

7. 試験施工の性能評価

7.1 オーバーレイ舗装の構造解析

航空機脚荷重や温度条件を考慮して、コンクリートオーバーレイを施した舗装の構造解析を実施した。解析手法としては、新旧コンクリート界面の付着程度や目地の影響を考慮するために、三次元有限要素法を用いた。

(1) ばね係数の決定

新旧コンクリート界面の付着程度を考慮するために、界面にばね要素（垂直ならびに水平方向）を挿入した舗装構造モデルを使用して解析を実施することとした。この解析では、界面に挿入するばね要素のばね係数の設定は、解析結果に大きな影響を与えると考えられることから、室内試験結果ならびに室内試験条件をモデル化した解析結果を基に決定することとした。この室内試験条件をモデル化した解析では、汎用有限要素解析プログラム NASTRAN を使用した。

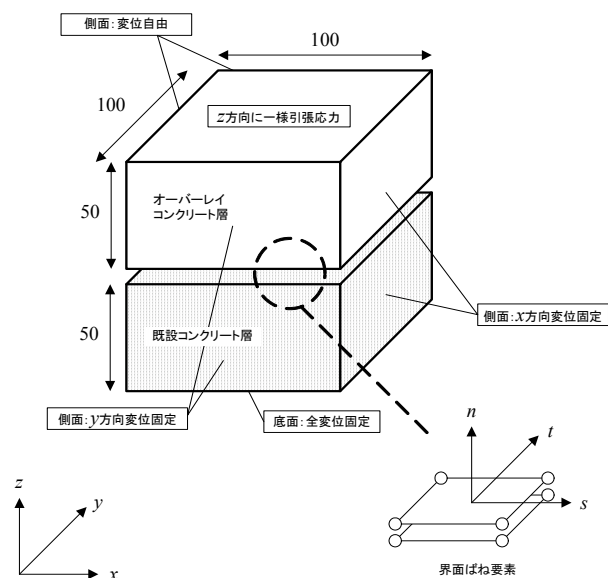
a) 界面垂直ばね係数の決定

i) 解析方法

有限要素解析により、室内引張試験をモデル化した解析を実施することで、界面に挿入する垂直ばね要素のばね係数を決定することとした。図-7.1.1 にそのモデルを、表-7.1.1、表-7.1.2 に解析条件を示す。室内試験に供した供試体は、直径 100mm、高さ 100mm（コンクリートオーバーレイ層と既設コンクリート層がそれぞれ 50mm）の円柱供試体であるが、この解析では、界面のばね係数を簡易且つ一律に設定するためには同一寸法の要素を用いるのが望ましいこと、界面には位置によらず同一の垂直引張応力が発生すると考えられることから、解析には幅 100 mm、高さ 100 mm の角柱モデルを使用した。また、試験では垂直方向に引張力を載荷することから、界面に水平に挿入したばね要素のばね係数の影響は小さいと考えられるため、室内せん断試験結果を参考に一律に設定した。

外力条件としては、直接引張試験における供試体破壊時の引張荷重をモデル上面に載荷し、解析における界面付近の破壊ひずみが試験値と同一となる場合の垂直ばね係数の値を採用した。直接引張試験におけるひずみの測定は、界面付近に貼り付けた長さ 30 mm のひずみゲージを用いていることから、測定した引張ひずみには、図-7.1.2 に示すように、新旧コンクリートの引張ひずみと界面の相対変位が混在していることとなる。このことから、計算における引張ひずみは、界面から上下 15mm の

位置における節点間の相対変位を基準長（30 mm）で除すことで算出した。また、新旧コンクリートのひずみを排除することで、破壊時における界面の相対垂直変位も算定した。



(単位：mm)

図-7.1.1 解析モデル図

表-7.1.1 コンクリートの力学定数¹⁾

コンクリート層	弾性係数 (MPa)	ポアソン比
コンクリート オーバーレイ層	34,000	0.15
既設コンクリート層	34,000	0.15

表-7.1.2 界面ばね要素の力学定数

	ばね係数 (GN/m ³)
垂直ばね要素 (k_n)	100~2,000
水平ばね要素 (k_s, k_t)	100

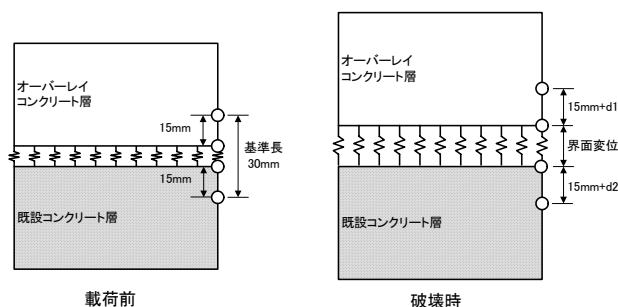


図-7.1.2 供試体破壊時の変形模式図

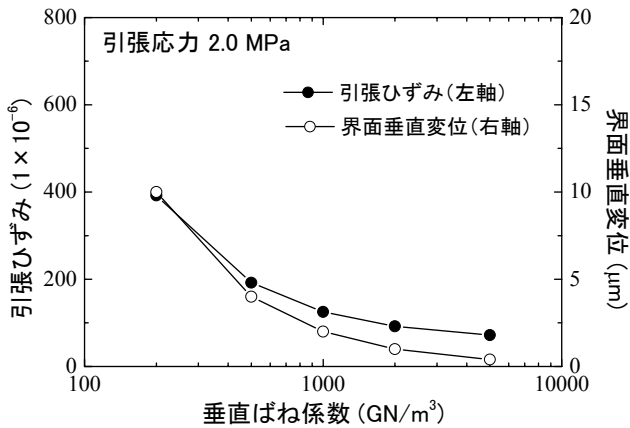


図-7.1.3 引張ひずみ，界面垂直変位と垂直ばね係数の関係

ii) 解析結果

垂直ばね係数を変化させた場合の解析結果の一例を図-7.1.3に示す。垂直ばね係数が小さい場合は、界面付着が弱いため、新旧コンクリート界面の垂直変位は大きく、引張ひずみはそのほとんどが界面垂直変位によるものである。一方、垂直ばね係数が大きくなるに従い、界面の付着が高くなるため、界面垂直変位は小さくなり、界面垂直変位が全体の引張ひずみに占める割合が小さくなることわかる。

上記の手順で算出した垂直ばね係数ならびに破壊時の界面垂直変位を図-7.1.4に、その平均値を表-7.1.3にまとめた。垂直ばね係数は工区により大きく異なり、現場試験や室内試験における引張強度や破壊形態との関連もあまりないようである。これは、既設コンクリートで破壊したケースは除いていることから、データ数が少ないことも一因であると考えられる。しかしながら、現場引張試験や室内引張試験において供試体が界面で多く破壊している②工区については 390GN/m^3 と、他工区よりも比較的小さい値であることがわかる。

一方、破壊時の界面垂直変位に関しては、一部の工区で大きな値となっているが、概ね $2\mu\text{m}$ 程度を超過すると破壊するケースが多いようである。

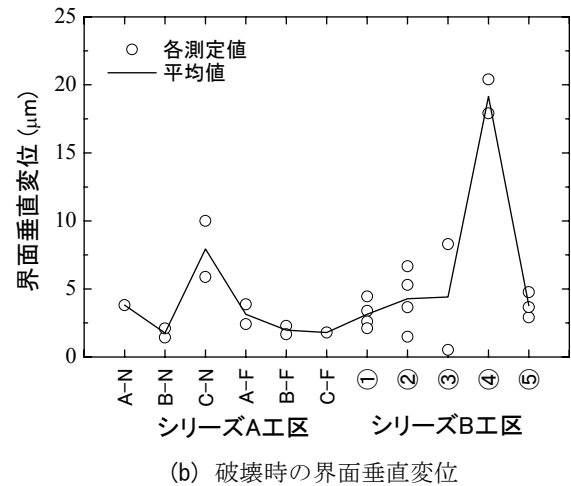
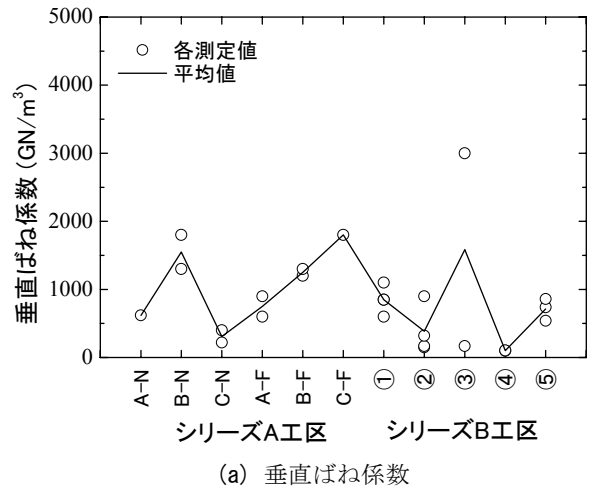


図-7.1.4 垂直ばね係数と界面垂直変位

表-7.1.3 垂直ばね係数と破壊時の界面垂直変位の平均値

工区	垂直ばね係数 (GN/m ³)	破壊時の 界面垂直変位 (μm)
A-N	620	3.81
B-N	1,550	1.77
C-N	310	7.94
A-F	750	3.14
B-F	1,250	1.97
C-F	1,800	1.80
①	850	3.14
②	390	4.28
③	1,590	4.41
④	100	19.15
⑤	710	3.78

b) 界面水平ばね係数の決定

i) 解析方法

室内せん断試験で計測された、水平荷重と水平変位の関係の一例を図-7.1.5に示す。新旧コンクリート層の水平変位は、供試体端部（図-7.1.6におけるAとBの位置）にそれぞれ配置したターゲットと変位計により測定していることから、この水平変位には、新旧コンクリートの変形と界面の水平変位が混在していることとなる。このことから、測定された水平荷重と水平変位の比から界面水平ばね係数を算出するのは妥当ではない。

以上の理由から、有限要素解析により、室内せん断試験条件をモデル化した解析を実施することで、界面に挿入する水平ばね要素のばね係数を決定することとした。

多くの室内せん断試験結果では、破壊時近辺における水平変位が正確に測定されているとは言い難いことから、図-7.1.7に示すように、界面水平ばね係数を変化させた解析結果から、破壊時の水平荷重の1/3に相当する水平荷重を解析モデルに载荷した際の水平変位が試験値と同一となるような界面水平ばね係数を採用した。表-7.1.4、表-7.1.5に解析条件を示す。界面に垂直に挿入したばね要素のばね係数の影響は小さいと考えられるため、前述の解析結果を参考に一定値とした。

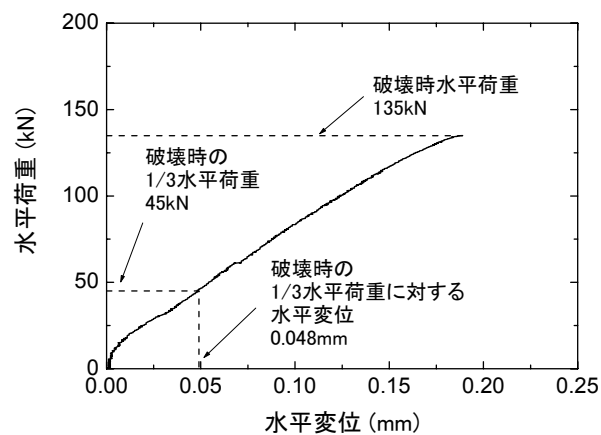


図-7.1.5 水平荷重と水平変位の関係

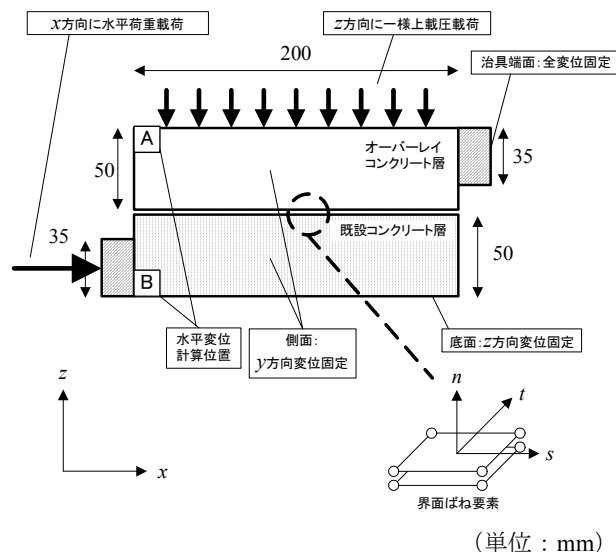


図-7.1.6 解析モデル図

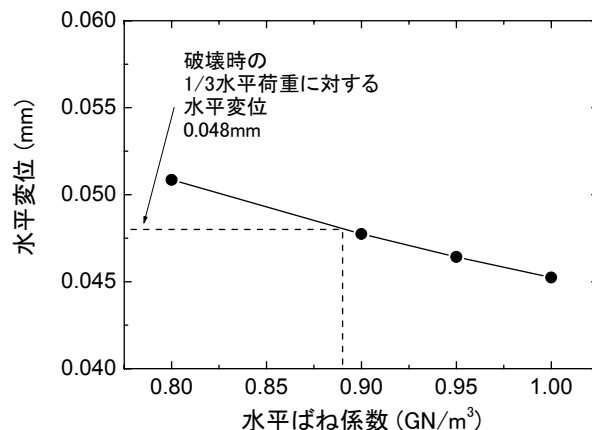


図-7.1.7 水平変位と水平ばね係数の関係

表-7.1.4 コンクリートの力学定数

コンクリート層	弾性係数 (MPa)	ポアソン比
コンクリート オーバーレイ層	34,000	0.15
既設コンクリート層	34,000	0.15

表-7.1.5 界面ばね要素の力学定数

	ばね係数 (GN/m³)
垂直方向ばね要素 (k_n)	1,000
水平方向ばね要素 (k_s, k_t)	0.1~100

ii) 解析結果

上記の手順により算出した水平ばね係数を図-7.1.8に、平均値を表-7.1.6に示す。水平変位が正確に測定されていないと考えられる試験ケースについては除外した。全体的には水平ばね係数の値に若干のばらつきが見られるが、水平ばね係数は概ね 1.0GN/m^3 程度であるといえる。

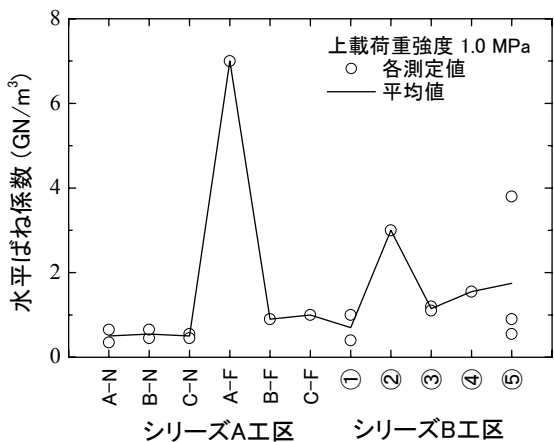
また、上記の解析により算出した、破壊時の $1/3$ の水平荷重を与えた際の、コンクリートの変形を除外した、界面の相対水平変位の平均値を表-7.1.7に示す。破壊時の相対水平変位はこれよりも大きな値と推測されるが、参考値として示した。

表-7.1.6 水平ばね係数の平均値

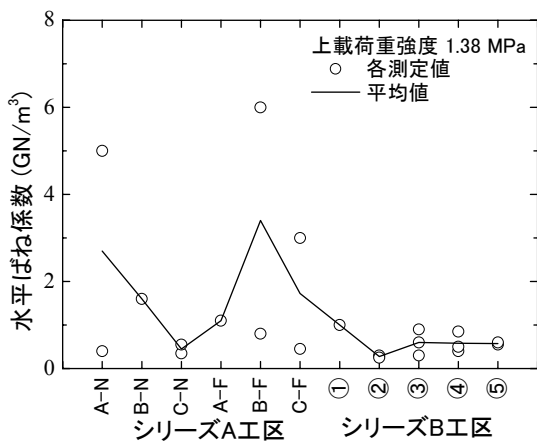
工区	水平ばね係数 (GN/m^3)	
	上載荷重強度 1.00 MPa	上載荷重強度 1.38 MPa
A-N	0.50	2.70
B-N	0.55	1.60
C-N	0.50	0.45
A-F	7.00	1.10
B-F	0.90	3.40
C-F	1.00	1.73
①	0.70	1.00
②	3.00	0.27
③	1.15	0.60
④	1.55	0.58
⑤	1.75	0.57

表-7.1.7 界面水平変位の平均値

工区	界面水平変位 (μm)	
	上載荷重強度 1.00 MPa	上載荷重強度 1.38 MPa
A-N	38.5	30.3
B-N	33.5	13.3
C-N	36.4	39.1
A-F	1.7	20.5
B-F	20.3	12.6
C-F	18.2	27.3
①	30.5	18.8
②	3.7	75.2
③	14.4	48.4
④	13.8	40.2
⑤	13.8	41.1



(a) 上載荷重強度 1.00 MPa



(b) 上載荷重強度 1.38 MPa

図-7.1.8 水平ばね係数

(2) 界面付着強度

a) 解析モデル

西澤が開発した有限要素解析プログラム *Pave3D*¹⁰⁾ を使用して、新旧コンクリート界面に必要な付着強度について検討した。有限要素解析に用いる基本的な舗装モデルを図-7.1.9に、舗装を構成する各層の諸元を表-7.1.8に示す。なお、この解析では、自重の影響を考慮している。

舗装モデルは東京国際空港西側エプロン舗装の断面を参考とし、路床、下層路盤、上層路盤、既設コンクリート層、コンクリートオーバーレイ層の5層構造とした。上層路盤と既設コンクリート層の界面、ならびに既設コンクリート層とコンクリートオーバーレイ層の界面には3方向 (s, t, n 方向、図-7.1.10を参照) に独立したばね要素を挿入し、界面の付着程度の違いを考慮することとした。新旧コンクリート層に関しては目地間隔を7.5mとし、 x 方向と y 方向のメッシュ間隔を25cm、 z 方向のメッシュを、既設コンクリート層では7.5cm 間隔、コンクリートオーバーレイ層では厚さに関わらず3分割とした。隣接版との目地には3方向に独立したばね要素を挿入し、目地垂直方向 (図-7.1.10における n 方向) ばね要素に関しては、目地幅の拡大を考慮するために、ばね要素が挿入されている節点間の目地垂直方向変位差が閾値 (0.001mm) を超過した場合には、ばね係数 k_n が0となるよう設定している。

解析に用いたばね係数を表-7.1.9に示す。これらの値については、前項で検討した値を使用した。また、上層路盤と既設コンクリート版間の界面水平方向ばね係数については、界面すべりを考慮するため、他のばね係数と比較して小さい値とした。

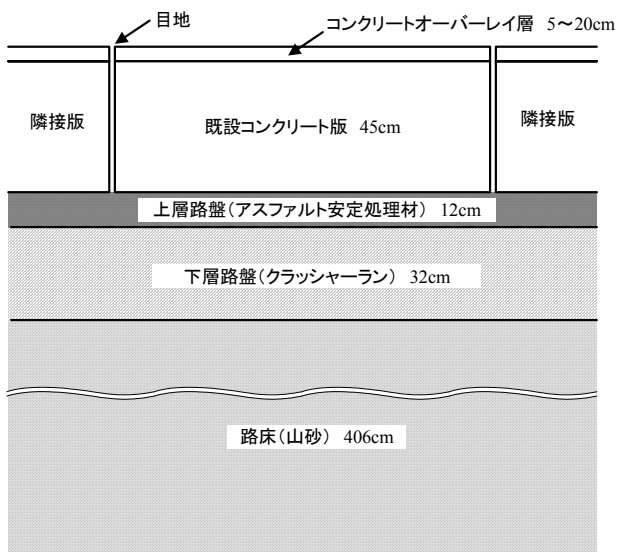


図-7.1.9 解析モデル断面図

表-7.1.8 計算条件

	弾性係数 (MPa)	ポアソン比	層厚 (cm)	単位体積質量 (g/cm ³)	線膨張係数 (10 ⁻⁶ /°C)
コンクリートオーバーレイ層	34,000	0.15	5~20	2.3	10.0
既設コンクリート版	34,000	0.15	45	2.3	10.0
上層路盤	2,000	0.35	12	1.9	-
下層路盤	300	0.35	32	1.9	-
路床	100	0.35	406	1.9	-

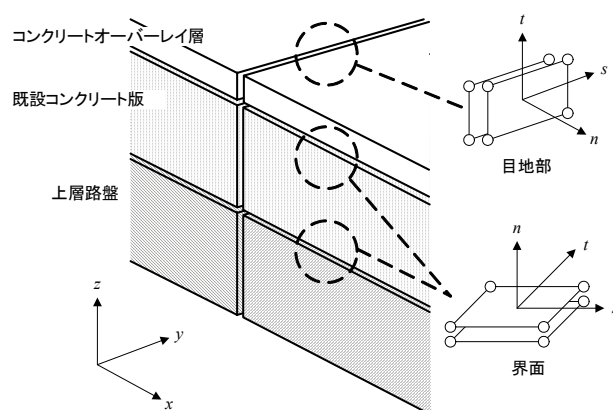


図-7.1.10 界面ならびに目地部のばね要素

表-7.1.9 ばね要素のばね係数

挿入位置	水平ばね係数 k_s, k_t (GN/m ³)	垂直ばね係数 k_n (GN/m ³)
目地間	100	100
新旧コンクリート界面	1.0	1,000
既設コンクリート版-上層路盤間	0.1	1,000

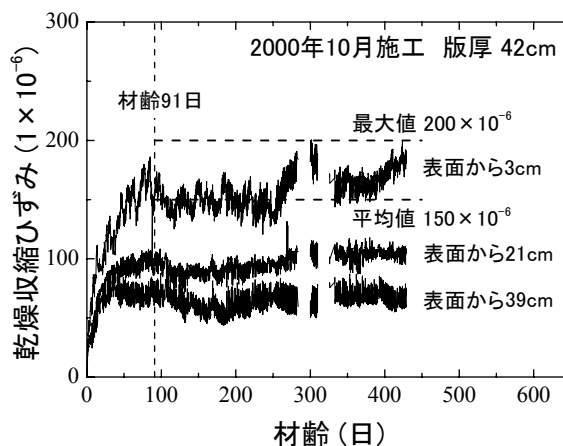
b) 解析条件

解析において考慮する外力としては、コンクリートオーバーレイ層の乾燥収縮ひずみとひずみ勾配、コンクリートオーバーレイ層と既設コンクリート層の温度勾配、航空機脚荷重の3条件を考慮した。基本解析条件を表-7.1.10に示す。

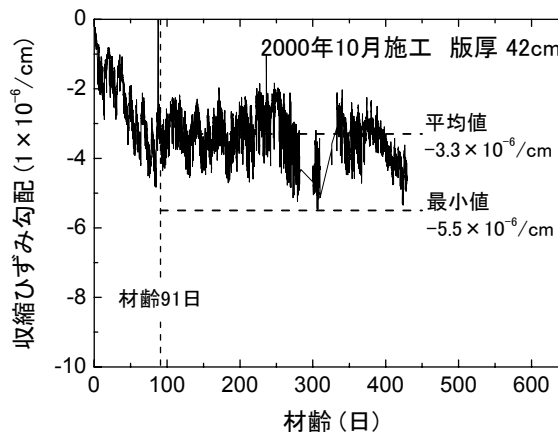
表-7.1.10 基本解析条件¹⁾

項目	設定値
タイヤ接地圧 (MPa)	0.00, 1.38
タイヤ接地面積 (cm ²)	1,632 (34×48cmの矩形)
オーバーレイ層厚 (cm)	5, 10, 15, 20
既設コンクリート層厚 (cm)	45
目地間隔 (m)	7.5
コンクリートオーバーレイ層の乾燥収縮ひずみ (10 ⁻⁶)	0, 200, 400
温度勾配 (°C/cm)	-0.30, 0.00, 0.45 (表面温度>下面温度の場合を正)
乾燥収縮ひずみ勾配 (10 ⁻⁶ /cm)	0, -5.5 (表面乾燥収縮ひずみ>下面乾燥収縮ひずみの場合を負)

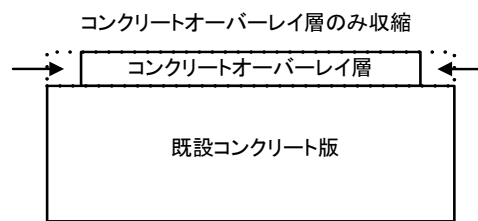
コンクリートオーバーレイ層の乾燥収縮ひずみの値としては、2000年10月に運輸省港湾技術研究所野比実験場(当時)に製作したコンクリート試験舗装の長期挙動観測結果を参考にした。これは、試験舗装近傍に作成した自由収縮測定用供試体(縦53cm, 横15cm, 厚さ42cm)の温度とひずみの測定結果である。打設直後より約1年2ヶ月にわたる測定結果から、コンクリートの熱膨張係数を算出し、コンクリートの乾燥収縮ひずみを計算した。その結果を図-7.1.11(a)に示す。乾燥収縮ひずみは版表面からの深さによって異なるため、解析モデルのコンクリートオーバーレイ層の厚さが5cmであることを考慮し、版表面から3cm, 21cmの深さに埋設したひずみ計により測定した乾燥収縮ひずみを参考に、乾燥収縮ひずみ勾配を算出したのが、図-7.1.11(b)である。この測定結果では、材齢91日以降で乾燥収縮ひずみはほぼ一定値になることから、乾燥収縮ひずみとしては材齢91日以降の最大値である200×10⁻⁶を、ひずみ勾配としては材齢91日以降の最小値である-5.5×10⁻⁶/cmを入力値として採用し、図-7.1.11(d)に示すように設定した。



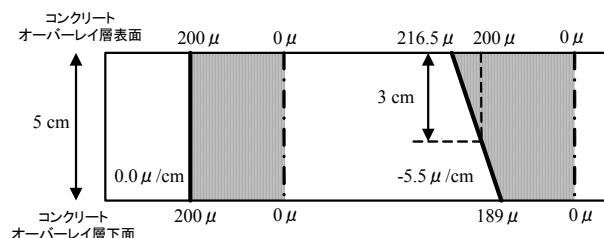
(a) 屋外供試体の乾燥収縮ひずみ



(b) 屋外供試体の乾燥収縮ひずみ勾配



(c) 乾燥収縮ひずみの設定模式図



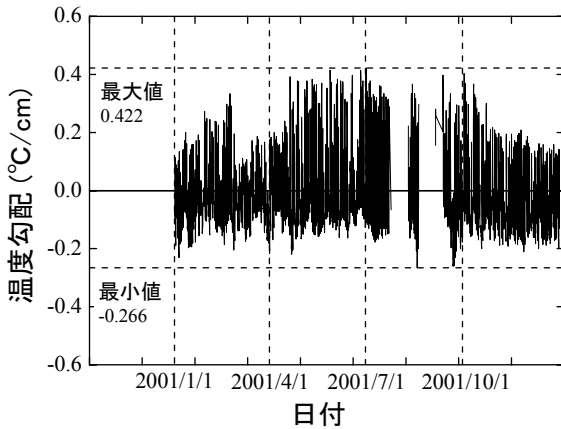
(d) 乾燥収縮ひずみ設定例

(乾燥収縮ひずみ勾配=左図: 0.0μ/cm, 右図: -5.5μ/cm)

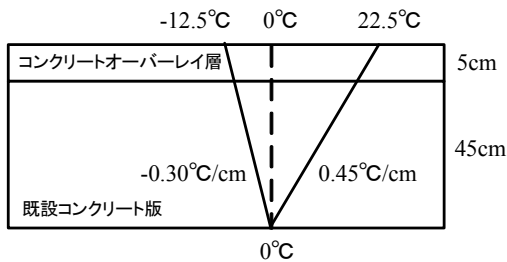
図-7.1.11 乾燥収縮ひずみの設定

コンクリートオーバーレイ層ならびに既設コンクリート層の温度勾配としては、上述の自由収縮測定用供試体の温度測定結果のうち、図-7.1.12 (a)に示す1月から12月までの温度勾配の最大値と最小値を参考に設定した。温度勾配は、深さごとに埋設された3つのひずみ計により測定された供試体温度から算出した Compensation Line の傾き¹⁾を採用し、図-7.1.12 (b)に示すように設定した。

航空機鉛直脚荷重は、B747-400型機の主脚荷重(2軸4輪)1脚を載荷することとし、載荷位置を版の中央部、目地部(主脚を目地に対して直角方向と平行方向にそれぞれ配置)、隅角部の4ケースとした。脚荷重載荷位置を図-7.1.13に示す。

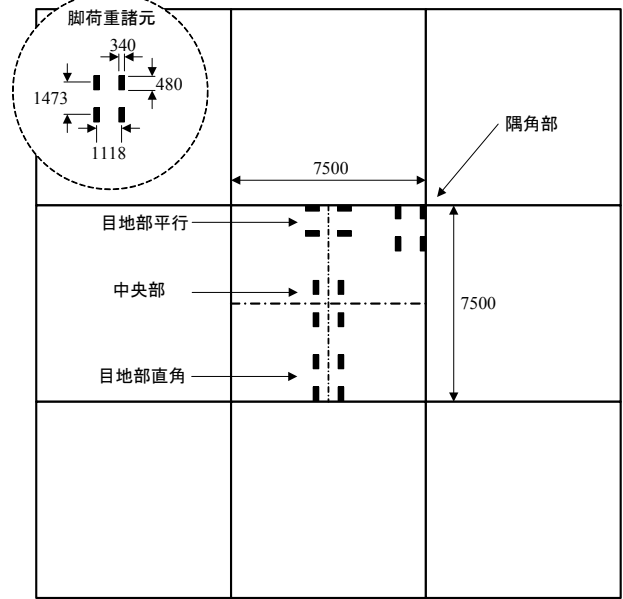


(a) 屋外供試体の温度勾配



(b) 温度勾配の設定模式図

図-7.1.12 温度勾配の設定



(単位 : mm)

図-7.1.13 脚荷重載荷位置

c) 解析結果

i) クリープの影響

乾燥収縮ひずみや温度による影響を持続的に受けると考えられることから、クリープによる影響を考慮するために、クリープ率を考慮した有効弾性係数を用いて検討した。この場合、クリープ率は1.5とし¹²⁾、次式¹¹⁾により有効弾性係数を算出した。

$$E_e = E / (1 + \phi) \quad (7.1)$$

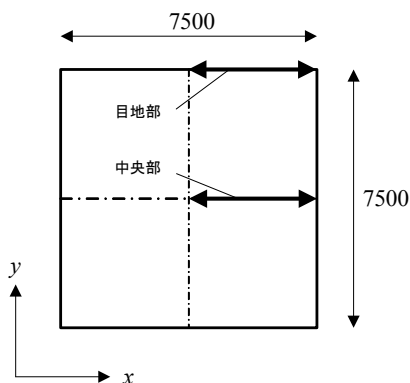
ここに、

- E_e : コンクリートの有効弾性係数 (MPa)
- E : コンクリートの弾性係数 (34,000MPa)
- ϕ : クリープ率 (=1.5)

図-7.1.14 に示す版中央部と版目地部における、界面応力の分布を図-7.1.15 に、界面応力の最大値を図-7.1.16 に示す。界面水平応力に関しては、x方向ならびにy方向のどちらか大きな値の絶対値を、界面垂直応力に関しては引張を正として示した。また、ここでは温度勾配が0.45°C/cmの場合(コンクリート版表面の温度がコンクリート版下面の温度より高い場合)のみ示した。

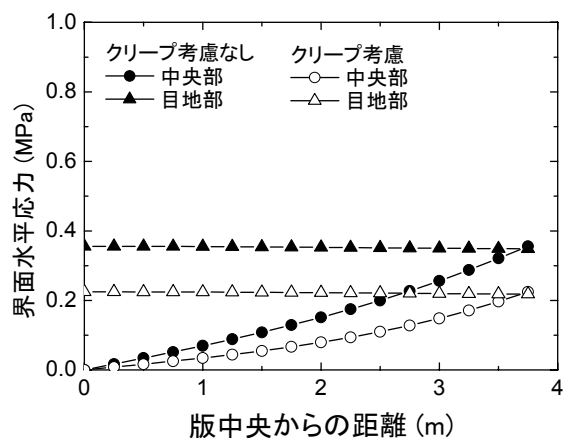
界面水平応力、界面垂直応力は、版の中央部よりも目地部において大きくなる傾向がわかる。また、クリープを考慮した有効弾性係数を用いることにより、界面水平応力、界面垂直応力ともに、若干小さくなる傾向にある。室内強度試験結果と比較すると、クリープを考慮しない場合の界面垂直応力は、引張強度の平均値をも超過することとなるが、試験舗装において剥離が生じている工区は少数にとどまっていること、温度勾配や乾燥収縮による影響は持続的に長期間作用する事を考慮すると、必要付着強度の検討のためには、コンクリートのクリープを考慮することが必要であると考えられる。

以上のことから、以降の検討では、クリープを考慮した有効弾性係数を用いて解析を実施した。

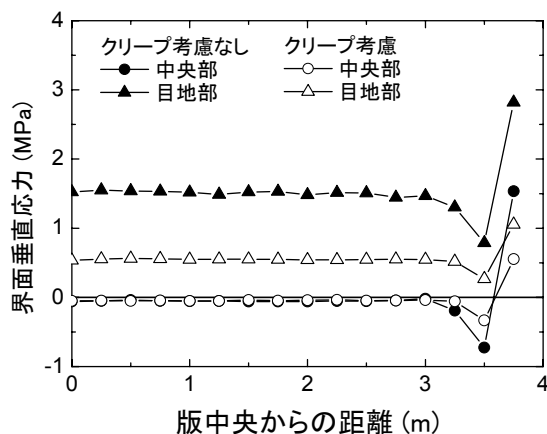


(単位 : mm)

図-7.1.14 界面応力表示位置



(a) 界面水平応力分布



(b) 界面垂直応力分布

図-7.1.15 クリープを考慮した場合の界面応力分布

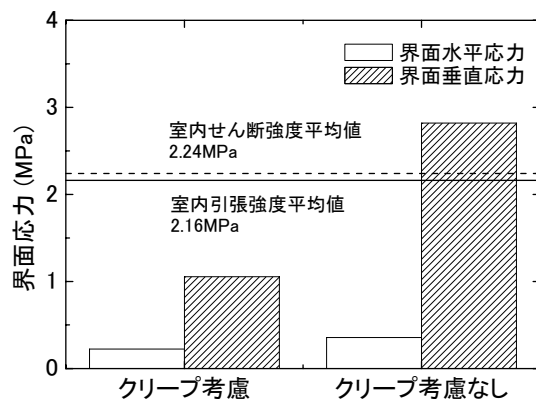


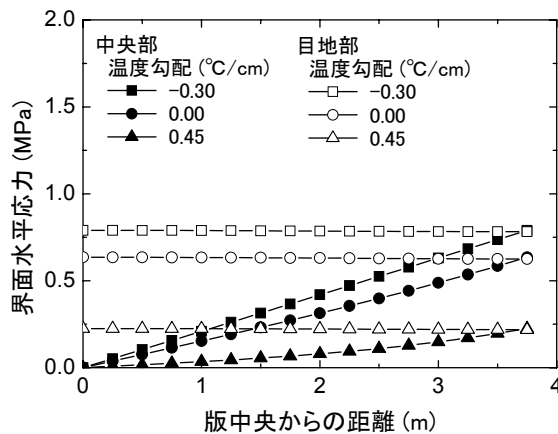
図-7.1.16 界面応力と室内強度

ii) 温度勾配の影響

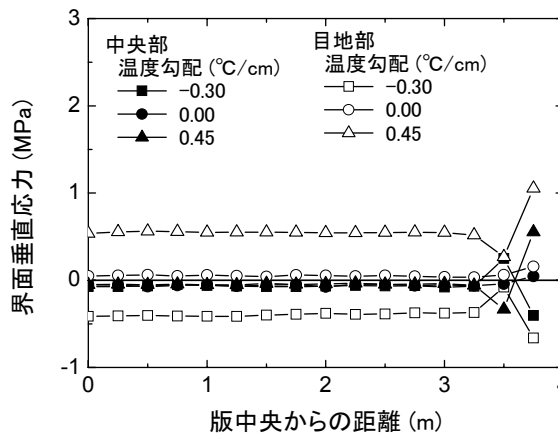
温度勾配を-0.30, 0, 0.45 °C/cm とした場合の界面水平応力, 界面垂直応力の分布を図-7.1.17 に, 界面応力の最大値と温度勾配の関係を図-7.1.18 に示す. この場合, コンクリート版表面の温度が, コンクリート版下面の温度よりも高い場合を, 正の温度勾配としている.

界面水平応力は, 版中央からの距離に比例して大きくなり, 目地部あるいは隅角部において最大となることがわかる. また, 目地部や隅角部で発生している最大の界面水平応力は, 温度勾配が負の場合ほど, 界面水平応力は大きくなる傾向にある.

一方, 界面垂直応力は, 版中央からの距離とは関係なく, 一様に分布しているが, 温度勾配に関わらず, 隅角部において最大となる傾向がわかる. また隅角部で発生している最大の界面垂直応力は, 温度勾配がない場合に最小となり, 温度勾配がある場合にはそれよりも大きくなるが, 今回の条件では温度勾配が正の場合が最大となっている.



(a) 界面水平応力分布



(b) 界面垂直応力分布

図-7.1.17 界面応力の分布

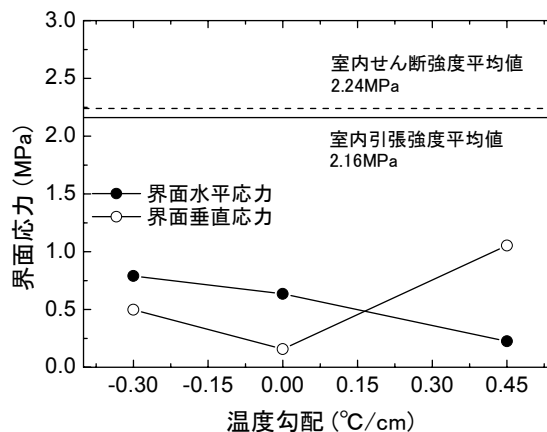


図-7.1.18 界面応力と温度勾配の関係

iii) 乾燥収縮量の影響

オーバーレイコンクリート層に生じる乾燥収縮ひずみ、ならびにその深さ方向の勾配の影響を検討した。

乾燥収縮ひずみの影響については、前述した通常の空港コンクリート舗装における乾燥収縮ひずみの実測値を参考に、オーバーレイコンクリート層に 0, 200, 400 × 10⁻⁶ の一様な乾燥収縮ひずみを与えて計算を実施した。

乾燥収縮ひずみ勾配の影響については、前述した実測値が、表面からの 3cm の深さにおけるひずみ量であることから、表面から 3cm の深さのひずみ量を 200 × 10⁻⁶ とし、乾燥収縮ひずみ勾配は最小で -5.5 × 10⁻⁶/cm とした。

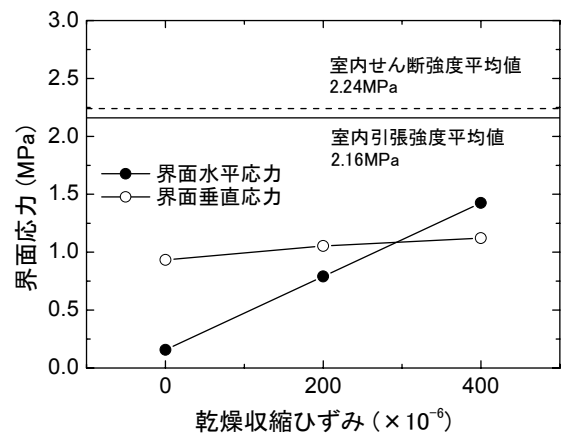
版界面に生じる最大の界面水平応力と界面垂直応力を図-7.1.19 に示す。ここでは、温度勾配が -0.3°C/cm の場合の界面水平応力と、温度勾配が 0.45°C/cm の場合の界面垂直応力を示した。また前述したように、いずれの場合でも、最大応力は目地部や隅角部において発生している。

オーバーレイコンクリート層に生じる乾燥収縮ひずみが界面応力に及ぼす影響は、界面水平応力と界面垂直応力で異なることがわかる。すなわち、乾燥収縮ひずみが大きくなると、界面応力は大きくなる傾向があるが、その影響は界面水平応力において顕著であり、界面垂直応力ではそれほど大きくはない。

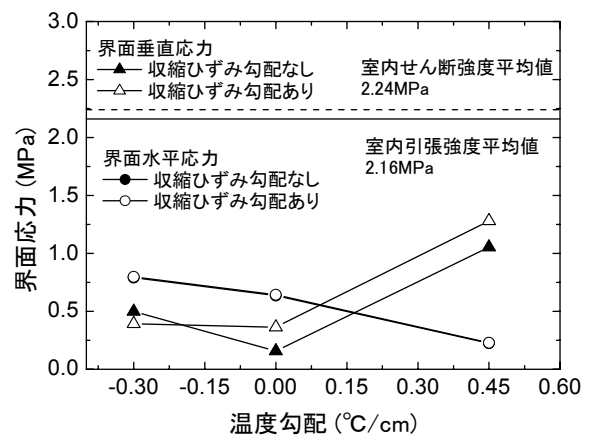
乾燥収縮ひずみ勾配の影響は、界面水平応力ではほとんど現れないものの、ひずみ勾配を考慮した場合の界面垂直応力は、一様な乾燥収縮ひずみを与えた場合の応力と比較して、温度勾配が負の場合は減少し、温度勾配がない場合や正の場合は増大する傾向がある。これは、図-7.1.11 (d) に示すような負のひずみ勾配を与えると、オーバーレイコンクリート層の温度勾配のみが小さくなることと同じ意味を持つ。このため、温度勾配が正である既設コンクリート版には上に凸の変形が生じるが、オーバーレイコンクリート層には下に凸の反り変形が生じるため、版端部の界面の相対変位が大きくなり、界面垂直応力が増大すると考えられる。

以上のことから、界面水平応力に対しては乾燥収縮ひずみ量が、界面垂直応力に対しては乾燥収縮ひずみ勾配が大きな影響を与えることが明らかとなった。実際のコンクリート舗装が曝されている環境を考慮すると、コンクリート表面ほど水分蒸発量が大きく、乾燥収縮ひずみ量が大きいと考えられることから、コンクリートオーバーレイ層のひずみ勾配を考慮し、適切な乾燥収縮ひずみ量を設定することで、界面に必要な付着強度を算定する必要があると考えられる。しかしながら、今回計算に用いたオーバーレイコンクリート層の乾燥収縮量、ならび

に深さ方向の乾燥収縮ひずみ勾配値は、コンクリート薄層オーバーレイ舗装において測定されたものではないことから、設定には十分留意する必要がある。



(a) 乾燥収縮ひずみの影響



(b) 乾燥収縮ひずみ勾配の影響

図-7.1.19 乾燥収縮ひずみ、ひずみ勾配の影響

iv) 脚荷重載荷位置の影響

航空機荷重の載荷位置による影響を検討するために、載荷位置を図-7.1.13 に示す 4 ケースについて解析を実施した。ここでの解析では、航空機荷重による影響と温度勾配・乾燥収縮による影響を同時に考慮することは困難であることから、以下の手順により実施した。

①本項で用いている、層間にばねを挿入したモデルを使用して、温度勾配ならびにオーバーレイコンクリート層の乾燥収縮に起因する界面応力を算出する。この場合、コンクリートの弾性係数としては、クリープを考慮した有効弾性係数を使用する。また、温度勾配は $0.45^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ とし、オーバーレイ層に生じる乾燥収縮ひずみは、表面からの深さによらず 200×10^{-6} で一定とした。

②航空機脚荷重の載荷により発生する界面応力の計算では、クリープを考慮しない弾性係数を使用する。また、本項で使用している、層間にばねを挿入したモデルでは、新旧両層における曲げモーメントの伝達を考慮できないため、層間のばね要素は省略し、新旧両層の界面における要素は、節点を共有したモデルとする。

③上記①と②で算出した界面応力の和を求める。ただし、②の航空機荷重を想定した解析では、新旧両層の界面における要素は節点を共有しているため、層間における節点間の水平変位差が生じないこと、前述した解析において、界面水平応力は室内せん断強度と比較して小さいことから、ここでは界面垂直応力のみ算出する。

隅角部に発生する界面垂直応力と載荷位置の関係を図-7.1.20 に示す。上記②による脚荷重の載荷により隅角部に発生する界面垂直応力は、温度勾配や乾燥収縮に起因する応力と比較すると非常に小さい引張応力、もしくは圧縮応力であることから、脚荷重の有無による界面垂直応力の差はほとんど無い。また、界面垂直応力は、載荷位置によらず室内引張試験強度の平均値よりも非常に小さな応力であることがわかる。

以上のように、航空機脚荷重の載荷が界面垂直応力に及ぼす影響は非常に小さいことから、界面付着強度を検討するうえでは、温度勾配やオーバーレイコンクリート層の乾燥収縮に起因する応力に着目することで十分と考えられる。

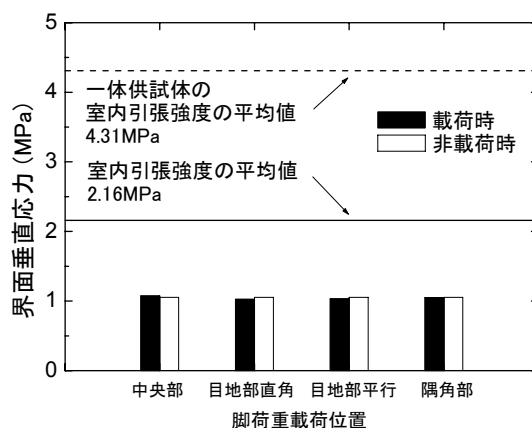


図-7.1.20 載荷位置が界面垂直応力に及ぼす影響

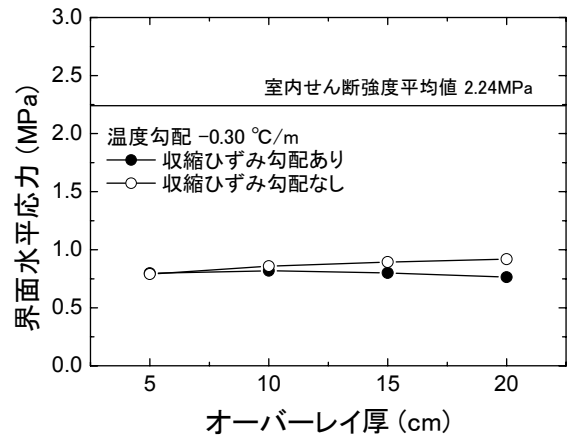
v) オーバーレイ厚の影響

オーバーレイ厚を 5, 10, 15, 20cm とした場合の、版に生じる最大の界面水平応力と界面垂直応力を図-7.1.21 に示す。ここでは、界面水平応力が最大となる温度勾配が $-0.3^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ の場合、ならびに界面垂直応力が最大となる温度勾配が $0.45^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ の場合についてのみ示した。また、オーバーレイ層に生じる乾燥収縮ひずみは、表面からの深さ 3cm の位置において 200×10^{-6} 、乾燥収縮ひずみ勾配は 0 (深さによらず一定の乾燥収縮ひずみ) ならびに $-5.5 \times 10^{-6}/\text{cm}$ とした。

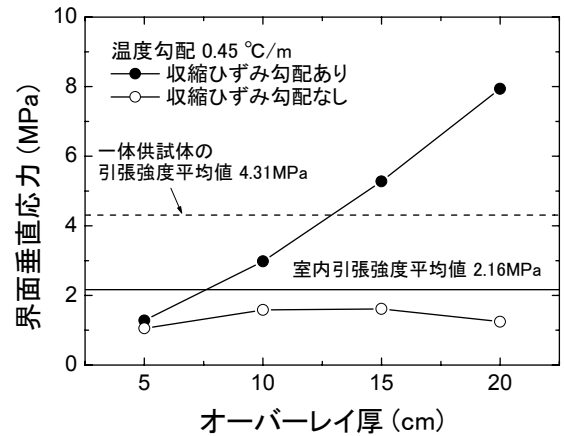
界面水平応力は、版厚の影響をほとんど受けないことが明らかであり、室内せん断試験における平均せん断強度と比較しても、極めて小さいことがわかる。

一方、界面垂直応力は、深さ方向の乾燥収縮ひずみ勾配の有無により、傾向が異なることがわかる。すなわち、乾燥収縮ひずみ勾配を考慮すると、界面垂直応力はオーバーレイ厚の影響を大きく受け、オーバーレイ厚が厚くなるほど、界面垂直応力は増大する傾向にある。

しかしながら、版厚が 10cm 以上の場合では、界面のない一体のコンクリート供試体の室内引張強度を超過することから、現実には発生し得ないと考えられる。乾燥収縮ひずみ勾配を考慮せず、オーバーレイコンクリート層の乾燥収縮ひずみが一様であるとした場合は、オーバーレイ厚が 5cm の場合 (1.1MPa) よりも厚い場合には大きな応力 (最大で 1.6MPa 程度) が生じると考えられ、オーバーレイ厚による影響は無視できないことがわかる。



(a) 界面水平応力



(b) 界面垂直応力

図-7.1.21 界面応力と版厚の関係

vi) 有限要素解析におけるメッシュ間隔の影響

図-7.1.15 に示すように、界面垂直応力の最大値は、目地部あるいは隅角部において急激に大きくなる傾向が認められることから、有限要素解析における水平方向のメッシュ間隔を、25cm（本項の解析における標準値）ならびに10cmとして解析結果を比較した。

図-7.1.22 に界面垂直応力分布を、図-7.1.23 にオーバーレイ厚と界面垂直応力の関係を示す。メッシュ間隔を細かくした場合でも、隅角部において局所的に応力が大きくなる傾向は変わらず認められる。しかしながら、界面垂直応力とオーバーレイ厚の関係は、メッシュ間隔を10cmと細かくすることにより、25cmとした場合の傾向とは大きく異なる。すなわち、メッシュ間隔を10cmと細かくした場合には、オーバーレイ厚が厚くなるにつれて、界面垂直応力は減少する傾向が認められる。また、これら以外のメッシュ間隔による解析モデルにおいても検討を実施したが、メッシュ間隔を広く、もしくは狭くすることが界面応力に及ぼす影響には、定性的な傾向が認められなかった。

本項の版を想定した解析では、図-7.1.10 に示すように、既設コンクリート層とコンクリートオーバーレイ層の界面に、3方向に独立したばね要素を挿入し、界面の付着程度の違いを考慮することとした。しかしながら、このモデルでは、新旧両層における曲げモーメントの伝達が考慮できない等、実際の現象を再現するためには十分でないことが考えられること、算出される界面応力がメッシュ間隔に大きく依存することなどから、本項の解析結果により、界面の必要付着強度を定量的に把握することは困難であると考えられる。

なお、図-7.1.23 には、参考として、新旧両層の層間にばねを挿入せず、節点を共有しているモデルを使用した解析結果も示した。このモデルでは、層間が完全に付着している一体版として捉えることができるが、この場合にも、層間にばね要素を挿入したモデルによる結果と同様の傾向が認められる。すなわち、メッシュ間隔が25cmの場合は、オーバーレイ厚が15cm程度の場合に層間垂直応力が最大となる傾向にあるが、メッシュ間隔が10cmの場合は、オーバーレイ厚が厚くなるほど、界面垂直応力が減少する傾向がある。

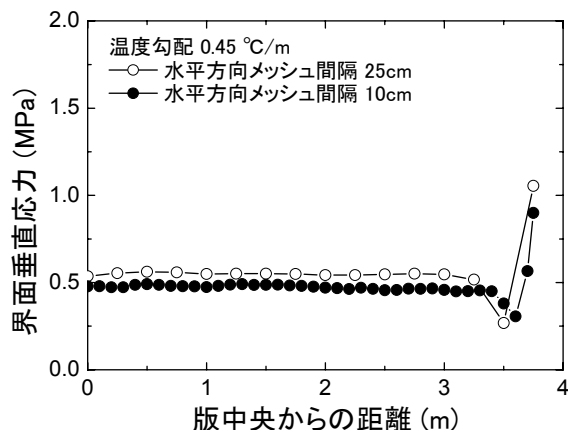


図-7.1.22 メッシュ間隔と界面垂直応力分布

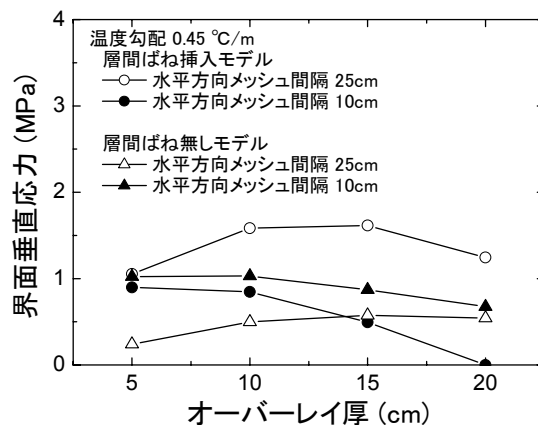


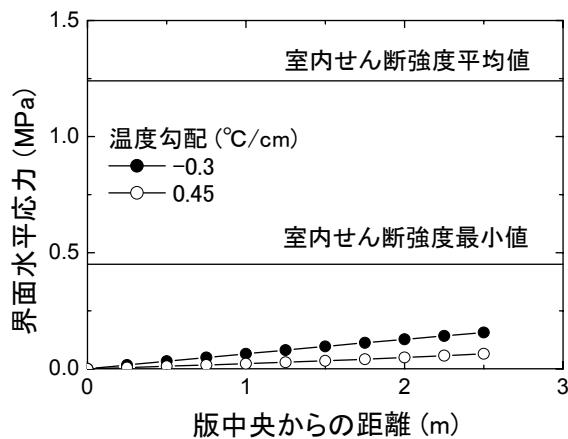
図-7.1.23 オーバーレイ厚と界面垂直応力の関係

vii) 解析結果の妥当性の検証

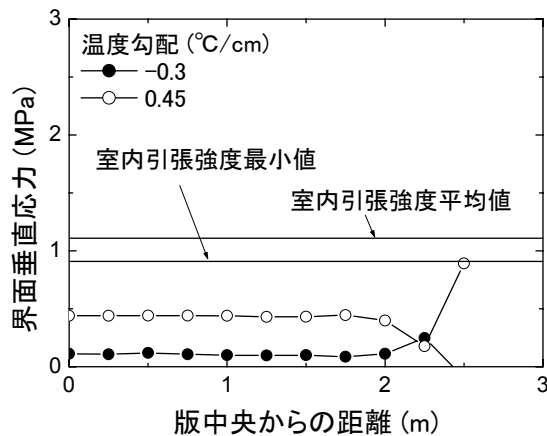
施工後、実際に剥離が生じた工区の引張試験結果を基に界面ばね係数、付着強度を設定し、解析結果の妥当性を検証した。ここでは、実際に剥離が生じた②工区における試験結果を用いた。すなわち、版の寸法は実際の版寸法である 5m×5m、界面垂直ばね係数、界面水平ばね係数は室内引張試験により得られた平均値 (390GN/m³, 0.27GN/m³) とした。また、オーバーレイ層に生じる乾燥収縮ひずみは、表面からの深さ 3cm の位置において 200×10^{-6} 、ひずみ勾配は $-5.5 \times 10^{-6}/\text{cm}$ とした。

図-7.1.24 に、版端部における界面水平応力、界面垂直応力の分布を示す。界面水平応力は室内試験における平均強度 (1.24MPa) と比べてきわめて小さいことから、試験舗装において生じた剥離の原因とは推測しがたい。

一方、界面垂直応力は、隅角部付近で室内試験における平均強度 (1.11MPa) の 80%程度である 0.89MPa の引張応力が発生している。また、②工区における室内引張強度最小値は 0.91MPa であることから、室内引張強度のばらつきも考慮すると、試験舗装に発生した剥離は、新旧コンクリート層の界面に発生する垂直応力が界面引張強度を超過したことが原因と推測される。



(a) 界面水平応力



(b) 界面垂直応力

図-7.1.24 ②工区における界面応力分布

(3) まとめ

以上の解析結果から、新旧コンクリート界面に発生する応力に関して以下の知見が得られた。

- ①新旧コンクリート界面に発生する応力は、目地部ならびに隅角部で最大となる傾向が認められる。
- ②温度勾配、乾燥収縮、乾燥収縮勾配が界面に発生する応力に及ぼす影響を検証するためには、コンクリートのクリープ率を考慮した有効弾性係数を用いるのが現実的と考えられる。
- ③界面水平応力は、温度勾配の増加とともに減少する傾向がある。一方、界面垂直応力は、温度勾配が正負の両方で増加する傾向があるが、実際の温度分布を考慮すると、温度勾配が正の場合の垂直応力のほうが大きい。
- ④オーバーレイコンクリート層に発生する乾燥収縮ひずみが増加した場合、界面水平応力は増加するが、界面垂直応力に与える影響は小さい。
- ⑤深さ方向の乾燥収縮ひずみ勾配の有無は、界面水平応力に対しては無視できる程度である。一方、乾燥収縮ひずみ勾配の影響は界面垂直応力において顕著であり、温度勾配が正の場合には応力が増加する傾向がある。
- ⑥試験舗装において剥離が生じた②工区における室内強度試験結果を考慮すると、剥離が生じた原因としては、界面の垂直応力が引張強度を超過したことが原因と推測される。
- ⑦航空機脚荷重の载荷が界面応力に及ぼす影響は小さい。
- ⑧オーバーレイ厚が界面水平応力に及ぼす影響は小さい。一方、界面垂直応力はオーバーレイ厚の影響を受ける傾向が認められる。
- ⑨種々の条件を考慮した解析結果から、界面に作用する水平応力は、室内試験におけるせん断強度と比べて非常に小さい。一方、界面に作用する垂直応力は、室内試験における引張強度を超過する場合も確認された。
- ⑩オーバーレイ厚を考慮した解析結果から、新旧コンクリート界面の剥離を防止するためには、1.6MPa程度以上の引張強度を有する必要があると考えられる。しかしながら、一連の解析結果は有限要素モデルのメッシュ間隔に大きく依存することから、本項で示したような解析モデルでは、必要付着強度を定量的に決定することは困難と考えられる。