用された高強度コンクリートの示方配合を表-1に示す。

RCプレキャスト版の寸法は、施工箇所の状況（車線幅、構造物、既設舗装との接合等）を考慮して決定された。RCプレキャスト版と既設コンクリート版との接合部分についてはタイバーで接合する方式が用いられた（写真-5）。

RCプレキャスト版の表面処理方法として2種類が用いられた。一つは、プレキャスト版製作時においてコンクリートの打設面がフレッシュなときにグルーピング溝を設け、コンクリートの硬化後に表面をショットブラストにより粗面処理する方法である。もう一つは、プレキャスト版製作型枠の底面にグルーピング溝の形状を型どったゴム製シートを貼ってコンクリートを打設する方法である。後者は、逆打ち工法であるので、路面の平坦性の確保が容易で、供用開始後の磨耗により早期段階で粗骨材が露出しやすいため、すべり抵抗の低下を防止する上で有利であると考えられた。これはプレキャスト版の製作上からも有利になる。なお、両方法で製作したRCプレキャスト版の供用前のすべり抵抗性は、ポータブルスキッドメータの測定値（BPN値）で60以上を確保しており、十分なものであることが確認されている。

(2) 施工状況

RCプレキャスト版舗装は、図-1に示すフローに従って施工された。具体的な施工状況を以下にまとめた。

まず、既設コンクリート版（厚さ30cm）を撤去した後、既設舗装との接合部処理としてタイバー設置位置の削孔を行うとともに、セメント安定処理路盤を修正した。

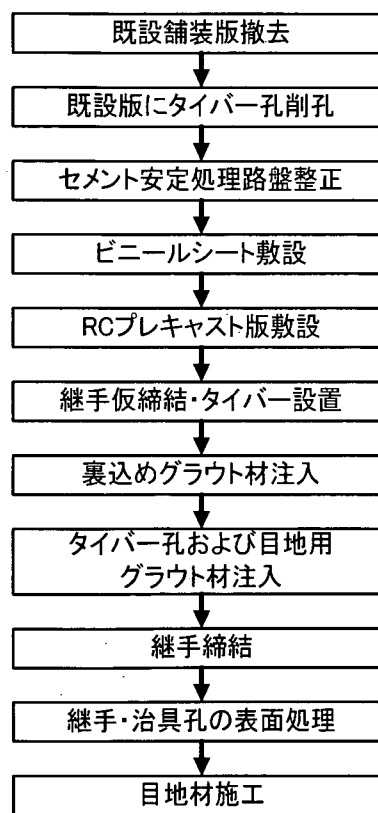


図-1 施工フロー

この路盤上にビニールシートを敷設後、トレーラーで搬入したRCプレキャスト版をトラッククレーンにより所定の位置に敷設した（写真-6）。既設舗装や隣接する版との間に段差が生じないように、版に内蔵した高さ調整ボルト（4箇所/枚）により高さの微調整を行った。

（写真-7）。また、平面的にRCプレキャスト版の寸法誤差によるずれが蓄積しないように、版同士の隙間を最大7mmとした。

そして、継手の仮締結後、グラウト注入孔よりグラウト材を自然流下方式で注入し、RCプレキャスト版と路盤との間の隙間を充填した。グラウト材は、JAロート流下時間60秒以内、材齢3時間で一軸圧縮強度が 2.0N/mm^2 以上、可使時間が40分の特性を持つ超速硬型のものを使用した。この裏込めグラウト材注入と並行して、RCプレキャスト版同士の間隙間に目地用グラウト材を注入した。目地用グラウト材は、J14ロート流下時間20秒以内、材齢3時間で一軸圧縮強度が 20N/mm^2 以上、可使時間が40分の特性を持つ超速硬型のものを使用した。裏込めグラウト材注入状況と目地用グラウト材注入状況を写真-8、写真-9に示す。

RCプレキャスト版相互の接合については、目地用グラウト材が硬化後、コッター式継手のH型金物の固定ボルトを所定のトルクで締付ける方法を用いた。

RCプレキャスト版表面の凹部となるコッター式継手部、グラウト注入孔の表面処理としては、樹脂系モルタルを充填する跡埋め処理を当初実施していたが、RCプレキャスト版とモルタル材の色が違ったこと、供用後にモルタル材にひび割れの発生が見られたことから、樹脂製キャップを使用し、締付けネジおよび接着剤にて固定する方法に変更した。キャップの取付け状況を写真-10、写真-11に示す。

2.3 空港舗装への適用性

RCプレキャスト版舗装を空港へ適用する場合に検討しなければならない事項としては次のようなものが挙げられる。

- ① RCプレキャスト版の荷重支持特性
 - a) 荷重支持力
 - b) 耐久性
 - c) 構造細目
 - i) コンクリートの品質
 - ii) 鉄筋の量・配置
- ② コッター式継手の荷重伝達特性
 - a) 荷重伝達能力
 - b) 耐久性
 - c) 構造細目

これらについては、別途実施した小型供試体を用いた試験により基本的な検討をしたあと、試験舗装によって詳細に研究することとした。これは、実際の空港舗装においては、RCプレキャスト版が、コッター式継手により連結されることにより広い面積で一体化がなされ、また、その供用が長期間に及ぶことになるため、可能な限

りその状況を事前に検討しておくことが必要になると考えられたからである。具体的には、航空機相当荷重を繰返し走行させて、耐久性を明らかにしなければならないと考えて、現地の地下水位が高い場合を想定して、RCプレキャスト版の下に滞水がある状態で航空機荷重の繰返し走行を実施した。

試験舗装においては以下のことを検討した。

- ① RCプレキャスト版の設計法の検討
- ② 目地部の荷重伝達機能の確認
- ③ コッター式継手の設計法の検討
- ④ コッター式継手の施工管理方法の検討
- ⑤ 平面一体化舗装としてのRCプレキャスト版ならびにコッター式継手の耐力の検討

3. 試験計画

空港舗装を対象とした、RCプレキャスト版舗装を製作し、航空機の主脚荷重を繰返し走行させたときの挙動を観測することによって、RCプレキャスト版に適用した設計方法、コッター式継手の耐力ならびに設計方法について検討した。

3.1 試験の概要

RCプレキャスト版をコッター式継手により連結した構造を有するRCプレキャスト版舗装を国土技術政策総合研究所原型載荷実験槽内に製作した。

この舗装に対して、走行載荷試験装置を用いて航空機脚荷重の繰返し走行載荷を実施した。繰返し走行載荷試験中の所定の走行回数時に、静的載荷試験、FWD載荷試験、表面性状調査を行った。また、繰返し走行載荷試験後、コッター式継手を取り外して単独版としたRCプレキャスト版に荷重を $1,100\text{kN}$ まで載荷する静的載荷試験も行った。

なお、載荷試験に先立ち、コッター式継手の固定用ボルトに導入する最適トルク量について検討するために、ボルトの締付け試験を行い、RCプレキャスト版の目地部とH型金物に生じるひずみを測定した。

3.2 試験舗装の製作

(1) 舗装構成

試験舗装は、図-2に示すように、250mm厚のセメント安定処理路盤上に250mm厚のRCプレキャスト版が敷設

された構造となっている。また、平面的にみれば、図-3に示すように、RCプレキャスト版が6枚並べられて、種々の目地形式により相互に連結されている。

6枚のRCプレキャスト版の長辺部分の4箇所の接合部には、表-2に示す4種類の目地構造を設けた。すなわち、コッター式継手では、締付けトルクを2種類、継手設置間隔を2種類としたのに加え、水平ジョイントでは従来より使用されているスリップバーを用いている。

表-2 試験に用いた目地構造

目地	種類	間隔(mm)	トルク(kN・m)
A-C版	コッター式継手	750	200
B-D版	コッター式継手	750	400
C-E版	コッター式継手	1,125	400
D-F版	水平ジョイント	450	-

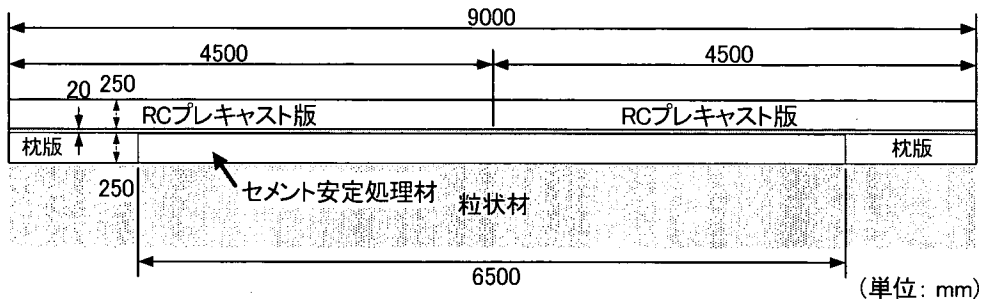


図-2 試験舗装の断面図

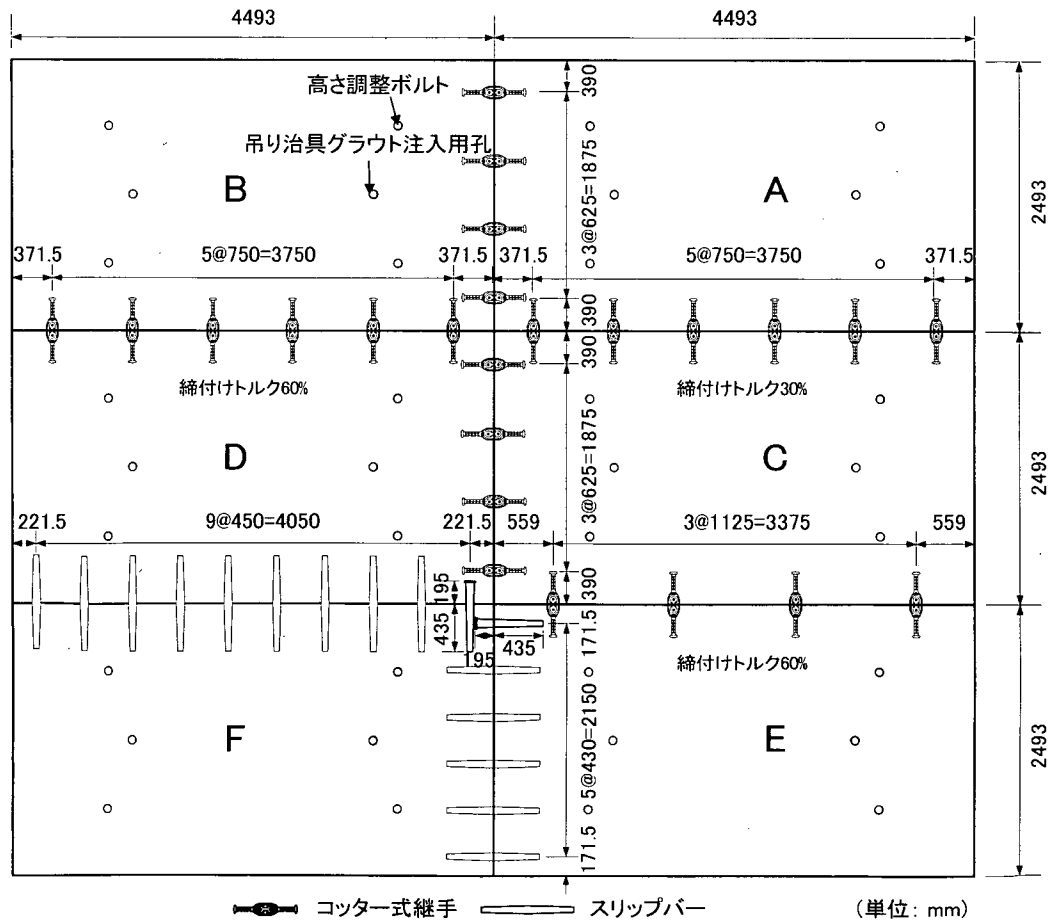


図-3 試験舗装の平面図

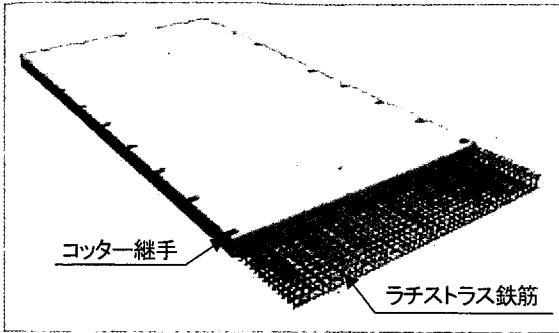


写真-1 高強度 RCプレキャスト版の構造

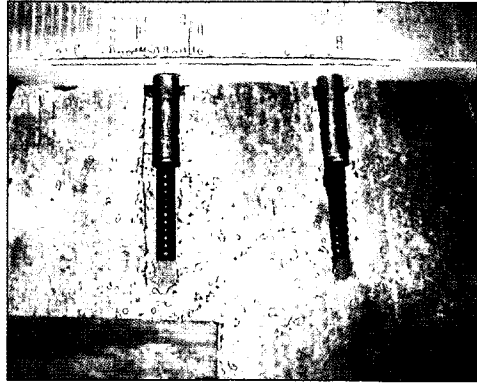


写真-5 既設コンクリート版との接合部

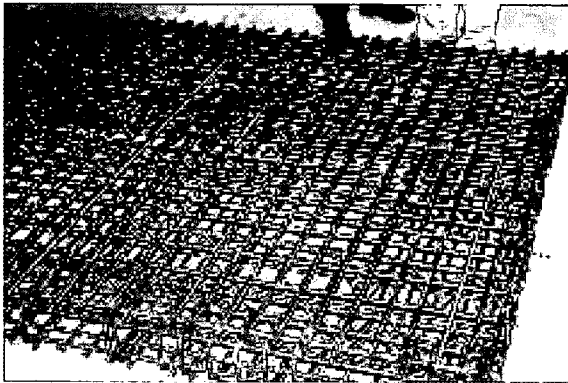


写真-2 鉄筋籠

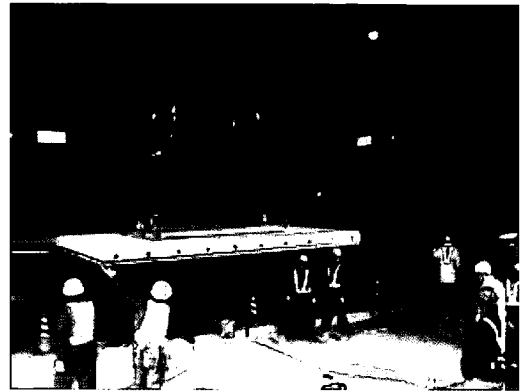


写真-6 RCプレキャスト版の敷設状況

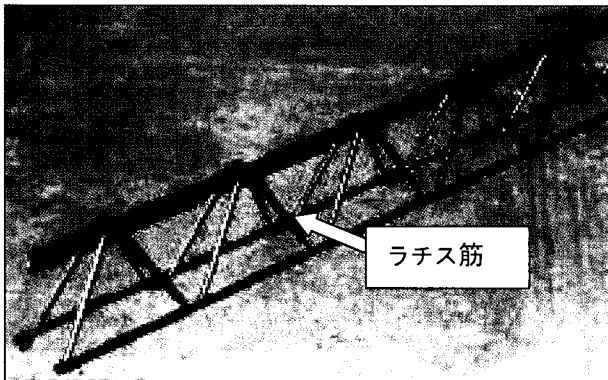


写真-3 ラチストラス鉄筋

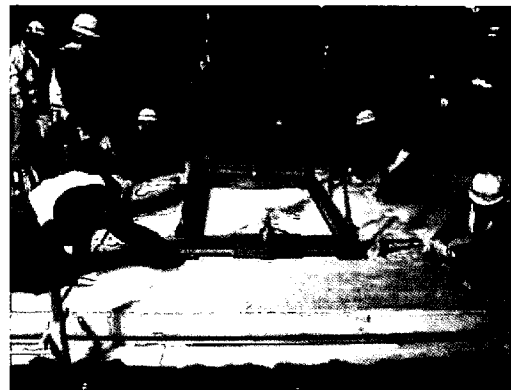


写真-7 RCプレキャスト版の高さ調整状況

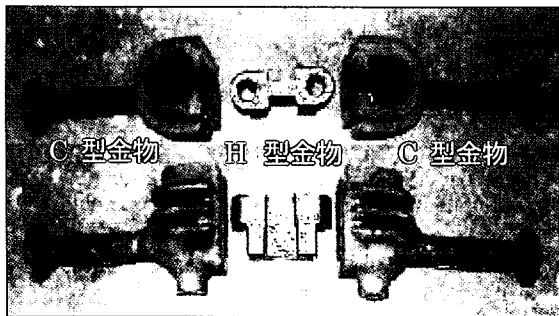


写真-4 コッター式継手



写真-8 裏込めグラウト材注入状況

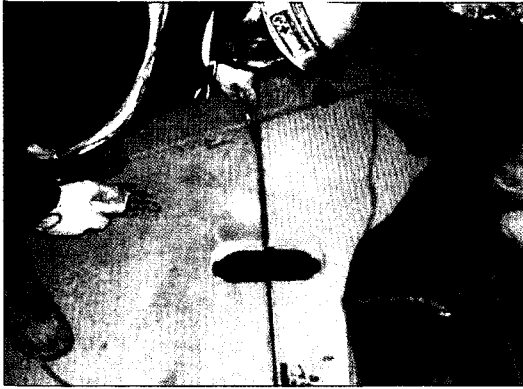


写真-9 目地用グラウト材の注入状況

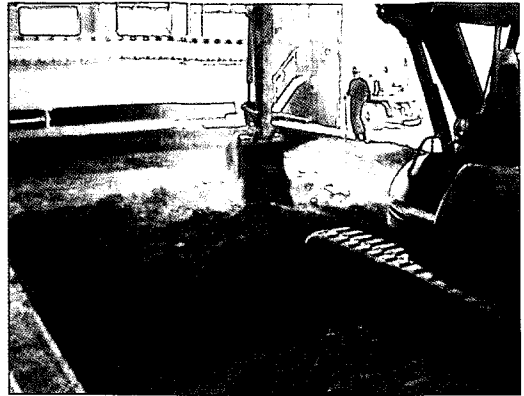


写真-13 セメント・路盤材混合状況



写真-10 樹脂製キャップの取付け状況

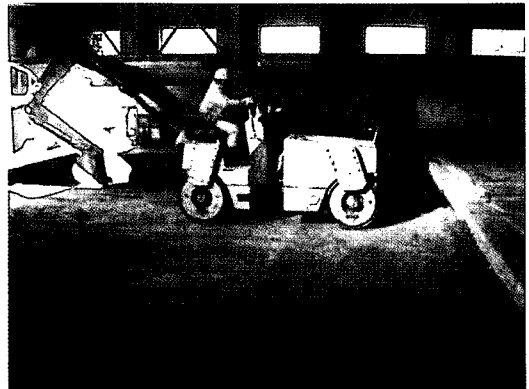


写真-14 転圧状況

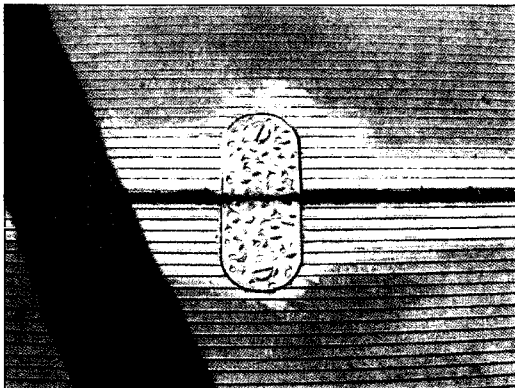


写真-11 樹脂製キャップの取付け完了の状況

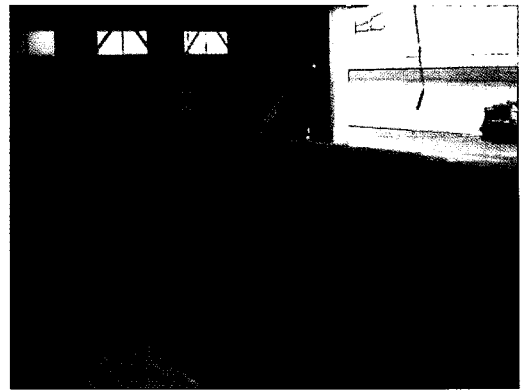


写真-15 仕上がり状況



写真-12 セメント散布状況



写真-16 枕版敷設状況



写真-17 枕版高さ調整状況

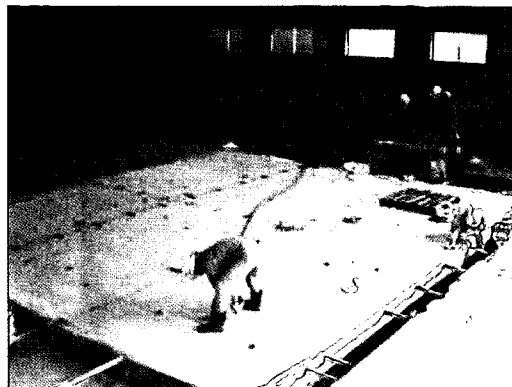


写真-21 裏込め用グラウト材注入状況



写真-18 裏込め用グラウト材注入状況



写真-22 目地用グラウト材注入状況

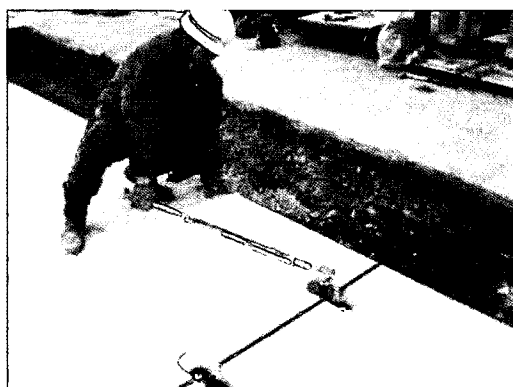


写真-19 コッター式継手締付け状況

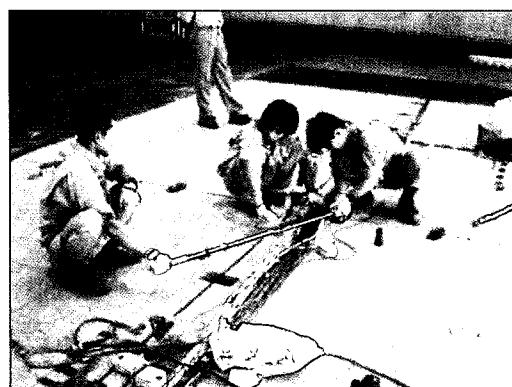


写真-23 コッター式継手締付け状況



写真-20 RC版敷設状況

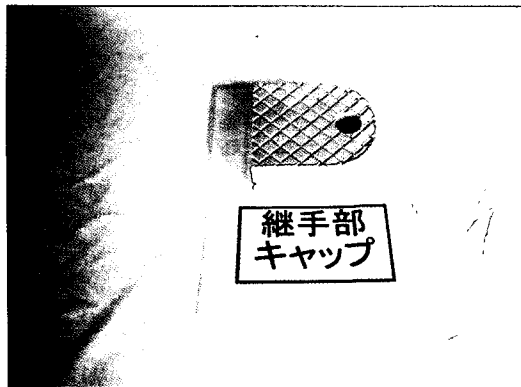


写真-24 コッター式継手部樹脂製蓋

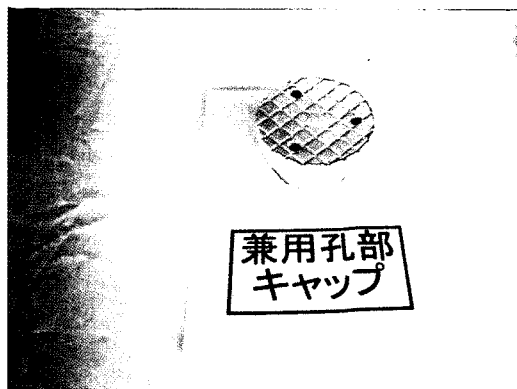


写真-25 吊り治具・グラウト注入兼用孔部用樹脂製蓋

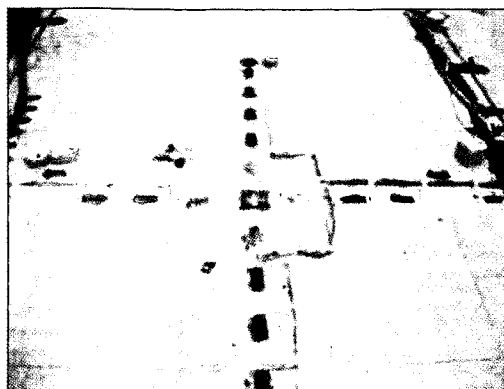


写真-29 C版におけるひずみゲージの取付状況

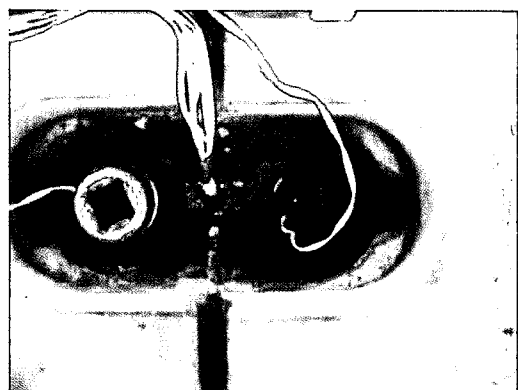


写真-26 コッター式継手のひずみゲージ取付状況



写真-30 FWD 載荷試験の状況

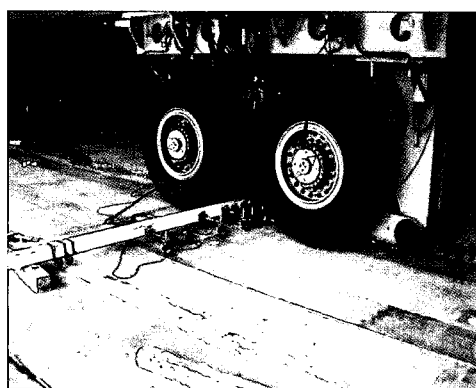


写真-27 変位の測定状況

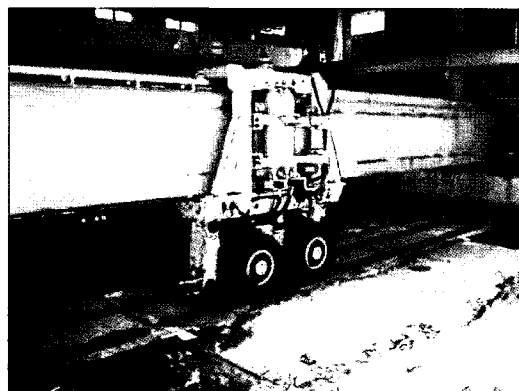


写真-31 走行載荷試験の状況

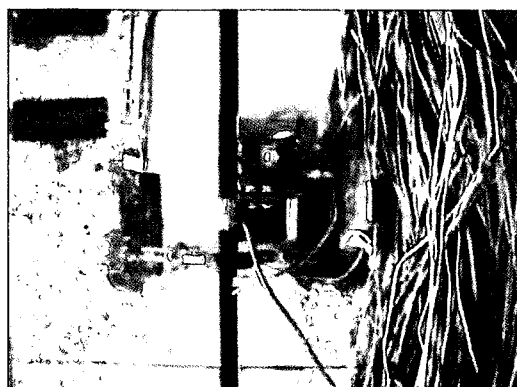


写真-28 目地幅測定装置の取付状況

(2) 使用材料

a) RCプレキャスト版

試験舗装に使用した RC プレキャスト版は、寸法 4,493mm×2,493mm×250mm のもの 6 枚である。いずれも工場にて製作された。使用したセメントコンクリートの示方配合ならびに材料の特性値を表-3、表-4に示す。

コンクリートの試験結果を表-5に示す。

RCプレキャスト版の配筋図(A版)ならびにコッター式継手の詳細図を図-4、図-5に示す。製作された RC プレキャスト版の寸法誤差は、平面的には 0~1mm, 厚さでは-2~4mmであった。

表-3 セメントコンクリートの示方配合

呼び強度 (N/mm ²)	粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランブ の範囲 (cm)	空気量 の範囲 (%)	W/C (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)					
						水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和材	
										混和材	混和剤
60	20	5±1.5	2±1.5	33	40.6	147	445	745	1130	-	5.38

表-4 RCプレキャスト版に使用した材料の特性値

材料	項目	設計値
コンクリート	設計基準圧縮強度 (N/mm ²)	60
	設計基準曲げ引張強度 (N/mm ²)	6.4
	許容曲げ引張強度 (N/mm ²)	6.1
	許容曲げ圧縮強度 (N/mm ²)	20
	弾性係数 (kN/mm ²)	35
鉄筋 SD345	引張強度 (N/mm ²)	196
	引張降伏強度 (N/mm ²)	345
	弾性係数 (kN/mm ²)	200
H型金物	引張強度 (N/mm ²)	500
	許容応力度 (N/mm ²)	190
	弾性係数 (kN/mm ²)	170
C型金物	引張強度 (N/mm ²)	900
	許容応力度 (N/mm ²)	280
	弾性係数 (kN/mm ²)	170
固定用ボルト (M22 12.9)	引張強度 (N/mm ²)	1,220
	許容応力度 (N/mm ²)	430
	弾性係数 (kN/mm ²)	200

表-5 コンクリートの試験結果

	スランブ (cm)	空気量 (%)	打設温度 (°C)	圧縮強度 (N/mm ²)
平均	5.1	1.9	16.6	70.0
最大値	5.7	2.2	19.0	73.5
最小値	4.3	1.6	15.0	67.9
標準偏差	0.47	0.21	—	1.8

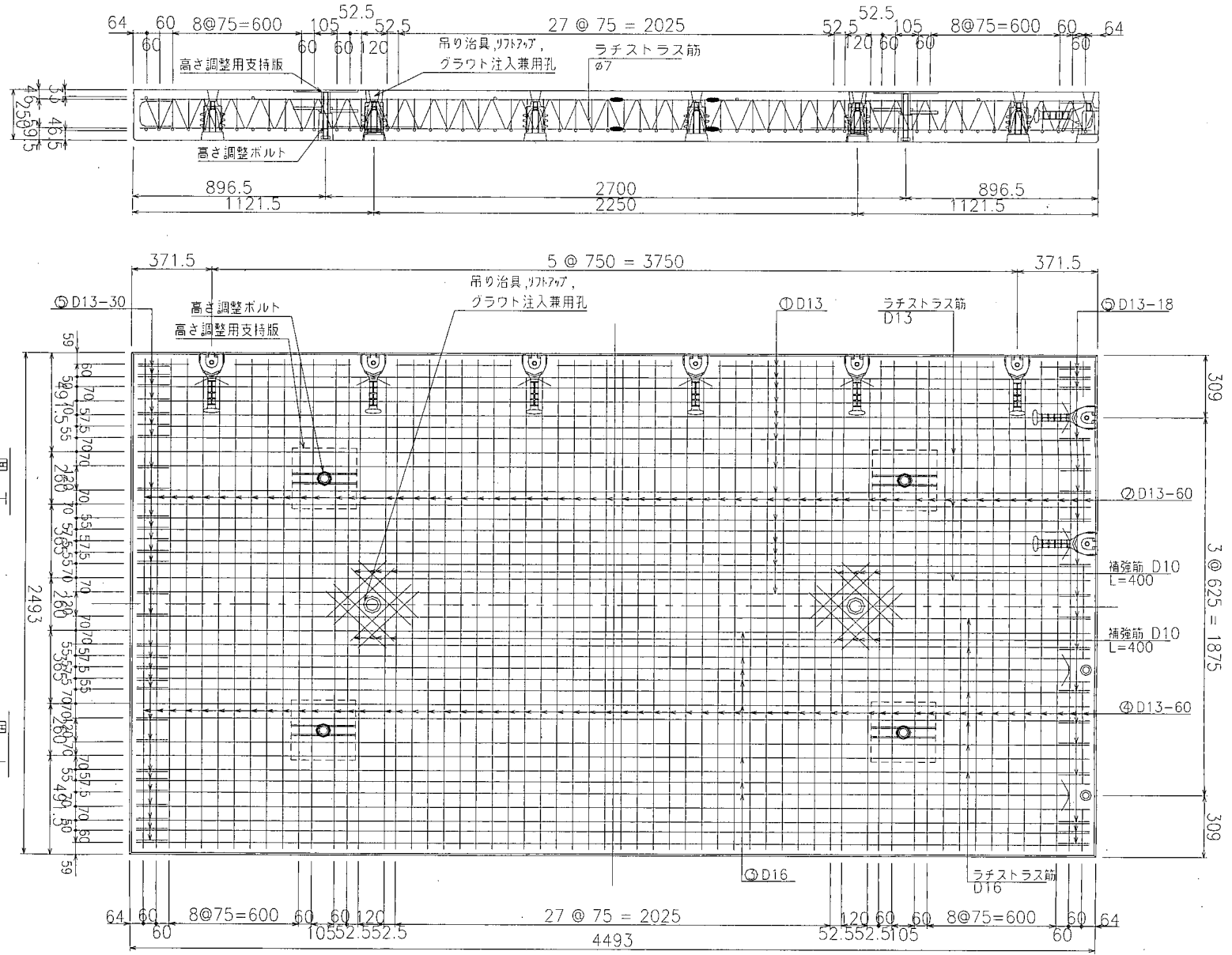
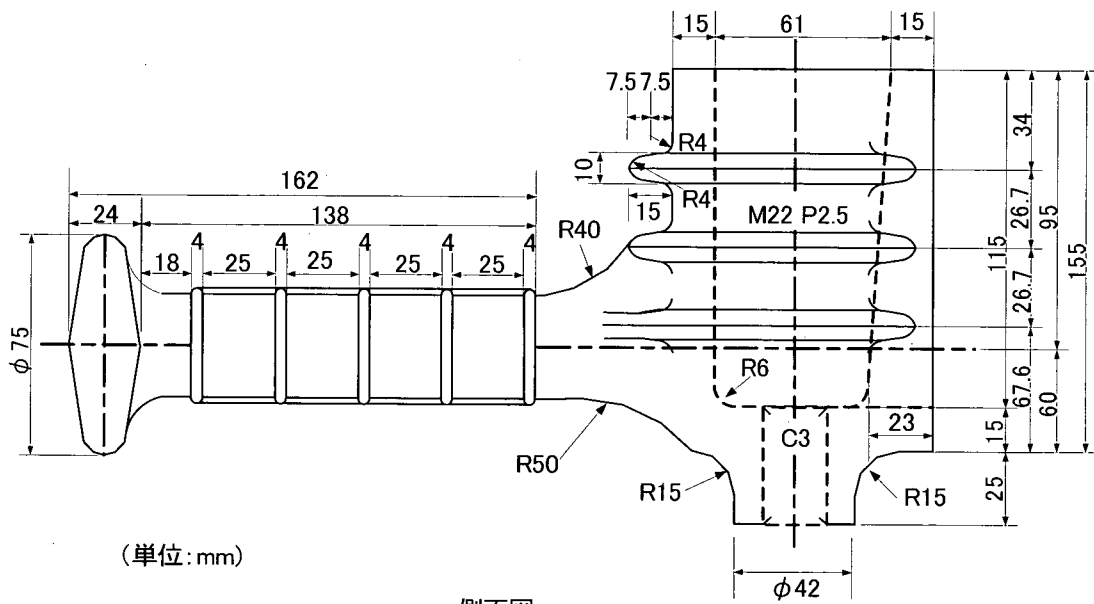
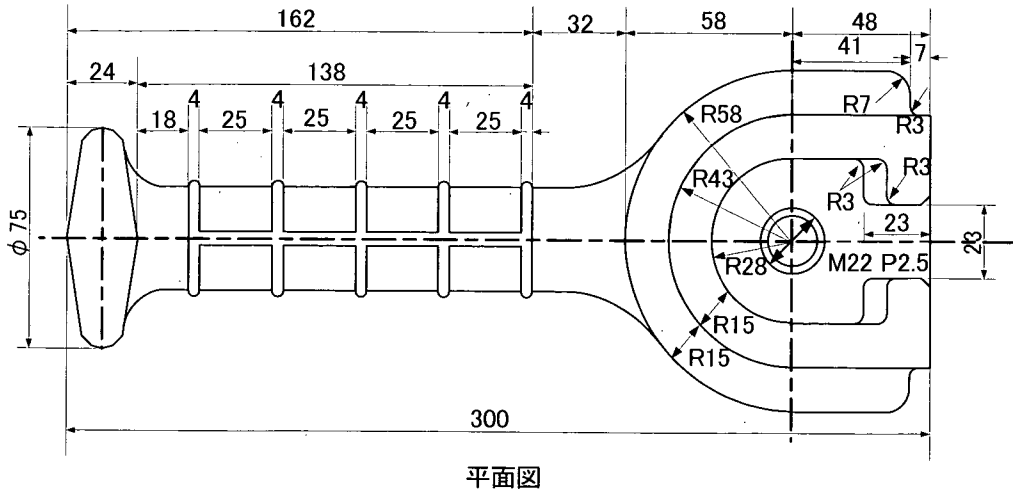
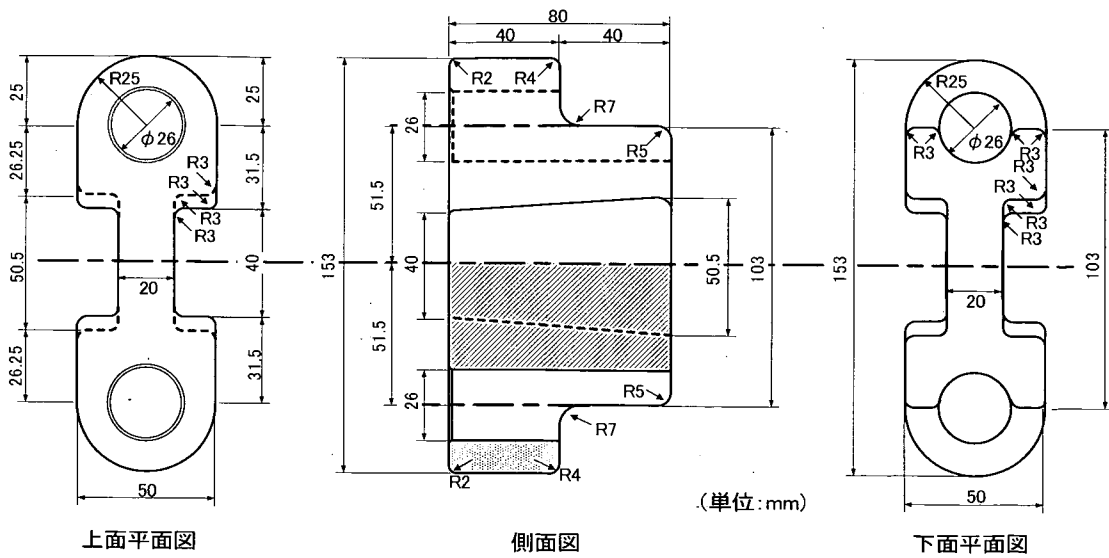


図-4 RCプレキャスト版の配筋図



a) C型金物



b) H型金物

図-5 コッター式継手金物の詳細図

b) 枕版

枕版は、RC プレキャスト版と同様に、工場にて製作された。枕版の形状は 3,750mm×2,493mm×250mm とし、枕版同士の結合はコッター式継手によった。なお、枕版に使用したセメントコンクリートの示方配合および材料は、RC プレキャスト版と同じものを使用した。

c) グラウト材

グラウト材は、RC プレキャスト版と路盤との間に生じる隙間を充填する裏込め用グラウト材、版同士の隙間に充填する目地用グラウト材の 2 種類である。各グラウト材の性状を表-6 に示す。

d) セメント安定処理材

セメント安定処理材は、既設路盤材に普通ポルトランドセメントを添加する (3%) 路上混合方式とした。セメント安定処理材路盤の厚さは 250mm で、転圧後の支持力係数 (K_{30}) は 307MN/m^3 であった。

(3) 施工状況

原型載荷実験槽に施工した試験舗装の施工手順を図-6 に示す。

a) セメント安定処理路盤

セメント安定処理路盤は、既設舗装版を撤去後、既設路盤を枕版が入る深さ (舗装面から約 520mm) まで掘り下げた後に、路盤材を 250mm 厚になるように敷均し、セメントを散布し、バックホウで混合した後に再度敷均し、ローラにて転圧した。なお、路盤高の管理値は -10mm とした。セメント散布状況、混合状況、転圧状況および仕上がり状況を写真-12、写真-13、写真-14、写真-15 に示す。

b) 枕版敷設

枕版は、路盤上の所定の箇所にビニールシートを敷いてから敷設した。枕版の高さは、枕版内に内蔵した高さ調整ボルトにて調節した。高さ調整後、枕版同士をコッター式継手で仮締結し、路盤と枕版の間に生じた隙間を埋めるために裏込め用グラウト材を枕版内に蔵されたグラウト注入兼用孔より充填した。また、並行して枕版同士に生じている隙間にも目地用グラウト材を充填した。各グラウト材が硬化後、トルクレンチを用いてコッター式継手の H 型金物固定用ボルトを締付けた。枕版敷設状況、高さ調整状況、裏込め用グラウト材注入状況および継手締付け状況を写真-16、写真-17、写真-18、写真-19 に示す。

表-6 グラウト材の性状

	裏込め用グラウト材	目地用グラウト材
一軸圧縮強度	3.0 N/mm ² 以上 (材齢 2 時間)	20.0 N/mm ² 以上 (材齢 3 時間)
流下時間	60 秒以下 (JA ロート)	15 秒以下 (J14 ロート)
可使時間	40 分以上	20 分以上

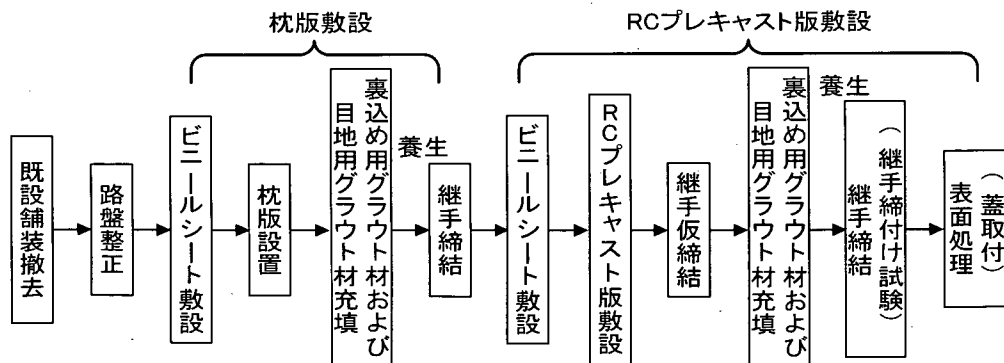


図-6 施工手順

c) RCプレキャスト版敷設

RCプレキャスト版は、枕版と同様の手順で敷設した。継手締付け試験終了後にはコッター式継手部の凹部、吊り治具・グラウト注入兼用孔を樹脂製の蓋により塞いだ。RCプレキャスト版敷設、裏込め用グラウト材注入状況、目地用グラウト材注入状況、コッター式継手締付け状況を写真-20、写真-21、写真-22、写真-23に示す。また、樹脂製の蓋を写真-24、写真-25に示す。

3.3 試験内容

この試験舗装に対して、上記のように、3種類の試験を実施した。一つ目はコッター式継手の最適締付け力を決定するための継手締付け試験、二つ目はRCプレキャスト版舗装の航空機荷重に対する挙動を調べるための舗装載荷試験、三つ目はRCプレキャスト版の耐力検証を目的とした単独RCプレキャスト版に対する載荷試験である、版構造試験である。このうち、舗装載荷試験は、航空機主脚を用いた静的載荷試験、Falling Weight Deflectometer (FWD)を用いたFWD載荷試験、航空機主脚を繰返し走行させる走行載荷試験から成る。

(1) 継手締付け試験

路盤上にRCプレキャスト版を敷設し、版同士の隙間を目地用グラウト材で充填した後、継手締付け試験を実施した。具体的には、RCプレキャスト版を接合するコッター式継手の固定用ボルトにトルクを導入することにより、目地部付近のRCプレキャスト版表面、H型金物ならびに固定用ボルトに生ずるひずみを測定した。

a) 試験方法

試験は図-7に示す各版の継手部において実施した。この試験では、締付けトルクはトルクレンチを用いて50kN・mずつ増加させて最大400kN・mまで8段階に分けて導入した。トルクの値が安定した時点で計測を行い、終了後次のトルク段階へ移行した。なお、最大締付けトルクは、A版とC版の接合部では固定用ボルト(M22 12.9)の許容引張応力度(430N/mm²)の30%に相当する200kN・m、その他の版の接合部では固定用ボルトの許容引張応力度の60%に相当する400kN・mとした。

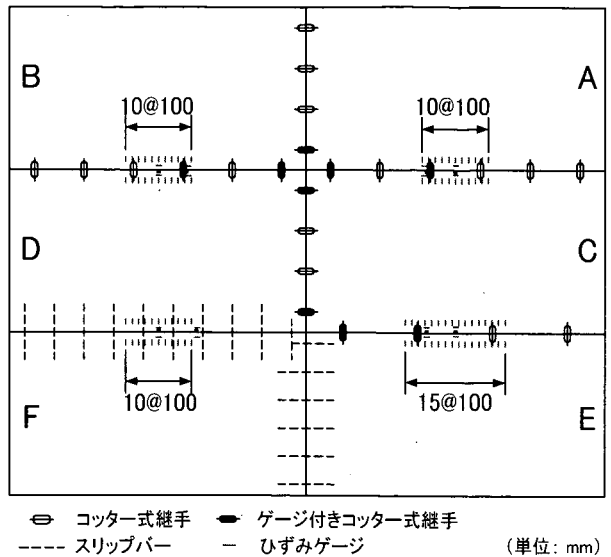


図-7 継手締付け試験の実施箇所

b) 計測項目

締付けトルクについてはトルクレンチにより計測した。コンクリート版表面ひずみ用ゲージは目地の両側に100mm間隔で設置した。また、H型金物には、最大、最小主ひずみを計測するために3軸方向ひずみゲージを貼り付けた。固定用ボルトにはその内部にひずみゲージを埋め込んだ。取付位置の詳細を図-8および写真-26に示す。

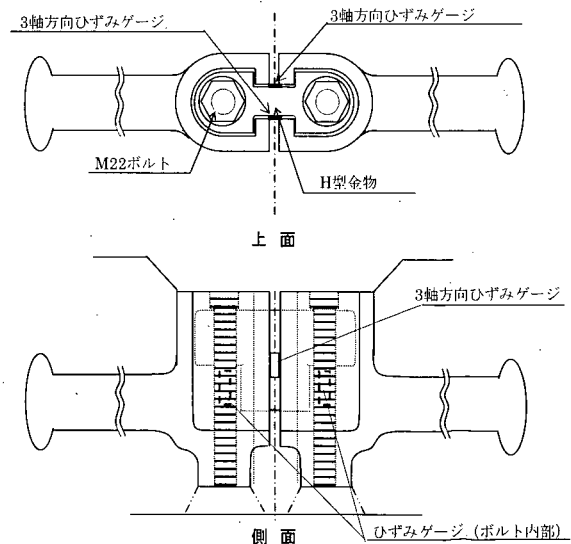


図-8 コッター式継手のひずみゲージ取付位置

(2) 静的荷重試験

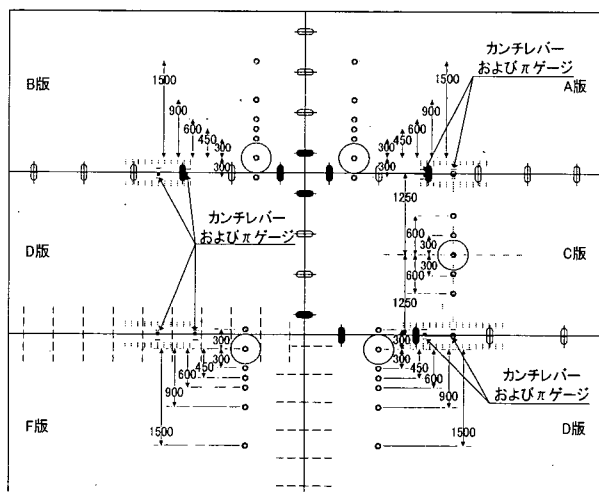
静的荷重試験は自走式走行荷重試験装置を用いて行った。このとき、地下水位が RC プレキャスト版の厚さの半分の位置（舗装表面から 125mm 下方）となるように調整した。

a) 試験方法

静的荷重試験は図-9に示す 5箇所において実施した。この試験では舗装表面に置いた直径 450mm の鋼製板を介して静的荷重を載荷した（鋼製板の下には板全面が舗装と接触するように硬質ゴムを敷いている）。

荷重は、0、50、100、150、200、276kN の 6段階に分けて載荷し、荷重が安定した時点で計測を行い、その後次の荷重段階へ移行した。荷重を 276kN とした後は一度に 0kN まで戻した。荷重段階ごとに 3回の載荷および除荷を行ったが、試験の間には十分な時間を確保した。

なお、試験実施時期は、走行試験前、3,000回走行後、10,000回走行後の3回とした。



○レーザ変位計 — ひずみゲージ ○ 静的載荷位置

図-9 静的荷重試験の位置

b) 計測項目

静的荷重試験における計測項目を表-7に示す。具体的な方法は以下のとおりである。

i) 荷重

荷重は自走式走行荷重試験装置の荷重計により計測した。

ii) 変位

①コンクリート版

コンクリート版のたわみは、目地部載荷の場合は載荷板中心より-300、0、300、450、600、900、1,500mmの7点で、また、中央部載荷の場合は載荷板中心より±300、±600、±1,250、0mmの7点で、レーザ式変位計により計測した。写真-27に変位の測定状況を示す。

②目地幅

目地幅は、コンクリート版上縁と下縁のそれぞれにあらかじめ設置したπ型変位計、カンチレバー式変位計を用いて計測した。写真-28にそれらの取付状況を示す。

iii) ひずみ

①コンクリート版表面

版中央部載荷試験時のコンクリート版表面ひずみを計測するために、静的荷重試験位置を中心に、RCプレキャスト版の長辺、短辺両方向に200mm間隔で11枚のひずみゲージを設置した（C版）。このほか、目地部載荷試験では継手締付け試験用に設置したひずみゲージも使用した。

C版のひずみゲージ取付状況を写真-29に示す。

表-7 静的荷重試験における計測項目

計測項目	計測位置	計測機器	測点数
荷重	載荷版	荷重試験機荷重計	1
変位	コンクリート版表面	レーザ式変位計	7
	上縁目地幅	π型変位計	8
	下縁目地幅	カンチレバー式変位計	8
ひずみ	コンクリート版表面	ひずみゲージ	136
	鉄筋	ひずみゲージ	88
	コンクリート版内部	モールドゲージ	44
	スリッパ	ひずみゲージ	12
	H型金物	3軸方向ひずみゲージ	18
固定用ボルト	ひずみゲージ	18	
温度	A版	熱電対	3

②鉄筋

鉄筋のひずみを計測するためにC版のRCプレキャスト版の中心位置近傍における長辺、短辺両方向の圧縮側鉄筋ならびに引張側鉄筋にひずみゲージを設置した。その位置は225mm間隔を基本に11箇所（1測点に対し鉄筋の上下でひずみゲージを2枚設置）である。なお、これらのひずみゲージは鉄筋にあらかじめ貼付け、型枠内にその鉄筋を設置した上でコンクリートを打設した。

③継手

継手締付け試験時に使用したコッター式継手のH型金物および固定用ボルトに設置してあるひずみゲージを用いた。

iv) 温度

A版内に埋設した熱電対3個を用いて、各荷重位置での試験開始時に温度を計測した。熱電対の深さ方向の位置は、舗装表面から50, 125, 200mmである。

(3) FWD 荷重試験

FWDを用いた荷重試験を行った。このときの地下水位は、静的荷重試験と同様に、RCプレキャスト版の厚さの半分の位置である。

a) 試験方法

最大衝撃荷重は100, 150, 200, 250kNの4段階とした。所定位置において同一最大荷重で重錘の落下を4回

連続して行い、1回目のデータは破棄し、2~4回目のデータを測定値とした。

測定箇所は静的荷重試験の場合と同一であり、試験実施時期は、走行試験前、1,000回走行後、3,000回走行後、5,000回走行後、10,000回走行後の5回とした。FWD荷重試験の状況を写真-30に示す。

b) 計測項目

FWD荷重試験では、FWDに標準装備されている計測装置により荷重とたわみを測定した。このうち、変位は、荷重板中心から-450, -300, 0, 300, 450, 600, 900, 1,500, 2,500mmの9点で実施した。このほか、コンクリート版の温度も静的荷重試験と同様に計測した。

(4) 走行荷重試験

走行荷重試験は、自走式走行荷重試験装置を用いて実施した。この場合の地下水位は他と同様である。

a) 試験方法

走行位置は、図-10に示すように、目地の近傍2箇所である。それぞれの位置で自走式走行荷重試験装置（B747型航空機の主脚）を10,000回（5,000往復）まで走行させた。

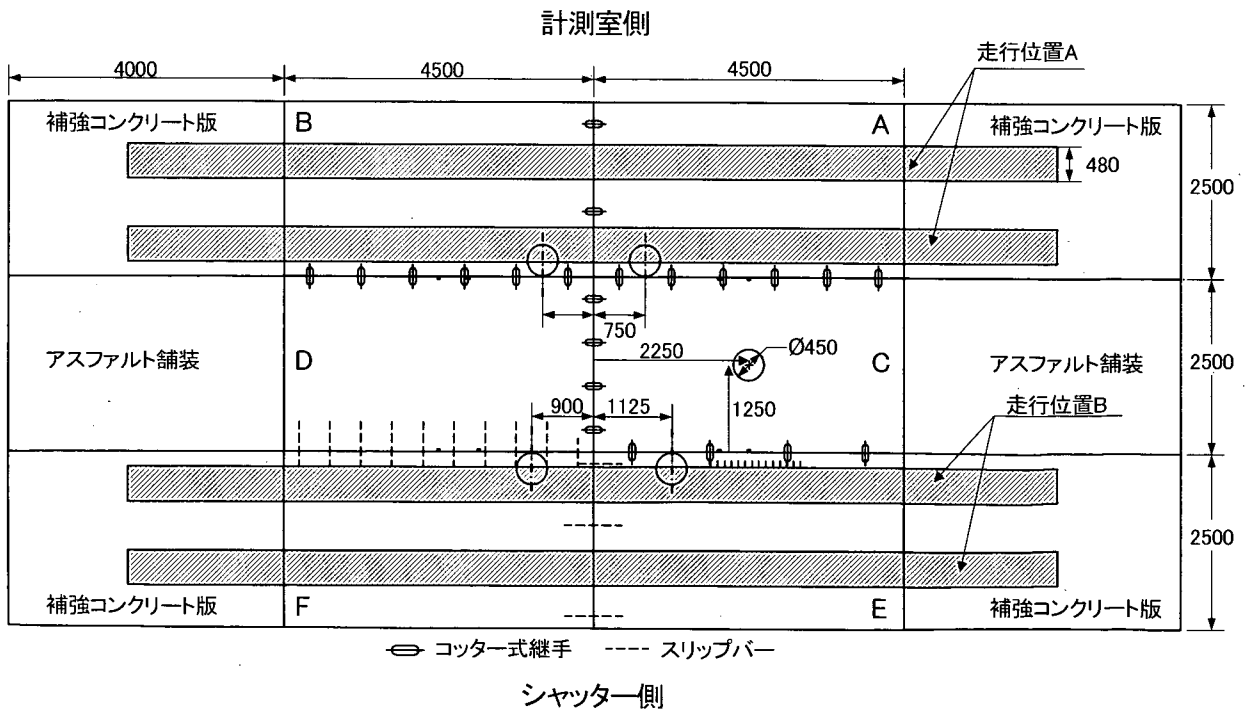


図-10 走行荷重試験実施位置

繰返し走行は2つの走行線上で所定の回数を交互に実施することとした。具体的には、走行線Aにおいて所定回数まで走行させた後に走行線Bにおいて同様に走行させ、その後、静的載荷試験、FWD載荷試験ならびにひび割れ状況調査を実施するというものである。所定の回数としては1,000回、3,000回、5,000回、10,000回を用いた。なお、走行時速は5km/hとし、荷重は910kNとした。写真-31に走行載荷試験の状況を示す。

b) 計測項目

試験方法は、走行載荷試験では、所定の走行回数時に、静的ならびにFWD載荷試験を行ったほかに、ひび割れ調査を実施した。これは、ひび割れ状況をスケッチし、ひび割れ長さ、ひび割れ幅、ひび割れが発生した走行回数を記録するものである。

(5) 版構造試験

上記の一連の載荷試験の終了後、版単体の挙動を調べる版構造試験を実施した。このときの地下水位は路盤以下に下げた。

a) 試験方法

走行試験終了後、C版を周囲の版から切り離し、C版中央部において載荷試験装置の載荷能力限界までの範囲で50kNずつ荷重を増加した。

b) 計測項目

版構造試験における計測項目は、静的載荷試験と同様であるが、各荷重レベルにおいてひび割れも併せて実施した。

4. 試験結果と考察

4.1 継手締付け試験

図-11、図-12、図-13に、最終締付けトルク時におけるコッター式継手周辺のコンクリート版表面におけるひずみ分布を示した。図に示すように、ひずみは、継手部直上付近で引張となり、継手間は圧縮状態となっている。また、継手間の圧縮ひずみは中央に向かって減少する傾向にあるが、750mm～1,125mmの範囲においては零となることはない。コッター式継手間に生じる圧縮ひずみは、平均で 15×10^{-6} 程度である。コンクリートの弾性係数を 35 kN/mm^2 とすると、コンクリート表面に作用している圧縮応力は 0.5 N/mm^2 程度になる。また、継手近傍では引張りひずみが発生しており、その値（絶対値）も圧縮ひずみより大きくなっていることがわかる。

B-D間の継手締付け試験結果として、導入トルクの増加に伴ってコンクリート版表面ひずみが変化する状況を図-14にまとめた。導入トルクが $150 \text{ kN}\cdot\text{m}$ に到達するまではひずみが急激に増加するものの、その後の増加程度はいく分落ち着いたものとなっている。

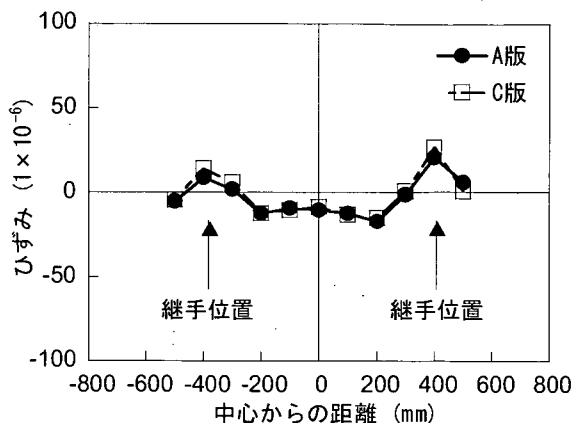


図-11 A-C版継手コンクリート版表面ひずみ

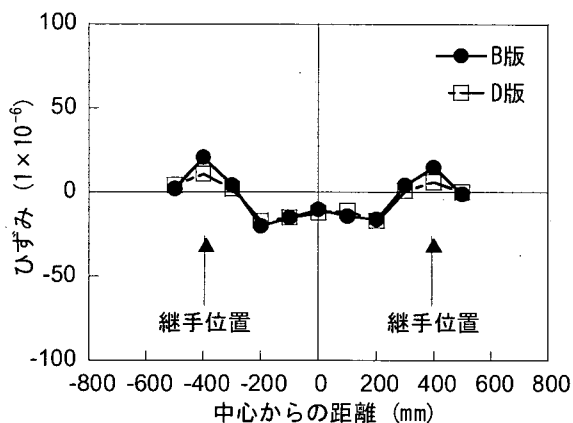


図-12 B-D版継手コンクリート版表面ひずみ

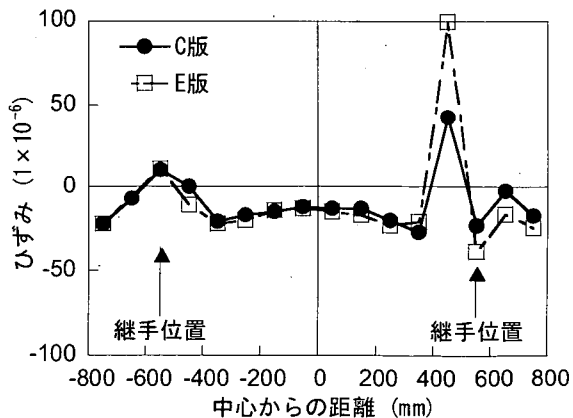


図-13 C-E版継手コンクリート版表面ひずみ

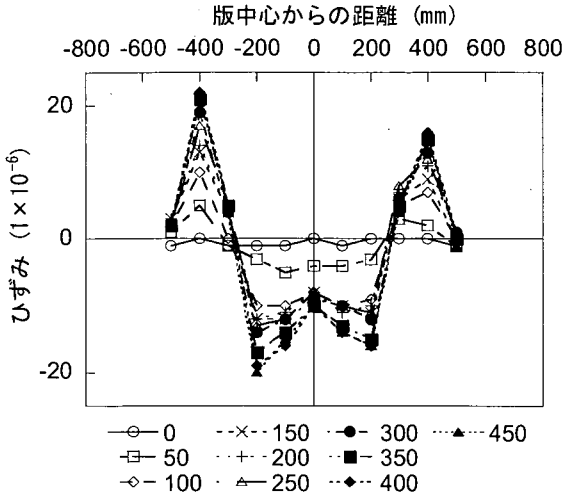


図-14 B-D版継手コンクリート版表面ひずみ

継手近傍で発生している引張ひずみは、最大 20×10^{-6} 程度であり、コンクリートの弾性係数を 35 kN/mm^2 とすると 0.7 N/mm^2 の引張応力がコンクリート表面に生じていることになる。この点を検証すべく、アンカー直上の引張ひずみについて有限要素法を用いて解析を行った。その結果を図-15に示した。計算値自体は実測値より小さいが、最大主応力として 0.19 N/mm^2 (引張) が発生していることがわかる。

導入トルクとH型金物ひずみ(最大ならびに最小主ひずみ)の関係を図-16、図-17、図-18に示す。導入トルクが $250 \text{ kN}\cdot\text{m}$ まではH型金物に生じる引張ひずみは線形に増加する傾向があるが、 $250 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 以上になると急激に増加する傾向が認められる。

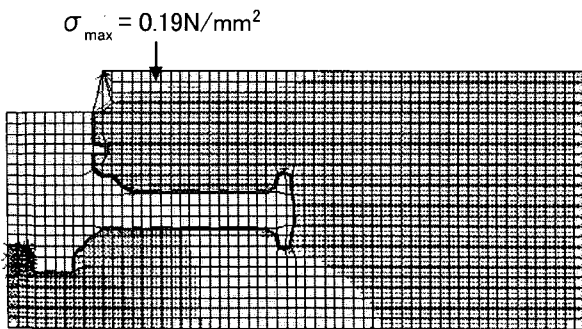


図-15 コッター式継手近傍におけるコンクリート版の応力解析結果

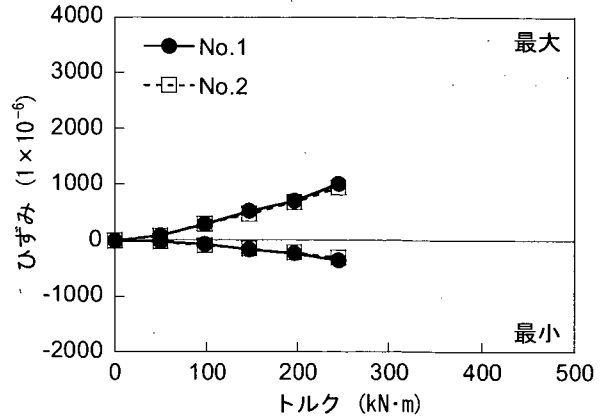


図-16 A-C版H型金物ひずみ

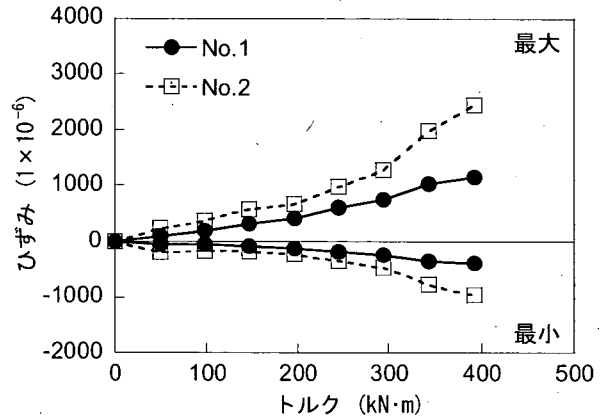


図-17 B-D版H型金物ひずみ

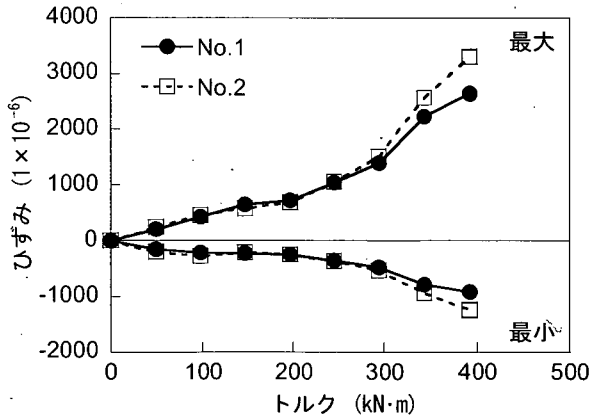


図-18 C-E版H型金物ひずみ

H型金物ひずみから応力を算出して、締付けトルクとの関係を求めた結果を図-19に示した。図中にはH型金物の許容引張応力度 σ_{sa} と降伏応力度 σ_{sy} を示してある。上記のように、導入トルクが $250 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 付近から非線形性がみられたが、これはこの時点で引張応力度が許容引張応力度に達するからであることがわかる。

弾性範囲内でのH型金物の引張応力度とボルトの締付けトルクの関係は次式で表すことができ、コッター式継手における締付け力はトルク値で管理することが可能となる。

$$T = 1.3 \times 10^3 \sigma_s \quad (1)$$

T : トルク (N・mm),
 σ_s : H型金物の引張応力度 (N/mm²).

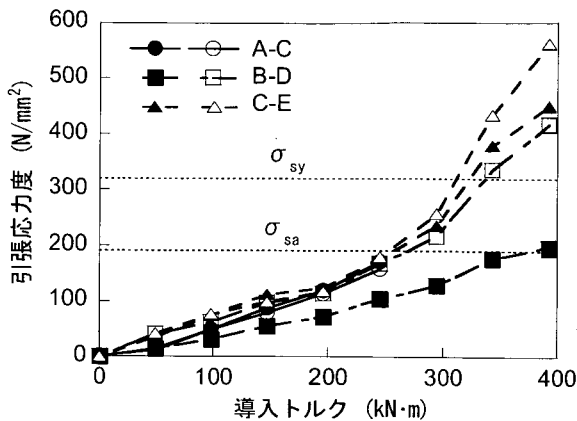


図-19 導入トルクとH型金物引張応力

4.2 舗装載荷試験

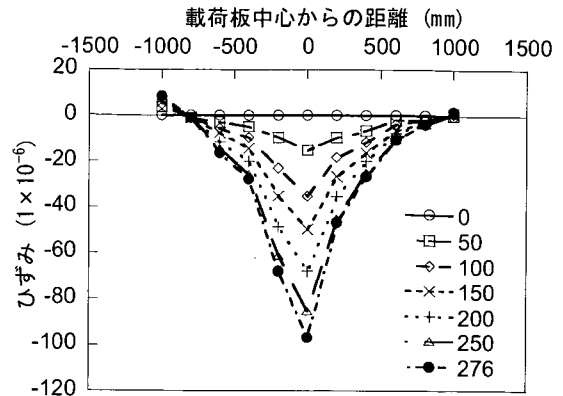
6枚のRCプレキャスト版を連結した構造となっているRCプレキャスト版舗装に対して、航空機主脚荷重による繰返し走行載荷試験を実施した。この試験では所定の走行回数時には静的載荷試験とFWD載荷試験も実施したことから、以下ではこれら一連の試験を総合して記述することにする。

(1) RCプレキャスト版舗装構造

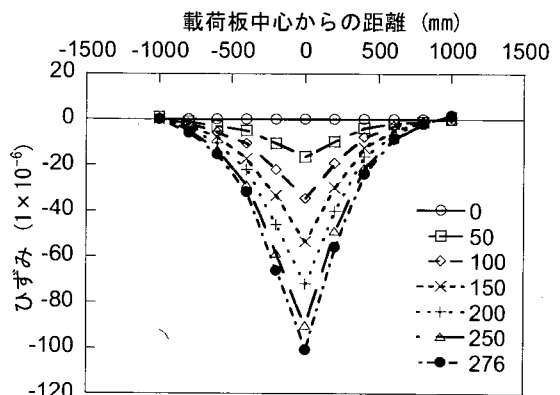
まず、静的載荷試験の結果として、走行載荷試験前のコンクリート版ならびに引張側鉄筋のひずみ分布を図-20、図-21に示す。いずれもRCプレキャスト版の長辺ならびに短辺方向であり、鉄筋ひずみについては引張側のものを示している。これらの最大ひずみが走行載荷の進行につれて変化する状況を図-22に示した。走行載荷によってひずみが増加するようなことはなく、RCプレキャスト版はこの程度の繰返し載荷に対して十分安全であることがわかる。

図-23には、荷重が276kN時のたわみ分布を示す(短辺方向)。この図の載荷板中心のたわみには載荷板の下に敷いたゴム板が影響していると考えられたので破線で示すように補正した。これは載荷板直下のものを除いた値より推定したものである。

FWD載荷試験の結果として、最大たわみ D_0 が走行載荷回数によって変化する状況を図-24に示す。繰返し走行載荷が進行しても最大たわみはほとんど変化することはないことが明らかである。

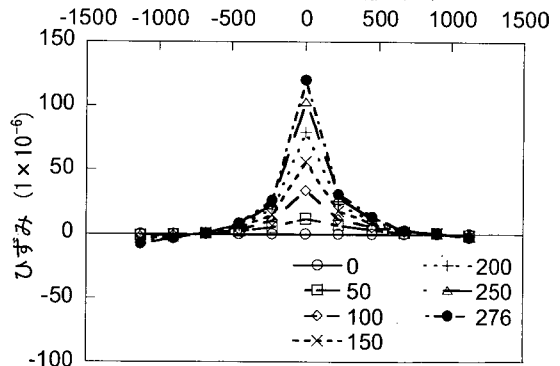


a) 長辺方向

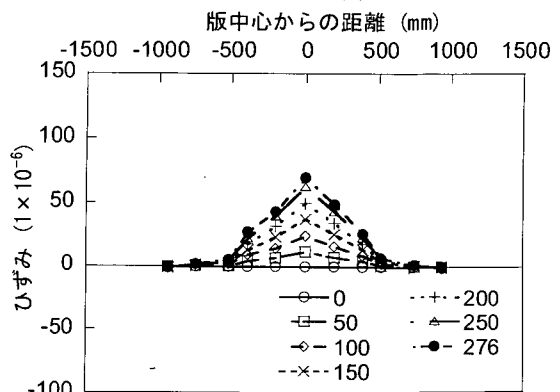


b) 短辺方向

図-20 コンクリート版表面ひずみの分布状況
版中心からの距離 (mm)



a) 長辺方向



b) 短辺方向

図-21 鉄筋ひずみの分布状況

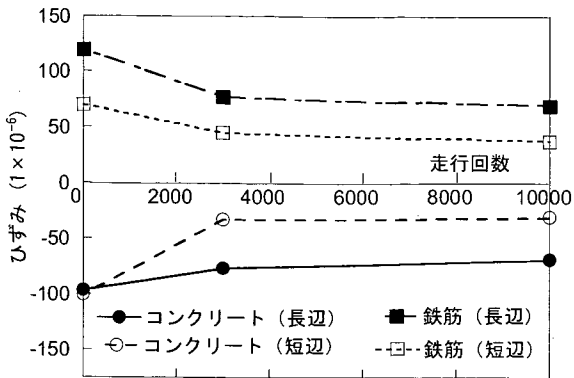


図-22 走行回数と最大ひずみ

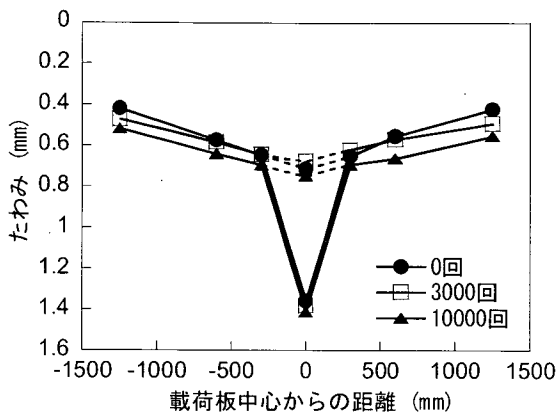


図-23 たわみ分布 (横断方向)

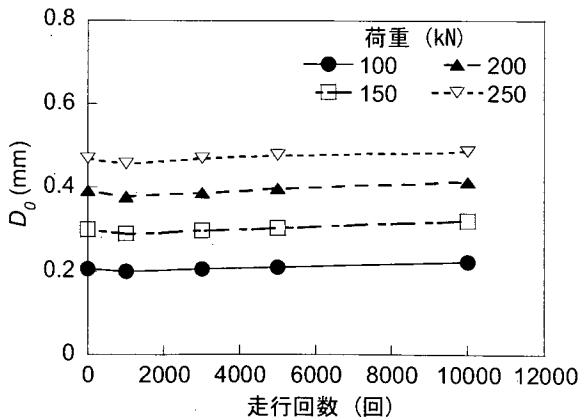
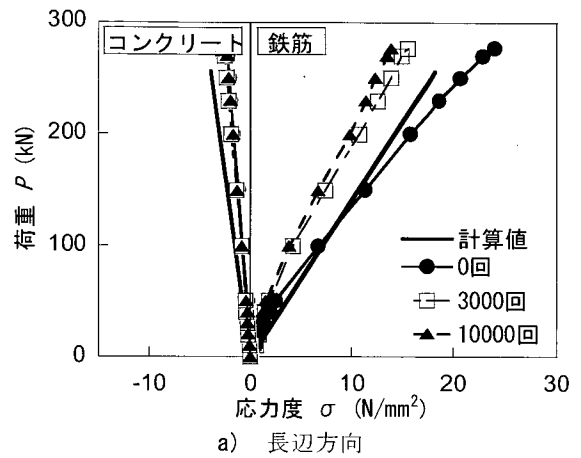


図-24 FWD最大たわみの変化

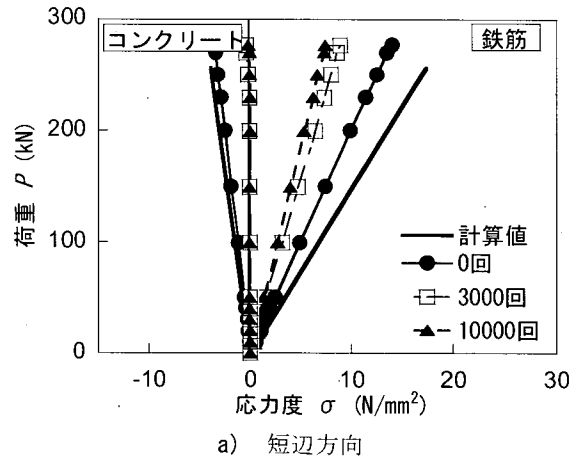
荷重の増加に伴ってコンクリート版のひずみは上記のように増加するが、これに基づいて応力を算定し、計算値と比較した。ここでは、計算値として、空港コンクリート舗装の構造設計で用いられている Westergaard の中央部荷重公式によるものを用いた (全断面有効として)。

図-25にその結果を示した。長辺方向の走行荷重試験前 (0回) における鉄筋の応力度はわずかに計算値を上

回っているものの、その他については設計値あるいはそれ以下に納まっている。したがって、全体的にみると、コンクリート、鉄筋のいずれも実測値と計算値はほぼ合致しているとみなしてよいとわかる。このことから、RCプレキャスト版においては Westergaard 式の適用性が高いとまとめられる。したがって、RCプレキャスト版の構造設計においては、コンクリート版縁応力度と全断面有効時の断面係数を用いてコンクリート版に作用する曲げモーメントを算出し、RC理論を適用すればよいとまとめられる。



a) 長辺方向



a) 短辺方向

図-25 荷重と応力の関係

次に、走行荷重試験におけるひび割れ発生状況をまとめた。その結果を図-26に示す。発生したひび割れの傾向を見ると、C版中央部に発生したひび割れを除くとほとんどが、注入孔、高さ調整孔、コッター式継手の周辺から発生していること、BとD版に集中していることがわかる。

ひび割れは、5,000 回走行後にはじめて観測されていることから、少なくとも走行 3,000 回程度までは RC プレキャスト版は健全な状態であったものと推定される。また、ひび割れ幅に着目すると、5,000 回走行後のひび割れ幅は 0.06mm 以下、10,000 回走行後のひび割れ幅は 0.08mm 以下であり、ひび割れ幅はほとんど拡大せず、しかも 10,000 回の時点でも後述する許容ひび割れ幅 0.2mm よりかなり小さいことがわかる。

走行載荷試験中に、荷重が直接加えられない C 版中央にひび割れが発生した。その原因は、コッター式継手により隣接版 (C 版) に曲げモーメントが伝達された結果、

C 版中央付近に負の曲げモーメント (上面側が引張応力となる) が発生したと推察された。そこで、走行載荷試験時の C 版中央部の応力状態を 3 次元 FEM により解析した。解析モデルとしては 3 次元ソリッドモデルを用い、路盤上に設置されたコンクリート版がコッター式継手により連結されたものを採用した。そのときの解析条件を表-8 に示した。なお、荷重としてはコッター式継手の締付けによる荷重と A 版端部の走行荷重が加わるものとした。走行荷重は 480×320mm の車輪 4 個から成る分布荷重とし、載荷位置を図-27 に示した。

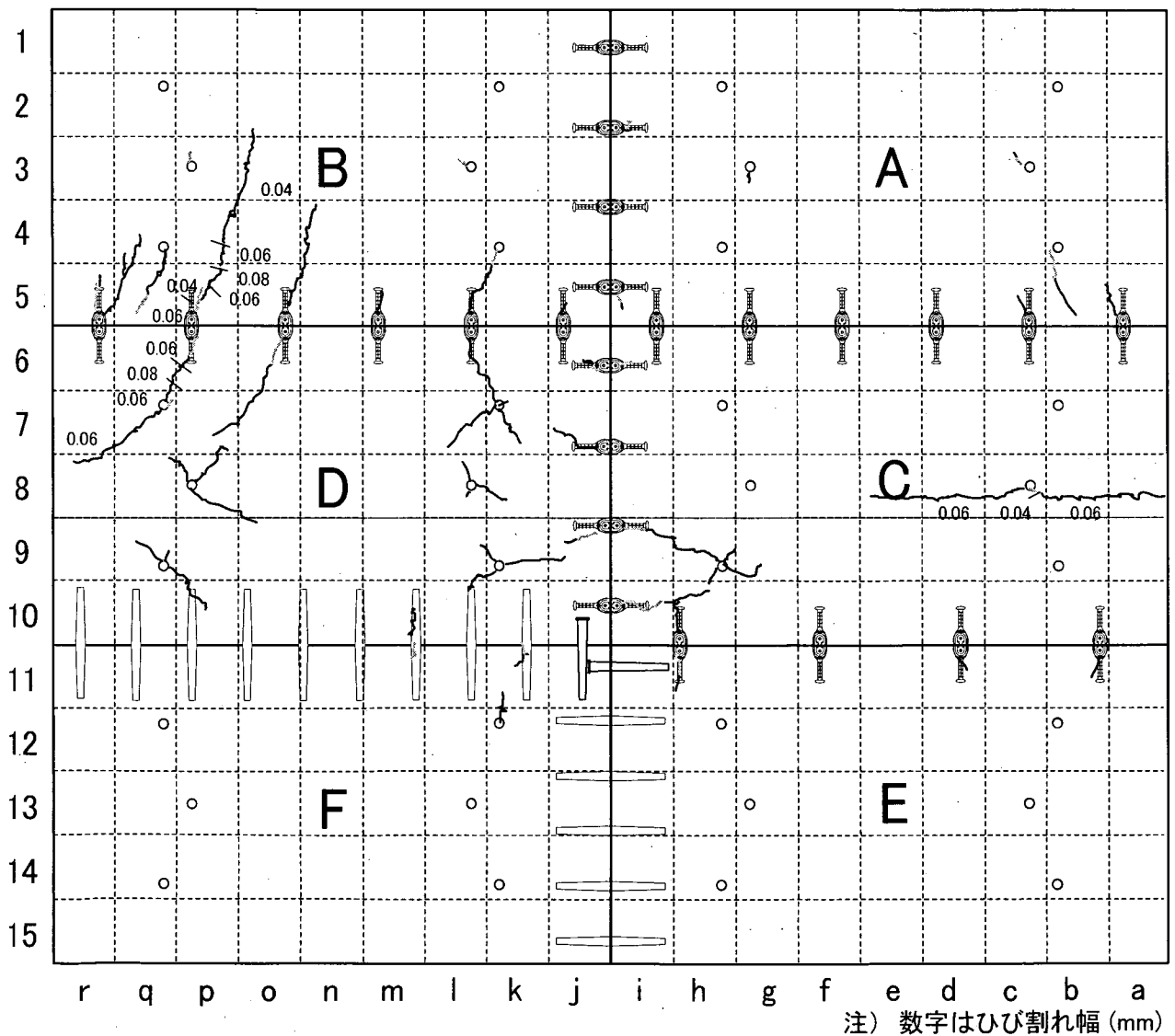


図-26 走行試験におけるひび割れ発生状況

表-8 解析条件

項目		入力値
コンクリート	弾性係数 (kN/mm ²)	35
	ポアソン比	0.15
	水平ばね	節点ごと
継手	弾性係数 (kN/mm ²)	170
	水平ばね (kN/m)	6.04×10 ⁶
	せん断ばね (kN/m)	2.00×10 ⁵
路盤支持力係数 (MN/m ³)		70
荷重	継手荷重 (kN)	304 (A-C版)
	走行荷重 (kN)	512 (A-B, B-D, C-D, C-E版)
		227.5

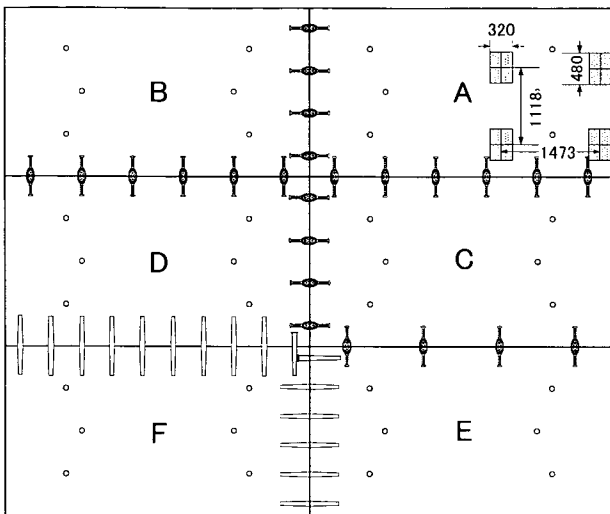


図-27 主脚荷重の載荷位置

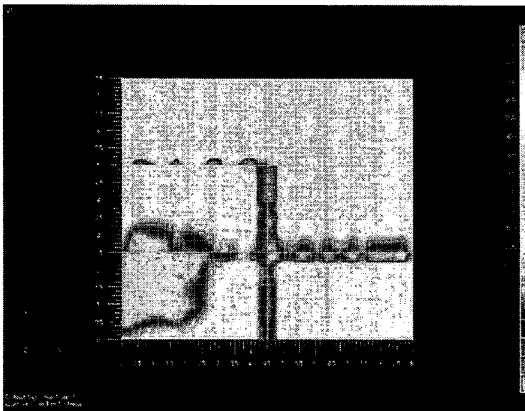
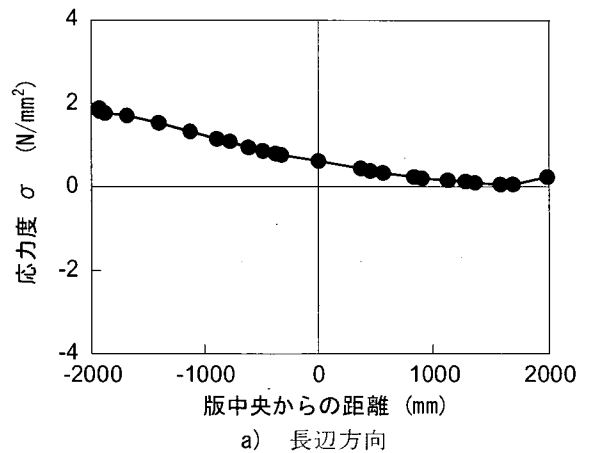


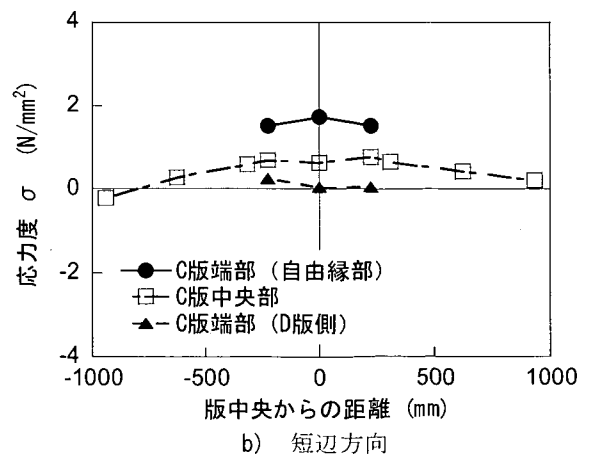
図-28 FEMによるコンクリート版表面の応力度

その結果として得られたA版端部載荷におけるコンクリート版表面の応力度の状況を図-28に示した。また、そのときのC版中央の長辺、短辺方向のひずみ分布を図-29に示した。これにより、C版中央には負の曲げモーメントが発生し、長辺方向で最大2.0 N/mm²程度の引張応力

が発生すること、短辺方向ではC版端部（自由縁部）が最大で2.0N/mm²程度の引張応力となることがわかる。これらの応力度は、コンクリートの許容引張応力度以下ではあるが、繰返し載荷によりひび割れが注入孔などの開口部から発生して、進展したものと考えられる。



a) 長辺方向



b) 短辺方向

図-29 コンクリート版表面の応力度分布

ひび割れが発生することによる版構造の耐久性は、土木学会コンクリート標準示方書 [構造性能照査編] ⁶⁾ の曲げひび割れの検討を用いて照査した。走行載荷試験によって生じた負の曲げモーメントによるひび割れ幅は最大 0.08mm であり、鋼材の種類を異形鋼材、鋼材の腐食性環境に対する環境条件を一般環境とした許容ひび割れ幅 0.2mm に対し、40% と小さく鋼材の腐食については問題ないものと考えられた。正の曲げモーメントによる RC プレキャスト版底面のひび割れは C 版載荷における鉄筋応力からひび割れ幅を算定することによって照査した。この場合のひび割れ幅は 276kN 載荷時の鉄筋最大応力度 21 N/mm² から 0.05mm となった。これは設計値のひび割れ幅 $W=0.088\text{mm}$ を下回ることから十分な耐久性を有していると認められた。

(2) 継手構造

静的載荷試験の結果として、目地部載荷時における目地直角方向のたわみ分布をまとめた。図-30、図-31、図-32、図-33に A-C 版、B-D 版、C-E 版および D-F 版の目地部載荷においてレーザ変位計にて測定した 276kN 載荷時のたわみ分布を示す。各目地部とも、走行載荷の進展につれてたわみは増加しているものの、コッター式継手、特に、A-C 版、B-D 版では 3,000 回と 10,000 回で大きな違いはみられない。これに対して、スリップバー目地 (D-F 版) では繰り返し走行につれてたわみの増加が継続すること、コッター式継手と比較して大きいことがわかる。載荷板下に敷いた硬質ゴム板の影響で載荷板中心のたわみ量が極端に大きくなっているため、他の点のたわみから推定した結果を示すと表-9 のようになる。

次に、図-34、図-35、図-36、図-37に A-C 版、B-D 版、C-E 版および D-F 版の目地部載荷において ϵ ゲージおよびカンチレバー式ゲージにて測定した目地幅を示す。このとき荷重は 276kN である。

表-9 載荷板中心たわみ

走行回数	A-C 版	B-D 版	C-E 版	D-F 版
0	0.891	0.854	0.762	0.693
3,000	0.895	0.933	—	—
10,000	0.945	0.951	1.508	1.105

(単位: mm)

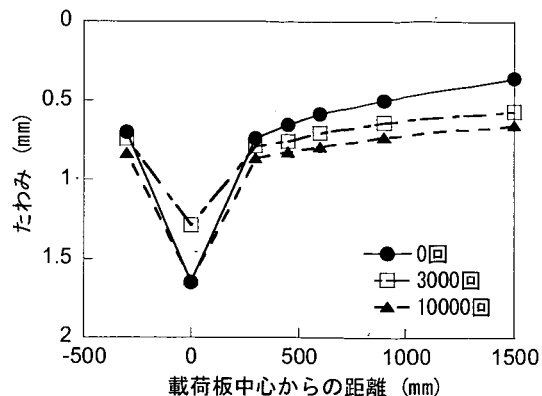


図-30 A-C 版たわみ分布

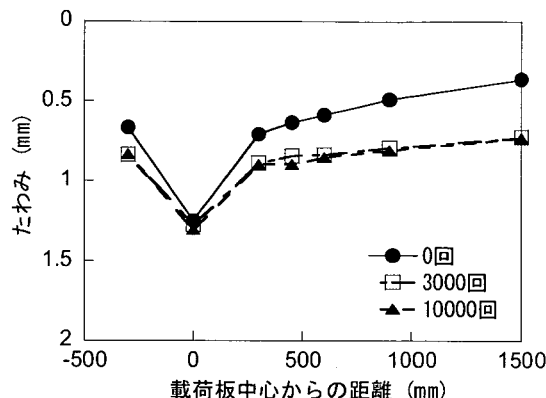


図-31 B-D 版たわみ分布

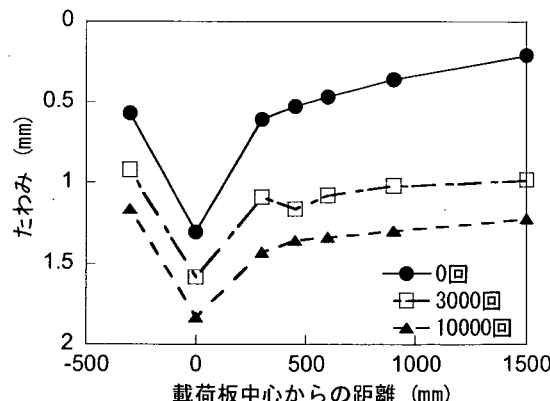


図-32 C-E 版たわみ分布

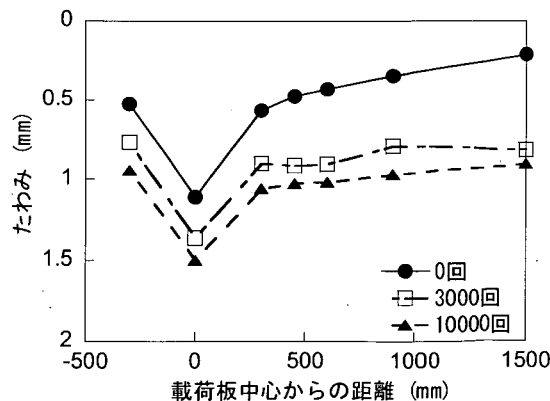
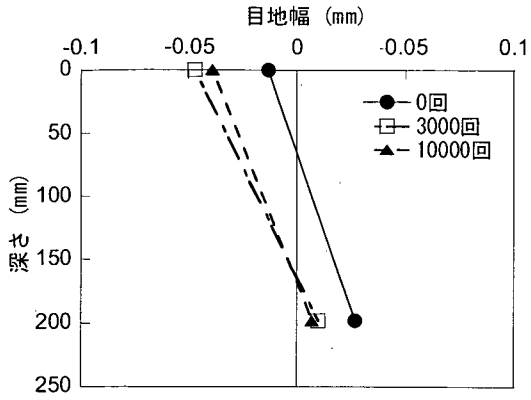
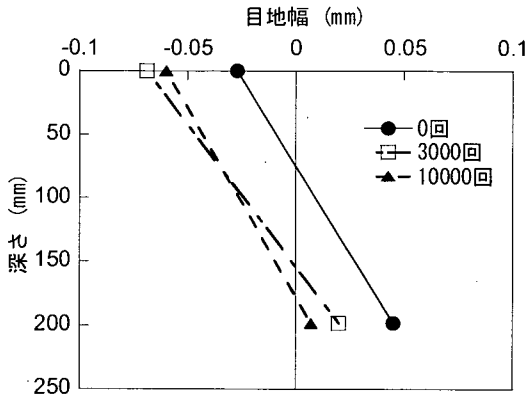


図-33 D-F 版たわみ分布

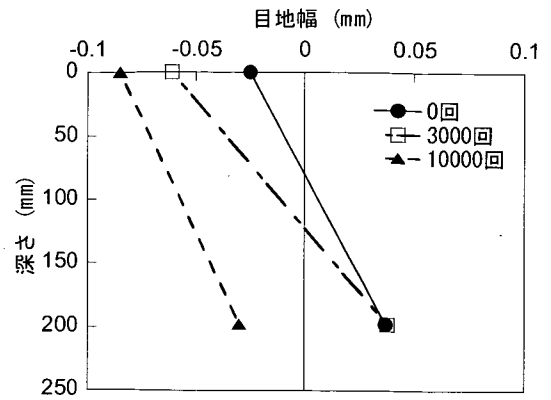


a) 継手間

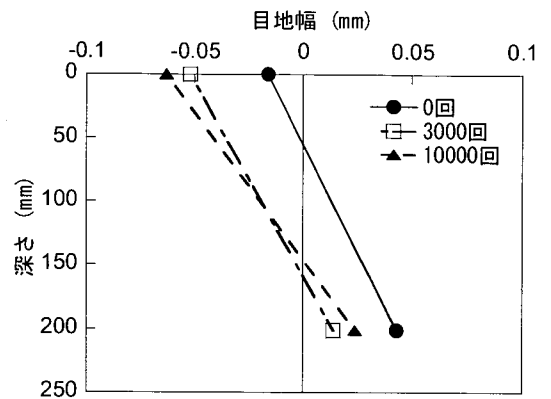


b) 継手付近

図-34 A-C版の目地幅

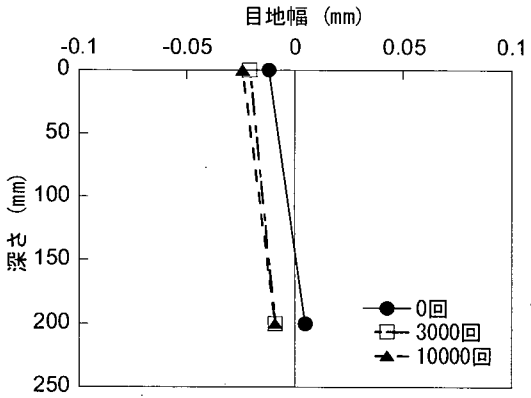


a) 継手間

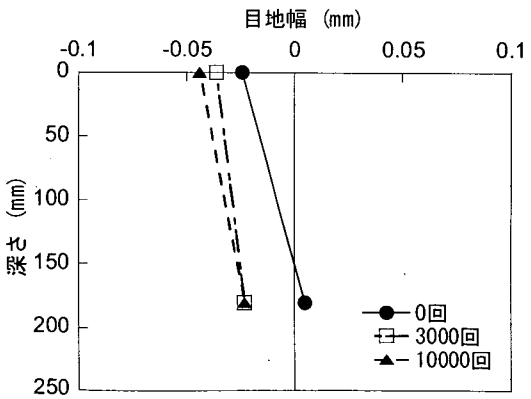


b) 継手付近

図-36 C-E版目地幅

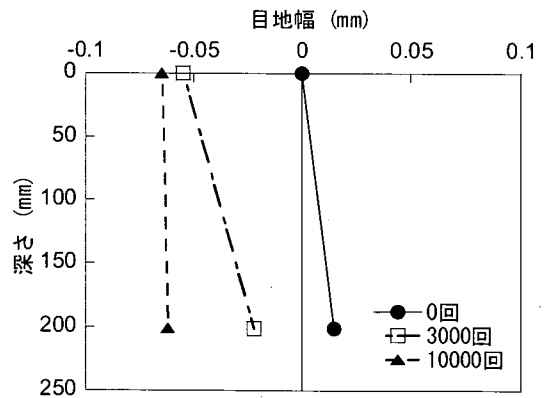


a) 継手間

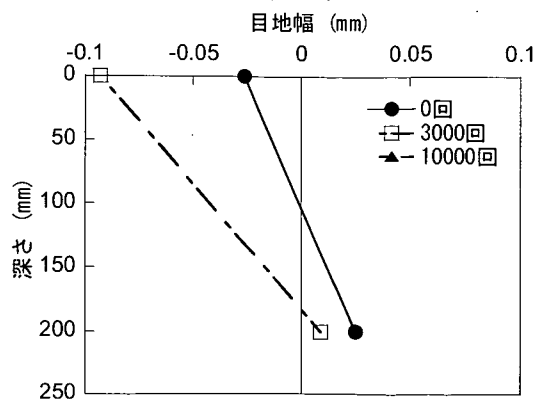


b) 継手付近

図-35 B-D版の目地幅



a) 継手間

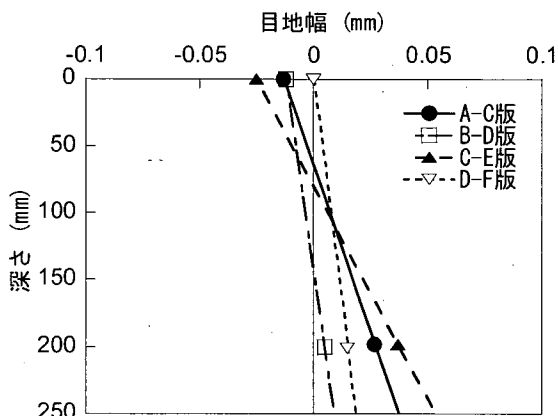


b) 継手付近

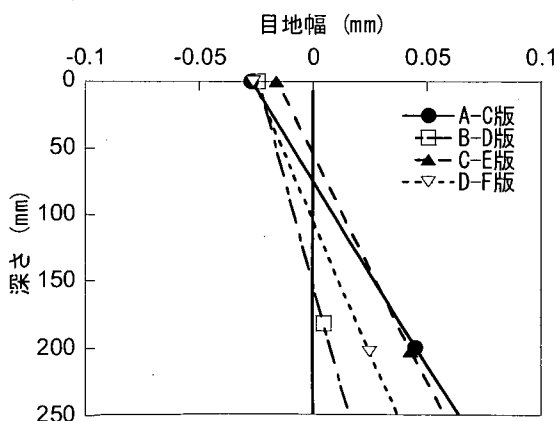
図-37 D-F版目地幅

継手間隔が狭くて導入トルクの大きな B-D 版では、目地幅の変化が小さく、しかも繰返し走行に伴う変化も小さいことがわかる。他のコッター式目地ではコンクリート版上縁で閉じて、下縁で開くといった傾向が顕著であり、繰返し走行により目地幅が変化する程度も大きい。

図-38に目地部載荷時における目地幅の比較を示した(継手間と継手近傍の両方)。継手(スリッパ)間のデータをみればわかるように、コッター式継手は上面で閉じて下面で開いていることから、曲げモーメントが伝達されていることがわかる。またコッター式継手の条件で750mm間隔・トルク30% (A-C版)と1,125mm間隔・トルク60% (C-E版)がほぼ同程度の目地幅を示していることがわかる。



a) 継手 (スリッパ) 間



b) 継手 (スリッパ) 近傍

図-38 目地部載荷時の目地幅の比較

次に、目地部における FWD 載荷試験結果である最大たわみ D_0 をまとめた。図-39、図-40、図-41、図-42は A-C 版、B-D 版、C-E 版および D-F 版における最大たわみと走行回数(回)の関係を示した。なお、このときの D_0 は荷

重を標準荷重 (100, 150, 200, 250kN) に換算した場合の値である。継手間隔の狭いコッター式継手を有する A-C 版ならびに B-D 版では繰返し走行載荷に伴う D_0 の変化は小さいが、継手間隔の広い C-E 版とスリッパ目地 (D-F 版) では比較的变化が大きいことがわかる。

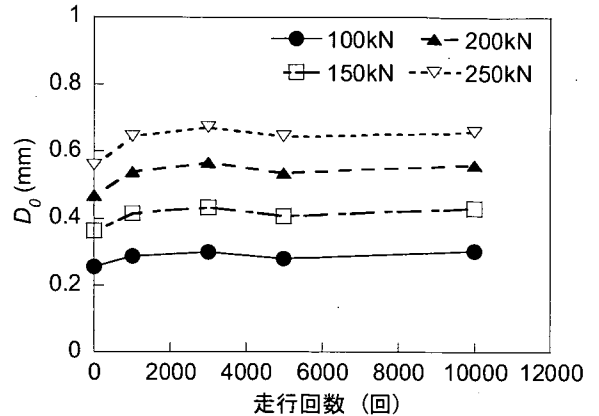


図-39 A-C 版における FWD 最大たわみ

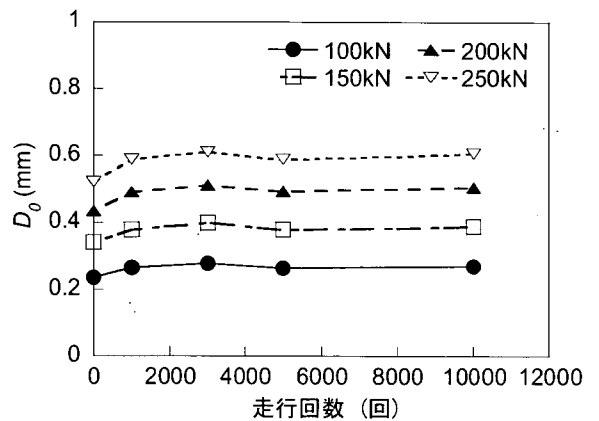


図-40 B-D 版における FWD 最大たわみ

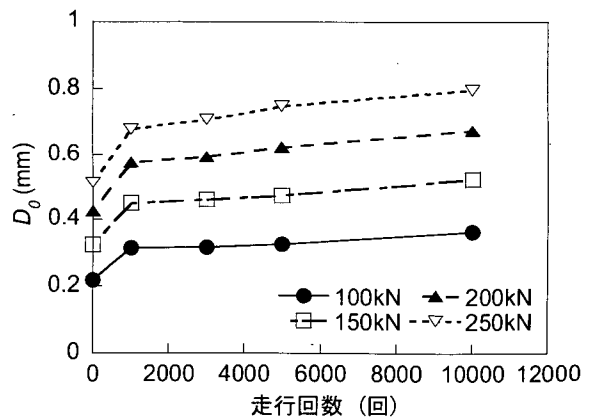


図-41 C-E 版における FWD 最大たわみ

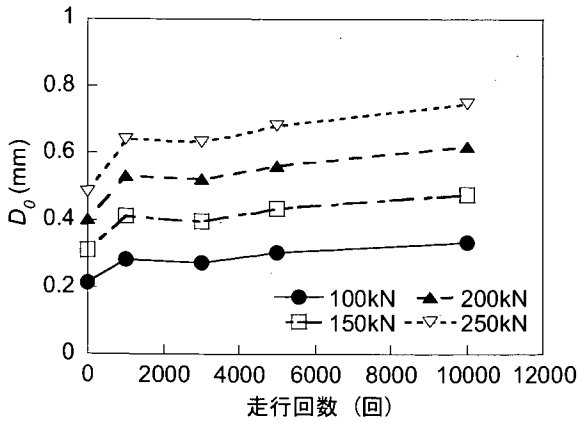


図-42 D-F版におけるFWD最大たわみ

ここで得られたたわみ分布から荷重伝達率を式(2)から算出した⁷⁾.

$$E_f = \frac{D_{450} / \{(D_{450} + D_0) / 2\}}{D'_{450} / \{(D'_{450} + D'_0) / 2\}} \times 100 \quad (2)$$

ここに、 D_{450}, D_0 は目地部、 D'_{450}, D'_0 は版中央部におけるたわみで、添字は載荷板中心からの距離である (D_{450}, D_0 は目地から225mm離れた非載荷側、載荷側のたわみになる)。

算出された荷重伝達率と走行回数との関係を図-43、図-44、図-45、図-46に示す(それぞれ、A-C版、B-D版、C-E版、D-F版)。いずれの目地においても、荷重伝達率は繰り返し走行載荷の初期段階でいく分低下するが、その後10,000回までの走行載荷試験中でも大きく低下するようなことはなく、90%以上の値が確保されている。

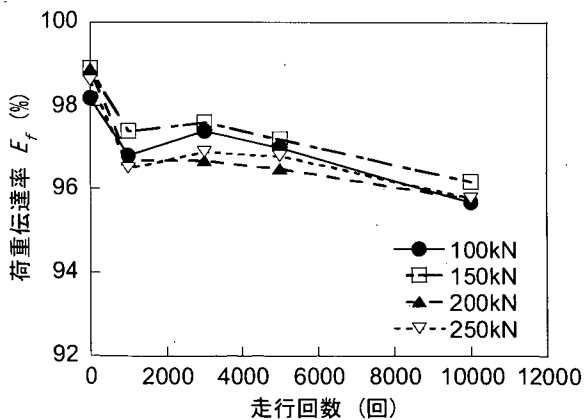


図-43 A-C版の荷重伝達率

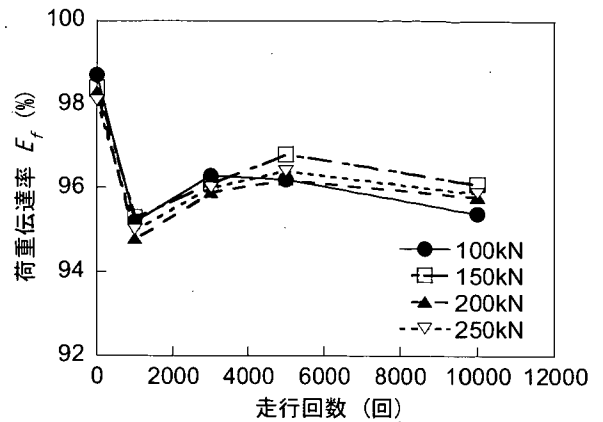


図-44 B-D版の荷重伝達率

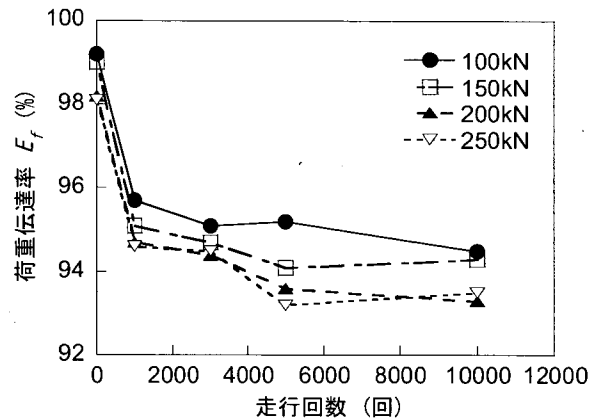


図-45 C-E版の荷重伝達率

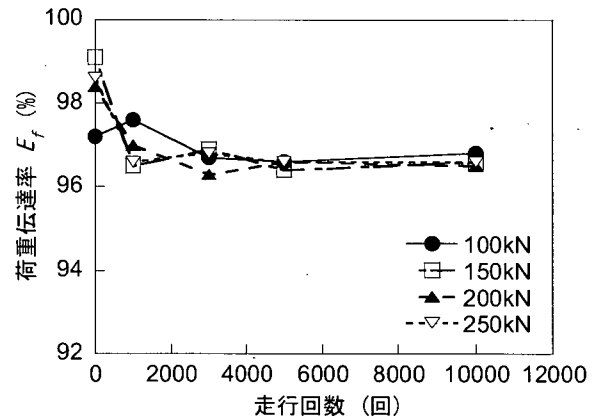


図-46 D-F版の荷重伝達率

図-47に各目地部における荷重伝達率の比較を示した(荷重250kN)。1,125mm間隔でトルク60%のコッター式継手(C-E版)は走行回数5,000回以降荷重伝達率が減少していること、750mm間隔としたものがスリップバー目地と同等の荷重伝達機能を示していることから、コッター式継手においてはその間隔を750mmとすることが妥当であるとわかる。また、コッター式継手間隔の狭いA-C版とB-D版では96%以上の荷重伝達率が確保されていることもわかる。

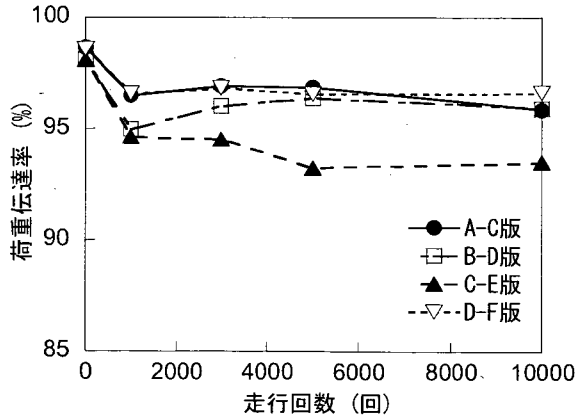
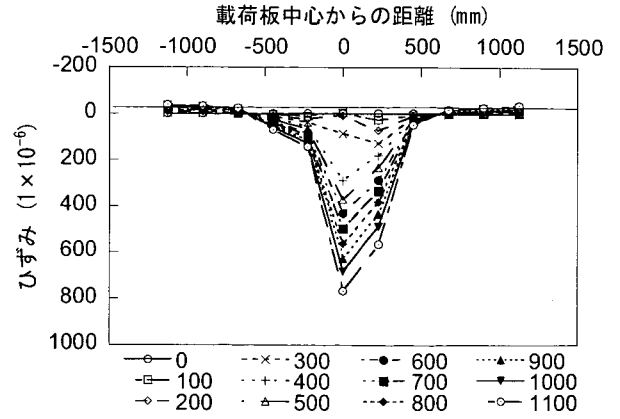
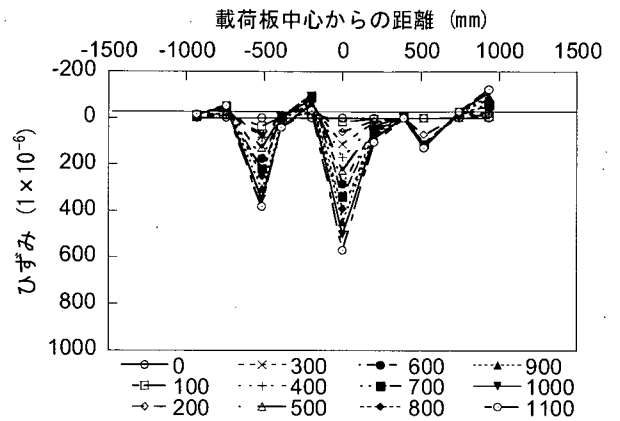


図-47 各目地部における荷重伝達率の比較

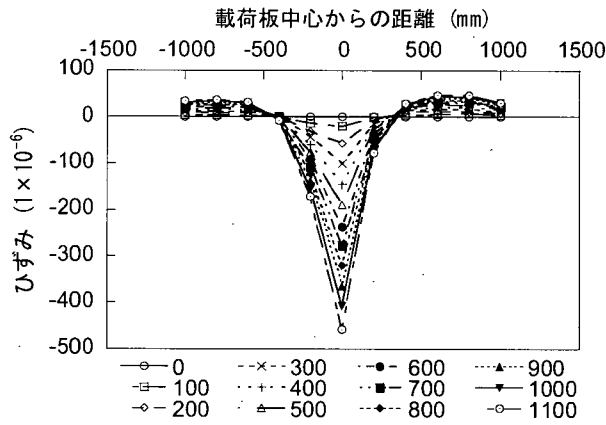


a) 長辺方向

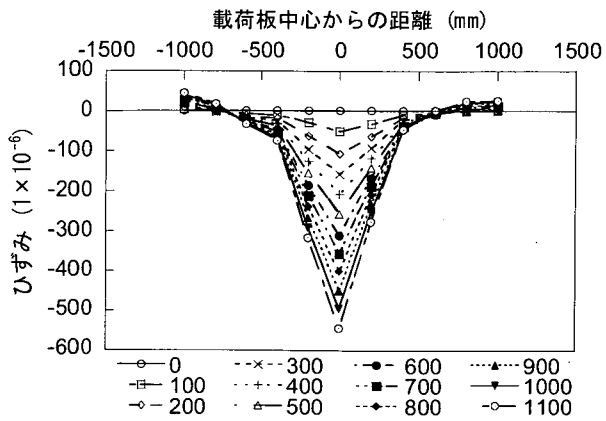


b) 短辺方向

図-49 鉄筋のひずみ分布



a) 長辺方向



b) 短辺方向

図-48 コンクリート版表面のひずみ分布

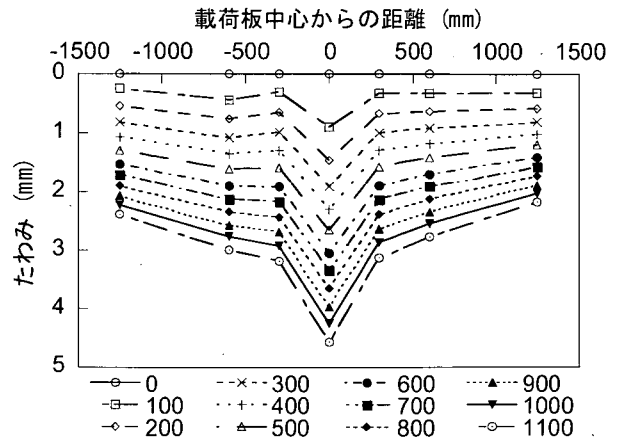


図-50 コンクリート版短辺方向のたわみ分布

4.3 版構造試験

図-48, 図-49に周囲の版との接続を解除した場合のC版単体の版中央部における載荷試験のひずみ分布を示す(それぞれ, コンクリート版, 鉄筋). また, 図-50にたわみ分布を示す.

4.4 まとめ

以上の試験結果を総括して, コッター式継手の標準構造を示すとともに, コッター式継手を用いた高強度 RCプレキャスト版舗装を空港へ適用する場合に注意が必要となる点をまとめる.

(1) コッター式継手の標準

a) 締付トルク

継手周辺の応力度分布をみると、150kN・m以上ではコンクリート版の表面ひずみはあまり増加せず、250kN・mでH型金物の応力度が許容引張応力度に達することがわかる。このことから、コッター式継手の締付けトルクを最大250kN・m程度とすることが妥当であると考えられる。

b) 継手間隔

コッター式継手を有する目地について、設置間隔750mm、締付けトルク30%（H型金物許容引張応力度の）と設置間隔1,125mm、トルク60%を比較すると、両者はほぼ同程度の開閉状況を示すこと、荷重伝達率は後者が若干低いことがわかった。これにより継手間隔は750mmを標準とすればよいものと考えられる。

c) 継手の設計

継手は、スリップバーの設計上の仮定に基づき設計すればよく、このときの1組のコッター式継手が伝達する荷重は、荷重伝達率を96%とみなして、設計荷重の48%とする。

(2) ひび割れへの対応

コッター式継手の剛性を高めることにより、荷重が直接加わらないコンクリート版において負の曲げモーメントが発生し、表面に引張応力が潜在する状態となった。初期の状態ではひび割れ発生までには至らなかったものの、繰返し載荷によって開口部などを起点としてひび割れが発生した。

RCプレキャスト版は、鉄筋コンクリート理論により設計されていることから、ひび割れの発生は構造上問題とはならず、耐久性についてもひび割れ幅を鉄筋により制御することで問題とはならない。一連の試験結果からもひび割れ幅は非常に小さいものであり、通常では問題は生じないと判断できる。しかし、空港舗装においては、開口部などのかぶり部のコンクリートが剥離した場合の航空機などへの影響を考慮すると、ひび割れの進展を抑制する効果のある繊維補強コンクリートなどを使用することが望ましいものと考えられる。

同様に、継手近傍のコンクリートについても局所的な引張応力域が存在し、その値は非常に小さなものではあるが、繊維補強コンクリートなどで補強することがひび割れの進行を防止する上では効果的であると考えられる。このほか、継手の形状を改良することによっても継手近

傍のコンクリートに発生する応力を減少できることが確認されている。

5. RCプレキャスト版舗装の構造設計方針

一連の試験研究を総括するものとして、空港へ適用可能なRCプレキャスト版舗装の構造設計の方針についてまとめた。なお、具体的な構造設計例については、付録に示した。

5.1 RCプレキャスト版

(1) 断面力の算定

断面力は、版厚方向平均温度の変化に起因する軸方向応力、脚荷重ならびに版厚方向の温度変化に起因する曲げ応力から合成応力度を算出し、断面係数を使用して算定することとする。

a) 軸方向応力度 (σ_0)

コンクリート版の温度低下時における収縮が路盤摩擦によって妨げられるため、コンクリート版に軸方向応力 σ_0 （引張応力）が発生する。なお、自由縁部では変形が拘束されないことから軸方向引張応力は発生しないとする。また、温度上昇時における圧縮応力は考慮しない。

$$\sigma_0 = f \cdot w \cdot \frac{L}{2} \quad (3)$$

ここに、

f : 路盤摩擦係数、

w : 単位体積重量(kN/m³)、

L : 1ブロックの縦寸法 (m, 100m以下)。

b) 脚荷重による応力度 ($\sigma_i, \sigma_e, \sigma_c'$)

コンクリート版に脚荷重が載荷される状態として、版中央部、版自由縁部、継手部の3種類を考えた。

i) 中央部載荷時 (σ_i)

Westergaardの中央部載荷公式を使用する。

$$\sigma_i = 0.0547 \frac{P_c}{h^2} \left\{ \left(\frac{b}{\ell} \right)^2 - 10.186 \log \frac{b}{\ell} + 3.714 \right\} \quad (4)$$

ここに、

P : 設計荷重 (kN)、

P_c : 等価単車輪荷重 (kN)、

h : 版厚 (mm)、

a : 等値接地半径 (mm)、

$$b := \sqrt{1.6a^2 + h^2} - 0.675h \quad (a < 1.724h), \quad a(a \geq 1.724h)(\text{mm}),$$

$$\ell : \text{剛比半径}, \quad \left(= \sqrt[4]{\frac{Ec \cdot h^3}{12(1-\nu^2)K_{75}}}, \text{ mm} \right),$$

Ec : コンクリートの弾性係数 (kN/mm²),

K_{75} : 路盤支持力係数 (N/mm³),

ν : ポアソン比.

ii) 自由縁部載荷時 (σ_e)

Westergaard の縁部載荷公式を使用する.

$$\sigma_e = (1 + 0.54\nu) \cdot C \cdot \frac{P_e}{h^2} \left\{ \log\left(\frac{\ell}{10}\right) - 0.75 \log\frac{a}{10} - 0.18 \right\} \quad (5)$$

ここに, C : 係数 (=2.12).

iii) 継手近傍載荷時 (σ_e')

コッター式継手では荷重伝達がなされ, 継手部における荷重による応力度は自由縁部よりも小さくなる. そこで, 自由縁部の応力度に対して荷重伝達効果を表した係数を乗ずることによって継手載荷時の荷重による応力度を算定する.

$$\sigma_e' = \alpha \sigma_e \quad (6)$$

応力の低減係数 α としては, 試験舗装に対する載荷試験において得られた荷重伝達率が 100%に近いほどであったことから, コンクリート標準示方書 [舗装編] を参考にして, 0.6 を用いればよい.

c) そり拘束応力度 (σ_i)

コンクリート版の厚さ方向の温度差によって版はそろうとするが, 自重などによってこれが妨げられるため, コンクリート版にはそり拘束応力が発生する.

i) 版中央部

$$\sigma_{ii} = 0.7 \cdot \frac{Ec \cdot \alpha \cdot \theta}{2(1-\nu)} \quad (7)$$

ここに, α : 線膨張係数 (1/°C),

θ : 版上下面の温度差 (°C).

ii) 版縁部

$$\sigma_{ie} = 0.35 \cdot C_w \cdot \alpha \cdot Ec \cdot \theta \quad (8)$$

ここに, C_w : そり拘束係数.

d) 合成応力度 (σ_c)

以上の a), b), c) の応力度を総合して, コンクリート版下面における合成応力度を算定する. この場合, 温度上昇時と下降時の 2 つを考えて, 前者では脚荷重応力とそり拘束応力度を, 後者では脚荷重応力と路盤摩擦応力を考慮する (表-10).

e) 断面力の算定

コンクリート版に作用する断面力は曲げモーメント M および軸力 N であり, 温度上昇時には曲げモーメントのみが作用し, 温度下降時には, 曲げモーメントと軸力が作用する. ここでは, 安全側を考えて, 断面力は全断面に作用するものとする.

i) 温度上昇時

$$M = (\sigma_i + \sigma_e) \cdot Z \quad (9)$$

ここに, Z : 断面係数 (全断面).

ii) 温度下降時

$$M = \sigma_i \cdot Z \quad (10)$$

$$N = A \cdot \sigma_0 \quad (11)$$

ここに, A : 断面積 (全断面).

表-10 合成応力の算定項目

		曲げモーメント		軸力
		脚荷重応力	そり拘束応力	路盤摩擦による応力
温度上昇時	自由縁部	σ_e	σ_{ie}	—
	版中央部	σ_i	σ_{ii}	—
	継手近傍	σ_e'	σ_{ii}	—
温度下降時	自由縁部	σ_e	—	—
	版中央部	σ_i	—	σ_0
	継手近傍	σ_e'	—	σ_0

(2) コンクリート版の設計

a) 版本体の応力度の検討

コンクリート版の応力度は上記のように RC 理論によって算出し、許容応力度設計法を用いて、鉄筋およびコンクリートの応力度がそれぞれの許容応力度以下になるようにする。

b) コンクリート版下面のひび割れ幅の検討

コンクリート版下面のひび割れ幅 w_c は、コンクリート標準示方書のひび割れ幅の算定式を用いて算出し、それが空港舗装構造設計要領記載の連続鉄筋コンクリート舗装における値以下であるようにする。

$$w_c = k \{4c + 0.7(C_s - \phi)\} \left[\frac{\Delta\sigma}{E_s} + \varepsilon'_{cs} \right] \quad (12)$$

ここに、

k : 鋼材の付着性状の影響を表す定数、

c : かぶり (mm)、

C_s : 鋼材の中心距離 (mm)、

ϕ : 鋼材の直径 (mm)、

$\Delta\sigma$: 増加応力度 (N/mm²)、

E_s : 鋼材の弾性係数 (N/mm²)、

ε'_{cs} : コンクリートの乾燥収縮およびクリープによるひび割れ幅の増加を考慮するための数値。

c) 表面ひび割れ発生荷重の検討

コンクリート版表面のひび割れ発生荷重 P_c については、PC 舗装の場合と同様の算定式を用いて算定し、設計荷重に対して所定の安全率 SF (ここでは 1.25) を確保できるようにする。

$$P_c = \left\{ \frac{4\pi}{1 - 4a/(3b')} + \frac{1.8(S - S_r)}{\ell - a/2} \right\} (M_r + M'_r) \quad (13)$$

ここに、

S : 複々車輪の横中心間隔 (mm)、

S_r : 複々車輪の縦中心間隔 (mm)、

b' : $= 3.9\ell$ 、

M_r : ひび割れ抵抗モーメント ($= Z \cdot (\sigma_{cut} - \sigma_t)$, N・mm)、

M'_r : 破壊抵抗モーメント $= M_r$, N・mm)、

σ_{cut} : 許容曲げ引張強度 (N/mm²)。

$$SF = \frac{P_c}{P_e} > 1.25 \quad (14)$$

d) たわみの検討

路床・路盤の耐久性については脚荷重が RC プレキャスト版舗装に載荷されたときのたわみを計算し、これが許容

値以下にあるようにする。ここでは版中央部に関してたわみ w を算定する。

$$w = \frac{P_c \cdot \ell^2}{8D} \left[1 - a_k^2 \{0.217 - 0.367 \log_e(a_k)\} \right] \quad (15)$$

ここに、

D : 版の単位幅当りの曲げ剛性 ($= \frac{E_c \cdot h^3}{12(1 - \nu^2)}$, kN・mm),

a_k : 荷重分布パラメータ ($= a/\ell$)。

5.2 コッター式継手

コッター式継手の構造設計は、空港コンクリート舗装で一般的に用いられているスリップバーの構造設計法を一部修正することにより用いる。

(1) 継手構造ならびに間隔の検討

空港舗装構造設計要領に記載されている方法ではスリップバーは、次の仮定の元に設計されている。

- ① 荷重中心から舗装の剛比半径の 1.8 倍以上の距離にあるスリップバーは荷重を伝達しない。
- ② スリップバーの荷重伝達能力は、荷重中心からの距離に応じて直線的に減少する。
- ③ スリップバー群の荷重伝達能力は設計荷重の 40% とする。

コッター式継手についても上記の仮定を元に設計するが、③のコッター式継手群の荷重伝達能力を設計荷重の 48% とする。また、1 本のコッター式継手が伝達する荷重についてはせん断耐力の 1/3 とする。

$$P_a = \frac{V}{\gamma} \quad (16)$$

$$S = \frac{1.8 \cdot \ell \cdot P_a}{0.48 \cdot P'_e} \quad (17)$$

ここに、

P_a : 1 本のコッター式継手が伝達する荷重 (N)、

V : 1 本のコッター式継手のせん断耐力 (N)、

γ : 安全率 ($= 3$)、

S : 継手間隔 (mm)、

ℓ : 舗装の剛比半径 (mm)、

P'_e : 輪荷重 (N)。

(2) 軸方向引張力に対する H 型金物の応力度の照査

コンクリート版の温度が下降するときには、コンクリート版の収縮が路盤摩擦により拘束されるため、継手には引張力が作用する。軸引張力に対して、H 型金物の応力度とアンカー長について照査する。

a) H型金物の応力度 (σ_H) の算定

$$\sigma_H = \frac{f \cdot A_{CH} \cdot w \cdot \frac{L}{2}}{A_H} \quad (18)$$

ここに、

A_{CH} : コッター式継手 1 個当りのコンクリート断面積 (mm),

A_H : H型金物の断面積 (mm),

N_H : コッター式継手 1 個当りの軸方向引張力
($= \sigma_H \cdot A_H \cdot N$).

b) C型金物アンカー長の算定

$$L_H = \frac{N_H}{\sigma_{bok} \cdot l_{sa}} \quad (19)$$

ここに、

L_H : アンカー長 (mm),

σ_{bok} : コンクリートの付着強度 (N/mm²),

l_{sa} : アンカーの周長 (mm).

6. まとめ

本研究では、空港を対象とした RC プレキャスト版舗装の開発にあたって、試験施工による実証を行った。以下に主な結論を示す。

(1) RC プレキャスト版構造について

C版中央部および注入孔周辺において 5,000 回走行後にひび割れが発生したが、10,000 回走行後でもひび割れ幅は 0.08mm 以下であった。FEM による解析結果から、このひび割れは、走行試験により版表面に曲げ応力が繰返し発生し、注入孔等からひび割れが発生して、進展していったものと考えられた。

このようなひび割れが発生した状況であっても、版構造の耐久性は十分であることが確認された。また、走行試験による 10,000 回の繰返し走行後における荷重試験によっても十分な耐久性を有していることが実証された。

(2) 目地構造について

静的荷重試験における各継手部の目地幅の測定結果から、コッター式継手は上面で閉じ、下面で開いていることから曲げモーメントが伝達されていることが確認された。また、10,000 回の繰返し走行後における荷重伝達率も 96% 程度を示すことから、耐久性は十分であることが実証された。

7. おわりに

以上、高強度 RC プレキャスト版舗装の空港への適用性についてまとめた。RC プレキャスト版の表面に発生するひび割れをより低減させるため繊維補強コンクリートで補強する対策を講ずる必要があるものとしたが、今後はその効果を確認するとともに、施工方法の改善等によりさらなる建設費用の低減を図る必要があると考えている。

なお、本資料は、国土交通省国土技術政策総合研究所、株式会社ガイアートクマガイ、ジオスター株式会社の三者の共同研究の成果をまとめたものである。計画、試験、解析、とりまとめに関わった関係各位に感謝申し上げる。

参考文献

- 1) 佐藤勝久, 福手 勤, 山崎英男, 犬飼晴雄: ホーンジョイントによる PC プレキャスト版舗装の開発, 港湾技術研究所報告, 第 19 巻, 第 4 号, pp.101-128, 1980 年.
- 2) 八谷好高, 野上富治, 横井聰之, 赤嶺文繁, 坪川将丈, 松崎和博, 高橋 修, 室園正徳, 阿部 寛: プレキャスト PC 版舗装を対象とした圧縮ジョイントの構造設計法, 国土技術政策総合研究所研究報告, 第 3 号, 41p., 2001.
- 3) 渡瀬 伸, 高山善典, 伊藤彰彦, 神谷裕之: 高強度 RC プレキャスト舗装版の開発と一般道交差部への急速施工, セメント・コンクリート, No.670, pp.8-15, 2002.
- 4) 運輸省航空 (監): 空港舗装構造設計要領, (財) 港湾空港建設技術サービスセンタ, 147p., 1999.
- 5) 土木学会コンクリート委員会 (編): コンクリート標準示方書 [舗装編], 212p., 2002.
- 6) 土木学会コンクリート委員会 (編): コンクリート標準示方書 [構造性能照査編], 257p., 2002.
- 7) 山埜井明弘, 加形 護, 川上淳仁, 萩島 徹, 宮本辰夫, 渡辺夏也: RCCP の荷重伝達率の評価, 土木学会第 46 回年次学術講演会概要集第 V 部, pp.128-129, 1991.

付録 RC プレキャスト版舗装の構造設計例

1. 設計条件

設計条件は以下のとおりである

(1) 形状

ブロック辺長: 55.9m

コンクリート版寸法: 幅 2.290m, 長さ 13.990m

版厚 h : 240 mm

(2) 荷重

設計航空機：B747-400

車輪配置：複々車輪 ($S : 1,118 \text{ mm}$, $S_T : 1,473 \text{ mm}$)

脚荷重 (満載時) $P : 910 \text{ kN}$

等価単車輪荷重 $P_e : 246 \text{ kN}$

車輪の接地圧 $p : 1.38 \text{ N/mm}^2$

タイヤ接地半径

$$a : 238 \text{ mm} (= \sqrt{\frac{246 \times 10^3}{1.38 \times \pi}})$$

$$b : 223 \text{ mm} (= \sqrt{1.6 \times 223^2 + 240^2} - 0.675h)$$

(3) 路盤支持力係数 $K_{75} : 70 \text{ N/m}^3$

(4) 剛比半径 $\ell : 876 \text{ mm}$ ($= \sqrt[4]{\frac{35 \times 240^3}{12(1-0.15^2) \times 0.07 \times 10^{-3}}}$)

(5) 路盤摩擦係数 $f : 1.0$

(6) 版の温度差 $\theta : 17^\circ\text{C}$ (温度上昇時), 9°C (温度下降時)

(7) 材料特性値

a) 版構造

i) 高強度コンクリート

設計基準圧縮強度 60 N/mm^2

設計基準引張強度 3.5 N/mm^2

設計基準曲げ引張強度 6.4 N/mm^2

許容曲げ圧縮応力度 20 N/mm^2

弾性係数 35 kN/mm^2

ポアソン比 0.15

単位体積重量 25 kN/m^3

線膨張係数 $1.0 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$

ii) 鉄筋

許容引張応力度 230 N/mm^2

弾性係数 200 kN/mm^2

b) 継手構造

せん断耐力 $V : 210 \text{ kN}$

せん断耐力に対する安全率 $\sigma = 3$

輪荷重 $P_e : 288 \text{ kN}$

2. コンクリート版

(1) 断面力の算定

a) 軸方向応力度 (σ_0)

$$\sigma_0 = 1.0 \times 25 \times \frac{55.9}{2} = 0.70 \text{ N/mm}^2$$

b) 脚荷重による応力度 (σ_i , σ_e , σ_e')

i) 中央部載荷時

$$\sigma_i = 0.0547 \frac{246 \times 10^3}{240^2} \left\{ \left(\frac{223}{876} \right)^2 - 10.186 \log_e \frac{223}{876} + 3.714 \right\} = 4.14 \text{ N/mm}^2$$

ii) 縁部載荷時

$$\sigma_e = (1 + 0.54 \times 0.15) \cdot 2.12 \cdot \frac{246 \times 10^3}{240^2} \left\{ \log \left(\frac{876}{10} \right) - 0.75 \log \frac{238}{10} - 0.18 \right\} = 7.15 \text{ N/mm}^2$$

iii) 継手付近載荷時

$$\sigma_e' = 0.60 \times 7.15 = 4.29 \text{ N/mm}^2$$

c) そり拘束応力度 (σ_r)

i) 版中央部

$$\sigma_{ri} = 0.7 \times \frac{35 \times 10^3 \times 1.0 \times 10^{-5} \times 17}{2 \times (1 - 0.15)} = 2.45 \text{ N/mm}^2$$

ii) 版縁部

$$\sigma_{re} = 0.35 \times 1.0 \times 1.0 \times 10^{-5} \times 35 \times 10^3 \times 17 = 2.08 \text{ N/mm}^2$$

iii) 継手近傍

$$\sigma_{rri} = \sigma_{ri} = 2.45 \text{ N/mm}^2$$

d) 合成応力度 (σ_c)

表-付1に示すとおり.

e) 断面力の算定

i) 温度上昇時

曲げモーメント M のみを考慮する.

α) 版中央部 $M_i = 6.59 \times 9.6 \times 10^6 \approx 63.3 \text{ kN} \cdot \text{m}$

β) 縁部 $M_e = 9.23 \times 9.6 \times 10^6 \approx 88.6 \text{ kN} \cdot \text{m}$

γ) 継手部 $M_{co} = 6.74 \times 9.6 \times 10^6 \approx 64.7 \text{ kN} \cdot \text{m}$

ii) 温度下降時

曲げモーメント M と軸力 N の両方を考慮する.

① 軸力 $N = 1,000 \times 240 \times 0.70 = 168 \text{ kN}$

α) 版中央部 $M_i' = 4.14 \times 9.6 \times 10^6 \approx 39.7 \text{ kN} \cdot \text{m}$

β) 縁部 $M_e' = 7.15 \times 9.6 \times 10^6 \approx 68.6 \text{ kN} \cdot \text{m}$

γ) 継手部 $M_{co}' = 4.29 \times 9.6 \times 10^6 \approx 41.2 \text{ kN} \cdot \text{m}$

(2) 構造設計

a) コンクリート版の応力度・下面ひび割れ幅の検討

検討結果を表-付2に示す.

表-付1 合成応力度の算定

		曲げモーメント			軸引張力
		脚荷重応力度	そり拘束応力度	合成応力度	路盤摩擦による応力度
温度上昇時	自由縁部	7.15	2.08	9.23	—
	版中央部	4.14	2.45	6.59	—
	継手近傍	4.29	2.45	6.74	—
温度下降時	自由縁部	7.15	—	7.15	—
	版中央部	4.14	—	4.14	0.70
	継手近傍	4.29	—	4.29	0.70

(単位：N/mm²)

表-付2 コンクリート版の応力度

項目	温度上昇時			温度下降時		
	自由縁部	継手近傍	版中央部	自由縁部	継手近傍	版中央部
断面力 M (kN・m)	88.6	64.7	63.3	68.6	41.2	39.7
N (kN)	—	—	—	—	-168	-168
中立軸 x (mm)	59.6	59.6	59.6	59.6	47.7	47.4
応力度 σ_c (N/mm ²)	17.4<20	12.7<20	12.5<20	13.5<20	8.1<20	7.8<20
σ_s (N/mm ²)	210<230	153<230	150<230	162<230	133<230	129<230
ひび割れ幅 (mm)	0.16<0.5	0.12<0.5	0.12<0.5	0.12<0.5	0.11<0.5	0.10<0.5

b) 表面ひび割れ発生荷重の検討

$$P_v = \left\{ \frac{4\pi}{1-4 \times 238 / (3 \times 3.9 \times 876)} + \frac{1.8(1,118+1,473)}{876-238/2} \right\} (50,850,000 + 50,850,000)$$

$$= 2,035 \text{ kN} \cdot \text{mm}$$

$$SF = \frac{2,035}{910} = 2.23 > 1.25$$

c) たわみの検討

$$w = \frac{246 \times 876^2}{8 \times 41.25 \times 10^6} \times [1 - 0.272^2 \times \{0.217 - 0.367 \log_e 0.272\}]$$

$$= 0.54 \text{ mm} < 1.25 \text{ mm}$$

d) RCプレキャスト版の構造

以上の検討により図-付1に示すものが決定された。

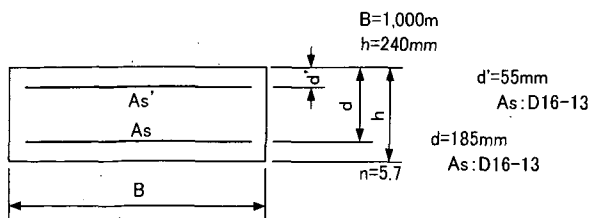


図-付1 決定された構造

2. 継手

(1) コッター式継手の間隔

$$P_v = \frac{210,000}{3} = 70,000 \text{ N}$$

$$S = \frac{1.8 \times 876 \times 70,000}{0.48 \times 288,000} = 798 \text{ mm}$$

以上の結果から、コッター式継手の間隔としては750mmとすればよい。

(2) H型金物応力度の照査

H型金物の応力度については、次のように、安全性が満足できる。

$$\sigma_H = \frac{1.0 \times 0.75 \times 0.24 \times 25 \times \frac{55.9}{2}}{0.0016}$$

$$= 78.61 \text{ N/mm}^2 < 190 \text{ N/mm}^2$$

C型金物のアンカー長については、次のように、300mを確保すればよい。

$$N_H = 78.61 \times 1,600 = 125,776 \text{ N}$$

$$L_H = \frac{125,776}{4.2 \cdot 110} = 272 \text{ mm}$$