

# 道路舗装工事の施工の効率化と品質向上に関する技術開発

〔株〕大林組

大林道路(株)

酒井重工業(株)

## 目 次

1. まえがき	1
2. 道路工事のプロセス分析	2
3. 新しい施工管理システムの開発 ー現場実験ー	9
3. 1 はじめに	9
3. 2 試験施工概要	9
3. 3 調査項目および測定方法	12
3. 4 測定結果	17
3. 4. 1 現地調査	17
3. 4. 2 室内試験	30
3. 5 測定結果比較	36
3. 5. 1 分散乱れ率から算出した $E_{roller}$ との比較	36
3. 5. 2 ピーク乱れ率より算出した $E_{roller}$ との比較	41
3. 6 舗装施工管理システムの構築	47
3. 7 3章のまとめ	56
4. 新しい施工管理システムの開発 ー室内試験ー	57
4. 1 はじめに	57
4. 2 室内試験概要	57
4. 3 試験条件	58
4. 3. 1 路盤材料の $M_r$ の測定	58
4. 3. 2 オイル混合物の $M_r$ の測定	59
4. 4 試験結果	60
4. 4. 1 路盤材料の $M_r$	60
4. 4. 2 オイル混合物の $M_r$	72
4. 5 試験結果比較	84
4. 5. 1 路盤材料の $M_r$	84
4. 5. 2 オイル混合物の $M_r$	94
4. 6 参 考	101
4. 6. 1 グリセリン混合物の $M_r$	101
4. 6. 2 砕砂の $M_r$	105
4. 7 設計 $E_h$ の算出	106
4. 8 4章のまとめ	108
5. 施工管理システムの実現場適用	109
5. 1 はじめに	109
5. 2 試験概要	109
5. 3 調査項目および測定方法	112
5. 4 測定結果	118
5. 4. 1 現地調査	118

5. 4. 2 室内試験	130
5. 5 測定結果比較	134
5. 6 5章のまとめ	148
6. 振動タイヤコンバインドローラの路盤材への適応性について	149
6. 1 はじめに	149
6. 2 試験施工実施状況	149
6. 3 試験結果	152
6. 4 6章のまとめ	154
7. 舗装工事の効率化に向けて	156
7. 1 新しい施工機械の提案	156
7. 2 施工機械の選定による効率化の検討	164
7. 3 施工管理による効率化の検討	165
8. まとめ	167

## 1. まえがき

道路は社会基盤の中でも中核をしめるものであり、その施工はもちろん、維持管理やリニューアルは重要であり、それゆえ施工時やリニューアル工事における舗装の品質の確保と施工の効率化は重要な課題である。道路は路体から路床、礎盤、表層工（舗装）の順に施工され、品質の確保に関してはそれぞれのプロセスの品質の担保が重要であり、施工の効率化に関しては、新しい管理手法の導入や新しい施工機械の導入が考えられる。施工品質の確保と施工の効率化は一見相反するように考えられるが、道路工事における舗装施工（路床・路盤・舗装）で、施工速度の向上とプロセス管理を中心とした客観的な品質管理を行うことによる品質の向上を同時に行うために、ICTを用いた施工支援システムおよび加速度センサー等による品質管理を統合し、施工システムを構築することを検討することとした。

本研究は、平成20年度、21年度の2カ年にわたり、下記の要領で実施した。

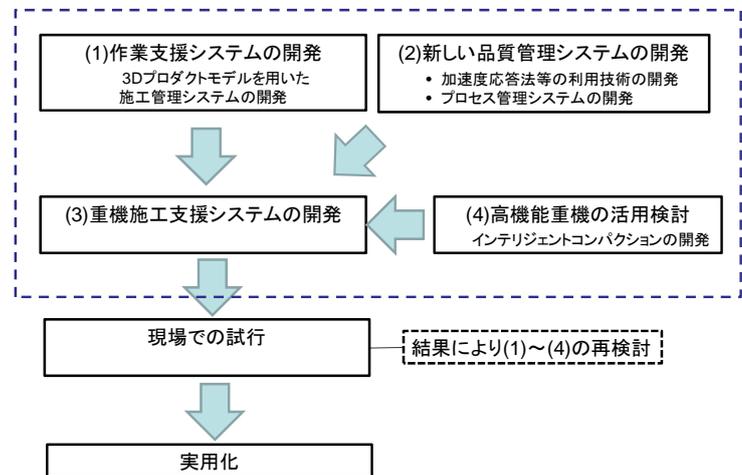


図-1. 1 研究開発項目とフロー図

1. 1. 研究課題名 道路舗装工事の施工の効率化と品質向上に関する技術開発

1. 2. 交付申請者 (株)大林組 生産技術本部 古屋 弘

本研究は図-1. 1に示す開発項目を掲げ、昨年度は (1)作業支援システムの開発、(2)新しい品質管理システムの開発、(3)高機能重機の活用検討、に関して実験・研究開発を実施した。以下に概要を示す。

### ・作業支援システムの開発

舗装工事のワークフローを分析し、施工管理に必要なデータ項目の抽出と3次元データを用いた品質管理システムの基本部分を構築した。このシステムは、次年度、図-1(3)の重機施工支援システム用システムとして汎用化を目指すものである。

### ・品質管理システムの開発

新しい品質管理システム構築のために、2008年8～9月に大林道路(久喜)で、2010年12月～3月に大分県新田原において屋外実験を実施した。この試験施工は、舗装構築時の新しい施工管理として、加速度応答解析結果を舗装工事に適用し、路床から路盤(土)、およびアスファルトの品質管理が加速度応答法による剛性指標(Eroller)にて可能であるか、適用性の検討を行った。

### ・高機能重機の活用検討

舗装品質と作業効率の向上を図るため、最近開発された振動マカダムローラ(酒井重工業製MW700型)、および振動タイヤローラ(酒井重工業製GW750型)、を用いた試験施工を2008年12月に実施した。

## 2. 道路工事のプロセス分析

本研究は、道路工事の施工の効率化を目指すものであるが、道路工事、特に舗装工事(路床工・路盤工・舗装工)の施工プロセスを分析し、従来の施工における効率化の可能性を検討することとした。

施工プロセスは、従来から行われている工事をBPMN(Business Process Modeling Notation : ビジネスプロセス・モデリング表記法)により分析することとした。図-2. 1には道路工事における作業員、施工(関連)機械をアクターとして示す。

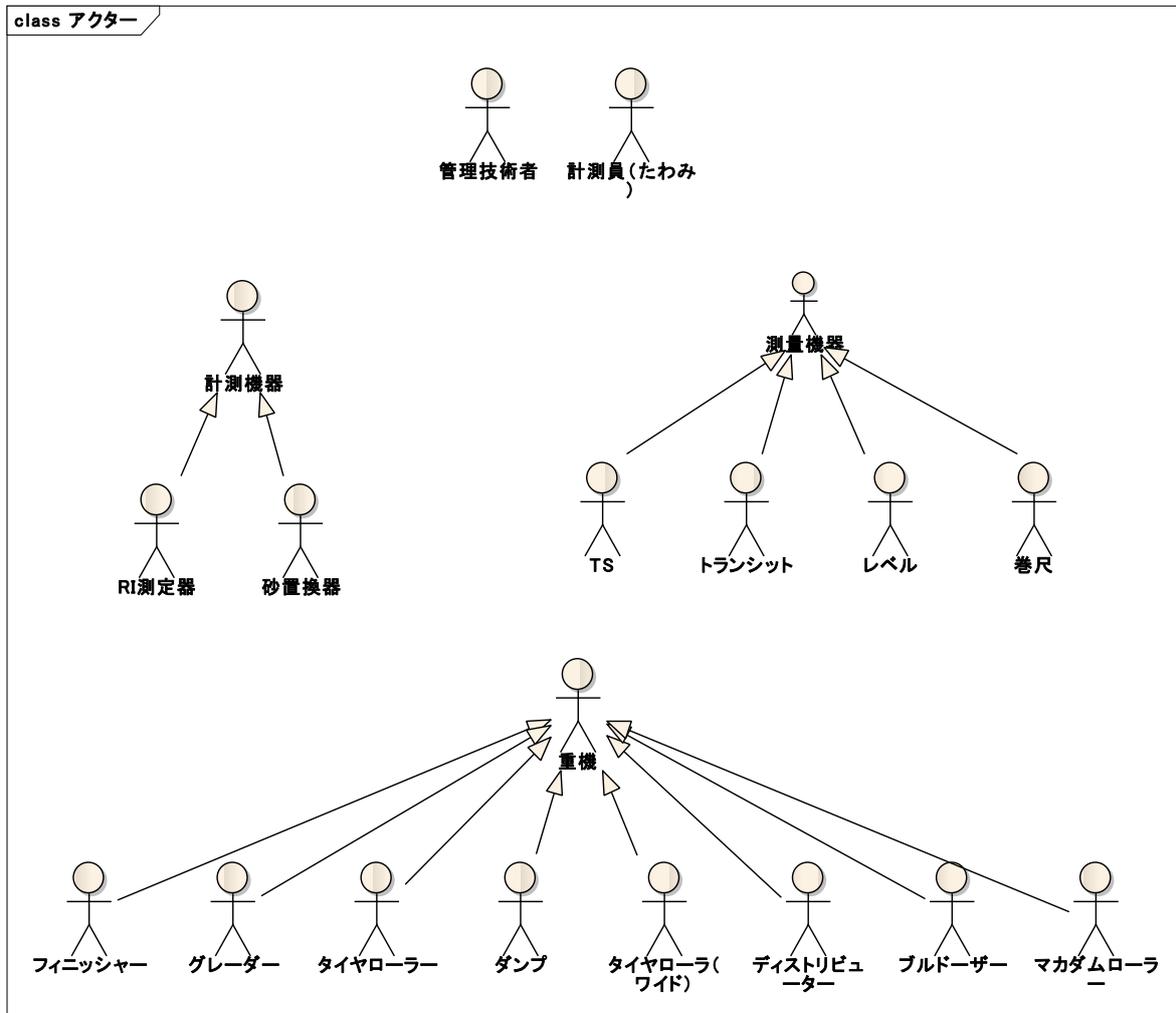


図-2. 1 ビジネスプロセスモデリングにおける道路工事のアクター

図-2. 1における上列は作業員、中列は施工管理(品質管理含む)の機器、下列は作業に関わる重機を表している。これらのアクターが道路工事に関わることとなるが、道路工事は付帯構造物(街渠等)を除くと路体から順次路床・路盤・舗装(一般にはコンクリートやアスファルト)の順に施工されることとなる。これをBPMNのフローを用いて路盤工から上部の施工に特化して示したものが図-2. 2である。路盤工からの詳細な作業分析は図-2. 4以降に示すが、施工管理の共通項目である計画・測量の分析は図-2. 3に示すとおりである。

図-2. 4~2. 7には路盤工から上部の施工のBPMN分析フローを示す。なお、このフローは比較的高規格な道路工事を想定しており、重要度の低い道路では路盤工は上層/下層に分けないこともある。この図で重要な点は、国内の道路工事は路体・路床までの施工と路盤工より上部の所謂「舗装工」は施工業者が異なり、出来型や品質は所定

の仕様書によって施工することはもちろん出来ているはずであるが、施工の真の情報は受け渡されておらず、そのため舗装請負業者は図-2. 4に示す「路盤準備工」というプロセスを介すこととなる点である。

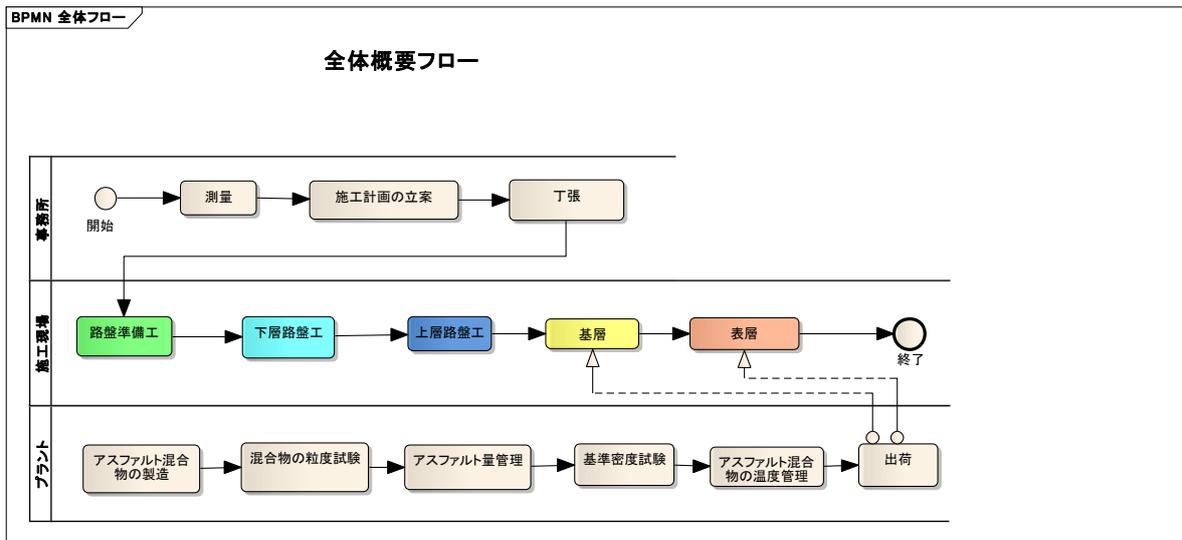


図-2. 2 道路工事全体のフロー(BPMN)

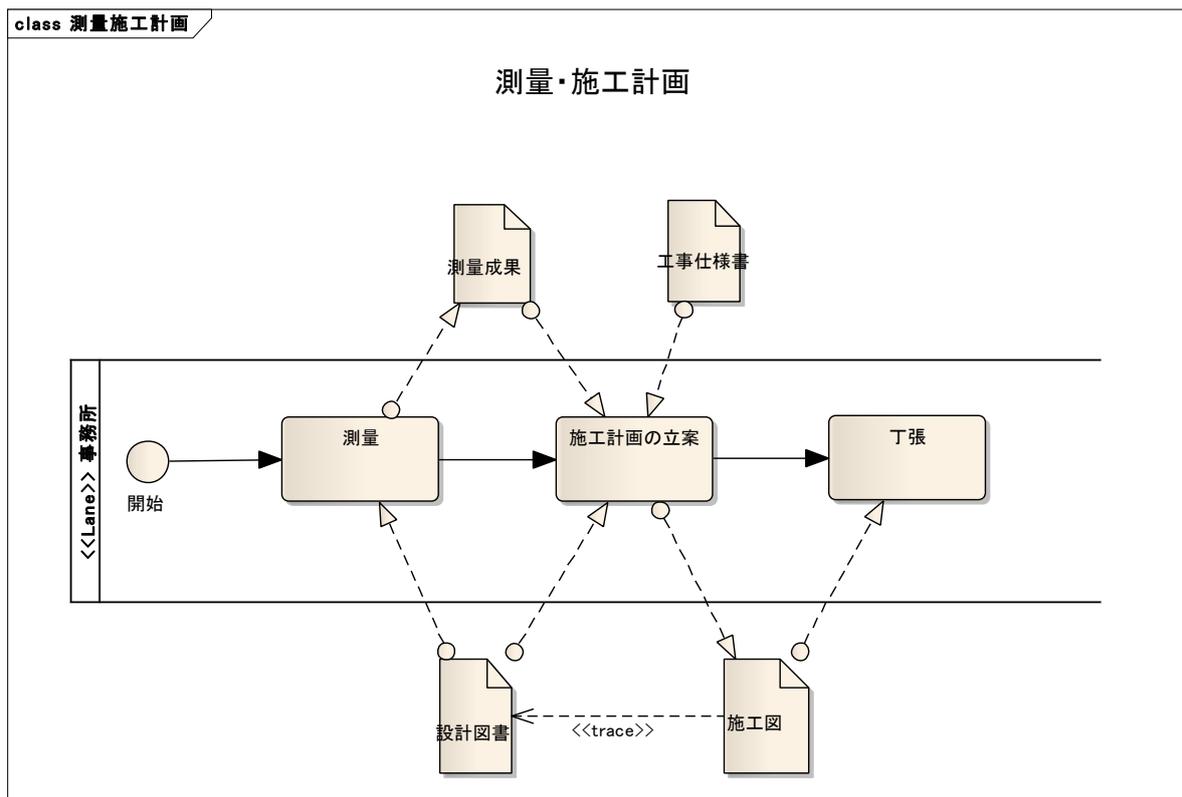


図-2. 3 施工計画等の関連付け(BPMN)

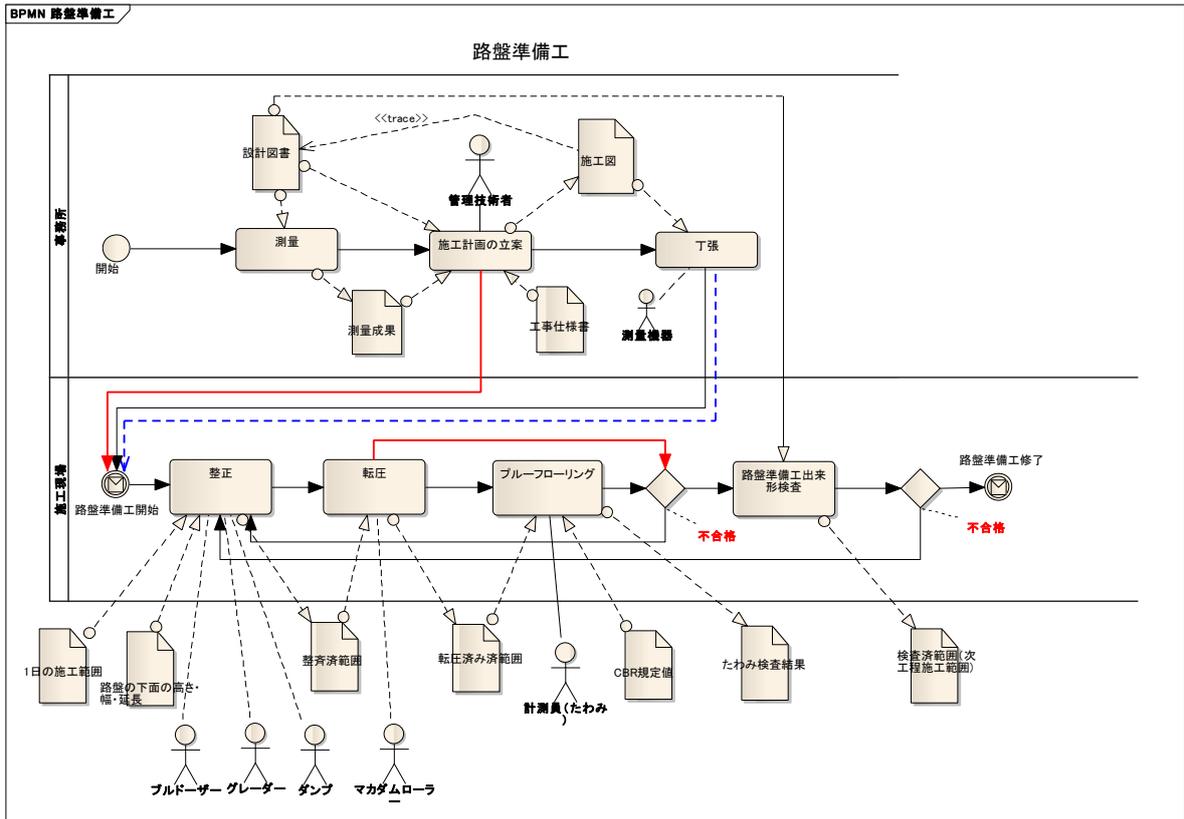


図-2.4 路盤準備工(BPMN)

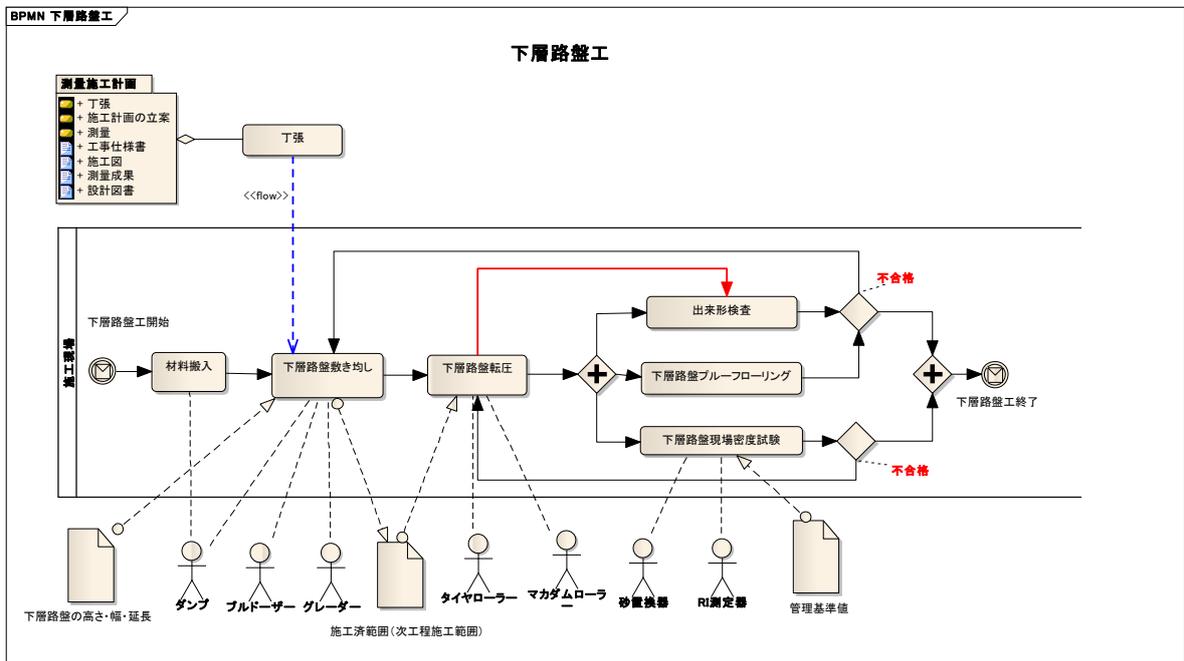


図-2.5 下層路盤工(BPMN)

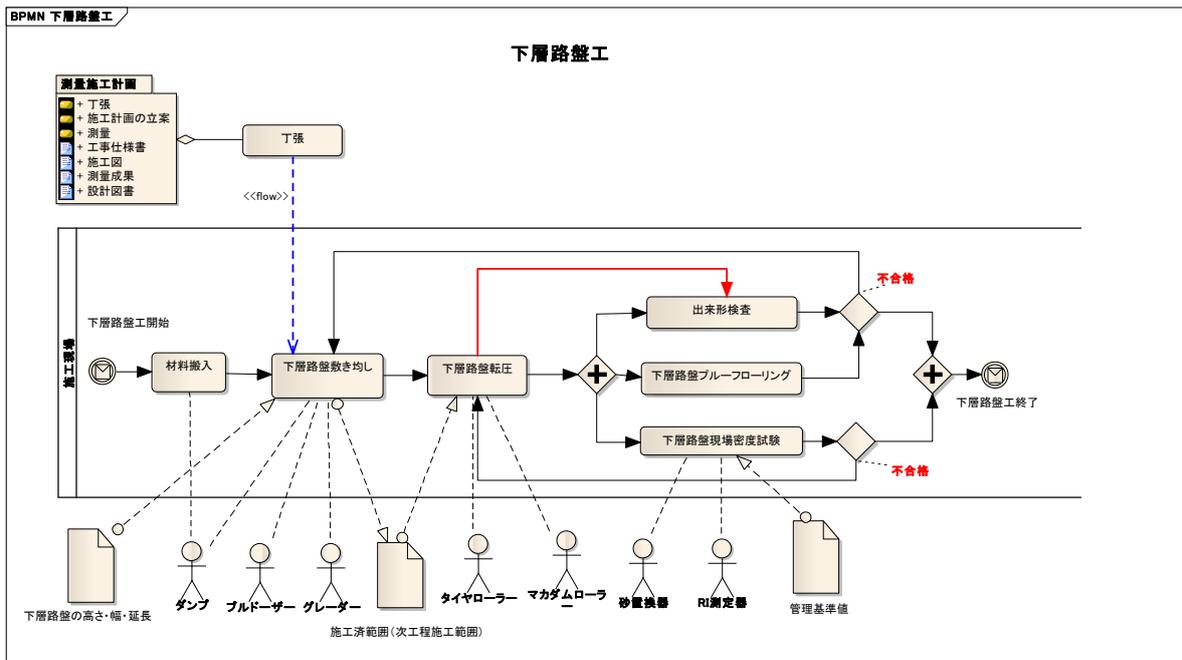


図-2.6 上層路盤工(BPMN)

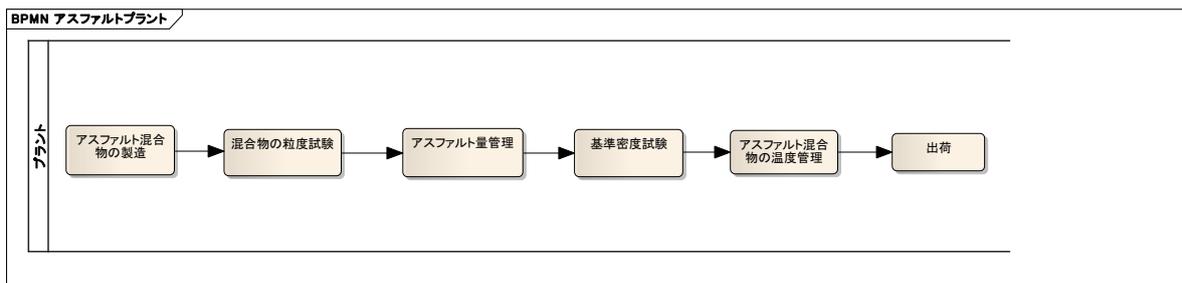


図-2.7 舗装工:アスファルト舗装(BPMN)

図-2.4～2.7までの分析は各施工プロセスの作業項目とアクターの関連付けをモデル化したものである。この図を各施工プロセスの項目とアクターの関連づけをアクティビティ表に示したものを図-2.8, 2.9に示す。図-2.8はアクターに着目してまとめたもの、図-2.9は施工課程の管理等に着目してまとめたものである。

近年、情報化施工は国土交通省の「情報化施工推進会議」の提言を受け、土工や道路工事に急速に現場に浸透しつつある。出来型管理へのTSやGPSの活用のほか、ブルドーザなどの敷均し機械の自動化(GPSを用いた敷均し管理システム等)や振動ローラの転圧管理(GPSを用いた転圧管理システム:工法規定)が用いられるようになり、施工の精度向上や省力化に寄与している。

本研究では、これらの効果も十分考慮した上で、さらなる省力化の適用可能な作業を抽出する目的で、上記のような要因分析を行った。この結果、重機の施工支援システムのほかに、施工管理(品質管理)の省力化にまだ余地がありそうな点、従来から用いられている施工法(マカダムローラによる低速な施工)を高速化することによる施工速度の向上、すなわち工期の短縮の可能性を見いだした(図-2.10のハッチ部分)。

この結果より、我々は、新しい施工法・特に振動タイヤローラを用いた新しい舗装の施工、および施工を行いながらの品質管理による工期短縮を目指すこととし、次章以降ではそれらの実験に関して報告する。



	情報																
	測量施工計画				測量準備工				下層路盤工				基礎				
	工事仕様書	施工図	設計図書	測量成果	1日1日の施工計画	必要図書	上たがひ検査結果	検査済範囲(欠工程施工計画)	検査済範囲	検査済の高低、偏り、直線	管理基準範囲	竣工済範囲(欠工程施工計画)	検査済範囲	検査済の高低、偏り、直線	高層検査済範囲	高層検査済の高低、偏り、直線	検査済範囲
測量施工計画	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
測量準備工	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
下層路盤工	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
基礎	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
鉄骨	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
7スアトムラフト	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

図-2.9 アクティビティ情報関連

		アクター							
		RI測定器	TS	グレーダー	マカダムローラー	レベル	計測員(たわみ)	計測機器	砂置換器
アクティビティ	測量施工計	施工計画の立案							
		測量							
	丁張								
	路盤準備工	ブルーフローリング						X	
		整正		X	X		X		
		転圧				X			
	下層路盤工	路盤準備工出来形検査		X					
		下層路盤ブルーフローリング							
		下層路盤現場密度試験	X						X
		下層路盤工							
		下層路盤敷き均し			X				
	上層路盤工	材料搬入							
		出来形検査							
		出来形検査							
		上層路盤現場密度試験							
		上層路盤工							
		上層路盤材料搬入							
	基層	上層路盤転圧				X			
		上層路盤敷き均し			X				
		上層路盤粒度試験							
		アスファルト混合物転圧				X			
		アスファルト混合物敷き均し							
		アスファルト混合物密度試験							
		プライムコート散布							
		温度管理							
		基層							
		散布量管理							
		出来形検査							
		撤去							
		表層	廃棄						
廃棄									
敷き均し後温度管理									
アスファルト混合物転圧					X				
アスファルト混合物敷き均し									
アスファルト混合物密度試験									
タックコート散布									
温度管理									
出来形検査									
撤去(切削)									
アスファルト	廃棄								
	廃棄								
	表層								
	敷き均し後温度管理								
	平坦性試験								
	アスファルト混合物の温度管理								
	アスファルト混合物の製造								
アスファルト量管理									
基準密度試験									
混合物の粒度試験									
出荷									

図-2.10 本研究のターゲット

### 3. 新しい施工管理システムの開発 —現場実験—

#### 3. 1 はじめに

本章は、「道路舗装工事の施工の効率化と品質向上に関する技術開発」の要素技術の一つである「新しい品質管理システムの開発」のために行われた試験施工調査結果をまとめたものである。

#### 3. 2 試験施工概要

##### (1) 試験施工の目的

現在、盛土工事の施工管理手法の一つとして「 $\alpha$ システム」が開発されている。このシステムは、振動ローラに取り付けた加速度計から出力される転圧時加速度応答の解析から地盤剛性を施工を行いながら連続的に評価するものである。舗装工事の効率化には、品質管理の合理化は重要な要素技術であり、施工を行いながらデータを取得できることは工期短縮に結びつく技術である。

本試験施工は、舗装構築時の新しい施工管理としてこの「 $\alpha$ システム」の適用性評価を目的として行ったものである。

##### (2) 試験施工概要

###### ①実施場所

試験施工の実施場所は、埼玉県久喜市の大林道路(株)機械センター内で行った。図-3.1および図-3.2に実施場所を示す。



図-3.1 試験施工実施場所

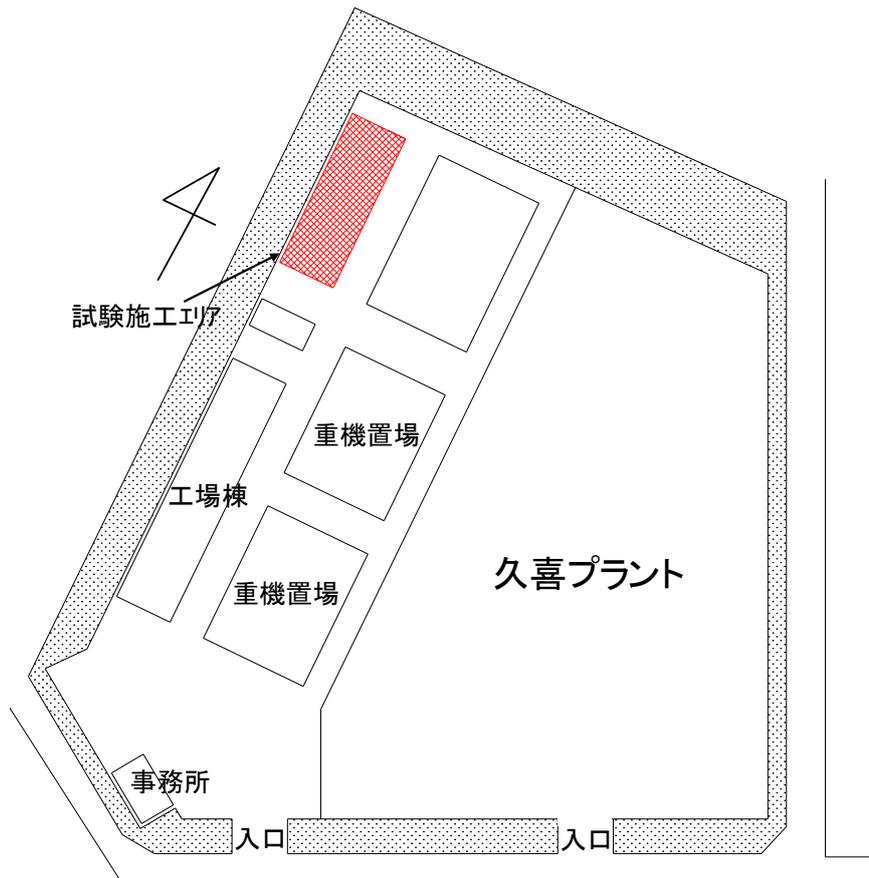


図-3.2 機械センター内試験施工箇所

②試験施工断面

試験施工における舗装断面を図-3.3に示す。なお、路床材として、砕砂とC-30を用いており、試験施工区間の中央部において加水ゾーンを設けて、高含水比の路床区間を構築した。



図-3.3 試験施工断面

③調査項目

試験施工において実施した調査項目および測定位置を表-3. 1, 3. 2, および図-3. 4, 3. 5に示す。

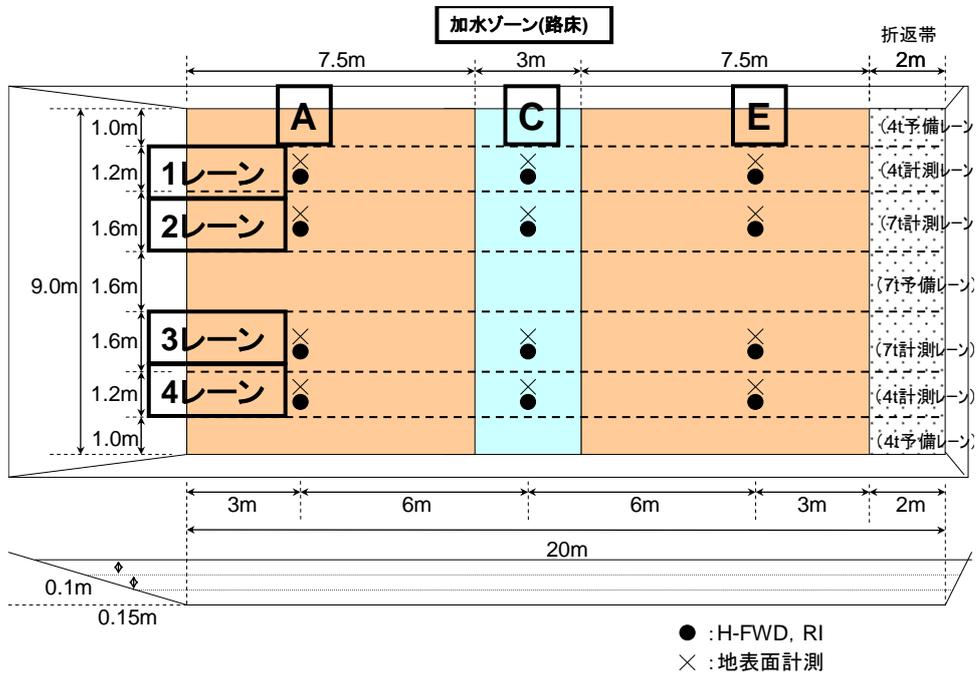


図-3. 4 調査項目測定位置(下層・上層路盤)

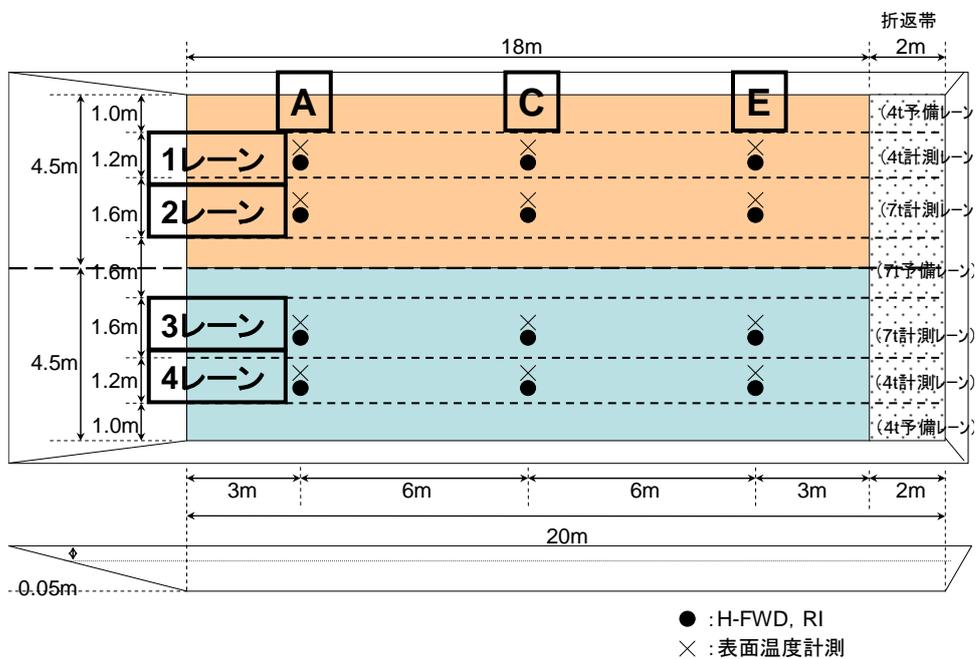


図-3. 5 調査項目測定位置(表層)

表-3.1 現地調査一覧表

工種	項目	数量	備考
下層・上層 路盤	αシステム	N=8+α	2機種 4レーン
	地表面高さ計測	60	12点×(N=2,4,6,8,最終)
	H-FWD	60	12点×(N=2,4,6,8,最終)
	RI(透過型)	60	12点×(N=2,4,6,8,最終)
	現場密度試験	6	仕上がり後測定
表層	αシステム	N=12	2機種 4レーン
	地表面高さ計測	12	FWD測定後
	表面温度計測	156	12点×(N=1~12,FWD)
	FWD	12	表面温度40℃以下
	RI(散乱型)	78	12点×(N=2,4,6,8,10,12)
	コア-抜取	36	12点×3個

表-3.2 室内試験項目一覧表

工種	材料	試験項目			
		突固め試験	Mr試験 (路床・路盤)	Mr試験 (アスコン)	抜取コア- 密度測定
路床	砕砂	1試料	1試料	—	—
	C-30	1試料	1試料	—	—
下層路盤	RC-40	1試料	1試料	—	—
上層路盤	M-30	1試料	1試料	—	—
表層	再生密粒(13)	—	—	12試料	36試料
	計	4試料	4試料	12試料	36試料

### 3.3 調査項目および測定方法

#### (1) αシステム測定

測定は試験施工レーンで一往復ずつ行った。今回はGPSを装着していないため、スタートライン、エンドライン通過時間を記録していった。測定状況を写真-3.1に示す。また今回の試験施工で使用した振動ローラを写真-3.2に示す。



写真-3.1 αシステム測定状況



写真-3. 2  $\alpha$ システム装着振動ローラ

なお、今回は舗装の施工管理であることを考慮して、舗装工事で一般的に使われている4tコンバインドローラ、7t振動ローラを使用し比較検討した。

## (2) FWD測定

小型FWDおよび大型FWDの装置概要を図-3. 6および図-3. 7、測定状況を写真-3. 3および写真-3. 4に示す。FWDは載荷版における衝撃荷重と変位を測定することにより、載荷面の力学的な性状を評価する装置である。FWD測定方法は「FWDおよび小型FWD運用の手引き」（土木学会，舗装工学ライブラリー2）に準拠して行った。

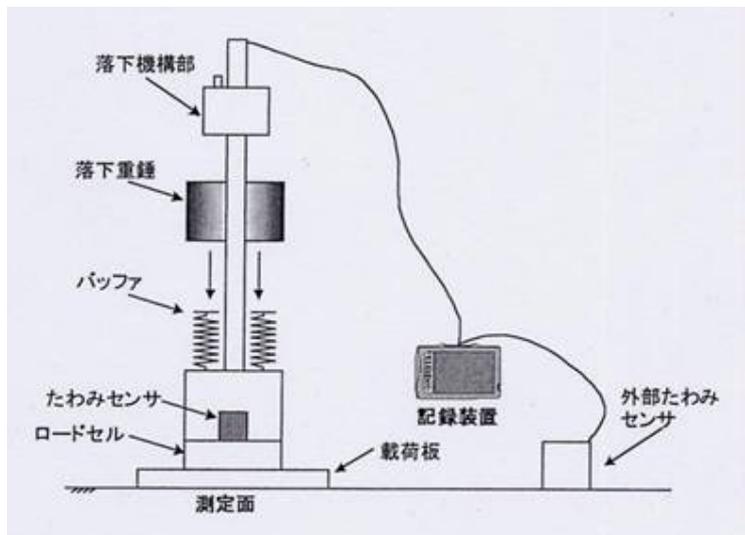


図-3. 6 小型FWD装置概要



写真-3.3 FWD測定(小型)状況

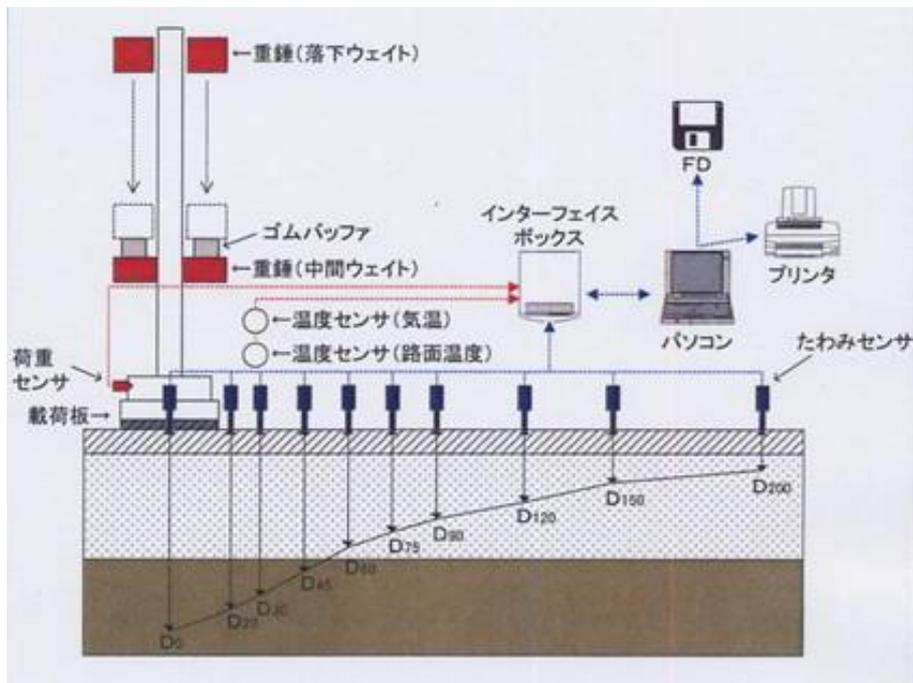


図-3.7 大型FWD装置概要



写真-3.4 FWD測定(大型)状況

なお、FWD測定値からの地盤弾性係数は次式により計算した。

(荷重直下の載荷版変位量からの地盤弾性係数)

$$E_{fwd} = \frac{2 \cdot (1 - \mu^2) \cdot P}{\pi r D}$$

$E_{fwd}$ :地盤弾性係数(MN/m<sup>2</sup>)  $\mu$ :ポアソン比  $P$ :荷重の最大値(N)  $r$ :載荷版半径(mm)  $D$ :変位の最大値(mm)

### (3) RI密度測定

RI密度測定は、「JHS106-2009:RI計器による土の密度試験方法」に準拠して行った。測定状況を写真-3.53に示す。



写真-3.5 RI密度測定状況

### (4) 現場密度測定

現場密度測定はRI測定結果の含水比補正を目的とし、舗装調査・試験法便覧「G021-1 突砂法による路床の密度の測定方法」に準拠して行った。測定状況を写真-3.6に示す。



写真-3.6 現場密度測定 試料採取状況

(5) 表層混合物のレジリエントモデュラス

表層混合物のレジリエントモデュラスの測定は、舗装調査・試験法便覧「B015 アスファルト混合物のレジリエントモデュラス試験」に準拠して行った。測定状況を写真-3. 7に示す。



写真-3. 7 基層混合物のレジリエントモデュラス測定状況

(6) 路床土および路盤材のレジリエントモデュラス

路床土および路盤材のレジリエントモデュラスの測定は、舗装調査・試験法便覧「B016 路盤材・路床土のレジリエントモデュラス試験」に準拠して行った。測定状況を写真-3. 8に示す。



写真-3. 8 路盤材・路床土のレジリエントモデュラス測定状況

### 3. 4 測定結果

#### 3. 4. 1 現地調査

##### (1) 締固め度測定結果

現場密度試験で補正したR I 密度及び抜取りコアの密度測定結果, 締固め度測定結果を表-3. 3, 3. 4に, 各層における転圧回数ごとの締固め度を図-3. 8~3. 11に示す。

表-3. 3 各層密度測定結果

路床材料	測点	路床	下層路盤(RC-40)				上層路盤(M-30)				表層
		仕上がり面	2回転圧	4回転圧	8回転圧	仕上がり面	2回転圧	4回転圧	8回転圧	仕上がり面	抜取りコア
砕砂	A-1	1.885	1.933	2.032	1.984	2.032	2.033	2.161	2.210	2.186	2.353
	C-1	1.948	1.968	2.066	1.998	2.015	2.060	2.098	2.074	2.179	2.358
	E-1	1.951	1.966	1.962	2.003	2.131	2.093	2.068	2.057	2.167	2.356
	A-2	1.945	1.980	2.027	2.074	2.139	2.120	2.244	2.273	2.273	2.392
	C-2	1.929	1.985	1.904	2.078	2.061	2.061	2.147	2.229	2.210	2.399
	E-2	1.980	1.907	2.063	2.091	2.066	2.182	2.166	2.196	2.201	2.400
C-30	A-3	2.243	1.909	2.088	1.933	1.927	2.205	2.247	2.102	2.161	2.379
	C-3	2.361	1.999	1.978	2.010	2.097	2.111	2.169	2.125	2.255	2.331
	E-3	2.209	1.859	1.925	1.929	1.999	2.094	2.267	2.209	2.096	2.385
	A-4	2.206	1.933	1.955	1.906	1.992	2.082	2.183	2.155	2.191	2.376
	C-4	2.389	1.927	1.977	1.896	2.105	2.157	2.135	2.183	2.230	2.346
	E-4	2.286	1.850	1.842	1.959	1.988	2.059	2.186	2.132	2.111	2.356
平均値		2.111	1.935	1.985	1.988	2.046	2.105	2.173	2.162	2.188	2.369

C-1. 2. 3. 4:加水ゾーン

表-3. 4 各層締固め度測定結果

路床材料	測点	路床	下層路盤(RC-40)				上層路盤(M-30)				表層
		仕上がり面	2回転圧	4回転圧	8回転圧	仕上がり面	2回転圧	4回転圧	8回転圧	仕上がり面	抜取りコア
砕砂	A-1	88.9	94.4	99.5	96.5	99.1	88.0	93.2	94.7	93.5	98.1
	C-1	91.6	95.4	100.5	97.6	97.2	88.8	90.0	88.8	93.3	98.2
	E-1	92.0	96.1	95.5	97.4	103.5	89.7	88.5	87.4	92.6	98.2
	A-2	92.0	96.2	99.5	101.0	103.5	90.9	96.0	97.2	93.9	99.6
	C-2	90.8	97.9	92.8	101.2	100.1	88.9	91.2	95.0	94.1	99.9
	E-2	93.3	92.8	101.2	101.9	100.3	93.4	92.2	93.1	93.8	100.0
C-30	A-3	93.7	93.5	102.6	95.3	93.9	94.9	96.4	90.6	92.0	99.1
	C-3	97.0	98.3	96.3	97.8	101.9	90.2	92.5	90.9	95.6	97.1
	E-3	92.7	91.5	94.0	95.6	98.2	89.6	97.1	94.4	88.1	99.4
	A-4	92.6	94.5	95.9	93.4	96.8	89.3	93.8	92.1	94.1	99.0
	C-4	98.5	93.6	96.4	91.7	102.4	91.6	91.1	93.2	94.6	97.8
	E-4	95.9	90.7	90.4	96.2	97.1	87.9	93.2	91.3	89.8	98.2
平均値		93.3	94.6	97.1	97.1	99.5	90.3	92.9	92.4	93.0	98.7

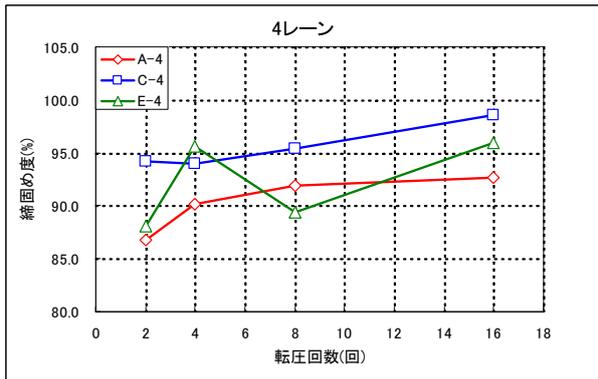
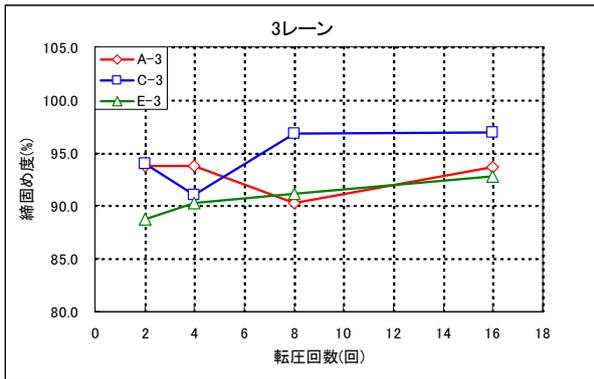
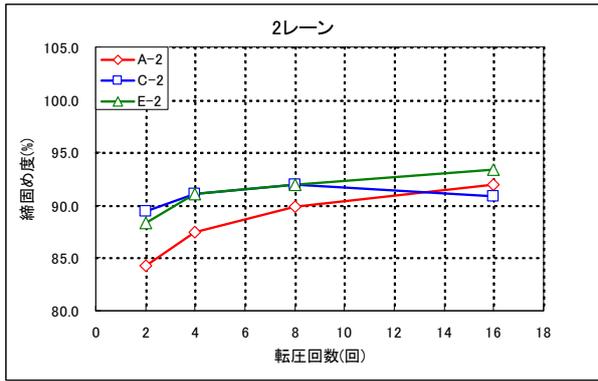
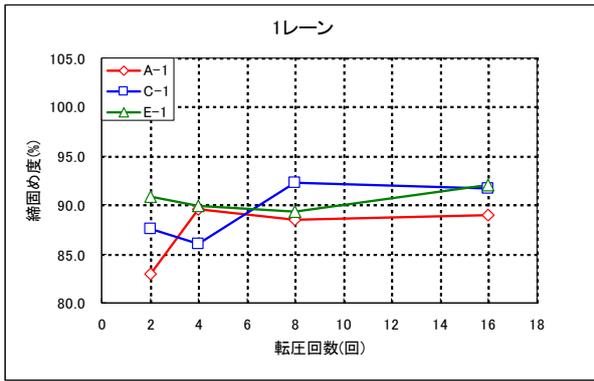


図-3. 8 転圧回数ごとの締固め度(路床)

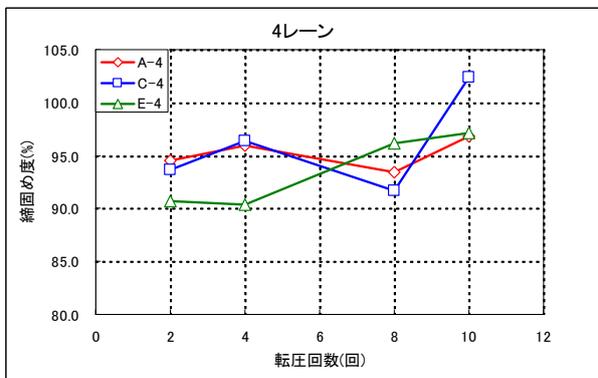
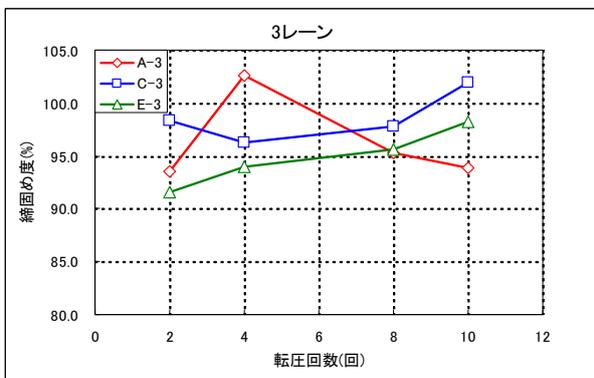
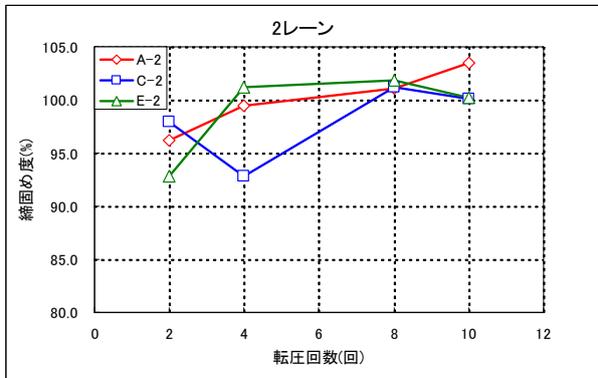
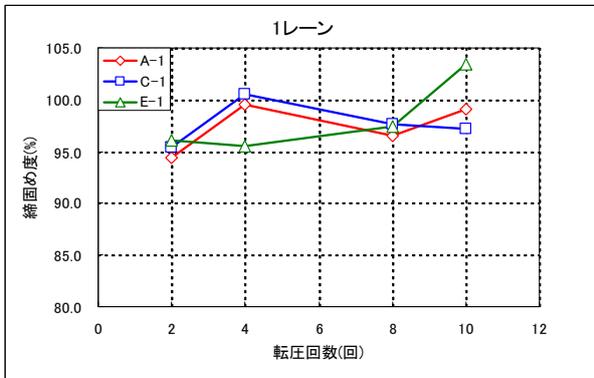


図-3. 9 転圧回数ごとの締固め度(下層路盤)

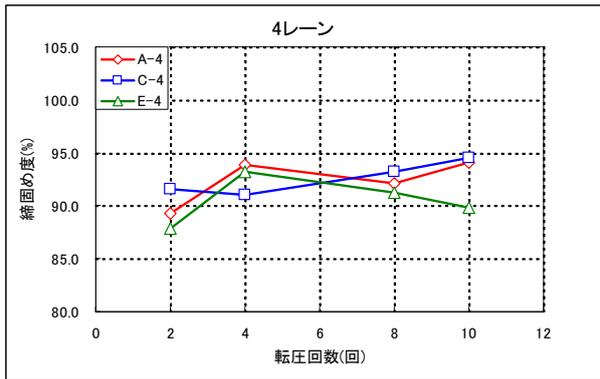
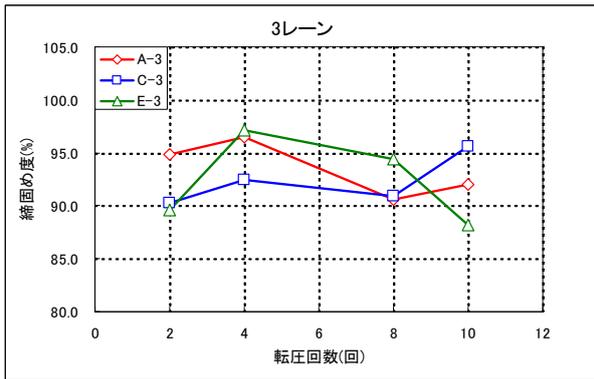
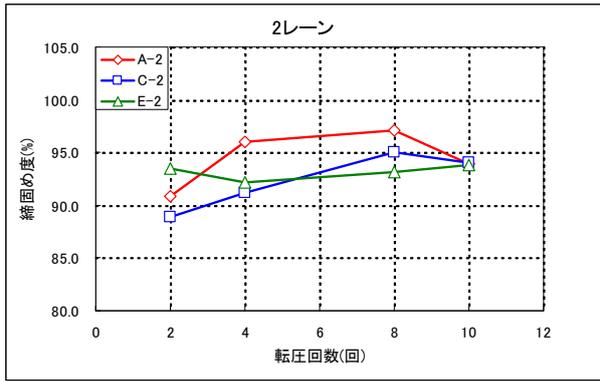
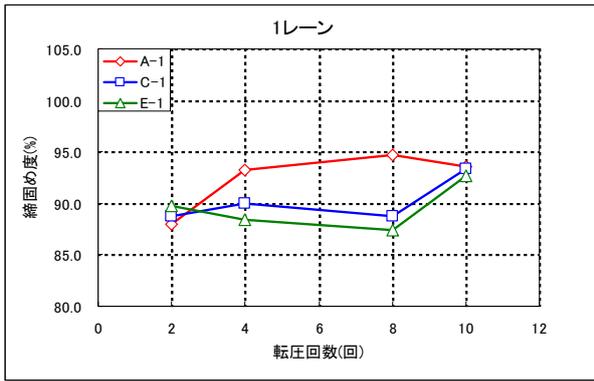


図-3. 10 転圧回数ごとの締固め度(上層路盤)

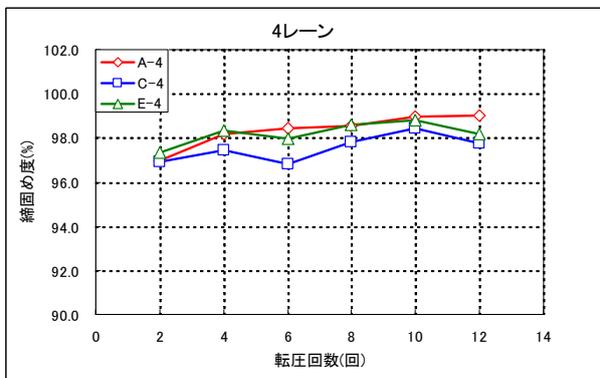
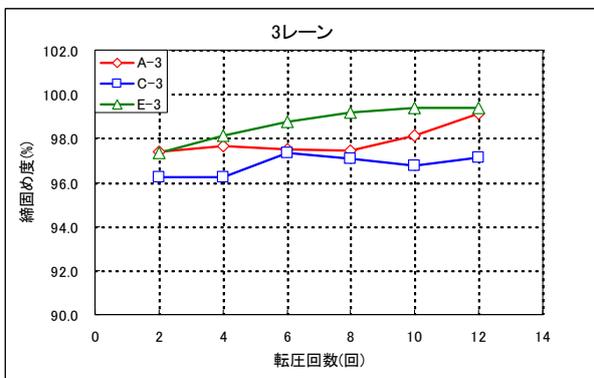
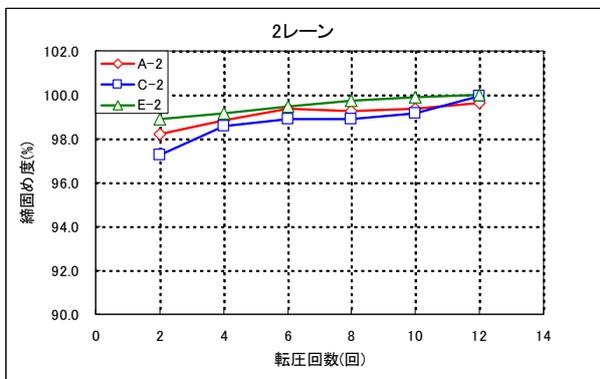
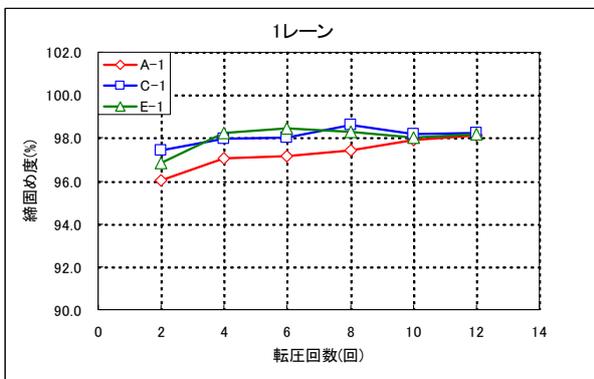


図-3. 11 転圧回数ごとの締固め度(表層)

(2) FWD測定

FWD測定結果を表-3. 5に、路床、上・下層路盤における転圧回数ごとの $E_{fwd}$ を図-3. 1 2～3, 1 4に示す。

表-3. 5 各層面の $E_{fwd}$ 測定結果

測点	路床		下層路盤			上層路盤				表層
	仕上がり面	2回転圧	4回転圧	8回転圧	仕上がり面	2回転圧	4回転圧	8回転圧	仕上がり面	仕上がり面
A-1	32.2	37.7	39.6	42.3	43.9	46.5	52.5	52.1	55.4	146
C-1	29.6	36.3	36.3	41.6	45.2	42.9	44.9	42.3	52.1	152
E-1	29.0	38.3	41.9	46.5	49.5	46.2	52.1	48.8	59.4	135
A-2	29.5	38.6	40.6	42.3	48.2	44.9	52.1	53.5	61.3	138
C-2	26.4	36.0	38.3	42.9	44.2	46.5	52.5	48.8	58.4	119
E-2	29.0	43.6	39.0	40.3	46.5	50.5	55.1	53.8	62.7	131
A-3	22.0	32.4	32.1	33.1	33.7	38.0	36.3	35.7	40.0	31
C-3	17.0	23.8	24.8	—	24.5	34.7	33.1	34.4	33.4	20
E-3	48.2	47.5	46.9	56.7	53.8	53.8	62.3	59.0	69.6	210
A-4	43.5	43.9	45.6	49.8	49.2	50.2	53.1	47.2	57.4	74
C-4	22.0	25.8	26.1	29.1	26.8	33.7	35.4	34.7	33.4	27
E-4	56.7	44.9	48.8	52.5	59.0	55.4	59.7	61.3	71.9	210
平均値	32	37	38	43	44	45	49	48	55	116

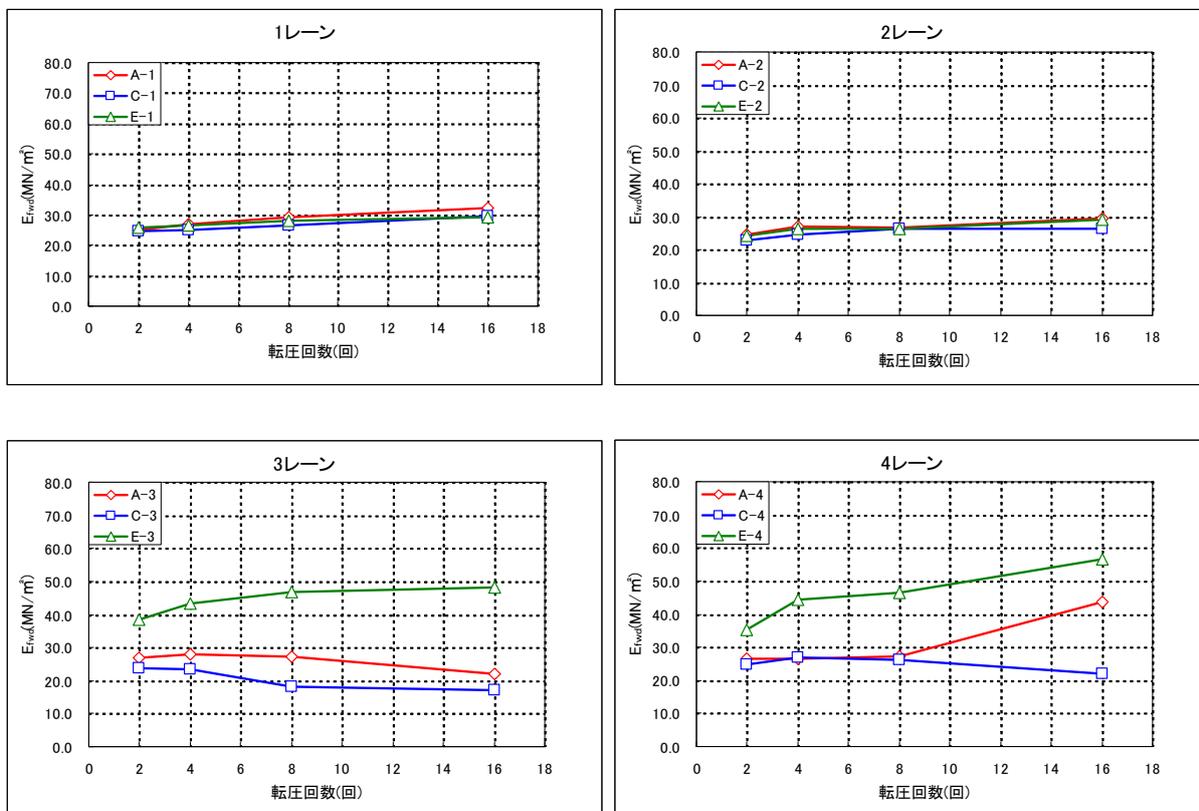


図-3. 12 転圧回数ごとの $E_{fwd}$ (路床)

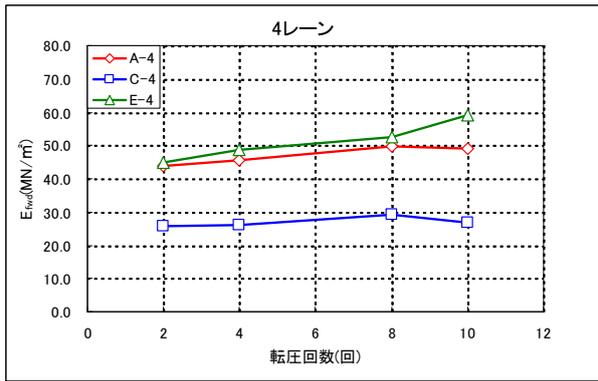
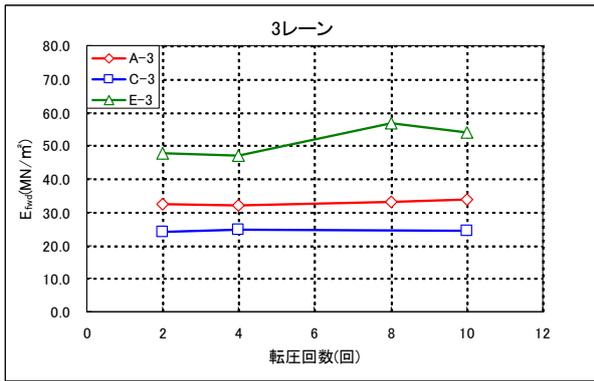
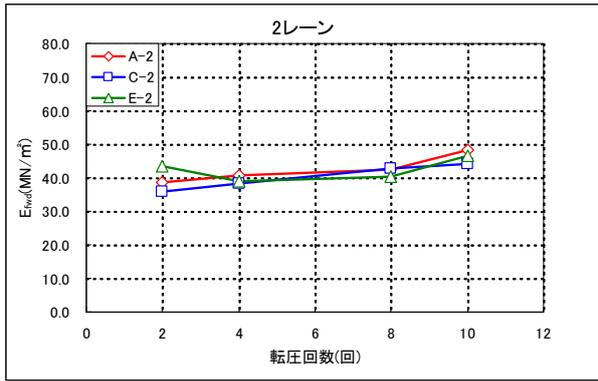
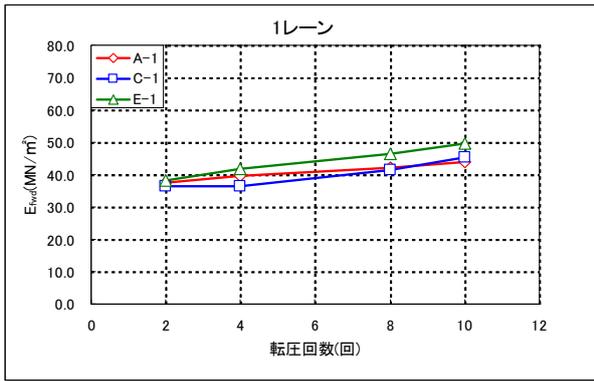


図-3. 13 転圧回数ごとのE<sub>fwd</sub>(下層路盤)

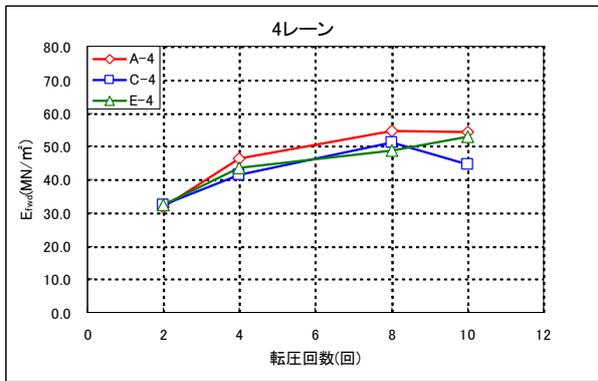
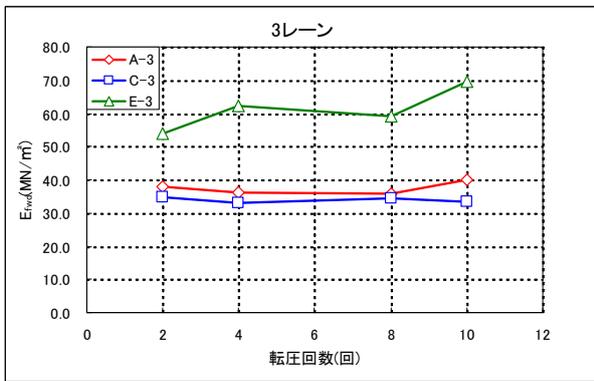
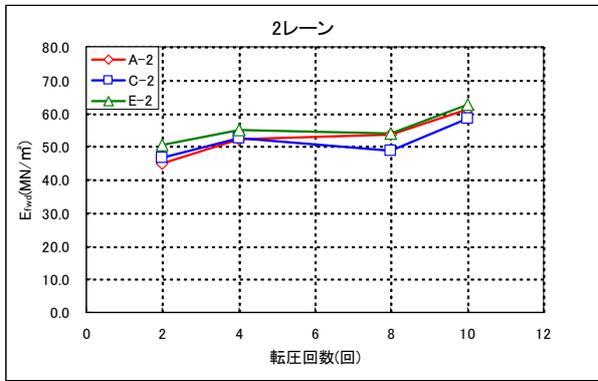
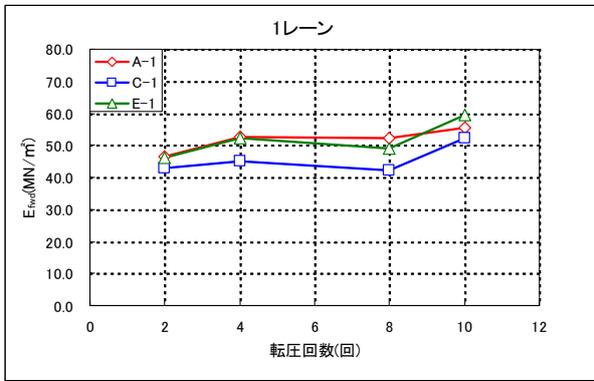


図-3. 14 転圧回数ごとのE<sub>fwd</sub>(上層路盤)

(3)  $\alpha$  システム測定

①分散乱れ率より算出した結果

$\alpha$  システムより得られた演算結果の内、分散乱れ率で算出した各測点における地盤弾性係数（以降、 $E_{roller}$ と記す）を表-3. 6, 3. 7に、各層における転圧回数ごとの $E_{roller}$ を図-3. 15～3. 18に、表層各測定レーンにおける表面温度と $E_{roller}$ の関係を図-3. 19, 3, 20に示す。

表-3. 6  $E_{roller}$ 測定結果(路床・下層路盤・上層路盤)

測点	路床	下層路盤			上層路盤				
	仕上がり面	2回転圧	4回転圧	8回転圧	仕上がり面	2回転圧	4回転圧	8回転圧	仕上がり面
A-1	36.1	34.3	33.7	37.8	32.7	34.6	38.1	43.9	38.7
C-1	36.0	34.1	33.8	38.1	30.0	33.5	37.2	42.4	36.6
E-1	36.6	31.2	31.4	37.8	29.8	37.0	38.1	43.2	36.7
A-2	26.8	25.1	26.0	27.1	29.4	24.5	26.2	29.0	—
C-2	26.5	23.5	24.8	27.2	28.7	24.5	26.3	26.4	—
E-2	25.2	23.9	24.3	26.2	26.7	24.5	23.8	26.7	—
A-3	27.4	24.9	26.4	24.9	25.6	25.5	26.6	26.8	—
C-3	26.4	27.5	27.8	26.9	25.9	23.3	25.0	22.2	—
E-3	29.3	27.5	28.1	30.8	30.1	26.6	30.1	32.7	—
A-4	54.8	38.6	39.9	50.7	43.3	31.7	46.2	54.6	54.2
C-4	47.4	42.5	40.5	43.9	36.9	32.3	41.5	51.3	44.5
E-4	53.4	38.3	38.9	41.9	42.0	32.2	43.5	48.7	52.9
平均値	35.5	30.9	31.3	34.4	31.7	29.2	33.5	37.3	43.9

表-3. 7  $E_{roller}$ 測定結果(表層)

測点		表層					
		2回転圧	4回転圧	6回転圧	8回転圧	10回転圧	仕上がり面
A-1	$E_{roller}(MN/m^2)$	28.6	32.8	37.2	42.5	46.3	71.0
	路面温度( $^{\circ}C$ )	100.0	85.0	69.0	60.0	54.0	38.0
C-1	$E_{roller}(MN/m^2)$	27.4	29.9	34.1	36.2	37.2	66.8
	路面温度( $^{\circ}C$ )	104.0	88.0	73.0	68.0	59.0	38.0
E-1	$E_{roller}(MN/m^2)$	27.8	36.4	39.0	40.0	43.1	59.3
	路面温度( $^{\circ}C$ )	94.0	84.0	72.0	66.0	60.0	38.0
A-2	$E_{roller}(MN/m^2)$	26.2	27.7	31.2	32.7	36.0	59.5
	路面温度( $^{\circ}C$ )	97.0	83.0	69.0	60.0	53.0	37.0
C-2	$E_{roller}(MN/m^2)$	27.6	29.4	28.9	28.6	31.8	46.5
	路面温度( $^{\circ}C$ )	102.0	81.0	73.0	65.0	55.0	37.0
E-2	$E_{roller}(MN/m^2)$	28.0	30.1	31.3	31.8	34.5	51.0
	路面温度( $^{\circ}C$ )	100.0	81.0	74.0	68.0	58.0	37.0
A-3	$E_{roller}(MN/m^2)$	28.6	34.4	33.8	39.7	49.5	45.0
	路面温度( $^{\circ}C$ )	127.0	104.0	94.0	75.0	58.0	35.0
C-3	$E_{roller}(MN/m^2)$	21.6	21.4	22.0	22.3	21.6	27.9
	路面温度( $^{\circ}C$ )	127.0	104.0	94.0	75.0	58.0	35.0
E-3	$E_{roller}(MN/m^2)$	22.8	23.3	23.9	24.6	26.0	32.4
	路面温度( $^{\circ}C$ )	127.0	104.0	94.0	75.0	58.0	35.0
A-4	$E_{roller}(MN/m^2)$	32.4	43.5	52.7	48.0	60.7	107.2
	路面温度( $^{\circ}C$ )	127.0	113.0	97.0	74.0	55.0	38.0
C-4	$E_{roller}(MN/m^2)$	28.9	36.6	40.4	40.5	27.3	64.9
	路面温度( $^{\circ}C$ )	127.0	113.0	97.0	74.0	55.0	38.0
E-4	$E_{roller}(MN/m^2)$	33.0	43.7	45.2	56.0	60.5	142.7
	路面温度( $^{\circ}C$ )	127.0	113.0	97.0	74.0	55.0	38.0
平均	$E_{roller}(MN/m^2)$	27.7	32.4	35.0	36.9	39.5	64.5

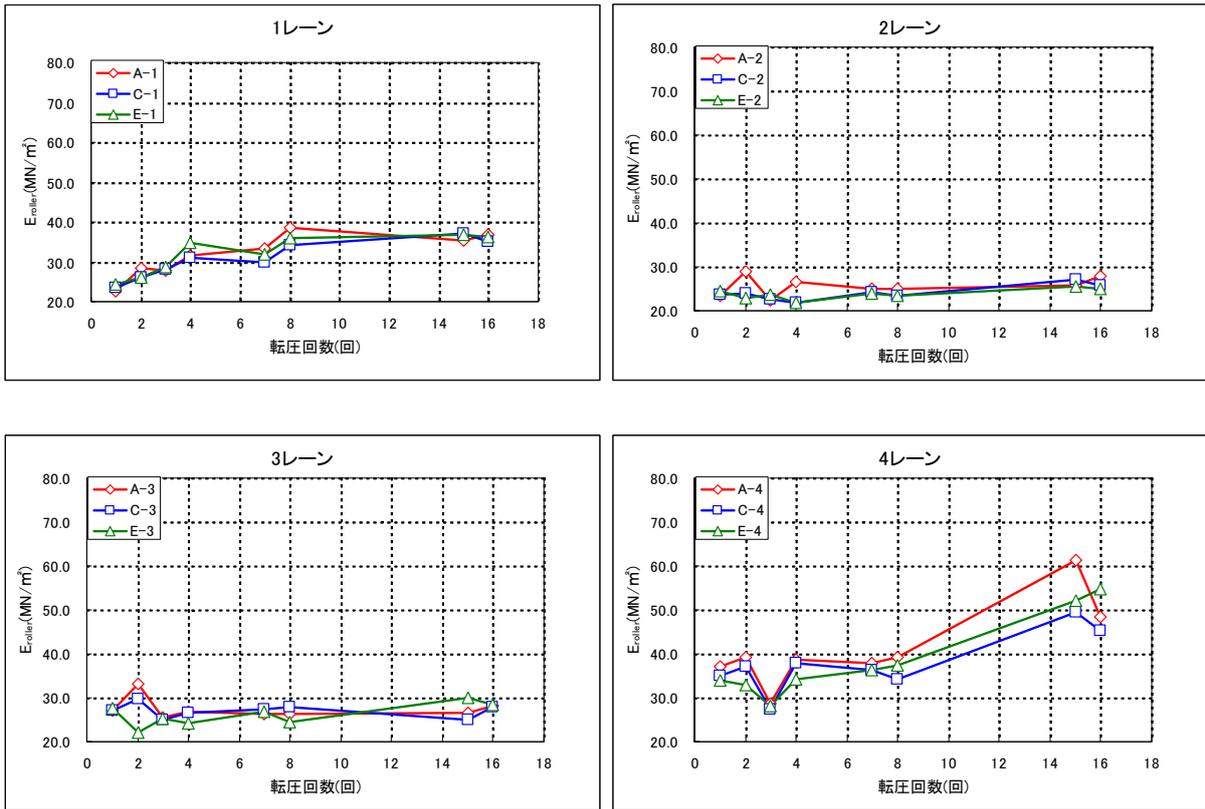


図-3. 15 転圧回数ごとのEroller(路床)

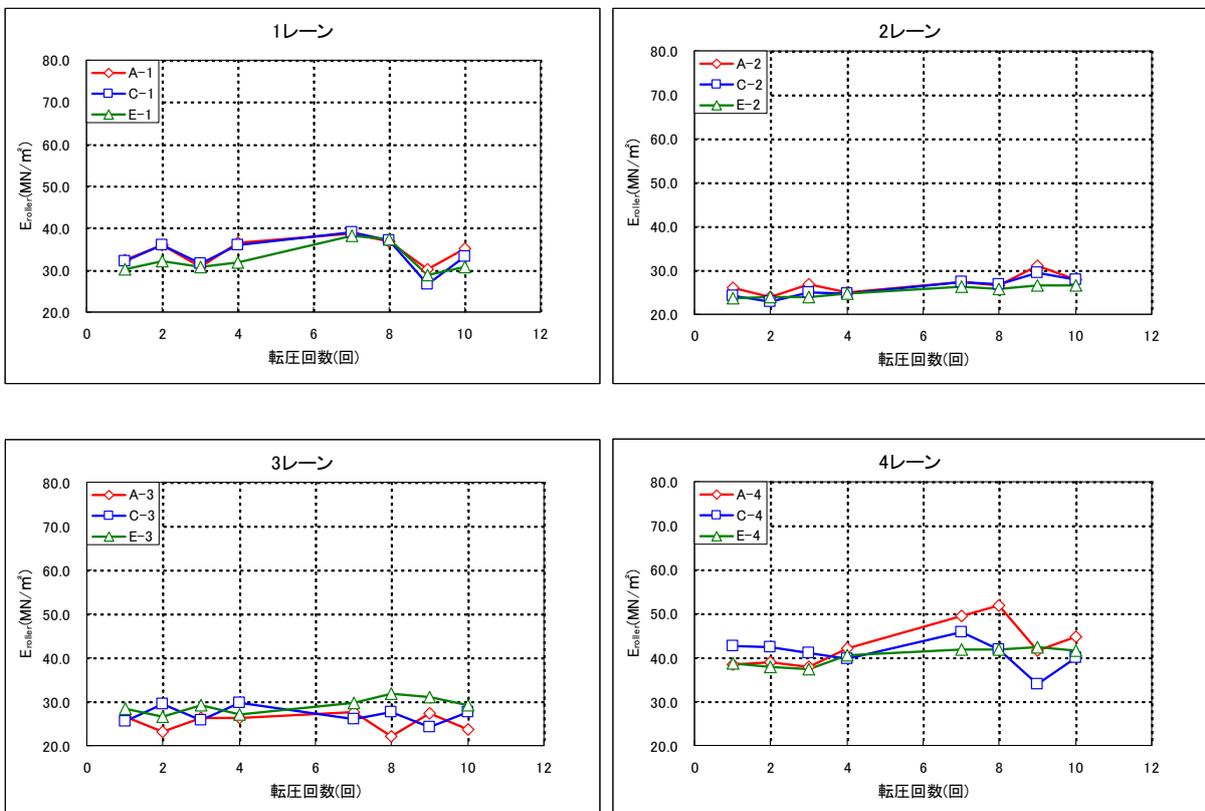


図-3. 16 転圧回数ごとのEroller(下層路盤)

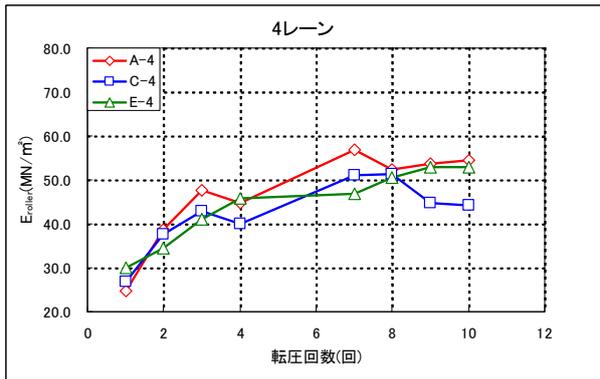
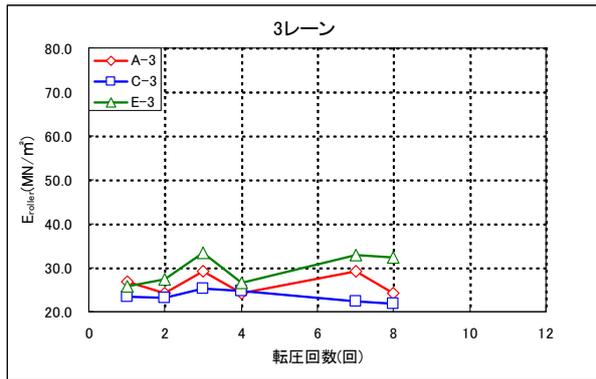
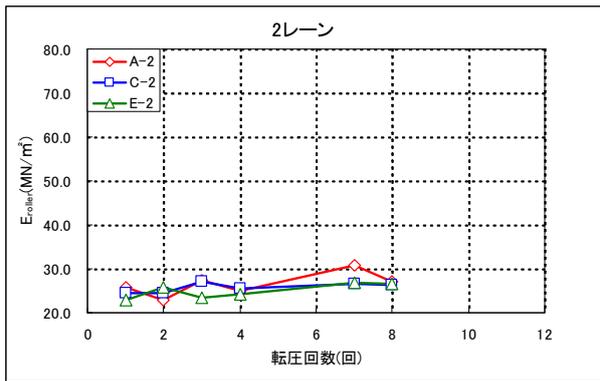
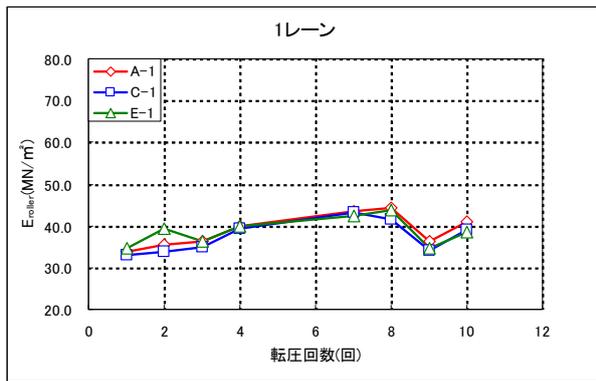


図-3. 17 転圧回数ごとのEroller(上層路盤)

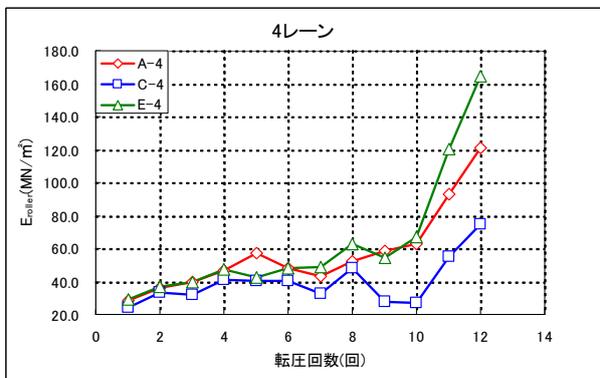
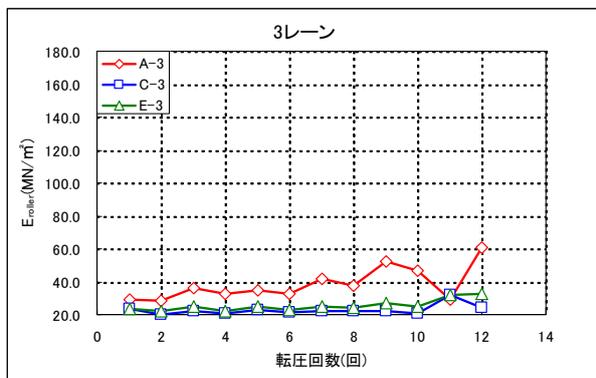
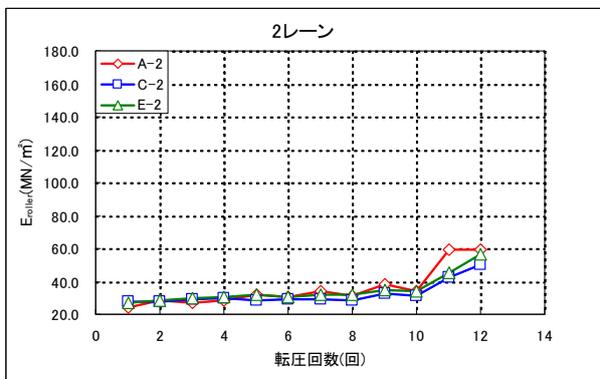
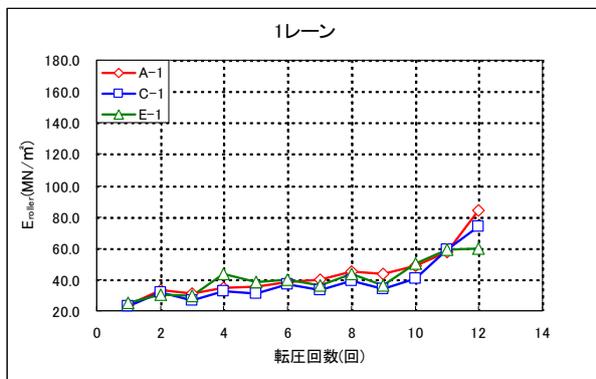


図-3. 18 転圧回数ごとのEroller(表層)

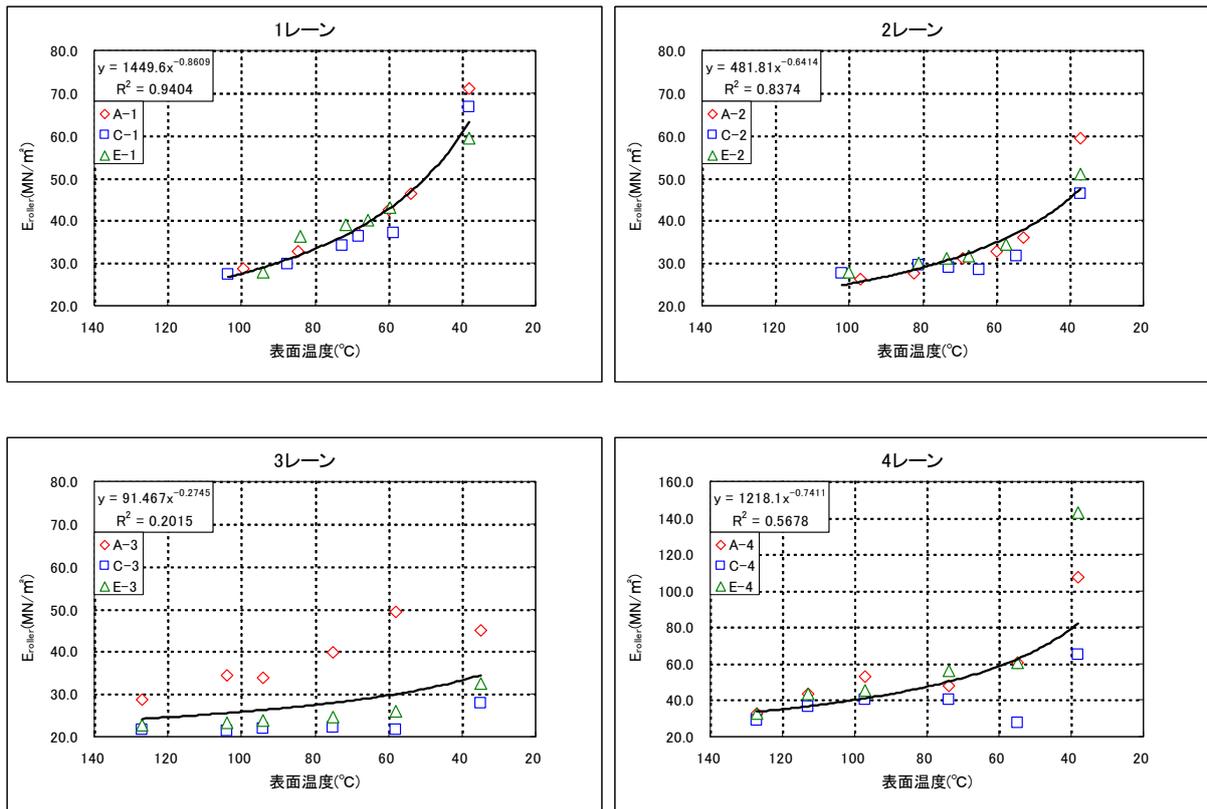


図-3. 19 Erollerと表面温度の関係(1~4レーン)

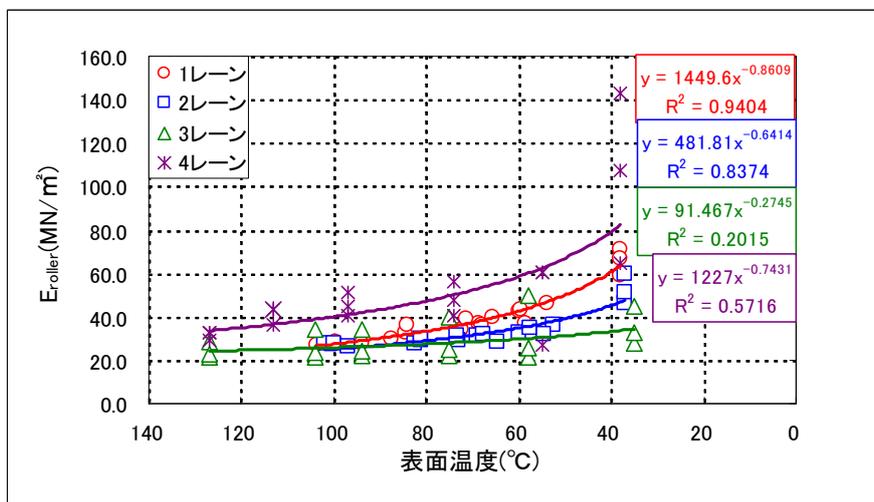


図-3. 20 Erollerと表面温度の関係(まとめ)

②ピーク乱れ率より算出した結果

$\alpha$  システムより得られた演算結果の内、ピーク乱れ率で算出した各測点における地盤弾性係数を表-3. 8, 3. 9に、各層における転圧回数ごとの $E_{roller}$ を図-3. 21~3. 24, 表層各測定レーンにおける表面温度と $E_{roller}$ の関係を図-3. 25, 3. 26に示す。

表-3. 8  $E_{roller}$ 測定結果(路床・下層路盤・上層路盤)

測点	路床	下層路盤				上層路盤			
	仕上がり面	2回転圧	4回転圧	8回転圧	仕上がり面	2回転圧	4回転圧	8回転圧	仕上がり面
A-1	23.4	19.1	20.4	23.7	20.4	22.1	21.9	21.8	23.7
C-1	20.9	19.5	20.6	22.8	20.7	22.2	22.6	22.4	24.4
E-1	23.2	19.6	21.5	22.4	19.9	20.7	22.7	22.3	23.2
A-2	18.4	18.5	19.8	21.6	23.8	19.1	21.0	23.6	—
C-2	19.8	18.9	20.2	21.9	24.2	19.4	20.1	21.8	—
E-2	19.7	18.8	19.7	21.4	22.5	18.4	19.4	22.7	—
A-3	17.8	17.3	18.9	17.9	19.5	19.1	19.3	20.4	—
C-3	17.6	16.9	16.7	16.8	17.4	16.4	17.1	16.2	—
E-3	19.9	19.3	21.6	21.2	24.0	20.4	22.7	23.9	—
A-4	18.9	23.7	23.7	26.6	28.8	19.0	25.0	23.2	29.7
C-4	15.0	23.5	19.3	20.9	20.9	17.2	22.9	18.7	25.1
E-4	21.2	22.6	24.0	26.3	25.2	19.4	27.0	24.2	31.8
平均値	19.6	19.8	20.5	21.9	22.2	19.4	21.8	21.7	26.3

表-3. 9  $E_{roller}$ 測定結果(表層)

測点		表層					
		2回転圧	4回転圧	6回転圧	8回転圧	10回転圧	仕上がり面
A-1	$E_{roller}(MN/m^2)$	20.0	24.7	29.4	27.7	30.1	39.8
	路面温度( $^{\circ}C$ )	100.0	85.0	69.0	60.0	54.0	38.0
C-1	$E_{roller}(MN/m^2)$	17.9	23.7	26.5	24.6	28.2	39.3
	路面温度( $^{\circ}C$ )	104.0	88.0	73.0	68.0	59.0	38.0
E-1	$E_{roller}(MN/m^2)$	18.5	24.4	27.9	30.5	28.4	39.1
	路面温度( $^{\circ}C$ )	94.0	84.0	72.0	66.0	60.0	38.0
A-2	$E_{roller}(MN/m^2)$	20.6	22.1	22.6	24.8	23.5	35.1
	路面温度( $^{\circ}C$ )	97.0	83.0	69.0	60.0	53.0	37.0
C-2	$E_{roller}(MN/m^2)$	23.6	25.1	23.4	25.2	25.6	33.8
	路面温度( $^{\circ}C$ )	102.0	81.0	73.0	65.0	55.0	37.0
E-2	$E_{roller}(MN/m^2)$	23.9	26.5	25.7	26.2	28.5	44.0
	路面温度( $^{\circ}C$ )	100.0	81.0	74.0	68.0	58.0	37.0
A-3	$E_{roller}(MN/m^2)$	21.7	24.1	26.3	29.3	34.3	32.5
	路面温度( $^{\circ}C$ )	127.0	104.0	94.0	75.0	58.0	35.0
C-3	$E_{roller}(MN/m^2)$	16.1	17.1	17.7	17.5	16.8	21.6
	路面温度( $^{\circ}C$ )	127.0	104.0	94.0	75.0	58.0	35.0
E-3	$E_{roller}(MN/m^2)$	18.3	19.2	19.0	20.5	21.9	25.5
	路面温度( $^{\circ}C$ )	127.0	104.0	94.0	75.0	58.0	35.0
A-4	$E_{roller}(MN/m^2)$	24.1	28.1	32.6	36.0	46.8	75.8
	路面温度( $^{\circ}C$ )	127.0	113.0	97.0	74.0	55.0	38.0
C-4	$E_{roller}(MN/m^2)$	21.4	24.5	24.1	24.0	19.6	29.9
	路面温度( $^{\circ}C$ )	127.0	113.0	97.0	74.0	55.0	38.0
E-4	$E_{roller}(MN/m^2)$	22.8	31.6	31.1	36.9	47.9	82.7
	路面温度( $^{\circ}C$ )	127.0	113.0	97.0	74.0	55.0	38.0
平均 $E_{roller}(MN/m^2)$		20.7	24.2	25.5	26.9	29.3	41.6

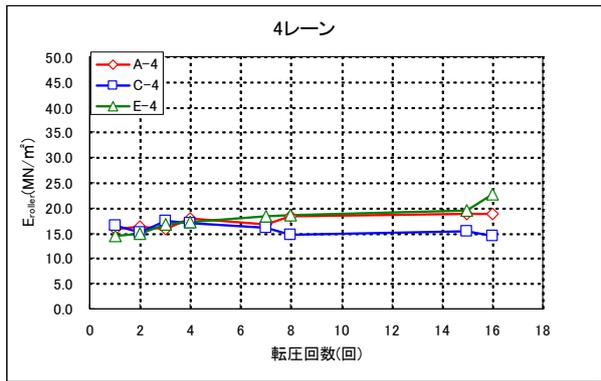
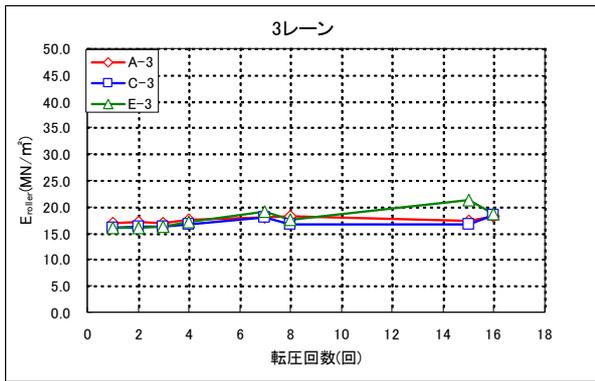
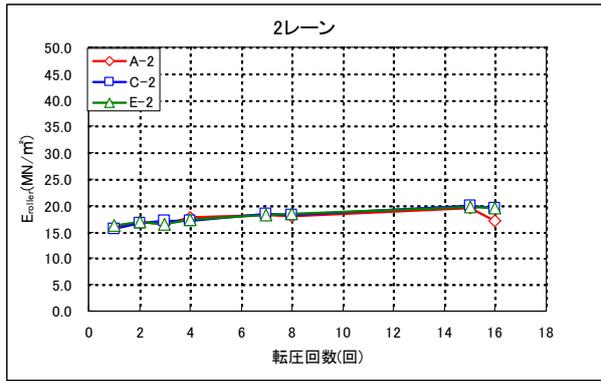
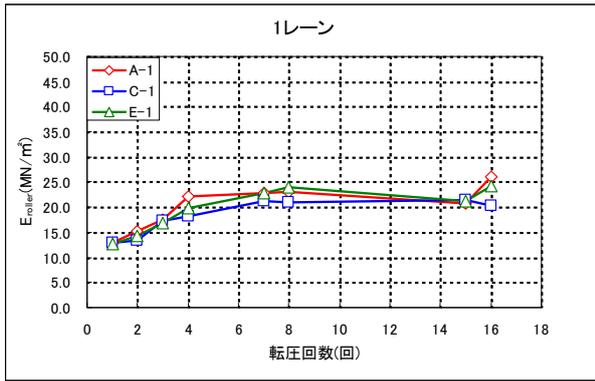


図-3. 21 転圧回数ごとのEroller(路床)

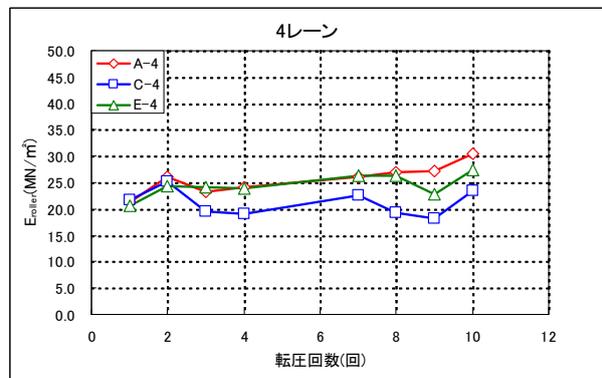
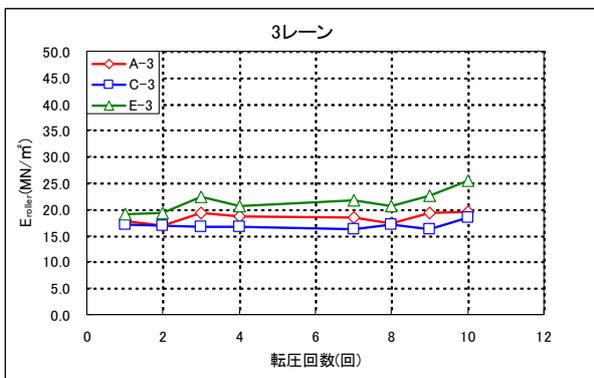
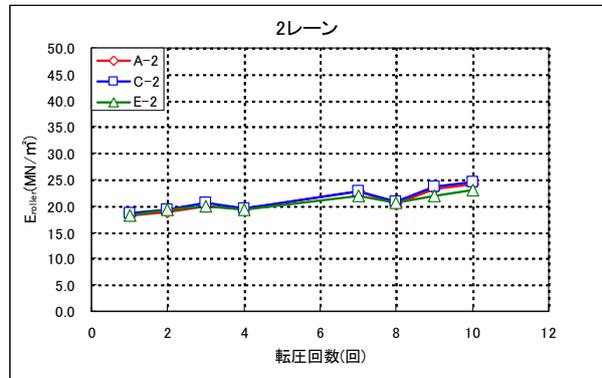
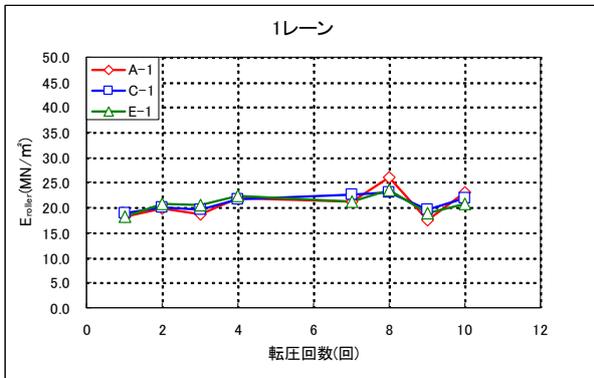


図-3. 22 転圧回数ごとのEroller(下層路盤)

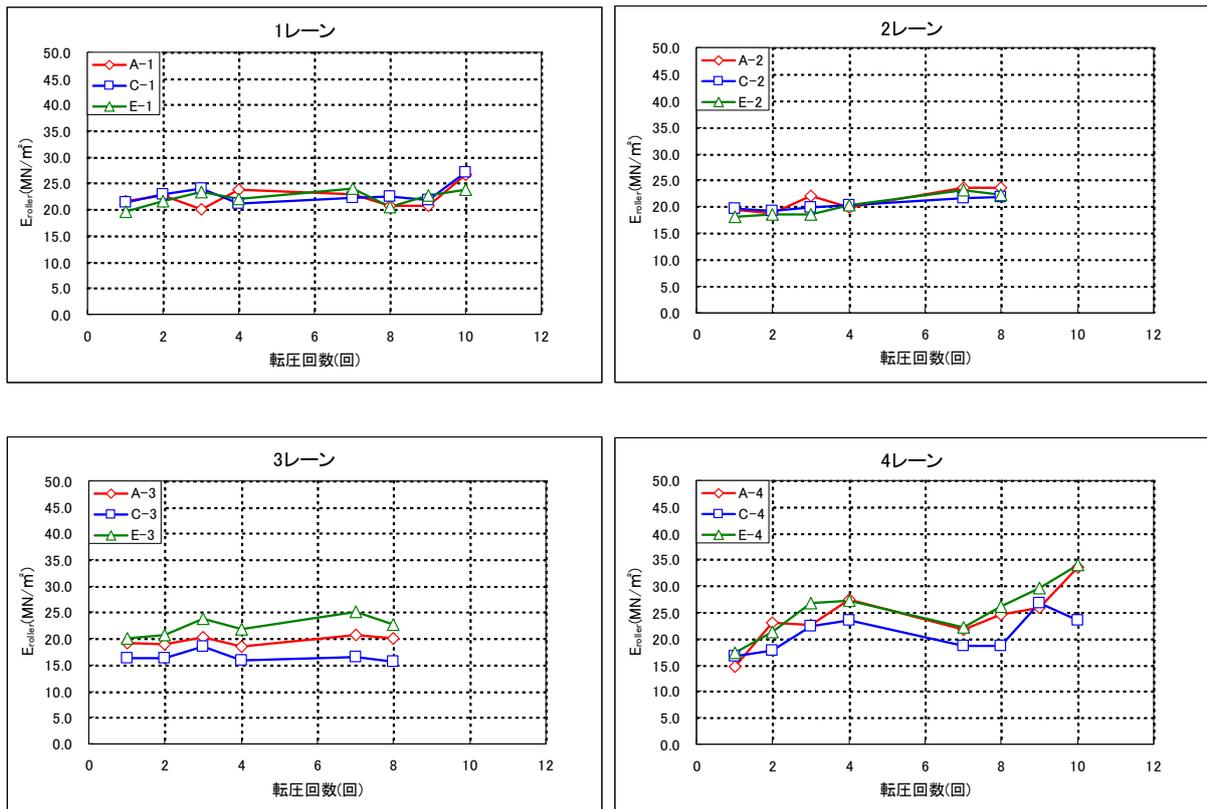


図-3. 23 転圧回数ごとのEroller(上層路盤)

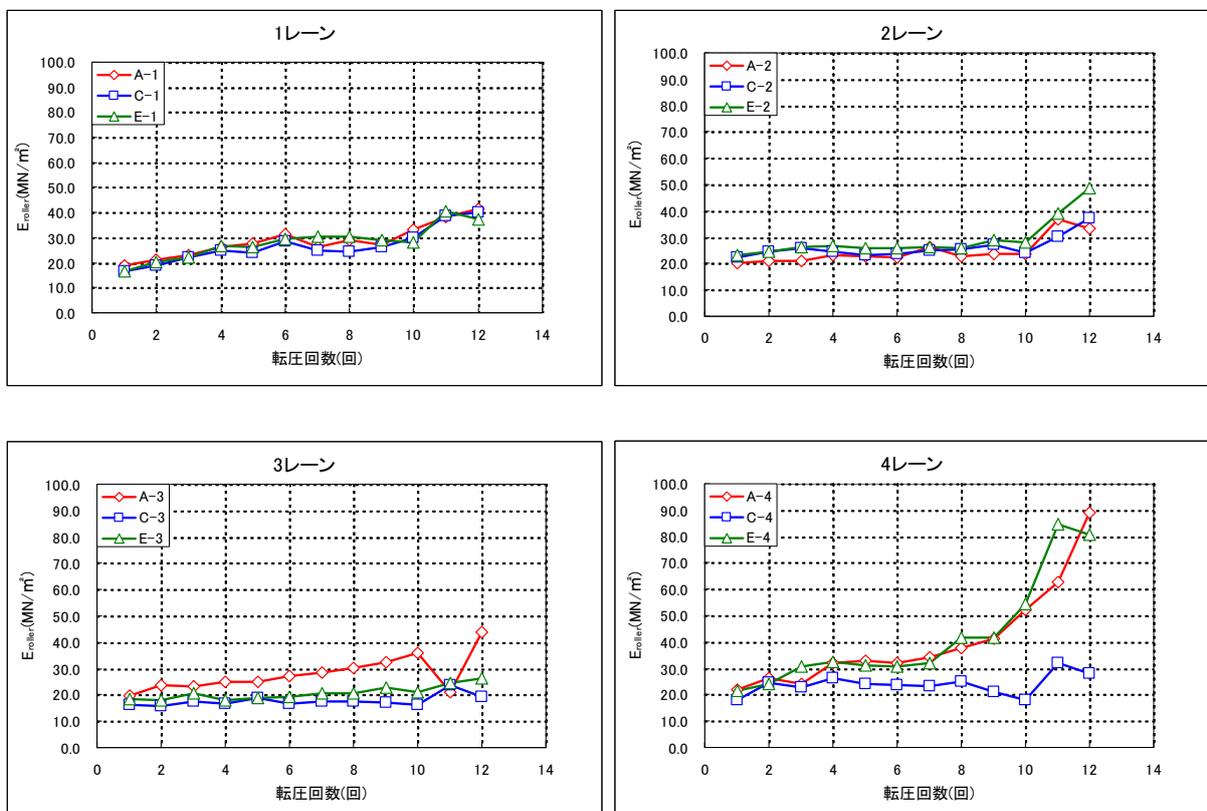


図-3. 24 転圧回数ごとのEroller(表層)

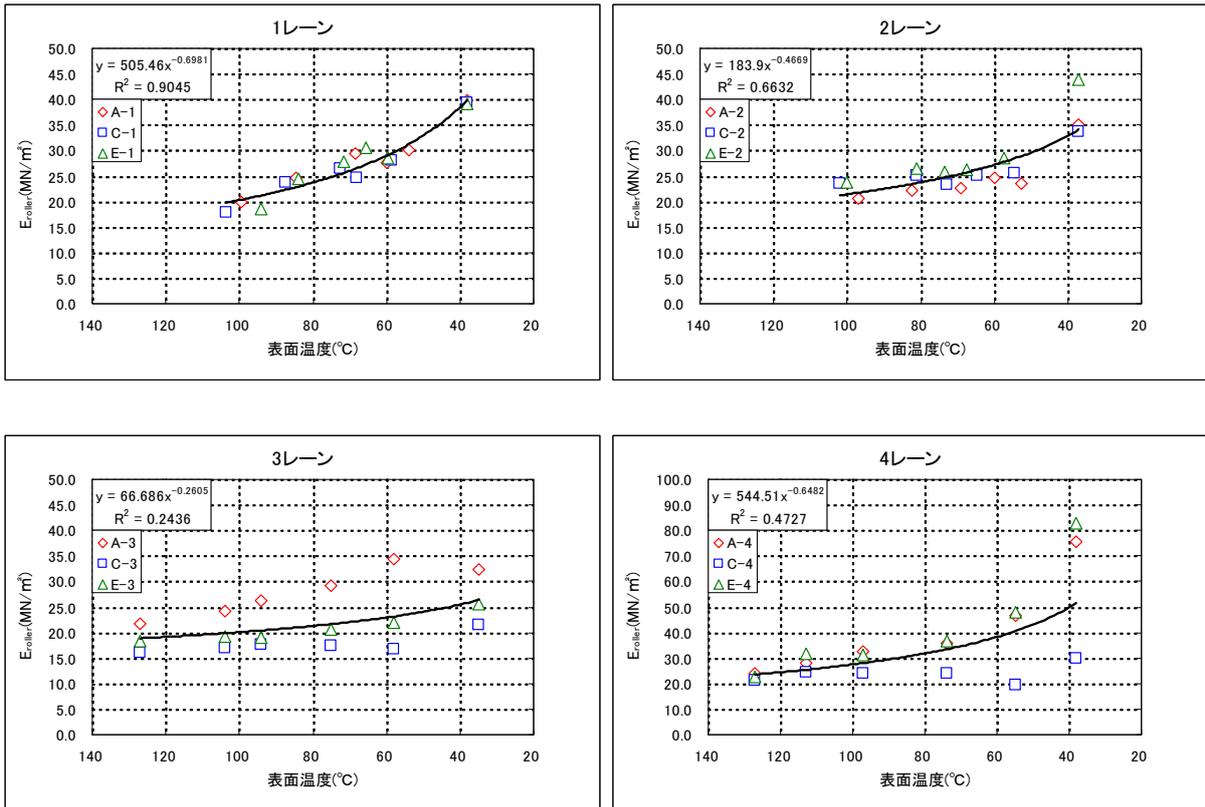


図-3. 25 Erollerと表面温度の関係(1~4レーン)

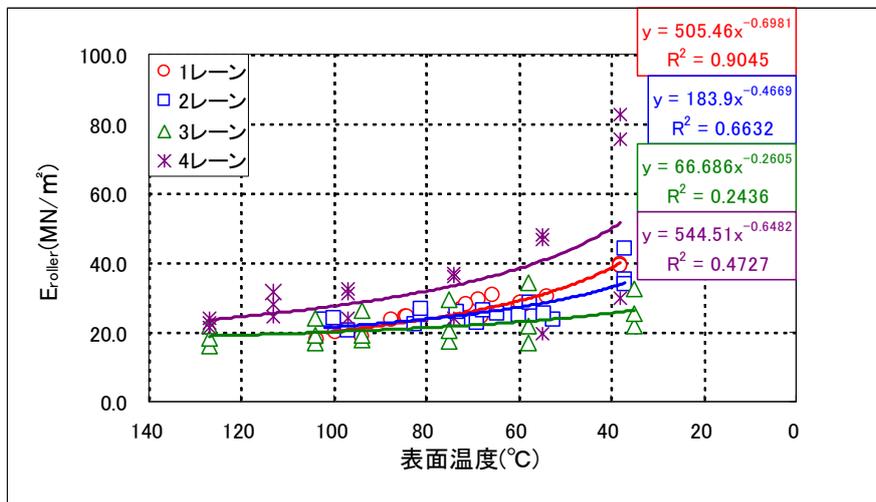


図-3. 26 Erollerと表面温度の関係(まとめ)

(4) 地表面高さ計測

各測定位置における各層の厚さを表-3. 10に示す。

表-3. 10 施工厚

測点	路床(cm)			下層路盤 (cm)	上層路盤 (cm)	表層 (cm)	総厚 (cm)
	1層目	2層目	計				
A-1	36.2	29.7	65.9	10.6	11.0	4.1	91.6
A-2	32.7	28.2	60.9	12.9	9.9	4.7	88.4
A-3	26.0	28.4	54.4	16.0	8.9	4.3	83.6
A-4	29.5	31.9	61.4	16.1	7.8	5.2	90.5
B-1	33.7	29.3	63.0	—	—	—	—
B-2	30.0	31.0	61.0	—	—	—	—
B-3	24.6	33.1	57.7	—	—	—	—
B-4	22.0	32.9	54.9	—	—	—	—
C-1	33.0	32.1	65.1	10.9	9.1	5.3	90.4
C-2	27.3	32.1	59.4	12.4	8.7	5.1	85.6
C-3	23.9	34.7	58.6	11.2	9.5	4.5	83.8
C-4	23.8	34.1	57.9	16.6	6.9	4.1	85.5
D-1	32.0	31.9	63.9	—	—	—	—
D-2	29.8	30.3	60.1	—	—	—	—
D-3	24.4	36.1	60.5	—	—	—	—
D-4	22.9	36.5	59.4	—	—	—	—
E-1	36.1	30.5	66.6	13.9	5.9	5.4	91.8
E-2	33.2	33.7	66.9	12.0	7.8	6.1	92.8
E-3	26.2	35.0	61.2	14.7	8.7	5.4	90.0
E-4	20.9	35.1	56.0	15.2	8.5	5.4	85.1
平均	28.4	32.3	60.7	13.5	8.6	5.0	87.8

3. 4. 2 室内試験

(1) 突固め試験

各材料の突固め試験の結果を表-3. 11に示す。

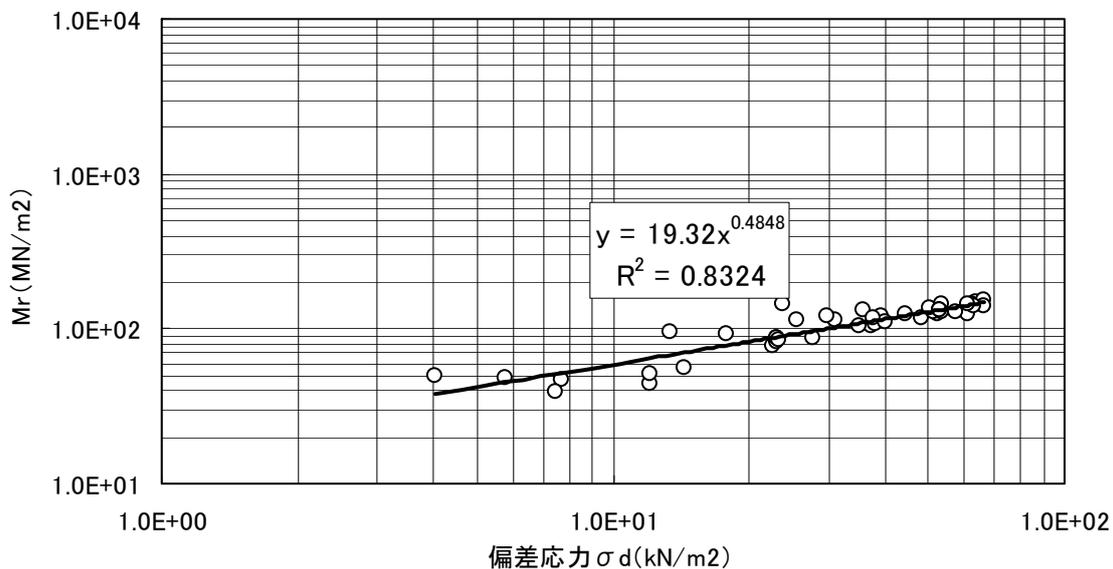
表-3. 11 突固め試験結果

材料名	最大乾燥密度 $\rho_{dmax}$	最適含水比 $W_{opt}(\%)$
砕砂	2.018	11.2
C-30	2.320	6.0
RC-40	1.952	13.0
M-30	2.260	5.5

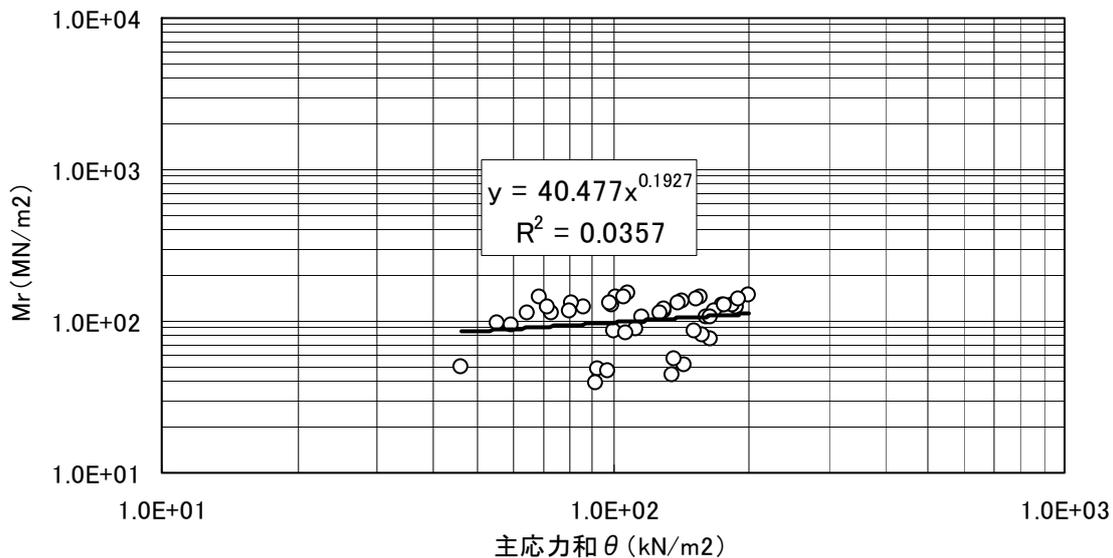
(2) レジリエントモデュラス試験

①路床材レジリエントモデュラス試験

試験施工の仕上がり面における含水比，施工中の締固め度の最大値で作成した供試体で路盤材(砕砂，C-30)のレジリエントモデュラス試験(以降Mr試験)を行った。結果を図-3. 27，3. 28に示す。

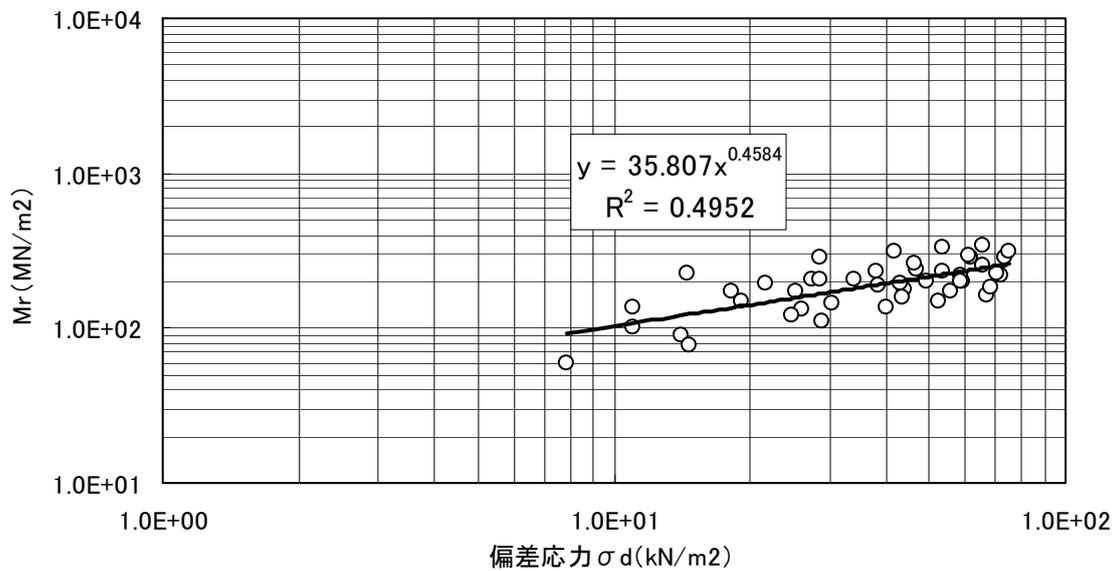


(a) 偏差応力とMrの関係

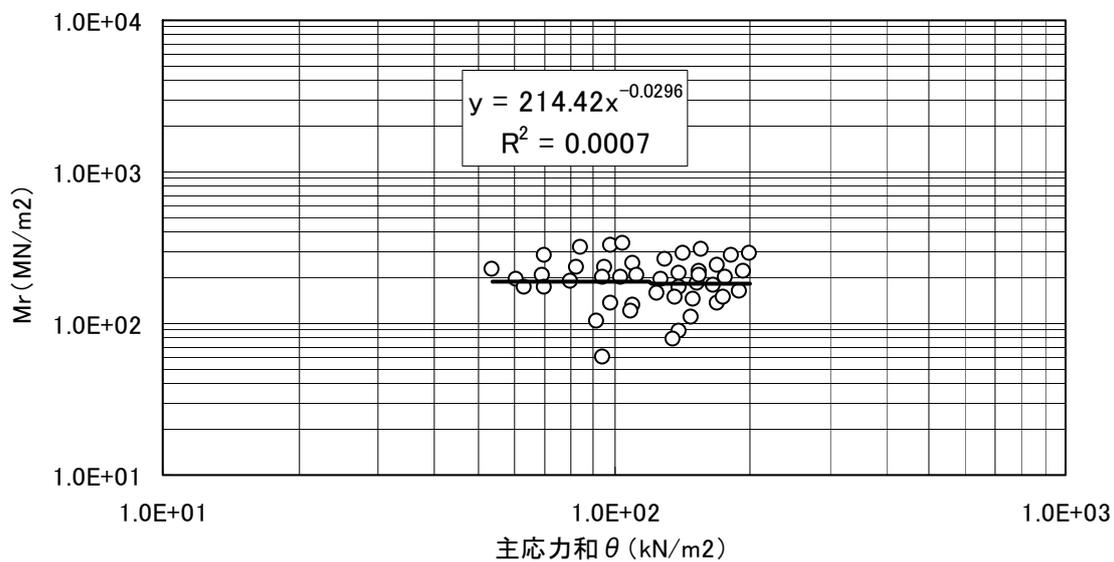


(b) 主応力和とMrの関係

図-3. 27 Mr試験結果 砕砂



(a) 偏差応力とMrの関係

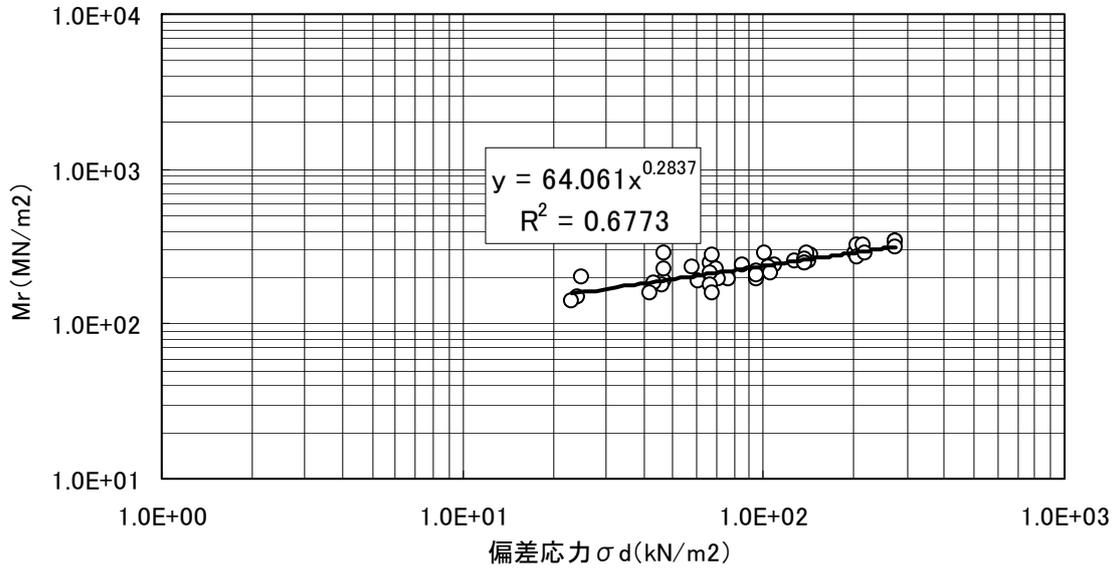


(b) 主応力和とMrの関係

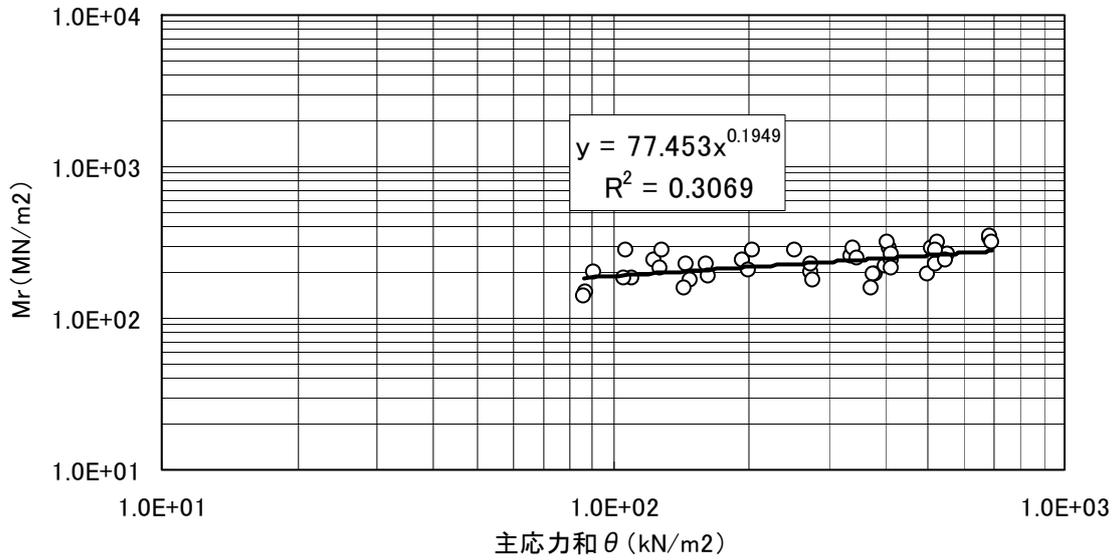
図-3. 28 Mr試験結果 C-30

②下層路盤材Mr試験

試験施工の仕上がり面における含水比に合わせ、施工中の締固め度の最大値で供試体を作成した下層路盤材(RC-40)のMr試験結果を図-3. 29に示す。



(a) 偏差応力とMrの関係

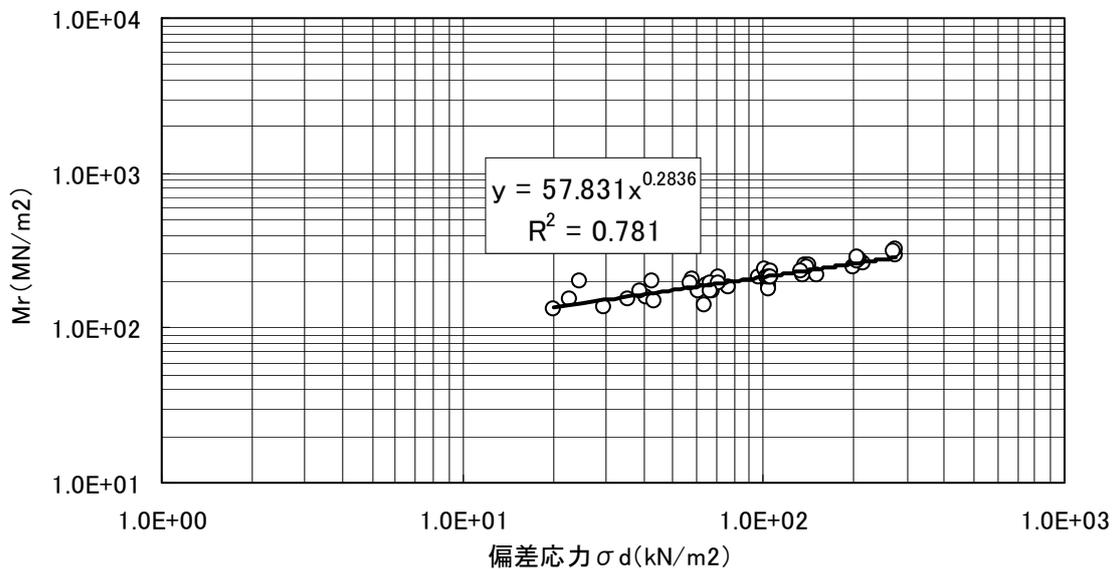


(b) 主応力和とMrの関係

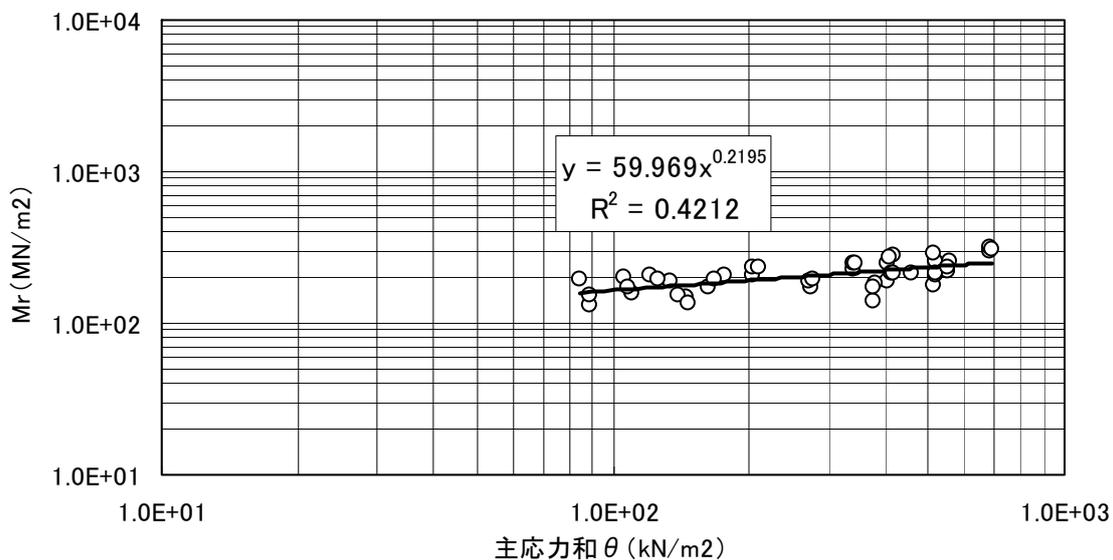
図-3. 29 Mr試験結果 RC-40

③上層路盤材Mr試験

試験施工の仕上がり面における含水比に合わせ、施工中の締固め度の最大値で供試体を作成した上層路盤材(M-30)のMr試験結果を図-3.30に示す。



(a) 偏差応力とMrの関係



(b) 主応力和とMrの関係

図-3.30 Mr試験結果 M-30

④表層混合物Mr試験

表層混合物(再生密粒(13))のMr試験結果を表-3. 12, 図-3. 31に示す。

表-3. 12 Mr試験結果 再生密粒(13)

全復元レジリエントモデュラス ERT( $\mu=0.35$ )				
試験温度 (°C)	1レーン (MPa)	2レーン (MPa)	3レーン (MPa)	4レーン (MPa)
5	4091	3531	4799	3783
25	2464	3102	2763	2370
40	1188	1138	1074	912

注) 各データは3個の平均値

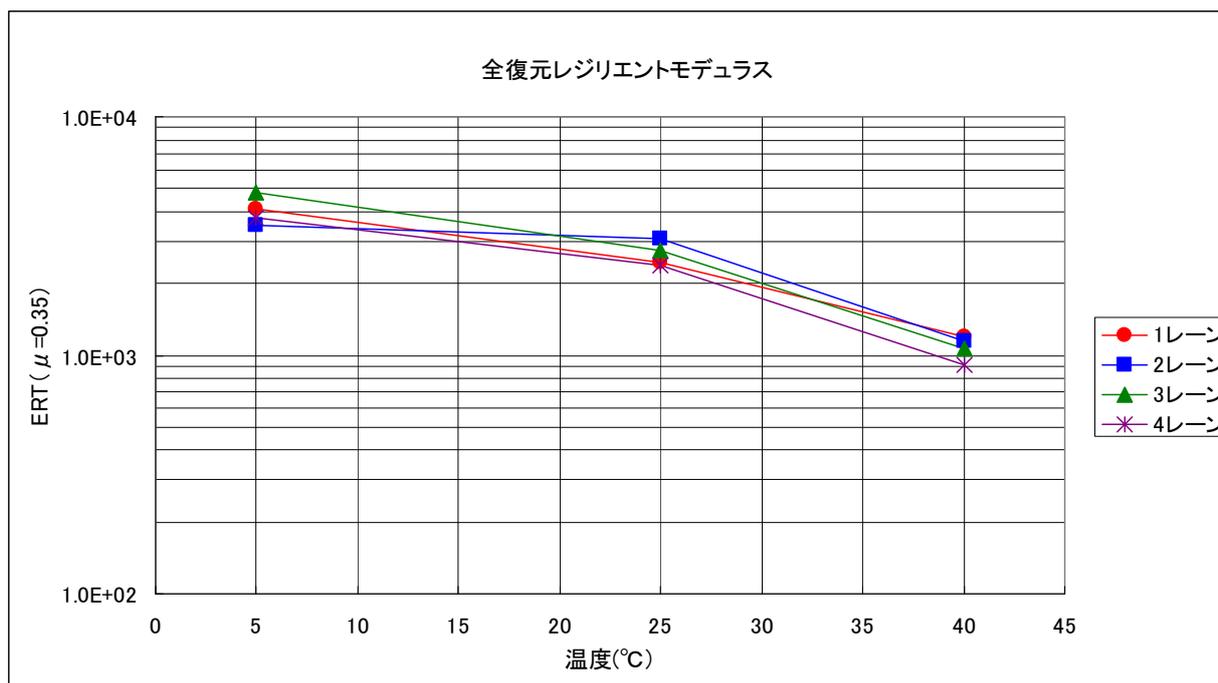


図-3. 31 Mr試験結果 再生密粒(13)

### 3. 5 測定結果比較

#### 3. 5. 1 分散乱れ率から算出した $E_{roller}$ との比較

測定した各試験の結果を分散乱れ率より算出した $E_{roller}$ と比較したものを以下に記す。

##### (1) $E_{roller}$ とRIによる締固め度の関係

各層における $E_{roller}$ と締固め度の関係を図-3. 32～図-3. 35に示す。 $E_{roller}$ と締固め度の関係は、値にばらつきがあり傾向も一定でなく、明確な関係は見られなかった。

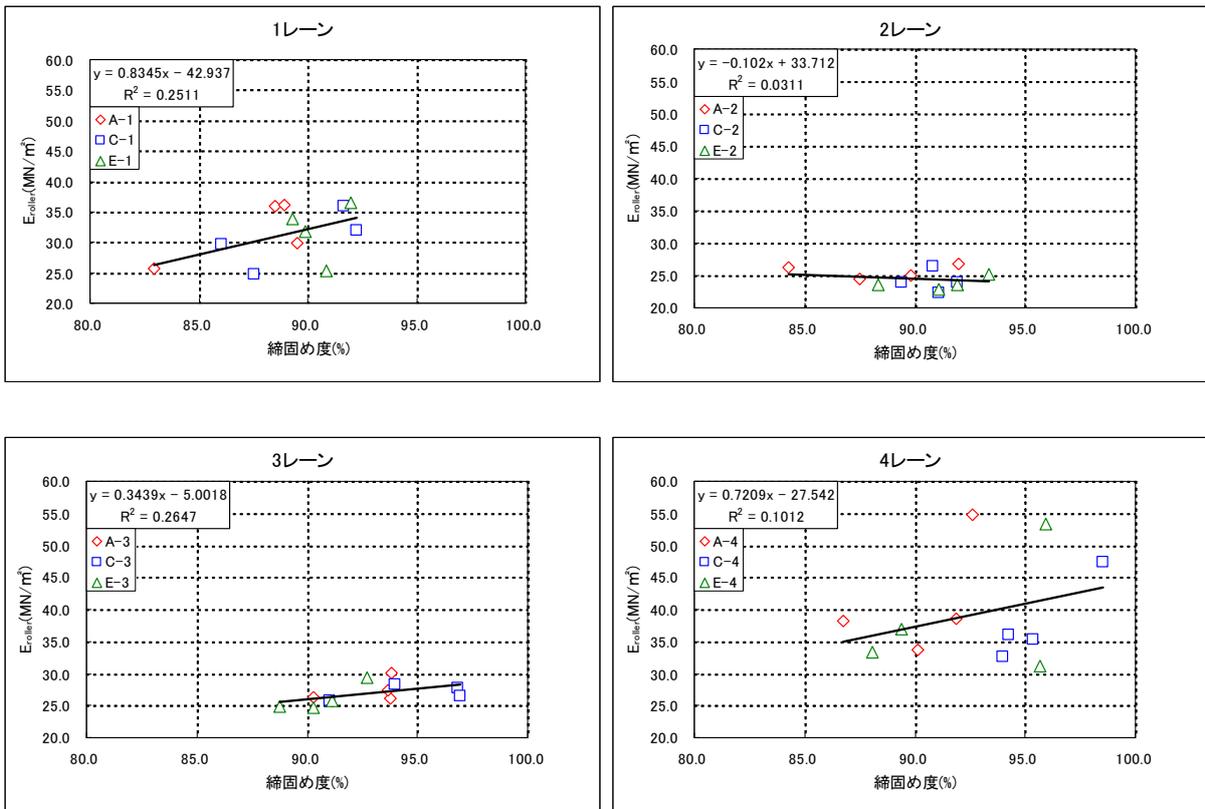


図-3. 32  $E_{roller}$ とRIによる締固め度の関係(路床)

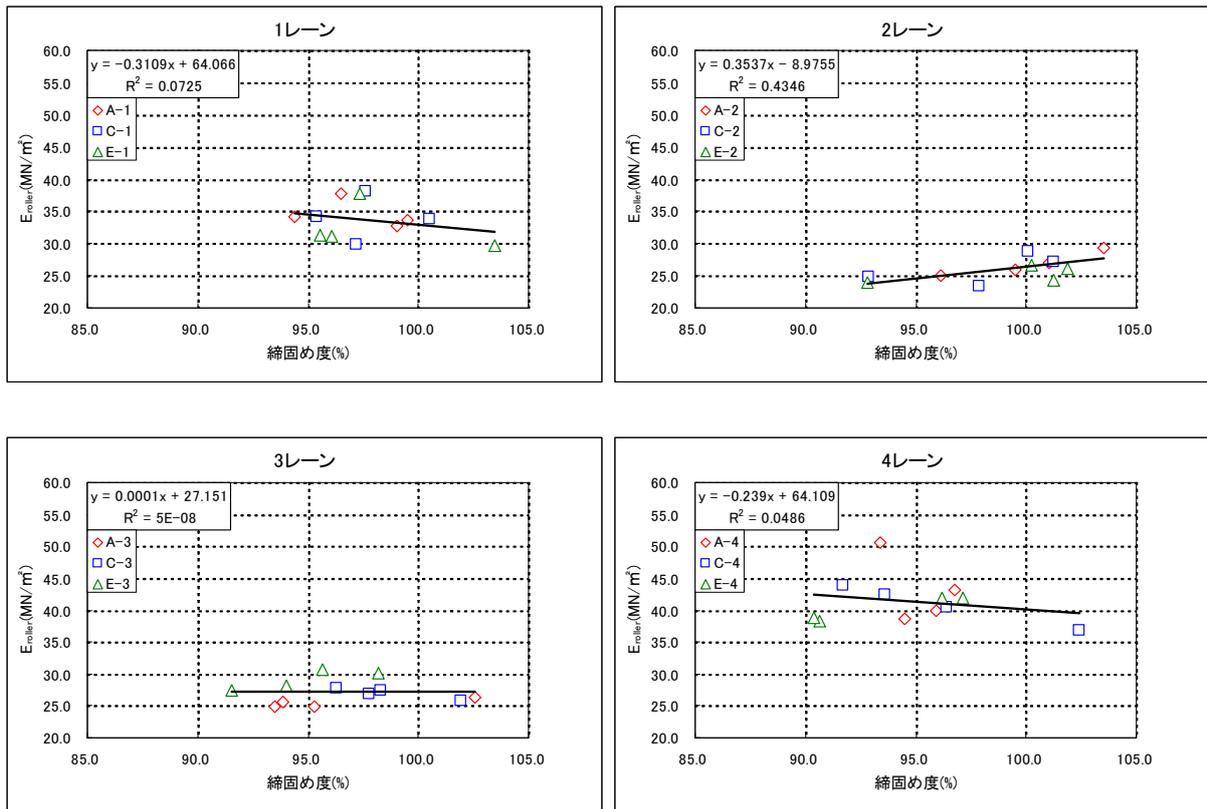


図-3. 33 E<sub>roller</sub>とRIIによる締固め度の関係(下層路盤)

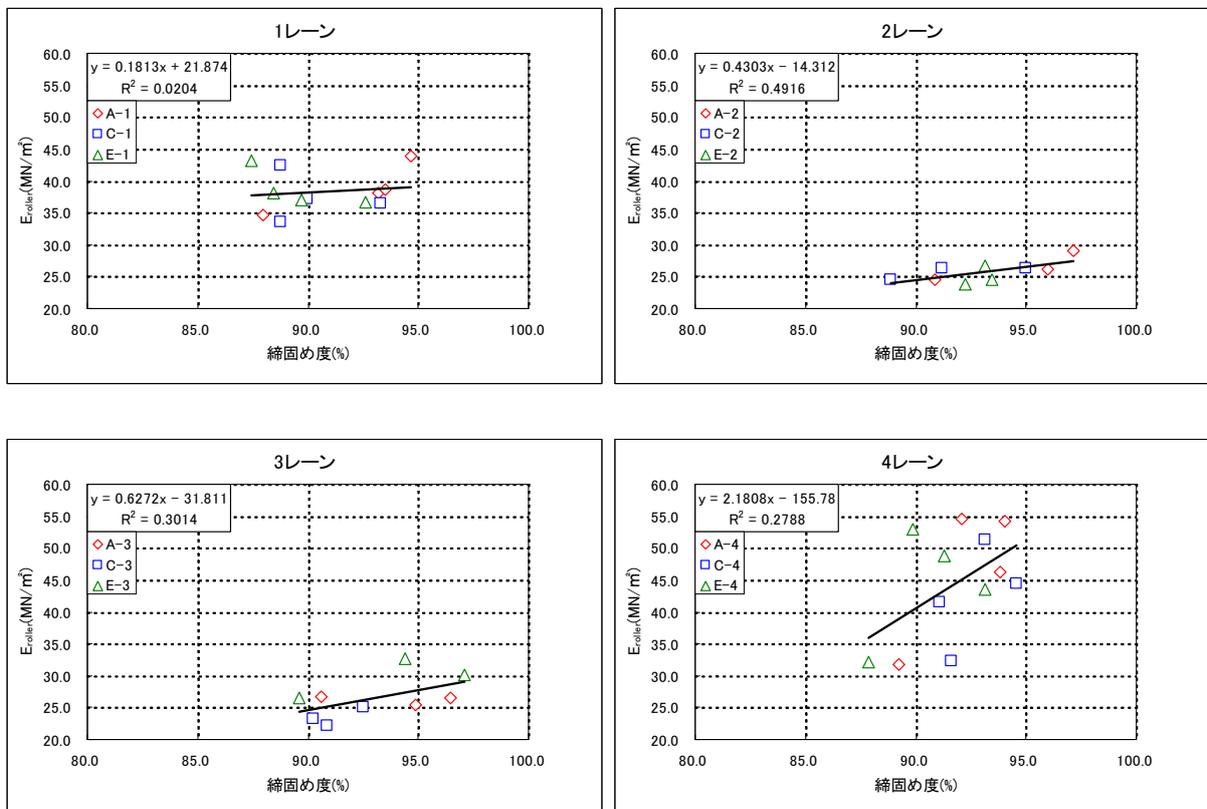


図-3. 34 E<sub>roller</sub>とRIIによる締固め度の関係(上層路盤)

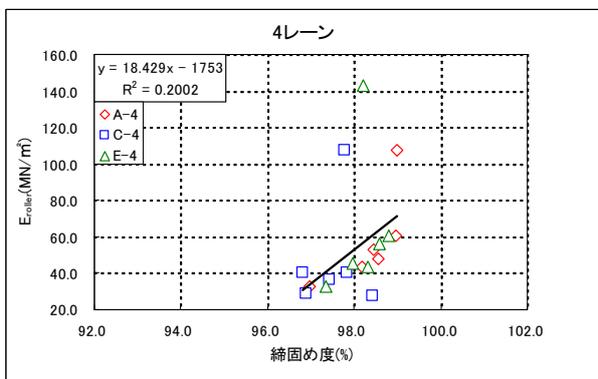
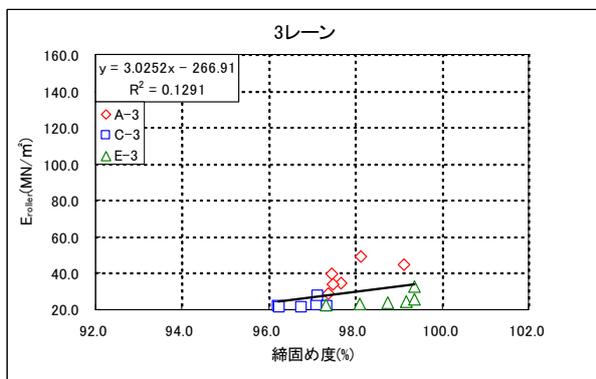
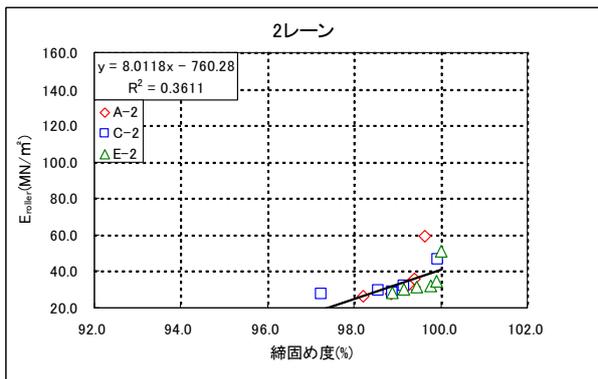
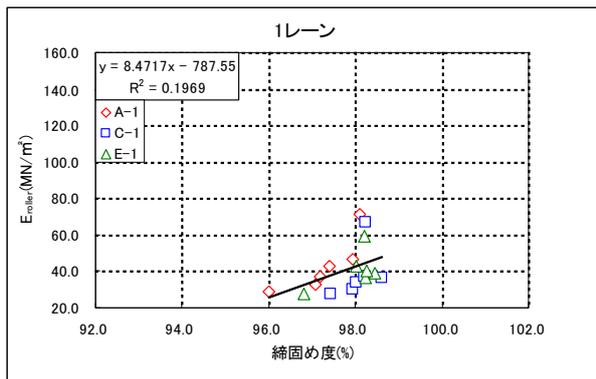


図-3.35 E\_rollerとRIによる締固め度の関係(表層)

(2)  $E_{roller}$ と $E_{fwd}$ の関係

各レーンにおける $E_{roller}$ と $E_{fwd}$ の関係を図-3.36～3.405に示す。1, 2レーンについては明確な相関性が認められる。なお、各層とも仕上がり面での値であり、表層は路面温度(40℃以下)で測定した。3.4レーンについては値にばらつきが多くみられた。なお、各レーンとも各測点(A, C, E)ごとの結果も示す。

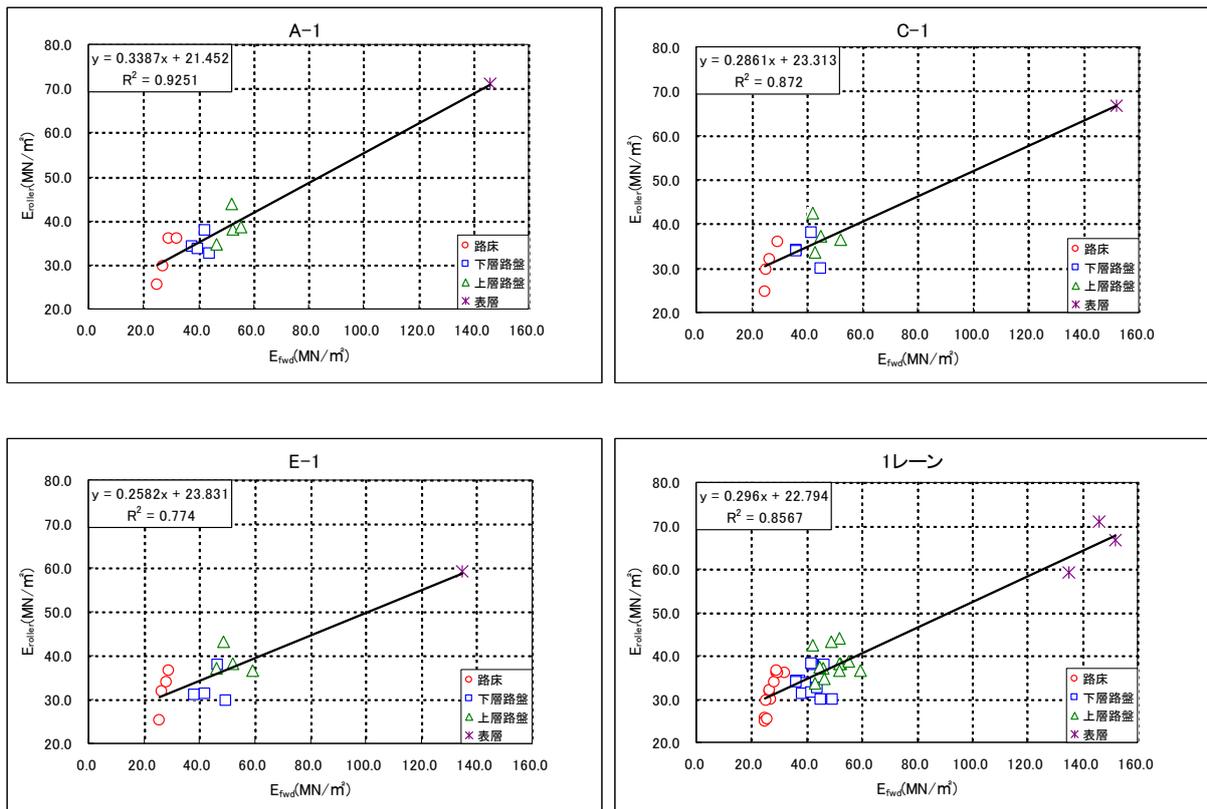


図-3.36  $E_{roller}$ と $E_{fwd}$ の関係(1レーン)

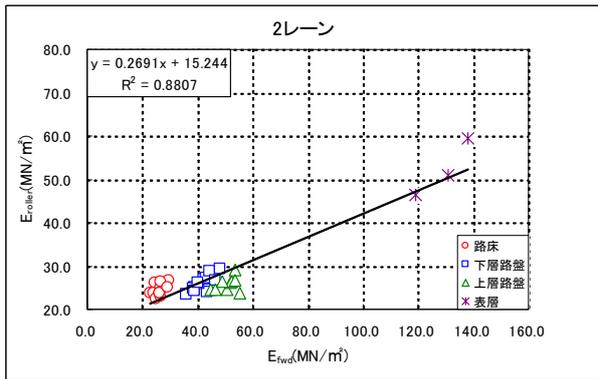
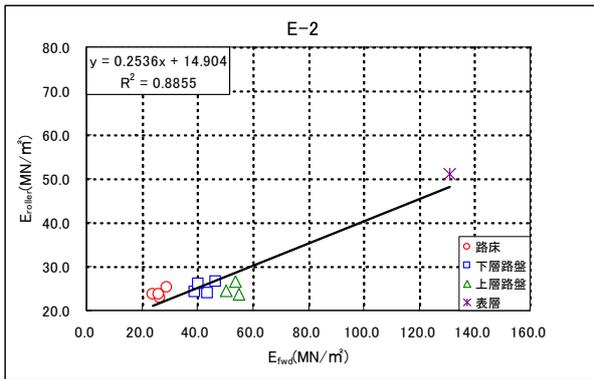
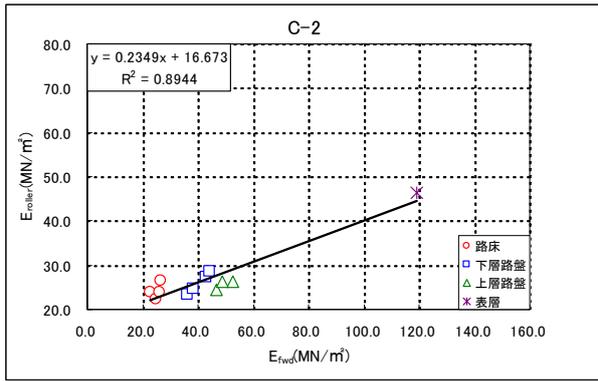
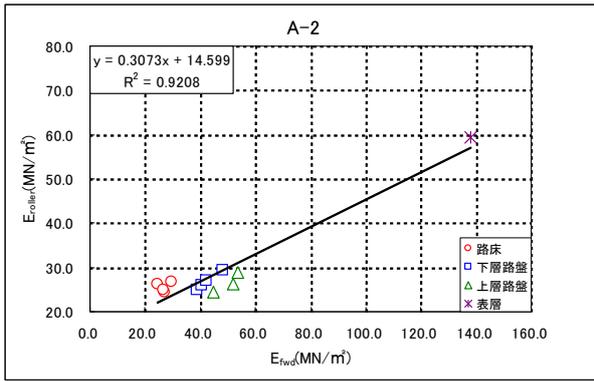


図-3. 37 ErollerとE<sub>fwd</sub>の関係(2レーン)

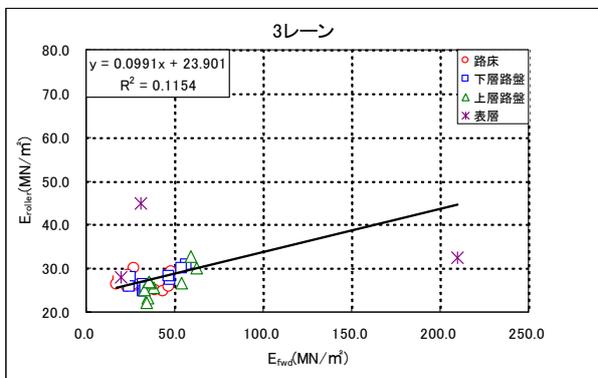
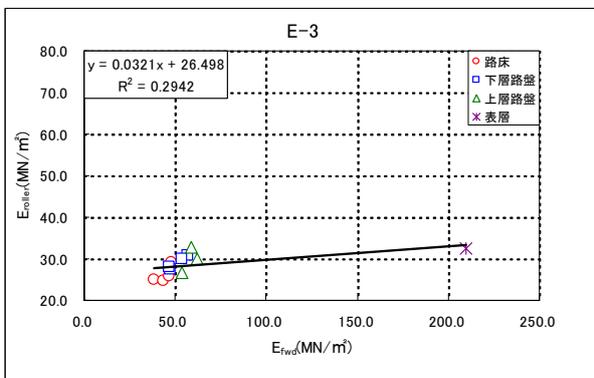
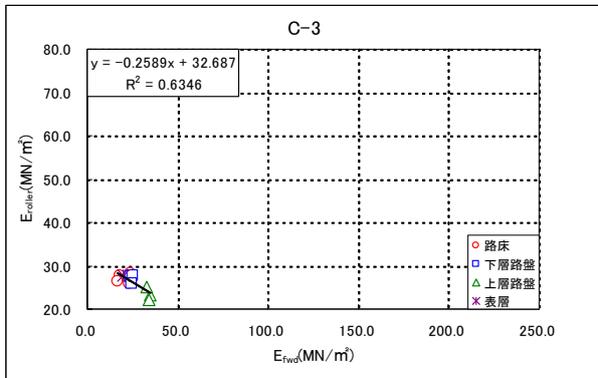
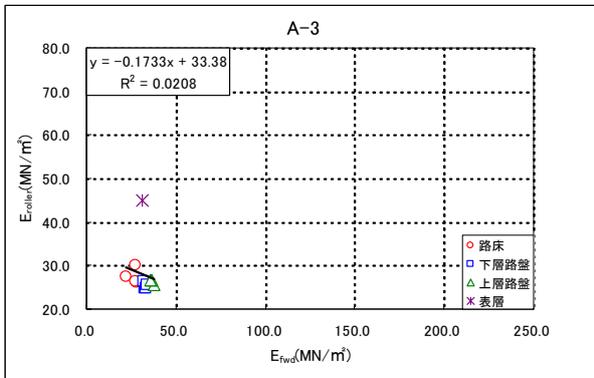


図-3. 38 ErollerとE<sub>fwd</sub>の関係(3レーン)

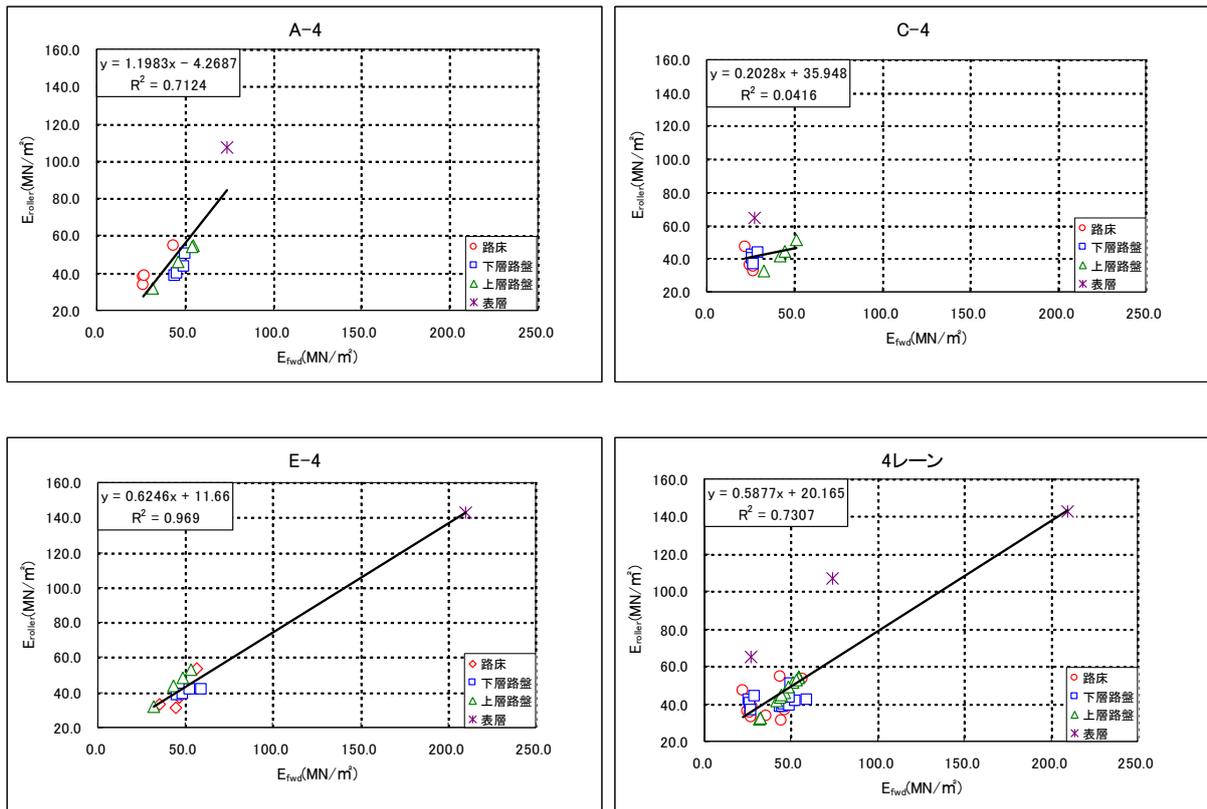


図-3. 39 E<sub>roller</sub>とE<sub>fwd</sub>の関係(4レーン)

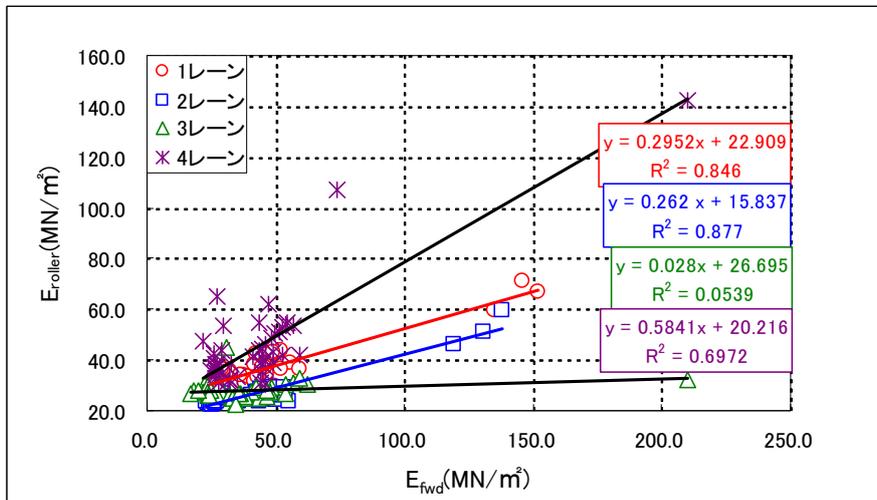


図-3. 40 E<sub>roller</sub>とE<sub>fwd</sub>の関係(1~4レーン)

### 3. 5. 2 ピーク乱れ率より算出した $E_{roller}$ との比較

測定した各試験の結果をピーク乱れ率より算出した $E_{roller}$ と比較したものを以下に記す。

#### (1) $E_{roller}$ とRIによる締固め度の関係

各層における $E_{roller}$ と締固め度の関係を図-3. 4 1 ~ 図-3. 4 4 に示す。 $E_{roller}$ と締固め度の関係は、値にばらつきがあり傾向も一定でなく、明確な関係は見られなかった。

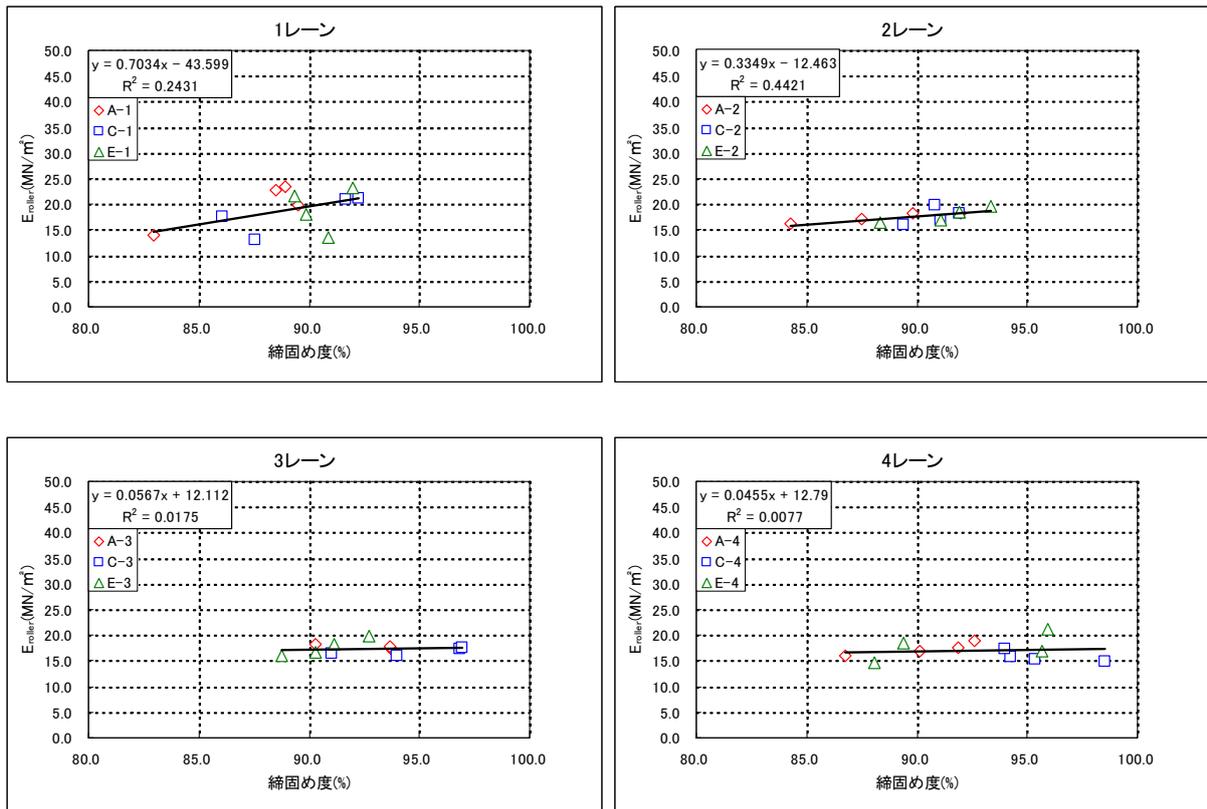


図-3. 41  $E_{roller}$ とRIによる締固め度の関係(路床)

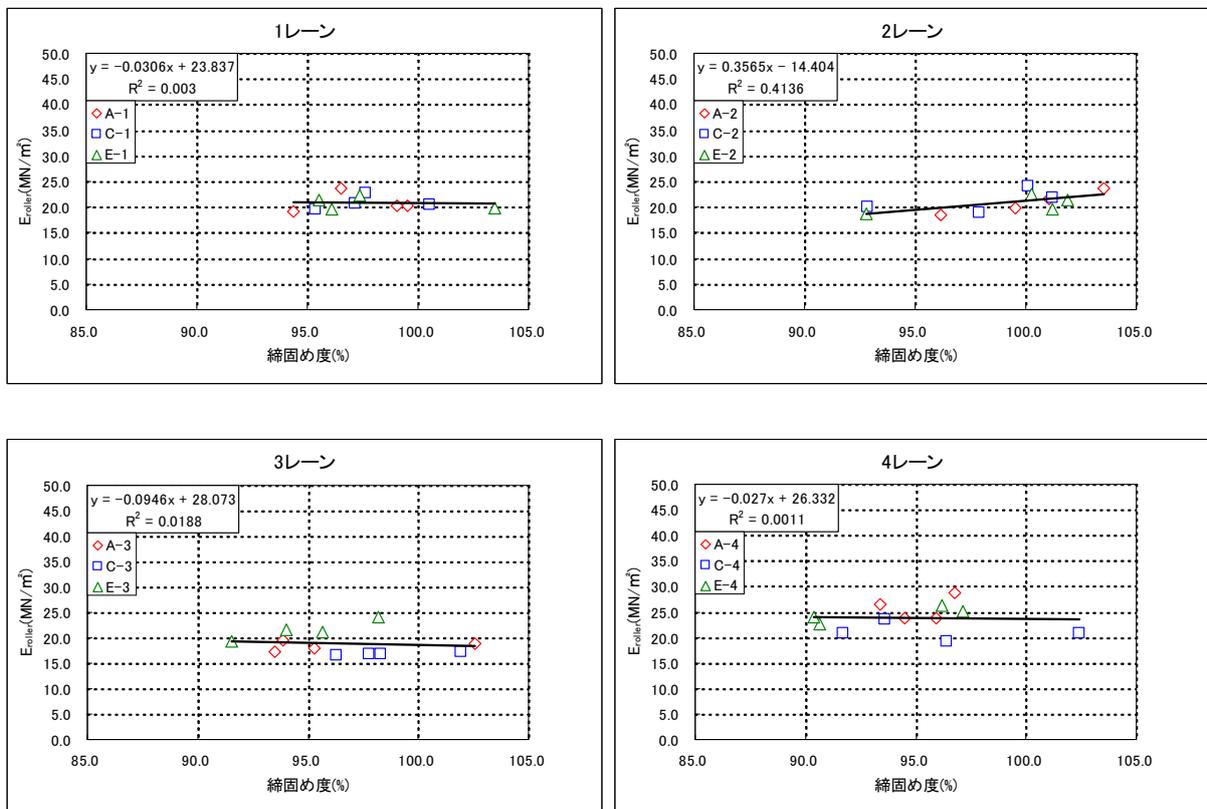


図-3. 42  $E_{roller}$ とRIによる締固め度の関係(下層路盤)

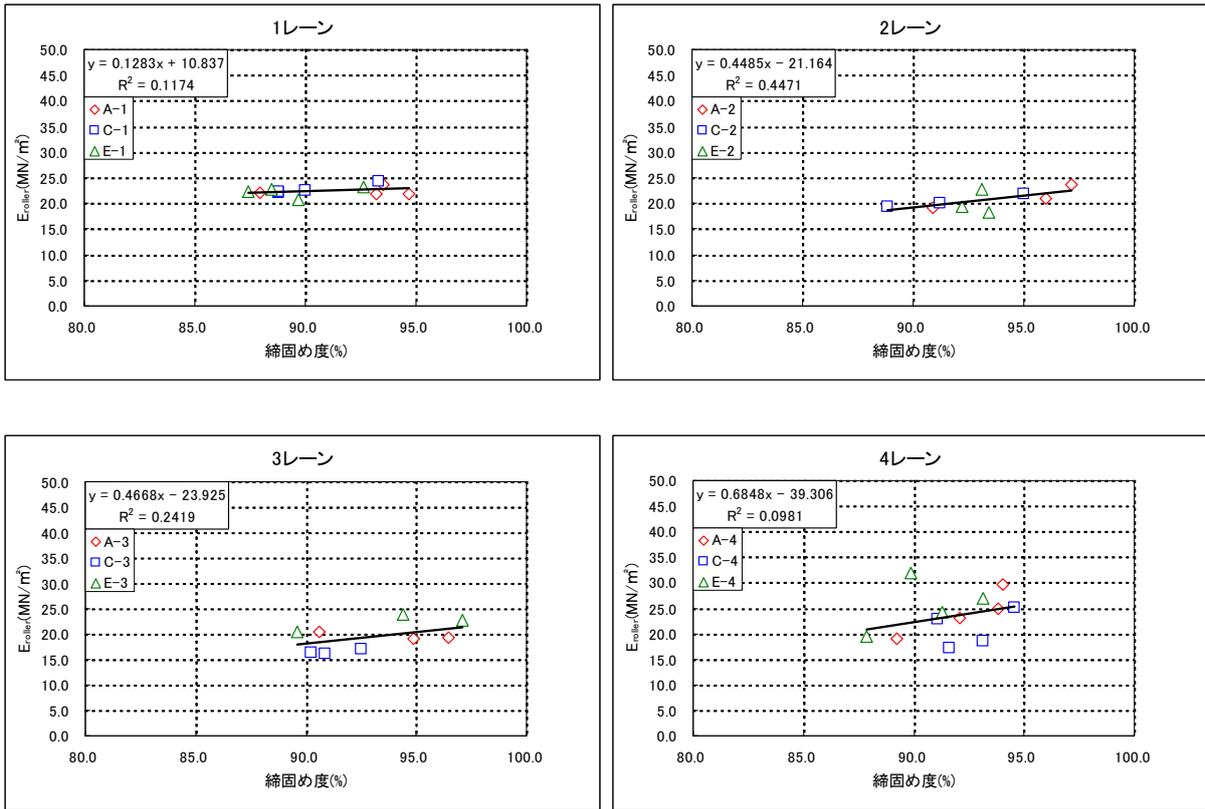


図-3. 43 E rollerとRIIによる締固め度の関係(上層路盤)

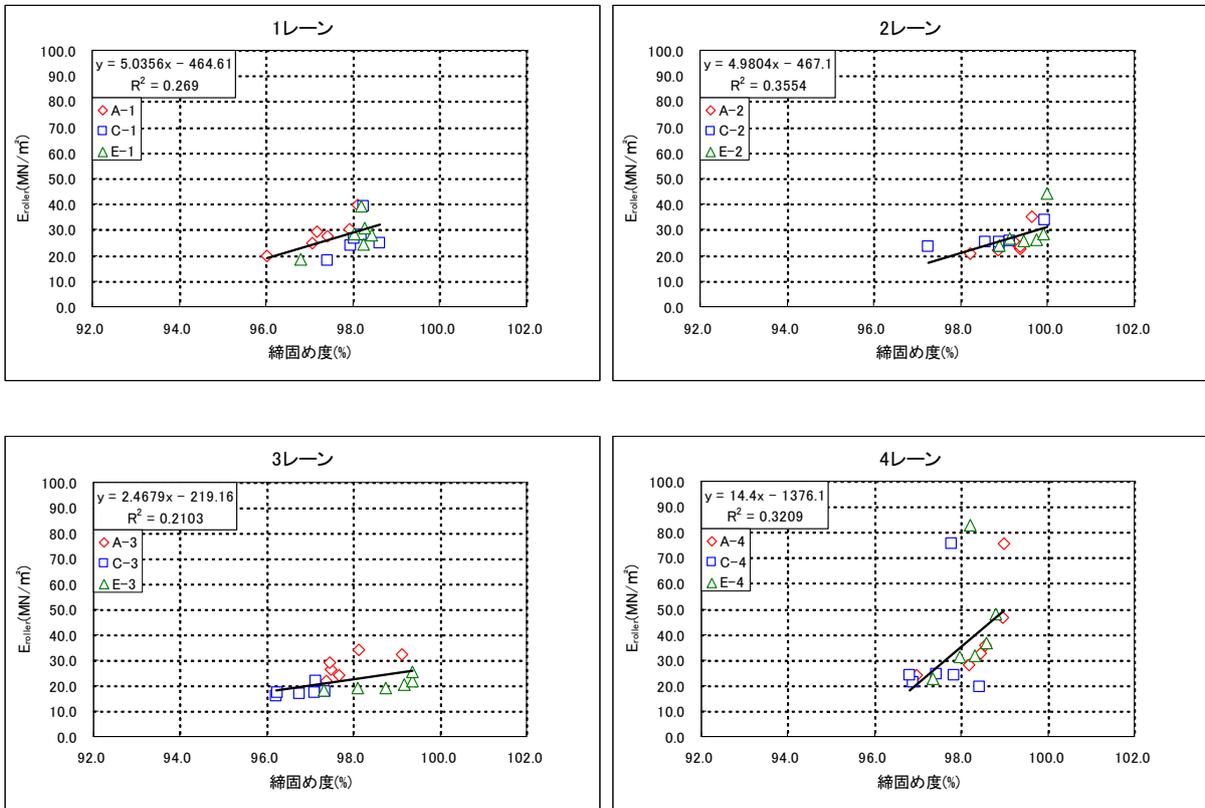


図-3. 44 E rollerとRIIによる締固め度の関係(表層)

(2)  $E_{roller}$ と $E_{fwd}$ の関係

各レーンにおける $E_{roller}$ と $E_{fwd}$ の関係を図-3.45～3.49に示す。1, 2レーンについては明確な相関性が認められる。なお、各層とも仕上がり面での値であり、表層は路面温度(40℃以下)で測定した。3, 4レーンについては値にばらつきが多くみられた。なお、各レーンとも各測点(A, C, E)ごとの結果も示す。

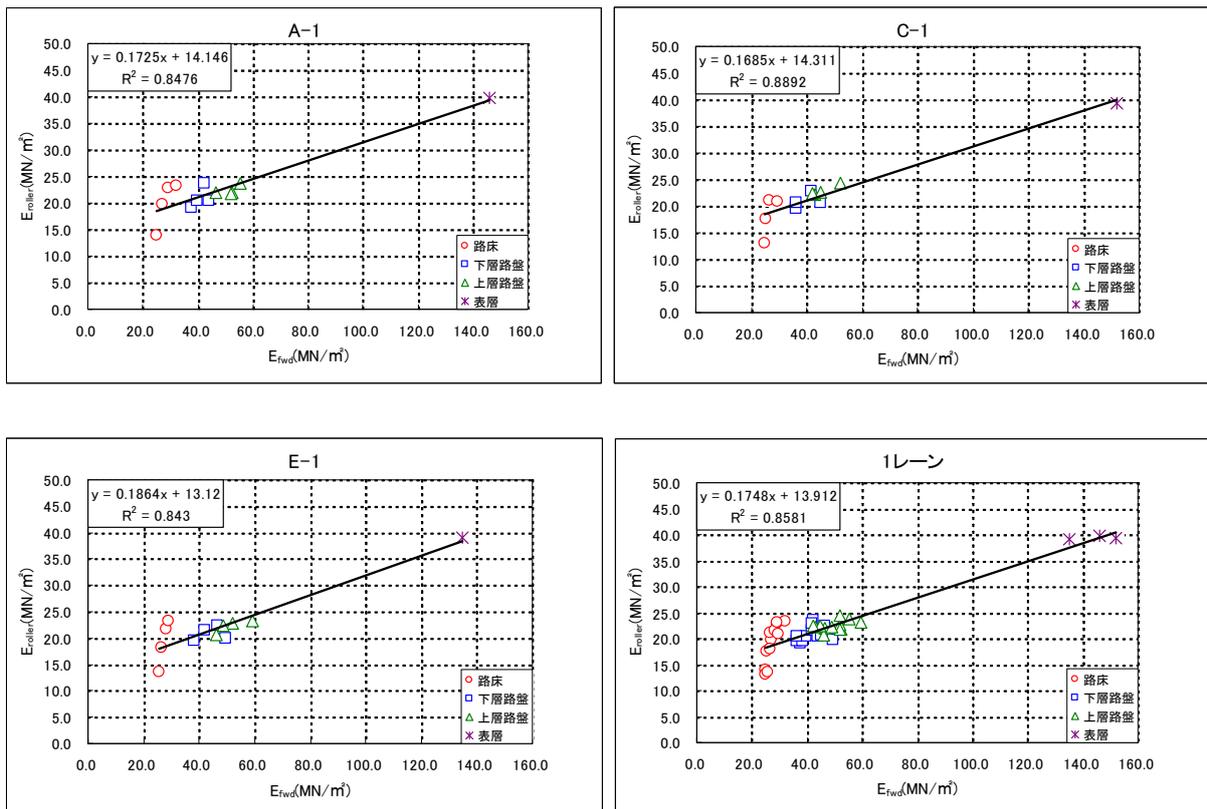


図-3.45  $E_{roller}$ と $E_{fwd}$ の関係(1レーン)

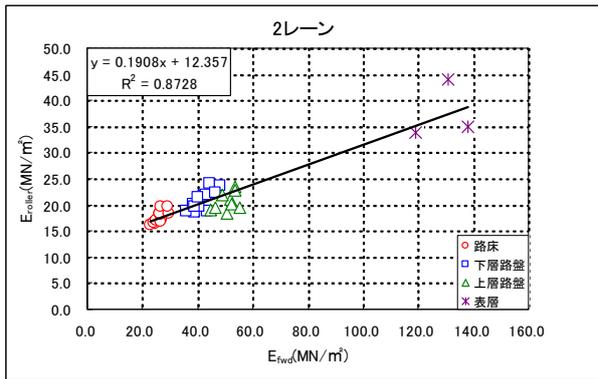
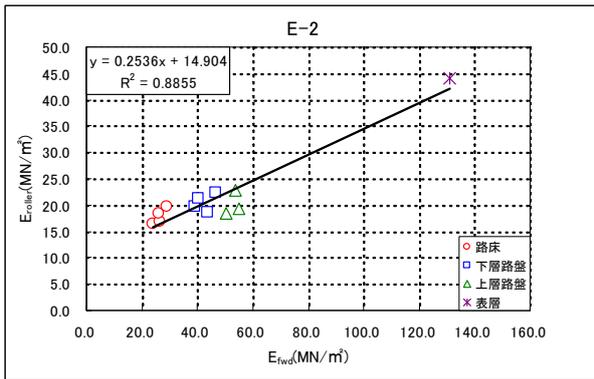
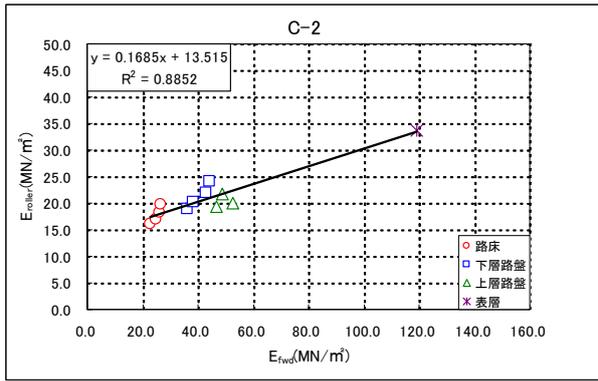
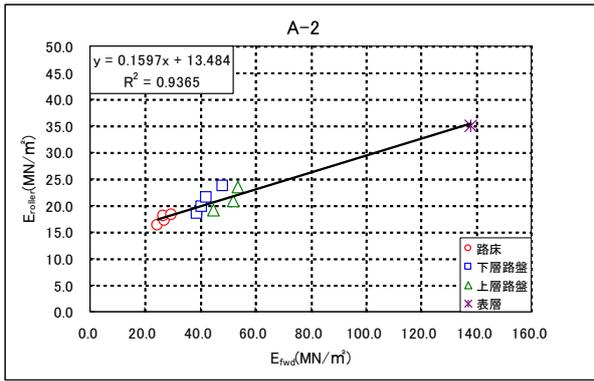


図-3. 46 ErollerとE\_fwdの関係(2レーン)

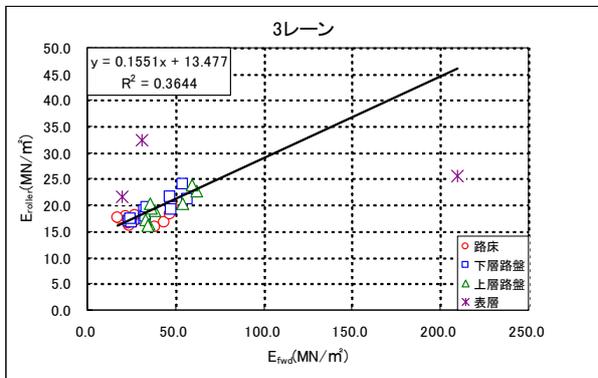
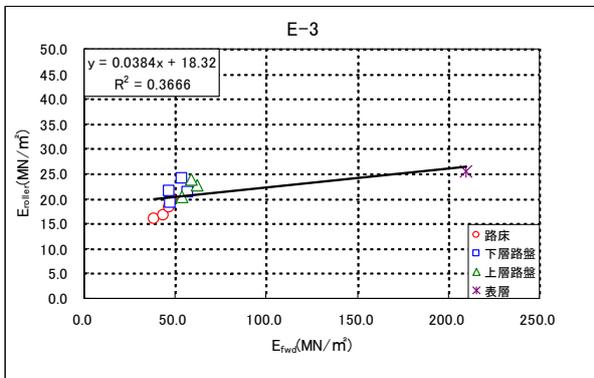
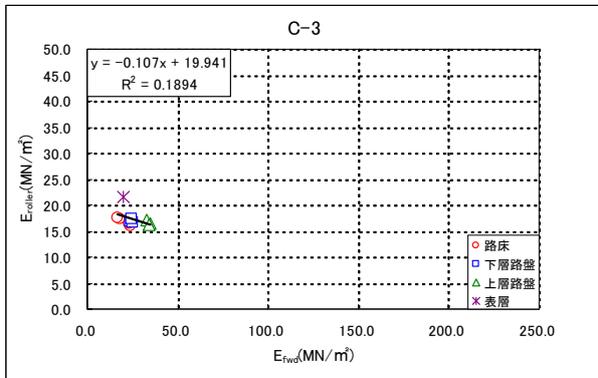
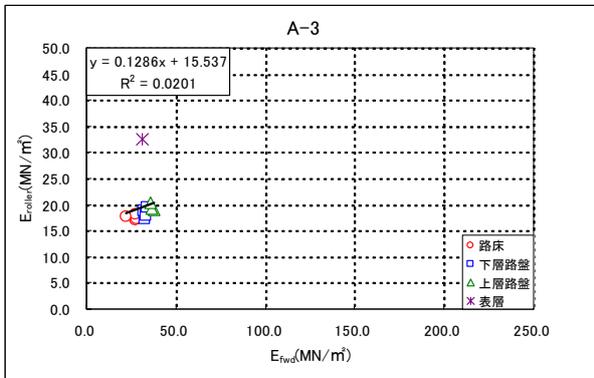


図-3. 47 ErollerとE\_fwdの関係(3レーン)

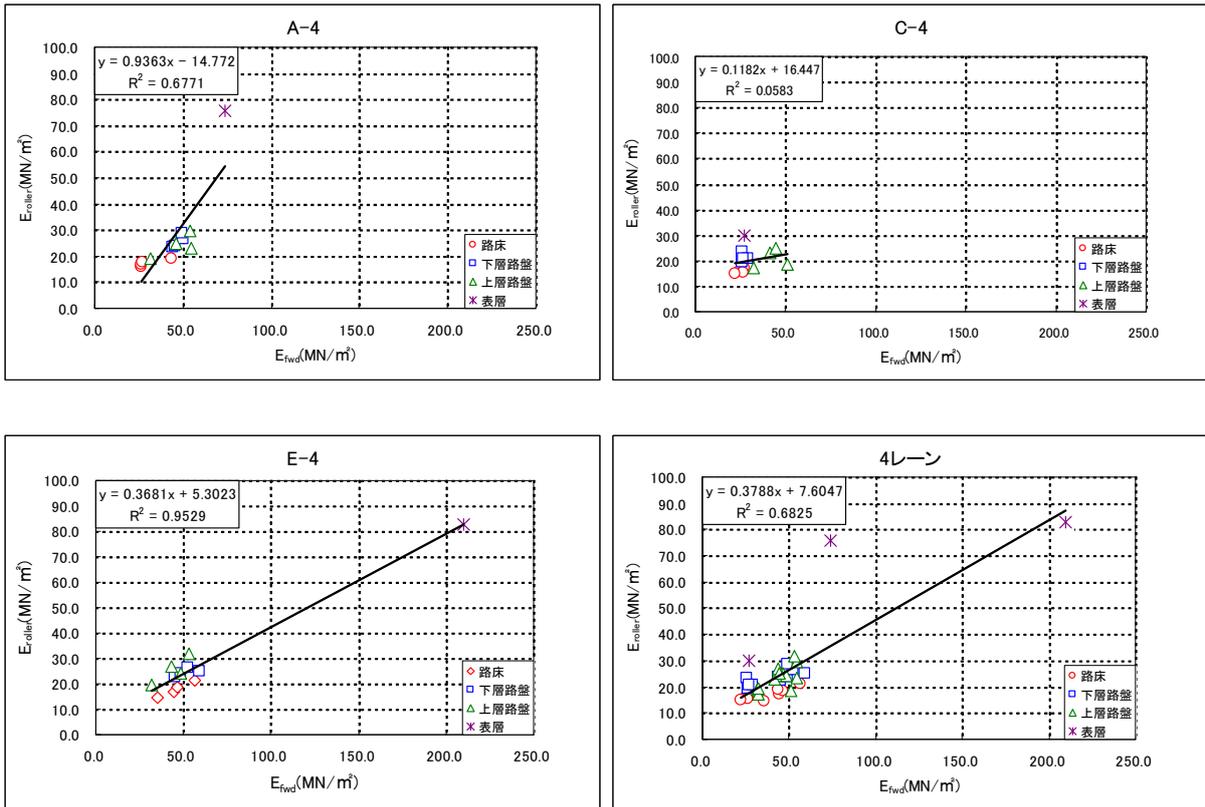


図-3. 48 ErollerとE\_fwdの関係(4レーン)

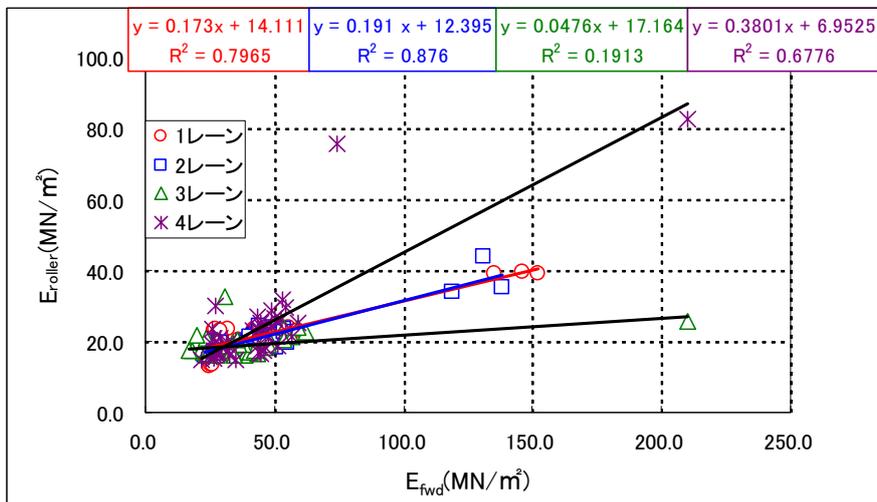


図-3. 49 ErollerとE\_fwdの関係(1~4レーン)

### 3. 6 舗装施工管理システムの構築

#### (1) 舗装施工管理システムの概要

『舗装設計便覧（（社）日本道路協会）』では設計方法を「経験に基づく設計方法」と「理論的設計方法」とに分類している。「経験に基づく設計方法」において用いられる材料特性値は等値換算係数（表層材の強さを1とした場合の相対強度係数）であるため、実際の力学的特性を示す $E_{roller}$ とは異質のものである。これに対して「理論的設計方法」は、舗装材料の弾性係数とポアソン比を設定し、一種の疲労計算により舗装断面を設計するものである。このため、今回検討している $E_{roller}$ はその施工管理に直接反映できるものと考えられる。

そこで、舗装の理論的設計法で設定される材料物性（弾性係数、ポアソン比）と $E_{roller}$ の関係を利用した施工管理システムを構築するものとした。フローを図-3. 50に示す。

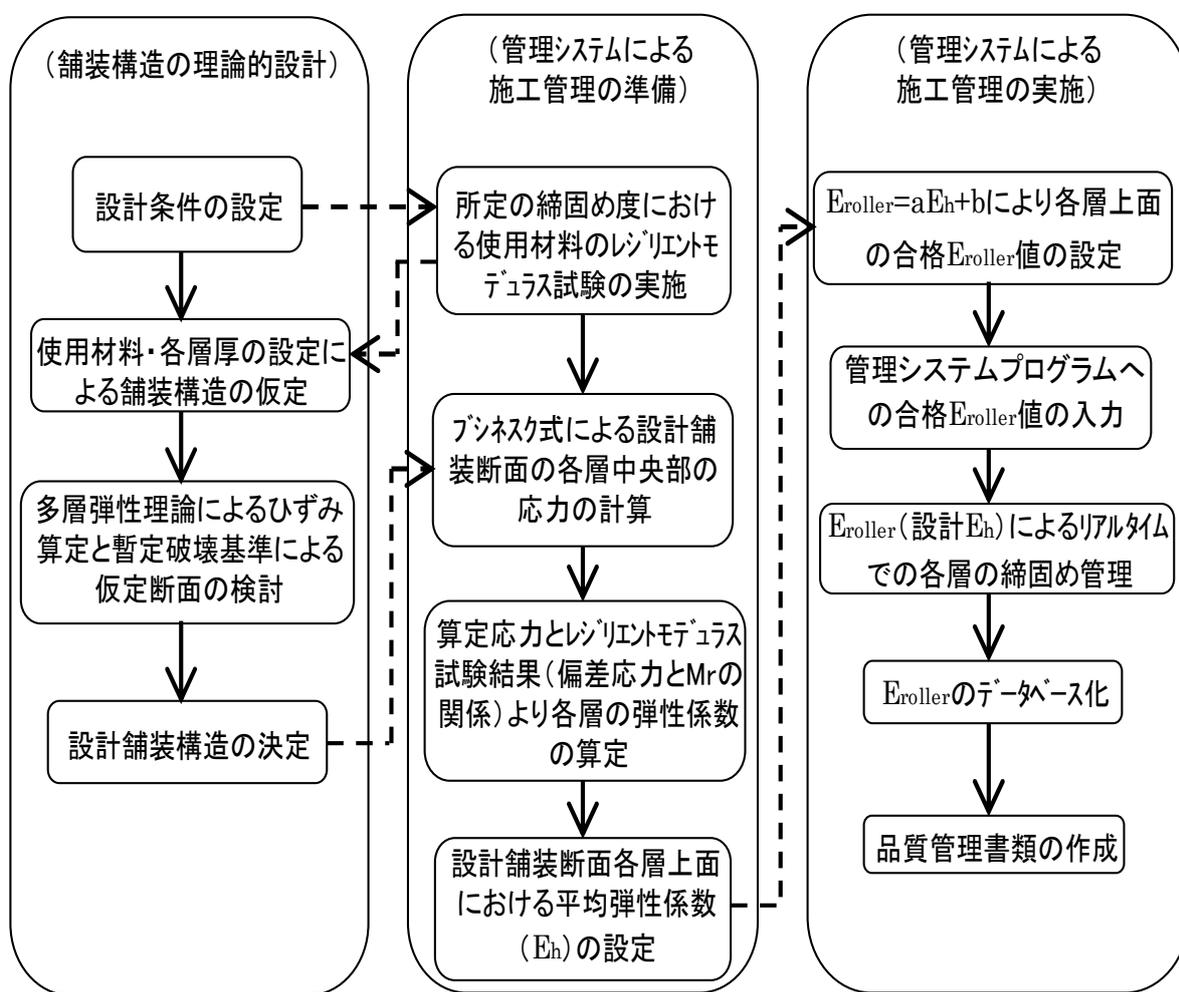


図-3. 50  $E_{roller}$ による舗装施工管理のフロー

(2) 各層の弾性係数の設定

理論的設計方法においては舗装材料毎にその弾性係数をパラメータとして用いるが、1個の個体として弾性係数を測定できる金属やコンクリートと異なり、粒状物の集合体となる路床、路盤や高温時のアスファルト混合物では、直接的に弾性係数を測定することはできない。このため、一般に三軸方向の応力を測定するMr試験により得られるMrを弾性係数とする場合が多い。

そこで、本検討についてもMrを用いることとした。なお、Mrは拘束応力によって異なるため、その拘束応力は、ブシネスク式を用いて算出されるローラ荷重によって各層中央部に発生する応力を使用することとした。Mrの算出方法を以下に記す。

(ステップ1)

αシステムの研究開発において、加速度応答に影響している地盤の深さは50~60cm程度であると試験施工の結果が得られている。そのため荷重伝達深さの半分、あるいは各層の厚さの半分の深さにおける拘束応力をブシネスク式で計算する。(図-3. 5 1)

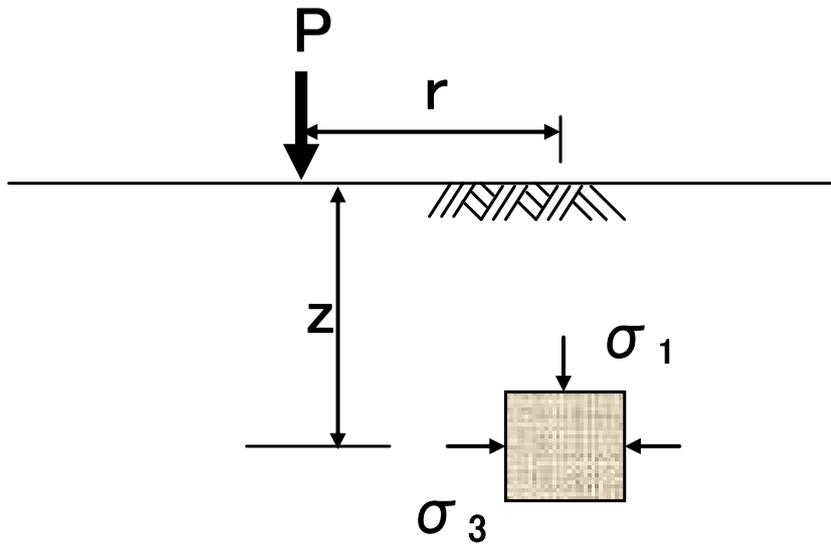


図-3. 51 地盤内応力(垂直応力)

$$\sigma_1 = \frac{3Pz^3}{2\pi(r^2 + z^2)^{5/2}}$$

$$\sigma_3 = \frac{P}{2\pi} \left\{ \frac{3r^2z}{(r^2 + z^2)^{5/2}} - \frac{1-2\mu}{r^2 + z^2 + z(r^2 + z^2)^{1/2}} \right\}$$

今回は荷重Pを線荷重と考え(図-3. 5 2)、ポアソン比μを0.35、影響深さは50cmと仮定した。4tロー

ラでの管理を想定したMrの計算を以降に記す。

4tローラ (TW502) の仕様

起振力 : 3500kgf

締固め幅 : 130cm

荷重Pの算出

$$P=3500\text{kgf}/130\text{cm}=26.9\text{kgf}/\text{cm}$$

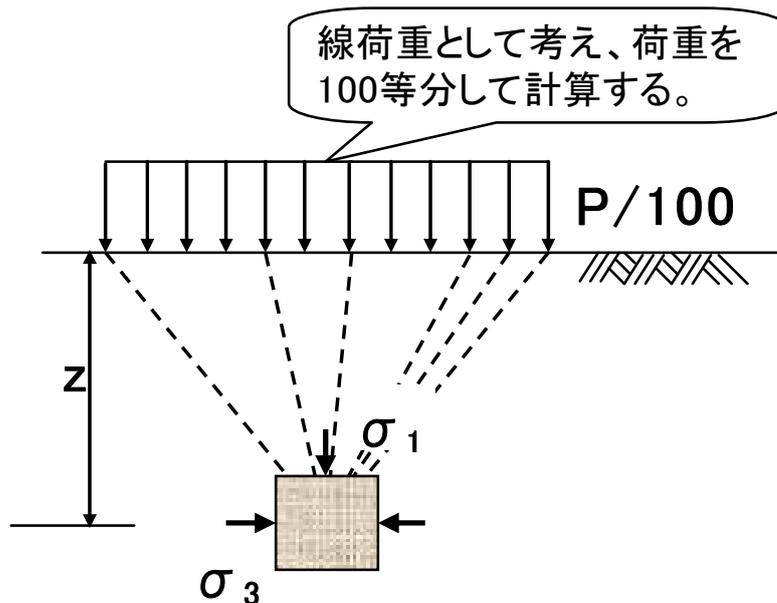


図-3. 52 地盤内応力(線荷重)

偏差応力  $\sigma_d$  の算出(路床面の場合)

影響深さを50cmとしているため、 $z=25\text{cm}$ となる。図6.3の考えで計算すると、 $\sigma_1=0.680$   
 $\sigma_3=-0.055$ となり、 $\sigma_d=\sigma_1-\sigma_3=0.680-(-0.055)=0.735(\text{kgf}/\text{cm}^2)=72.115(\text{kPa})$ となる。

(ステップ2)

各層材料のMrの算出式は4章(1)～(3)の試験結果に示される偏差応力とMrの関係式を用い設定する。

$$Mr = k_1 \sigma_d^{k_2}$$

$\sigma_d$  : 偏差応力 ( $\sigma_1 - \sigma_3$ )

$k_1, k_2$  : 材料係数

(3) 施工面の弾性係数の設定

$E_{roller}$ は施工面における地盤の剛性を表す。従って、管理システムに使用するためには最終的に表面から計測される弾性係数に対応するものとして、多層構造における理論的な平均弾性係数(以降 $E_h$ )を設定する必要がある。 $E_h$ の設定方法を図-3. 53に示す。

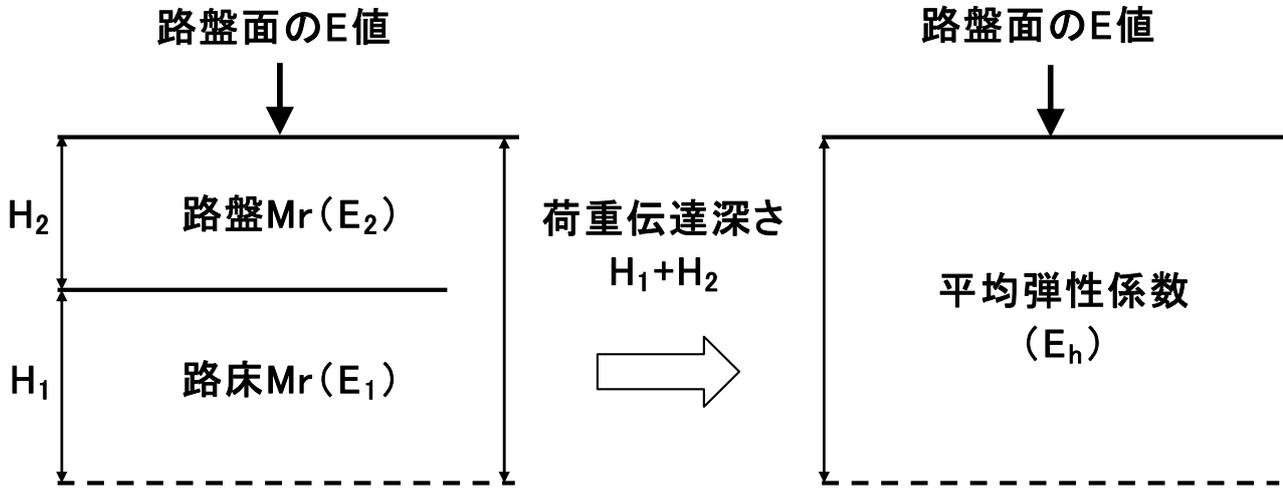


図-3. 53 平均弾性係数設定方法

$$E_h = \left( \frac{(H_1 E_1^{1/3}) + (H_2 E_2^{1/3})}{H_1 + H_2} \right)^3$$

(4)  $E_{roller}$ と $E_h$ の関係

(1) ~ (3) より算出した $E_h$ の結果を表-3. 13~3. 16に示し、各レーンにおける分散乱れ率より算出した各層仕上がり面での $E_{roller}$ と $E_h$ の関係を図-3. 54~3. 58に、ピーク乱れ率より算出した各層仕上がり面での $E_{roller}$ と $E_h$ の関係を図-3. 59~3. 653に示す。 $E_{roller}$ と $E_h$ の関係より、各層材料の $Mr$ から推定される $E_h$ とは異なる値を示したものの、各層が積み重なっていくことによる変化には高い相関性が認められた。そのため多層弾性理論に基づいて設計された舗装の施工管理手法として加速度応答データの適応は可能であると考えられる。すなわち、理論的に算出された $E_h$ に対応した $E_{roller}$ を管理下限値として各層の施工管理を行うことが可能と考えられる。

表-3. 13 各層設計Eh(1レーン)

ローラ位置	層の種類	深さ z(cm)	偏差応力 $\sigma_d$ (kPa)	弾性係数 Mr(MPa)	厚さ H(cm)	平均弾性係数 E <sub>h</sub> (MN/m <sup>2</sup> )
路床面	路床	25.0	72.115	153.7	50.0	153.7
下層路盤面	下層路盤	7.5	231.307	300.1	15.0	164.4
	路床	40.0	44.680	121.9	35.0	
上層路盤面	上層路盤	5.0	343.592	303.0	10.0	174.1
	下層路盤	17.5	101.994	237.9	15.0	
	路床	50.0	34.875	108.1	25.0	
表層	表層	-	-	1358(38°C)	5.0	222.1
	上層路盤	10.0	174.997	250.2	10.0	
	下層路盤	22.5	79.947	222.0	15.0	
	路床	55.0	31.177	102.4	20.0	

表-3. 14 各層設計Eh(2レーン)

ローラ位置	層の種類	深さ z(cm)	偏差応力 $\sigma_d$ (kPa)	弾性係数 Mr(MPa)	厚さ H(cm)	平均弾性係数 E <sub>h</sub> (MN/m <sup>2</sup> )
路床面	路床	25.0	126.763	202.1	50.0	202.1
下層路盤面	下層路盤	7.5	406.648	352.2	15.0	208.5
	路床	40.0	79.834	161.5	35.0	
上層路盤面	上層路盤	5.0	605.105	355.7	10.0	216.2
	下層路盤	17.5	178.821	279.0	15.0	
	路床	50.0	63.389	144.4	25.0	
表層	表層	-	-	1523(37°C)	5.0	269.6
	上層路盤	10.0	307.245	293.5	10.0	
	下層路盤	22.5	140.348	260.5	15.0	
	路床	55.0	57.211	137.4	20.0	

表-3. 15 各層設計Eh(3レーン)

ローラ位置	層の種類	深さ z(cm)	偏差応力 $\sigma_d$ (kPa)	弾性係数 Mr(MPa)	厚さ H(cm)	平均弾性係数 E <sub>h</sub> (MN/m <sup>2</sup> )
路床面	路床	25.0	126.763	329.6	50.0	329.6
下層路盤面	下層路盤	7.5	406.648	352.2	15.0	290.6
	路床	40.0	79.834	266.6	35.0	
上層路盤面	上層路盤	5.0	605.105	355.7	10.0	272.6
	下層路盤	17.5	178.821	279.0	15.0	
	路床	50.0	63.389	239.9	25.0	
表層	表層	-	-	1637(35°C)	5.0	324.2
	上層路盤	10.0	307.245	293.5	10.0	
	下層路盤	22.5	140.348	260.5	15.0	
	路床	55.0	57.211	228.9	20.0	

表-3. 16 各層設計Eh(4レーン)

ローラ位置	層の種別	深さ z(cm)	偏差応力 $\sigma_d$ (kPa)	弾性係数 Mr(MPa)	厚さ H(cm)	平均弾性係数 E <sub>h</sub> (MN/m <sup>2</sup> )
路床面	路床	25.0	72.115	254.5	50.0	254.5
下層路盤面	下層路盤	7.5	231.307	300.1	15.0	230.6
	路床	40.0	44.680	204.4	35.0	
上層路盤面	上層路盤	5.0	343.592	303.0	10.0	220.1
	下層路盤	17.5	101.994	237.9	15.0	
	路床	50.0	34.875	182.4	25.0	
表層	表層	-	-	1106(38°C)	5.0	254.8
	上層路盤	10.0	174.997	250.2	10.0	
	下層路盤	22.5	79.947	222.0	15.0	
	路床	55.0	31.177	173.3	20.0	

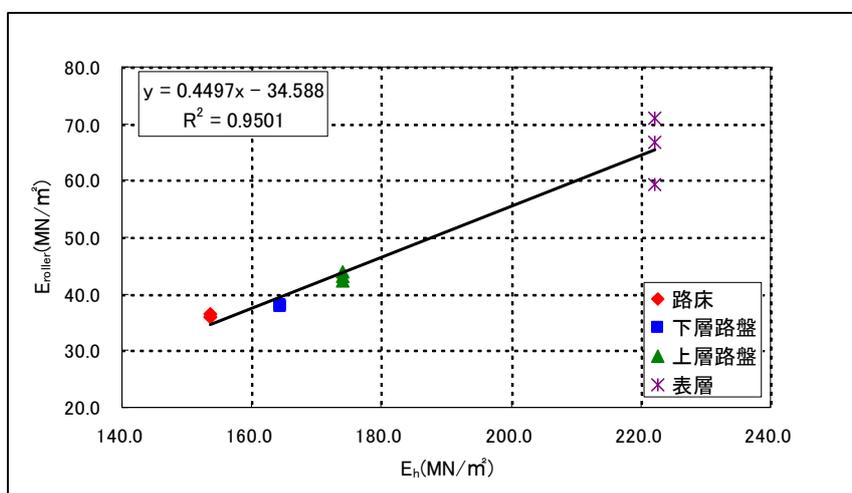


図-3. 54 各層仕上がり面のEroller(分散)とEhの関係(1レーン)

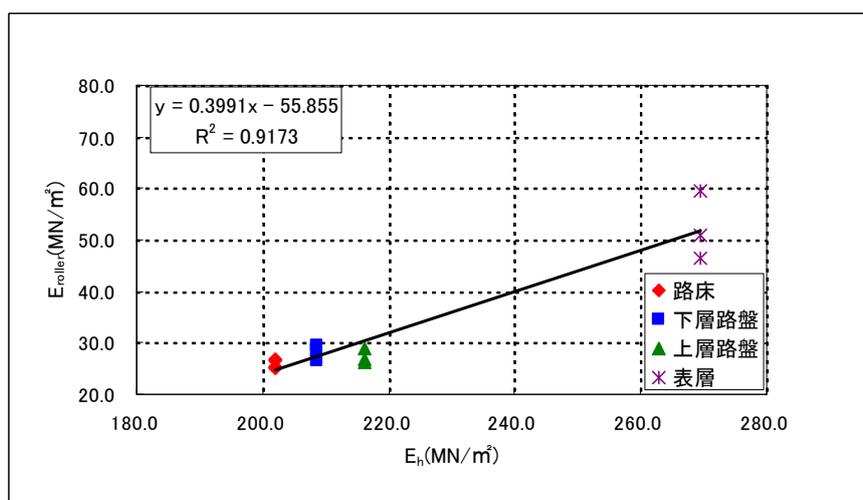


図-3. 55 各層仕上がり面のEroller(分散)とEhの関係(2レーン)

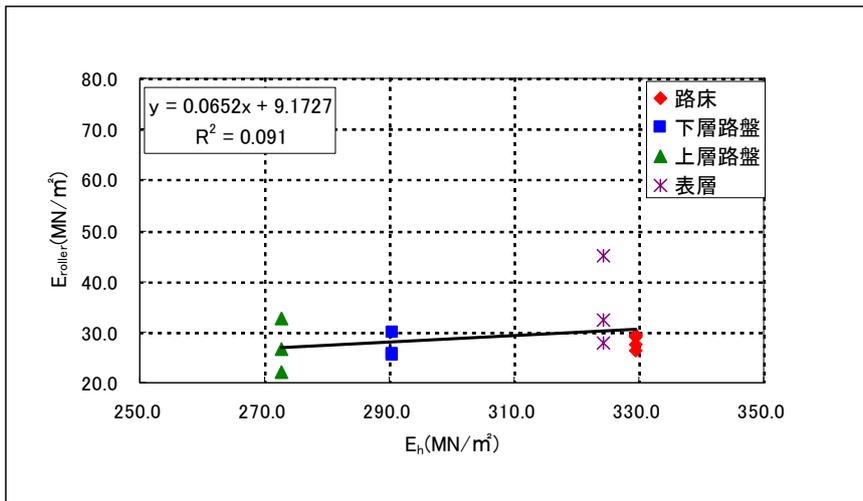


図-3. 56 各層仕上げ面のEroller(分散)とEhの関係(3レーン)

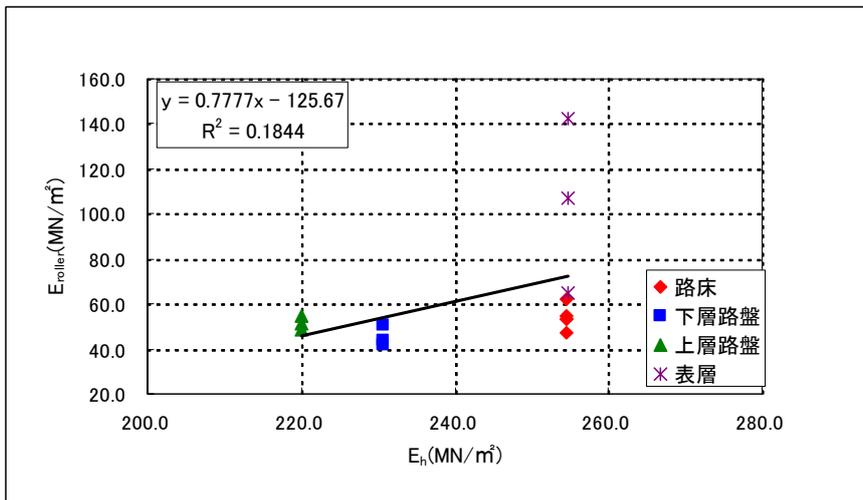


図-3. 57 各層仕上げ面のEroller(分散)とEhの関係(4レーン)

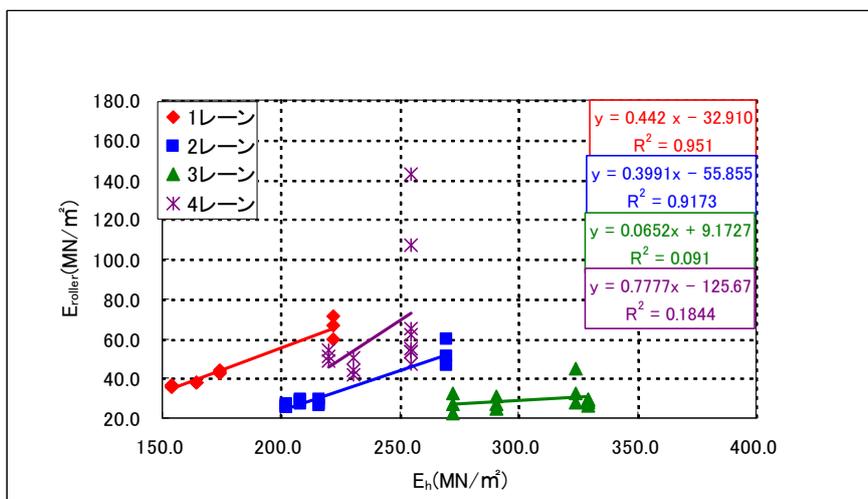


図-3. 58 各層仕上げ面のEroller(分散)とEhの関係(1~4レーン)

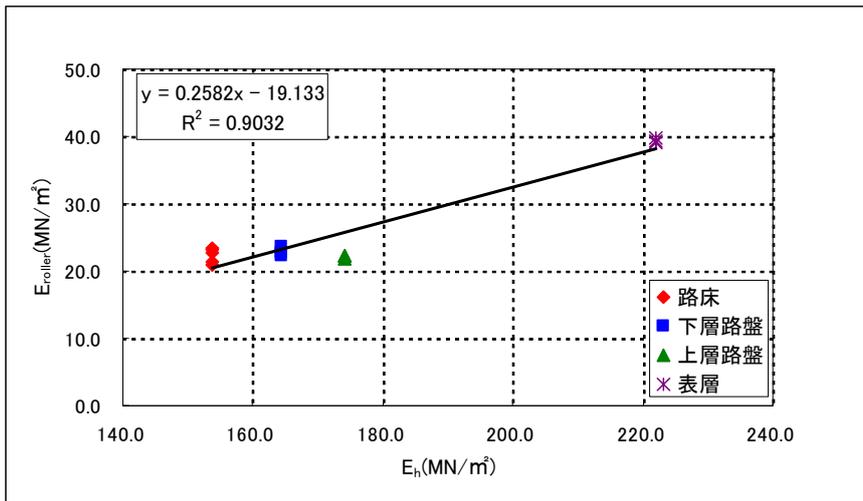


図-3. 59 各層仕上がり面のEroller(ピーク)とEhの関係(1レーン)

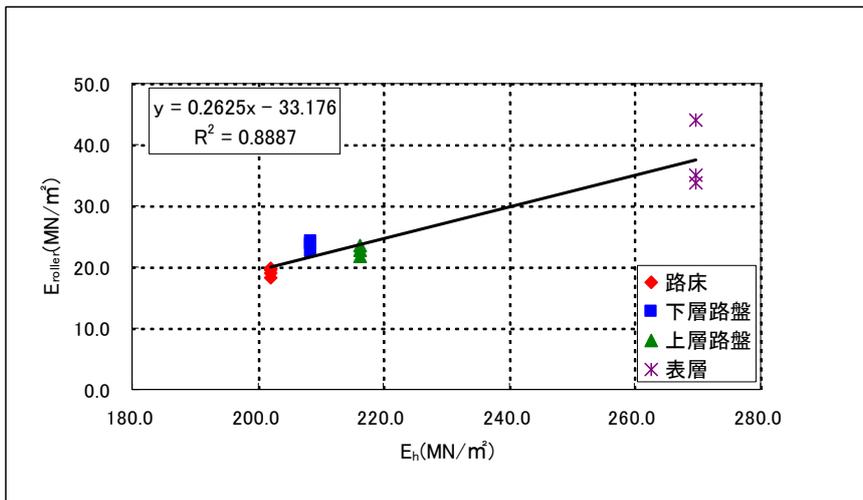


図-3. 60 各層仕上がり面のEroller(ピーク)とEhの関係(2レーン)

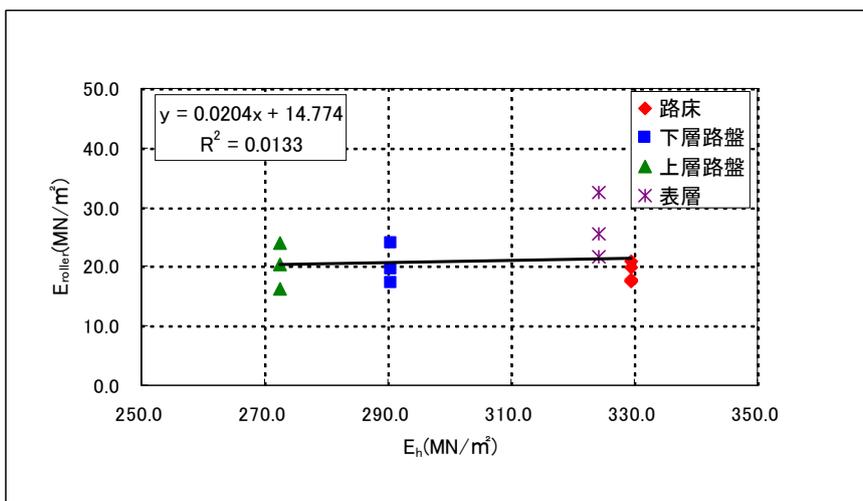


図-3. 61 各層仕上がり面のEroller(ピーク)とEhの関係(3レーン)

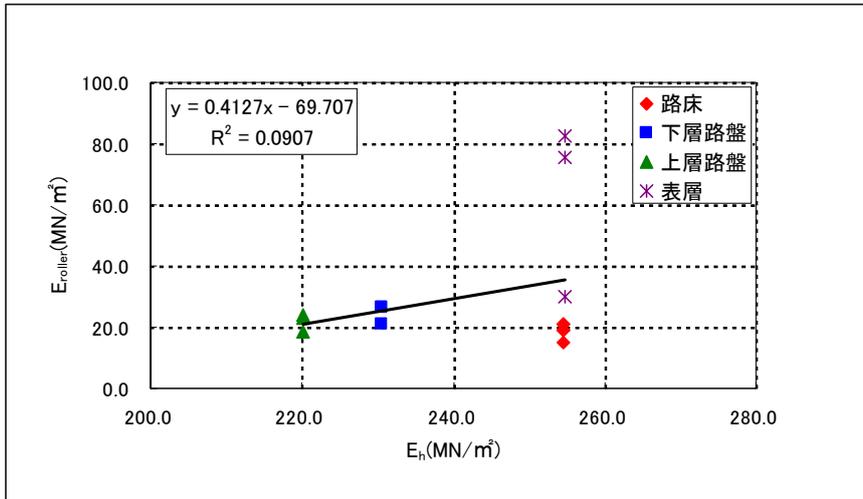


図-3. 62 各層仕上がり面のEroller(ピーク)とEhの関係(4レーン)

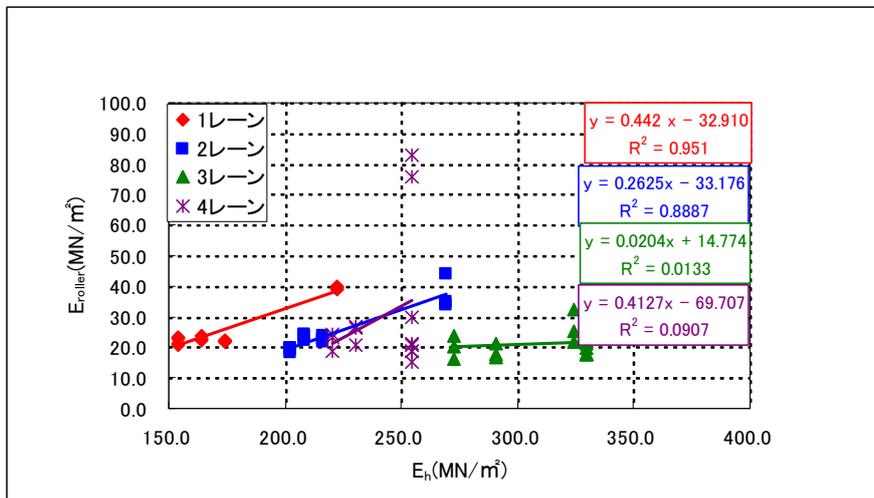


図-3. 63 各層仕上がり面のEroller(ピーク)とEhの関係(1~4レーン)

### 3. 7 3章のまとめ

#### (1) まとめ

今回の試験結果をまとめると下記のとおりである。

- ①締固め度と $E_{roller}$ には、明確な相関は認められなかった。
- ② $E_{fwd}$ と $E_{roller}$ には、相関が認められた。
- ③砕砂路床(1, 2レーン)においては、レジリエントモデュラス試験から、理論的に求めた $E_h$ と $E_{roller}$ には、相関が認められた。

#### (2) 今後の実務に適用するにあたっての課題

検討課題として以下の二点があげられる。

##### ① $E_{roller}$ 管理下限値の設定

今回の試験施工では平均弾性係数を算出するのに現場の締固め度で $M_r$ 試験を行った。 $E_{roller}$ を施工管理で使うためには、供試体の締固め度を変えて試験を行い、管理下限値を明らかにする必要がある。

##### ②アスファルト混合物の温度の影響

アスファルト混合物の物性は温度によりアスファルトの粘度が変化するため、締固め度の違いによる $M_r$ の変化を把握することが困難となる。そこで、種々の締固め度におけるアスファルト混合物の $M_r$ への温度の影響を排除するため、施工時のアスファルトの粘度と同じものを用いた混合物の締固め度別の $M_r$ を測定する必要がある。

## 4. 新しい施工管理システムの開発 ー室内試験ー

### 4. 1 はじめに

前章では屋外の試験ヤードにて実験を行い、加速度応答法（ $\alpha$ システム）による施工管理の適用性を検討した。実験結果から舗装工事への品質管理の手法の一つ敏江の適用の可能性は検証できたが、舗装の施工管理に $\alpha$ システムを適用するにあたっては、舗装の断面設計に用いられた数値（材料特性値）と舗装各層上面の $\alpha$ システムから得られる数値（ $E_{roller}$ 等と記す）との関係を把握する必要がある。

「舗装設計便覧」に示されている設計方法には「経験にもとづく設計方法」と「理論的設計方法」とがあるが、前者における材料特性値は等値換算係数（表層材の強さを1とした場合の相対強度係数）であるため、実際の力学的物性値を示す $\alpha$ 値とは異質のものである。

「理論的設計方法」は舗装材料の弾性係数とポアソンを設定し、一種の疲労計算により舗装断面を設計するものである。このため、 $\alpha$ システムによる施工管理を想定した場合、この「理論的設計方法」で設計された舗装に適用できると考えられる。

なお、現在適用されている舗装設計方法は「経験にもとづく設計方法」が殆どであるため、現時点において $\alpha$ システムの適用を考えた場合は、使用材料の一般的な物性値（CBR値、マーシャル特性値等）の他に何らかの方法で弾性係数を設定する必要がある。

### 4. 2 室内試験概要

#### (1) 室内試験の目的

「理論的設計方法」は舗装材料の弾性係数（レジリエントモジュラス）を用いている。久喜工場内における試験施工では、転圧状態での力学的物性値である $E_{roller}$ と舗装材料のレジリエントモジュラスとは高い相関を示した。

そこで、「レジリエントモジュラス試験」によって、種々の締固め状態にある舗装材料のレジリエントモジュラス（以降 $M_r$ と記す）を測定して、転圧状態の舗装材料の弾性係数を求めることを目的とした。

#### (2) 実施場所

室内試験の実施場所は、東京都清瀬市の大林道路(株)技術研究所内で行った。

#### (3) 試験装置

右(写真-4.1)に示すような $M_r$ 試験装置を用いて、 $M_r$ 値を測定した。この装置は、拘束圧をかける水とその外側の水槽の温度を制御することができる。



写真-4.1  $M_r$ 試験装置

#### 4. 3 試験条件

##### 4. 3. 1 路盤材料のMrの測定

###### (1) 載荷条件

「舗装調査・試験法便覧」に示す載荷条件を表-4. 1に示す。ただし、今回の試験では、通常の試験では実施しない締固め度を変えて行うため、予備載荷の影響が考えられた。そこで、予備載荷の有無についても検証した。

表-4. 1 載荷条件

載荷条件	載荷回数	路床土		路盤材	
		拘束圧 $\sigma_3$ (kPa)	偏差応力 $\sigma_d$ (kPa)	拘束圧 $\sigma_3$ (kPa)	偏差応力 $\sigma_d$ (kPa)
予備載荷	1,000	41.4	27.6	103.4	103.4
1	100	41.4	13.8	20.7	20.7
2	100	41.4	27.6	20.7	41.4
3	100	41.4	41.4	20.7	62.1
4	100	41.4	55.2	34.5	34.5
5	100	41.4	68.9	34.5	68.9
6	100	27.6	13.8	34.5	103.4
7	100	27.6	27.6	68.9	68.9
8	100	27.6	41.4	68.9	137.9
9	100	27.6	55.2	68.9	206.8
10	100	27.6	68.9	103.4	68.9
11	100	13.8	13.8	103.4	103.4
12	100	13.8	24.8	103.4	206.8
13	100	13.8	37.6	137.9	103.4
14	100	13.8	49.7	137.9	137.9
15	100	13.8	62.0	137.9	275.8

###### (2) 路盤材料と試験頻度

試験対象とする路盤材は、久喜工場構内における試験施工データとの関連性を考慮して、試験施工に使用した材料と同一のものを使用する。表-4. 2に路盤材および試験頻度を示す。今回は、C-30は予備載荷の有無の影響を確認し、M-30予備載荷有、RC-40予備載荷無の条件で行った。

表-4. 2 試験条件(路盤材)

項目	試験条件
材料	C-30, M-30, RC-40
供試体条件	締固め度100%, 95%, 90%

###### (3) 供試体作製方法

供試体の作製は、試験装置内で行った。締固め度100%、95%、90%とも、久喜工場内の試験施工における含水比に調整した後ボッシュタンパにより所定の締固め度に締固めた。体積の調整は型枠上端からの下がり管理し、均一となるように3層に分けて締固めた。

#### 4. 3. 2 オイル混合物のMrの測定

##### (1) 载荷条件

载荷条件は路盤材と同様とした。なお、予備载荷無しの条件で行った。

##### (2) アスファルト混合物と試験条件

アスファルト混合物の物性は、温度によりアスファルトの粘度が変わるため、締固め度の違いによるMrの変化を把握することが困難となる。そこで、種々の締固め度におけるアスファルト混合物のMr値への温度の影響を排除するため、所定の温度においてアスファルトが示す粘度と常温で同じ粘度を示すオイルをアスファルトの代替として用いた混合物（以下、オイル混合物と記す）の所定の締固め度におけるMr値を測定する。表-4. 3にアスファルトの粘度と使用したオイルの粘度を示す。

評価対象とする混合物は、久喜工場内の試験施工と同様に密粒度アスファルト混合物（13）とし、表-4. 4に試験条件を示す。

なお、オイル混合物の試験温度については供試体を拘束する水の温度を所定の温度にコントロールする。

表-4. 3 粘度(ストアス, オイル)

ストレートアスファルトの粘度	Motor oil SAE 20W-50の粘度
150°C—約200mm <sup>2</sup> /s	200mm <sup>2</sup> /s—40°C
140°C—約300mm <sup>2</sup> /s	300mm <sup>2</sup> /s—35°C
130°C—約500mm <sup>2</sup> /s	500mm <sup>2</sup> /s—27°C
120°C—約800mm <sup>2</sup> /s	800mm <sup>2</sup> /s—20°C

※最適混合粘度=180±20mm<sup>2</sup>/s, 最適締固め粘度=300±30mm<sup>2</sup>/s

表-4. 4 試験条件(オイル混合物)

項目	試験条件
材料	密粒度アスコン(13)
供試体条件	締固め度100%, 95%, 90%
温度条件	40°C, 35°C, 27°C, 20°C

##### (3) 供試体作製

供試体作製は路盤材の場合と同様とした。ただし、常温でオイル（比重0.87）とストレートアスファルト（比重1.035）の比重が異なるのでオイル量は、アスファルト量と同じ体積になるようにした。

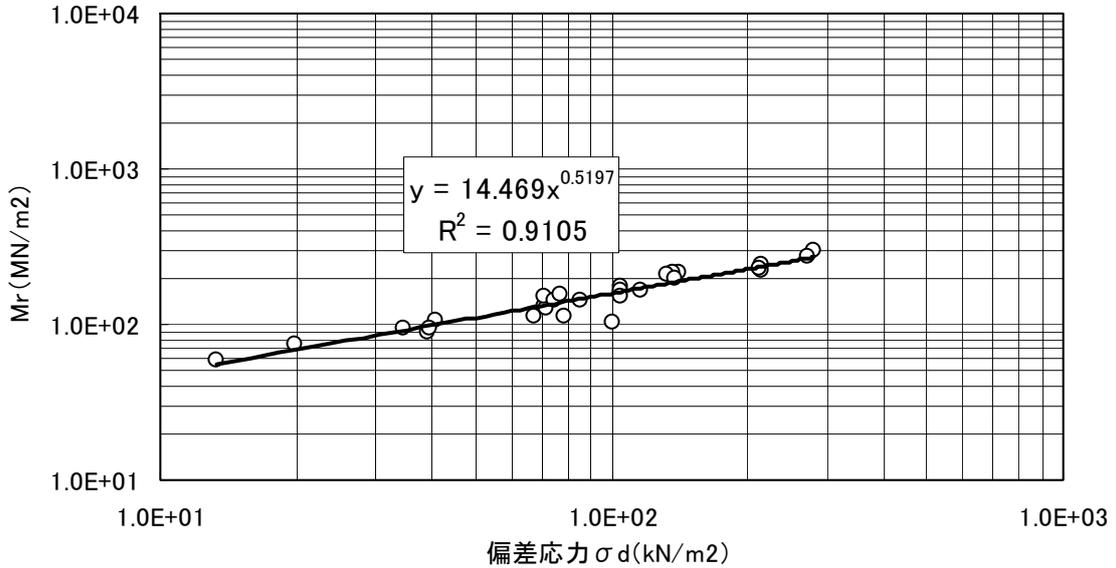
#### 4. 4 試験結果

各試験条件における路盤材の $M_r$ 試験結果を示す（図-4. 1～4. 12）。

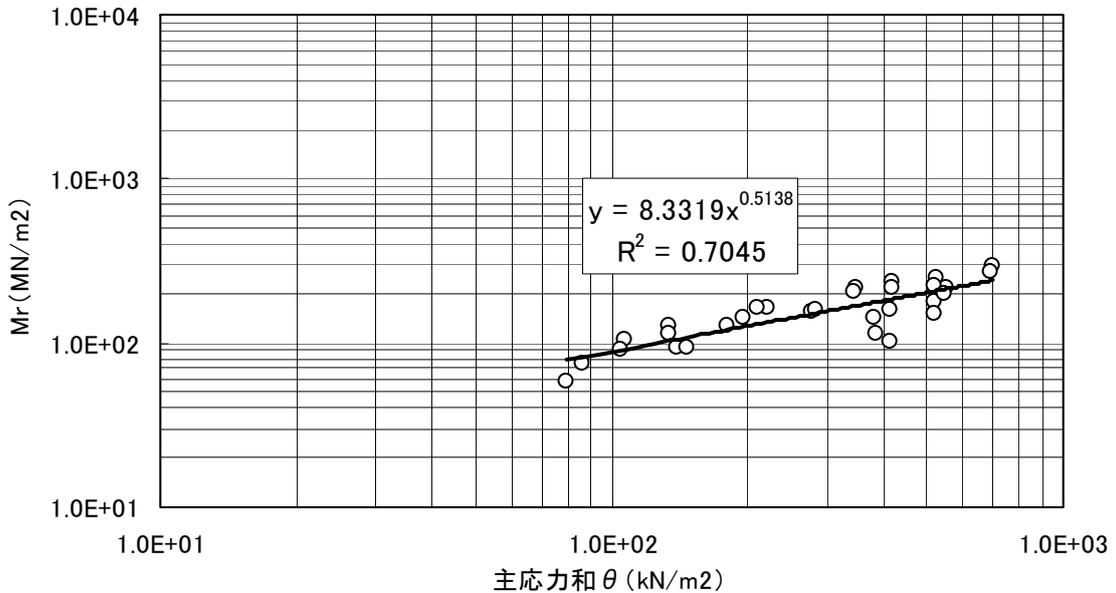
##### 4. 4. 1 路盤材料の $M_r$

(1) C-30 予備載荷有

①締固め度90%



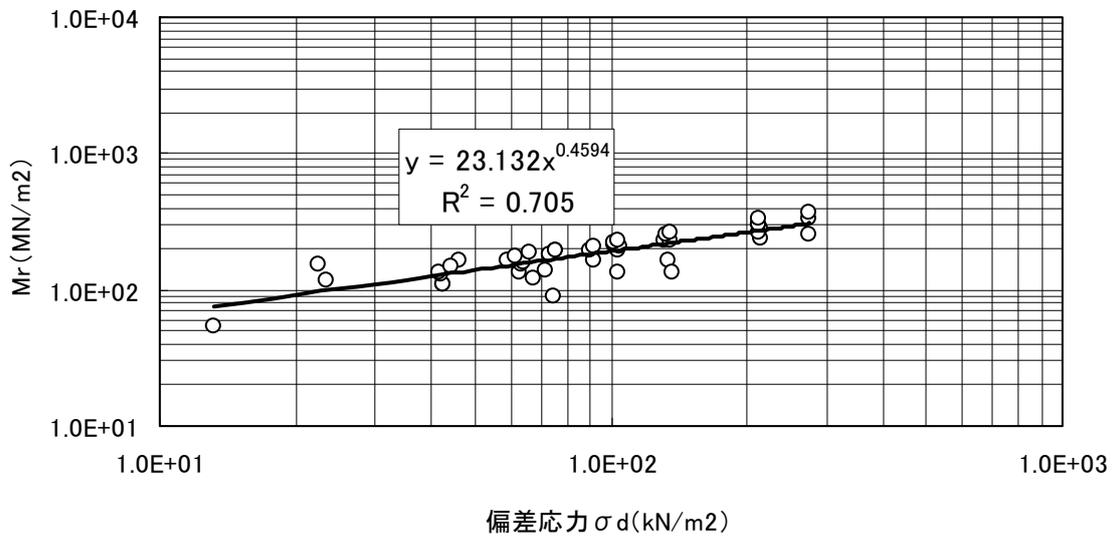
(a) 偏差応力と $M_r$ の関係



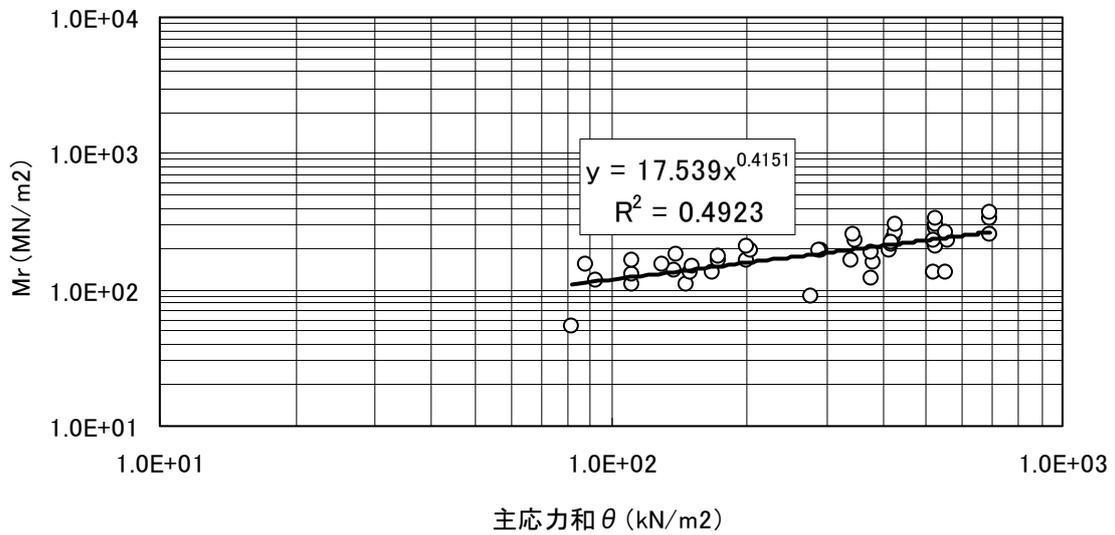
(b) 主応力と $M_r$ の関係

図-4. 1 試験結果 C-30 90%(予備載荷有)

②締固め度95%



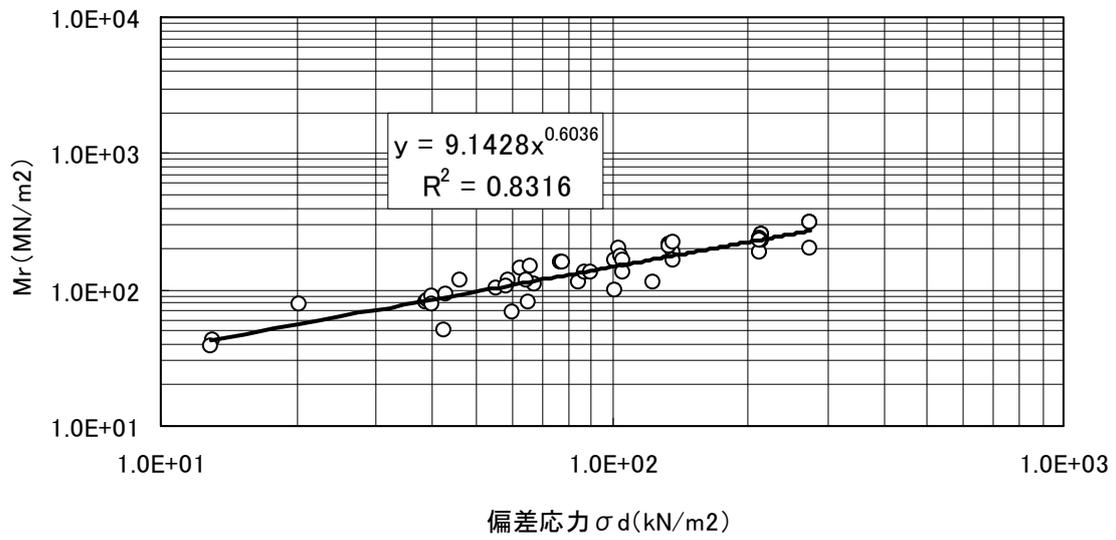
(a) 偏差応力と $M_r$ の関係



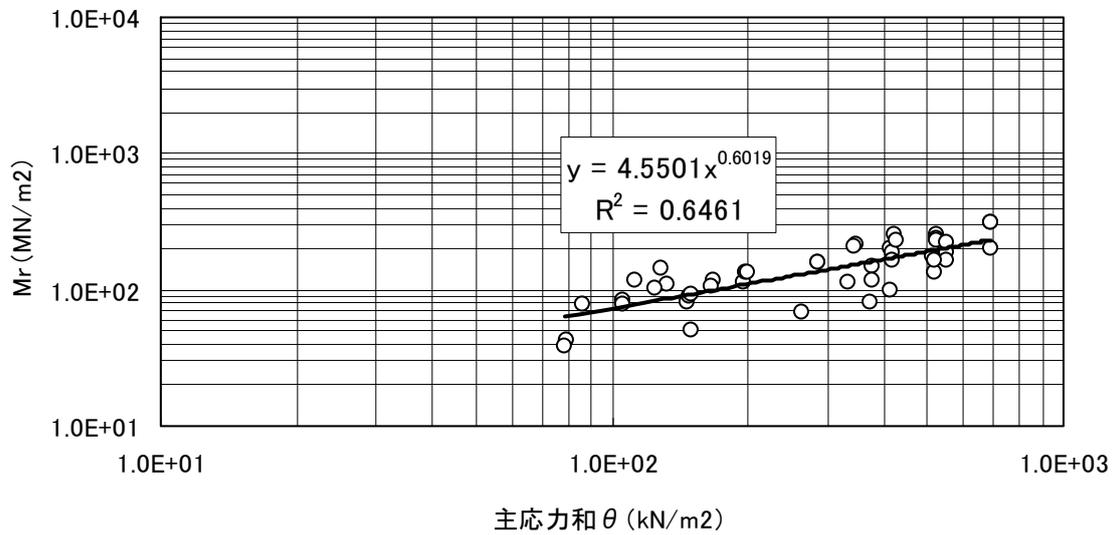
(b) 主応力和と $M_r$ の関係

図-4.2 試験結果 C-30 95%(予備載荷有)

③ 締固め度100%



(a) 偏差応力とMrの関係

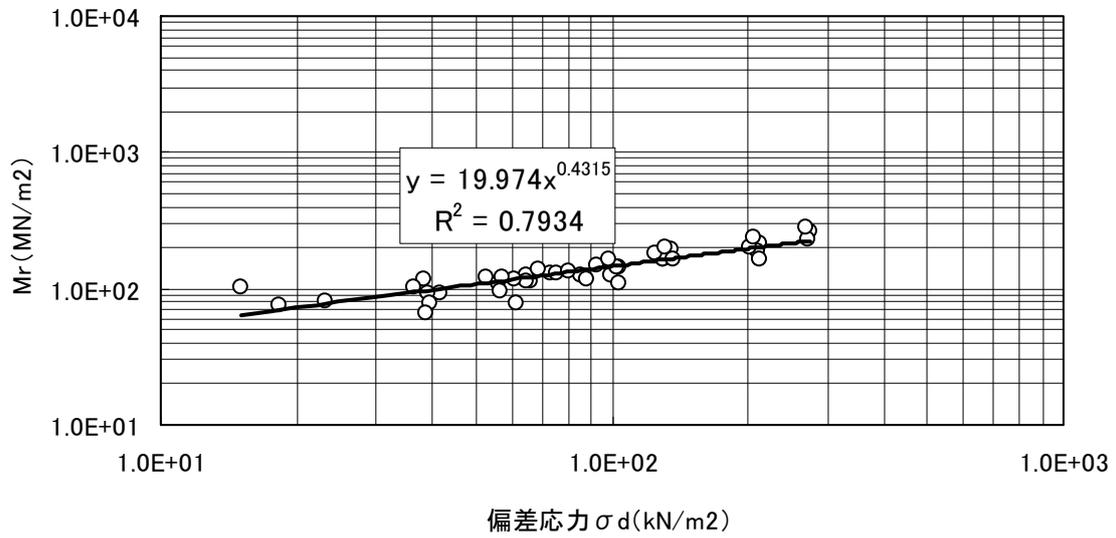


(b) 主応力和とMrの関係

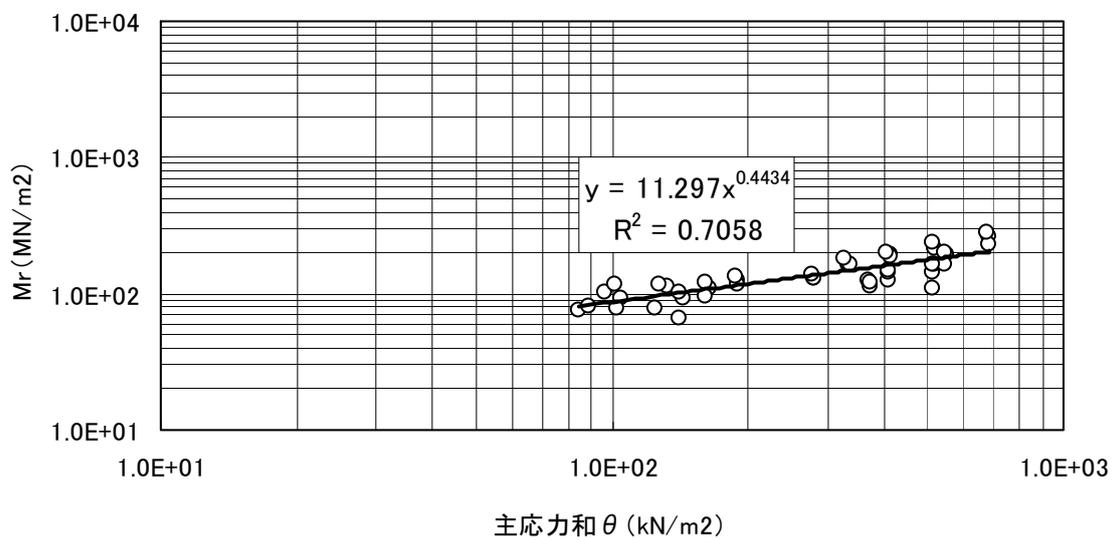
図-4.3 試験結果 C-30 100%(予備載荷有)

(2) C-30 予備載荷無

① 締固め度90%



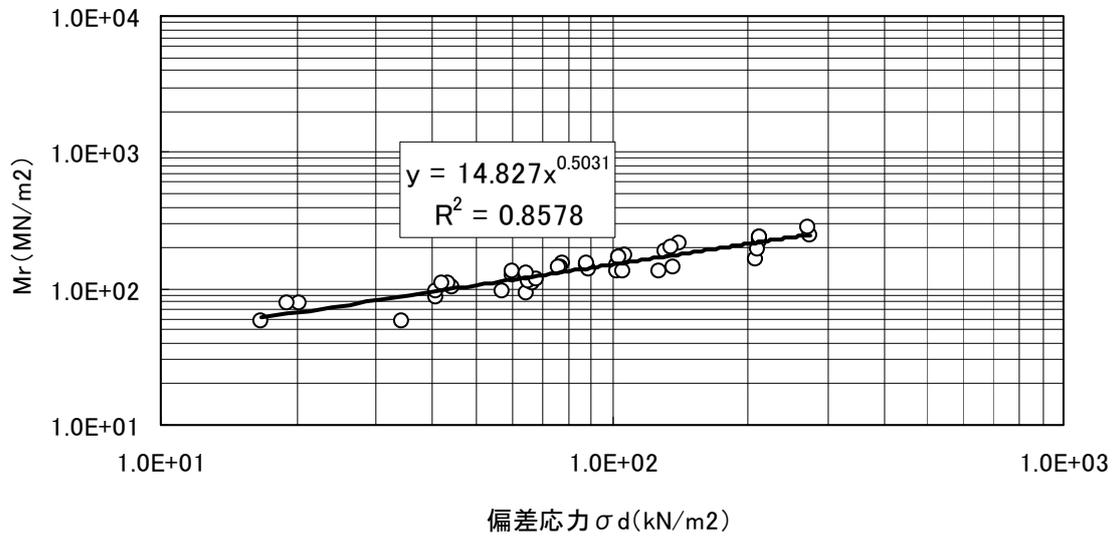
(a) 偏差応力とMrの関係



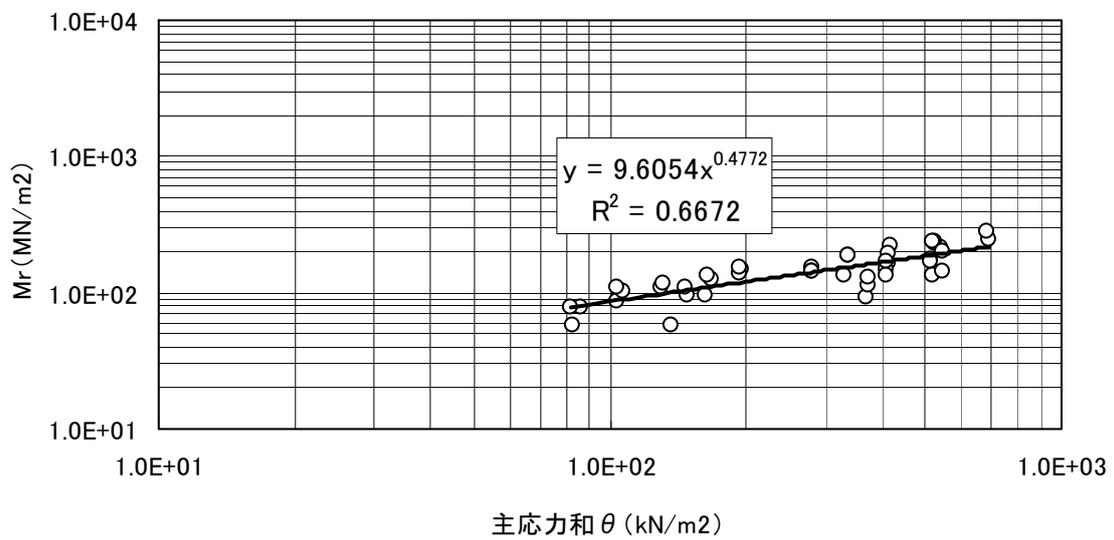
(b) 主応力和とMrの関係

図-4. 4 試験結果 C-30 90%(予備載荷無)

②締固め度95%



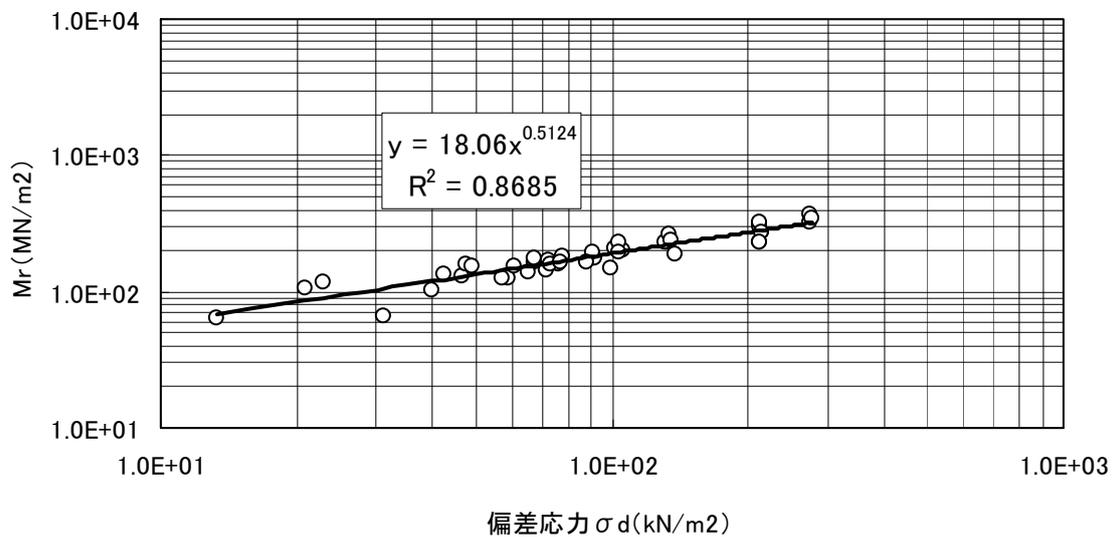
(a) 偏差応力と $M_r$ の関係



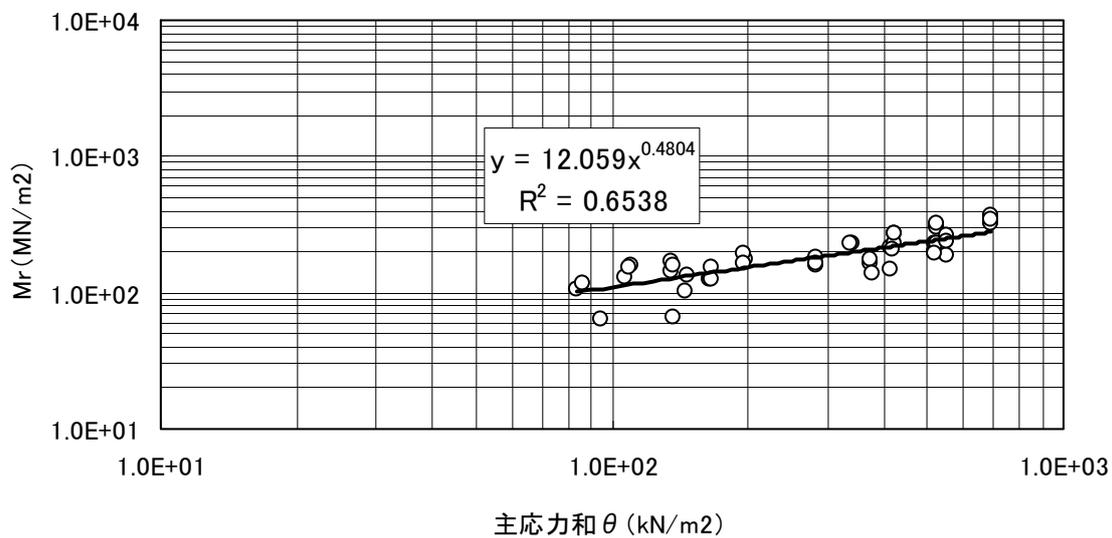
(b) 主応力和と $M_r$ の関係

図-4.5 試験結果 C-30 95%(予備載荷無)

③ 締固め度100%



(a) 偏差応力と $M_r$ の関係

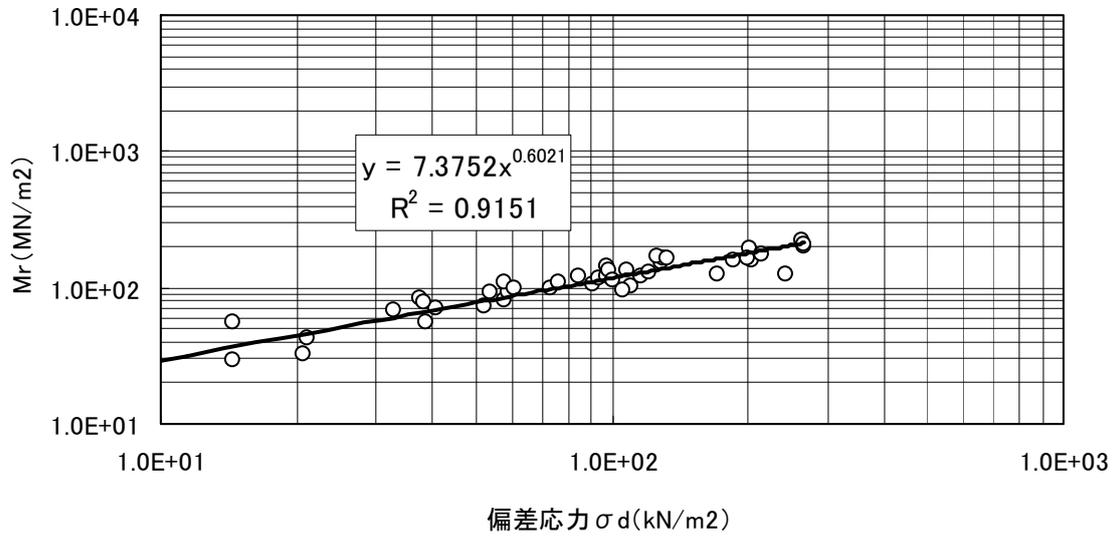


(b) 主応力和と $M_r$ の関係

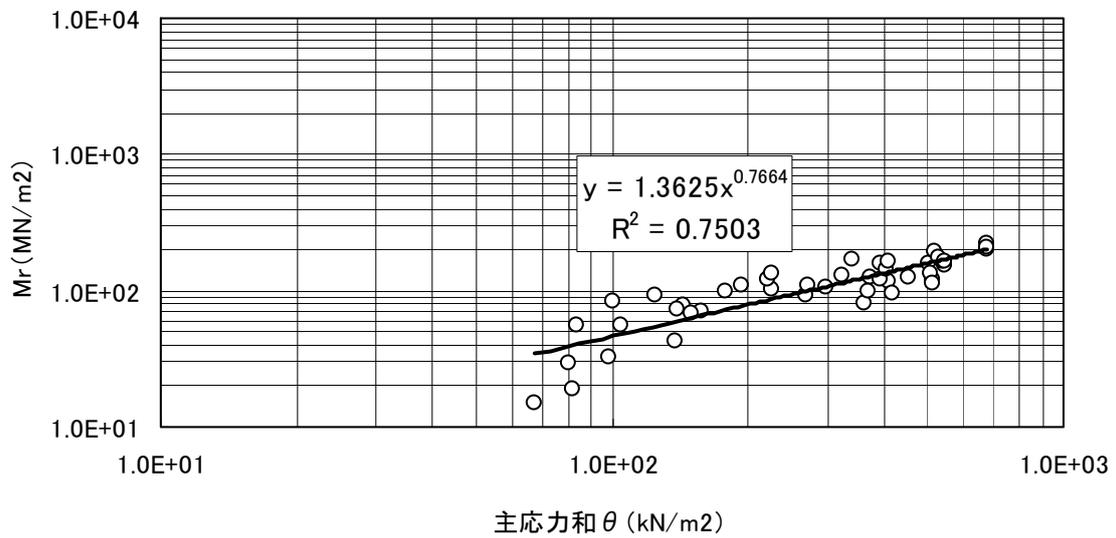
図-4.6 試験結果 C-30 100%(予備載荷無)

(2) M-30 予備載荷有

① 締固め度90%



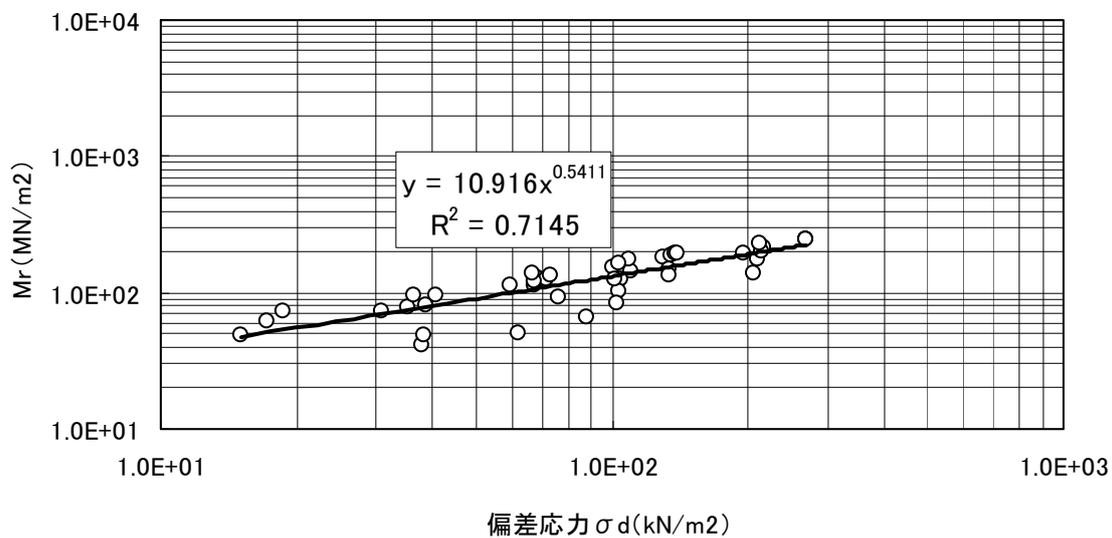
(a) 偏差応力と $M_r$ の関係



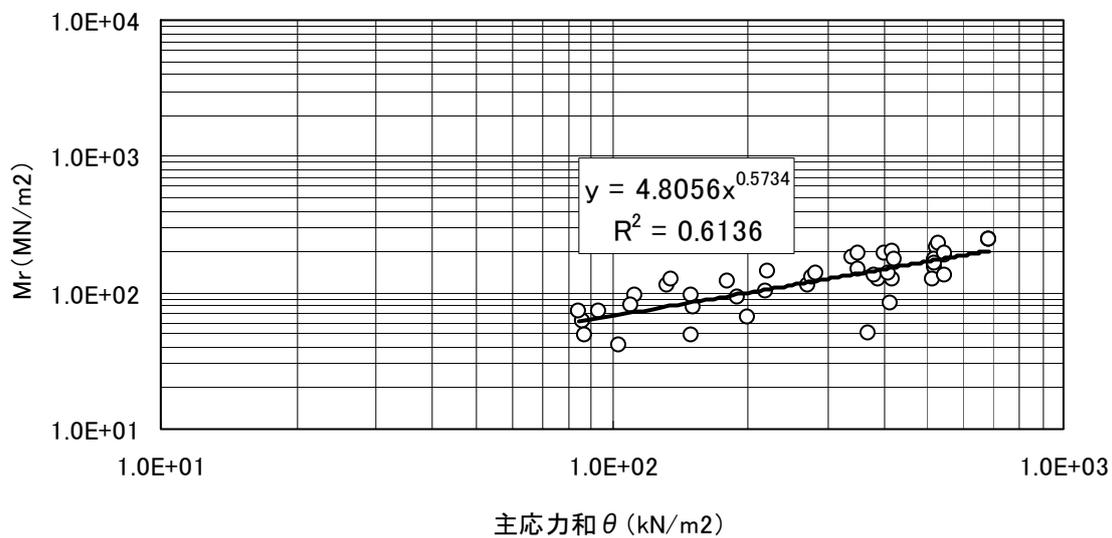
(b) 主応力和と $M_r$ の関係

図-4.7 試験結果 M-30 90%(予備載荷有)

②締固め度95%



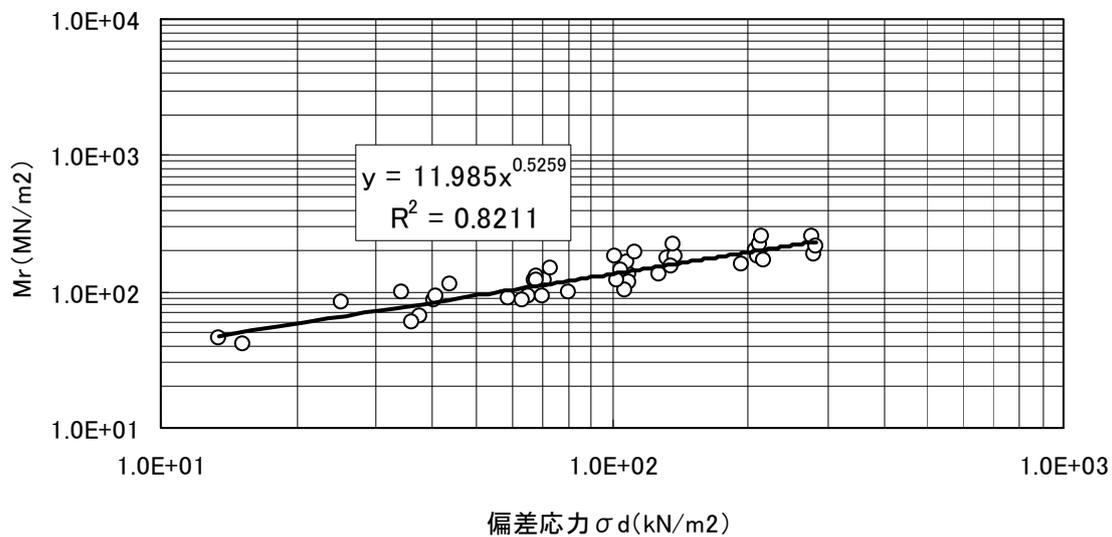
(a) 偏差応力と $M_r$ の関係



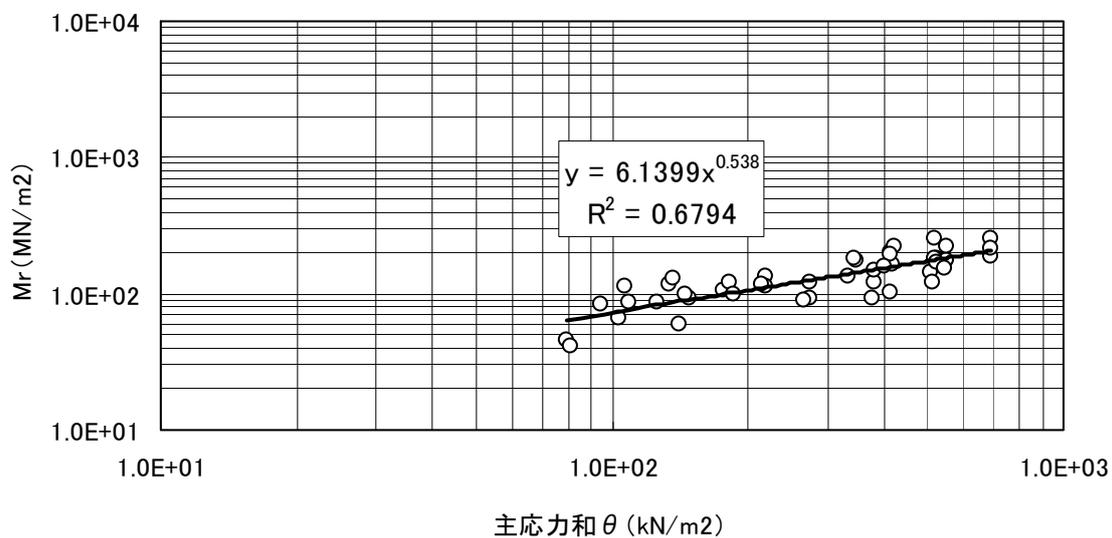
(b) 主応力和と $M_r$ の関係

図-4. 8 試験結果 M-30 95%(予備載荷有)

③ 締固め度100%



(a) 偏差応力と $M_r$ の関係

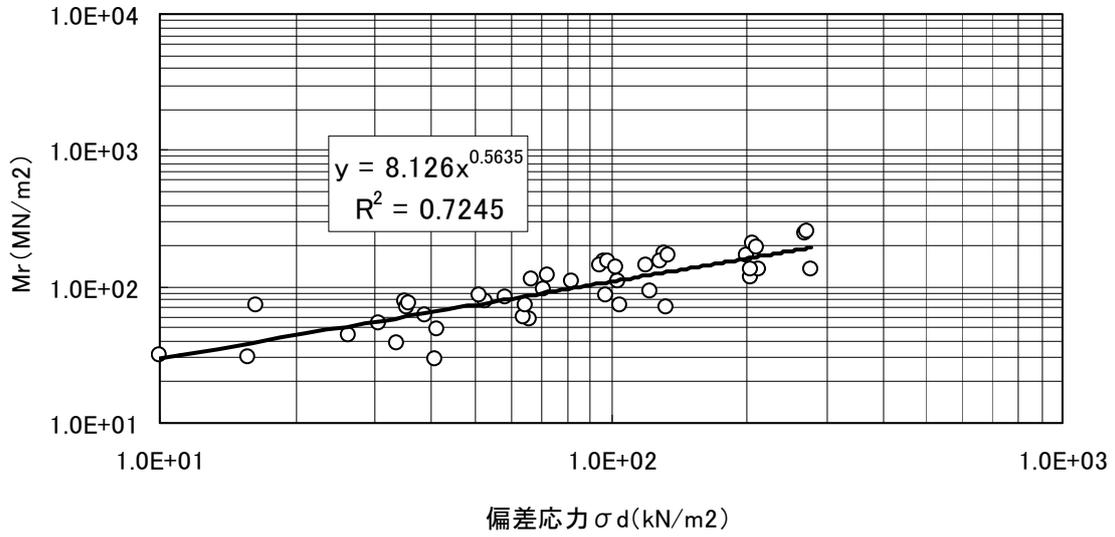


(b) 主応力和と $M_r$ の関係

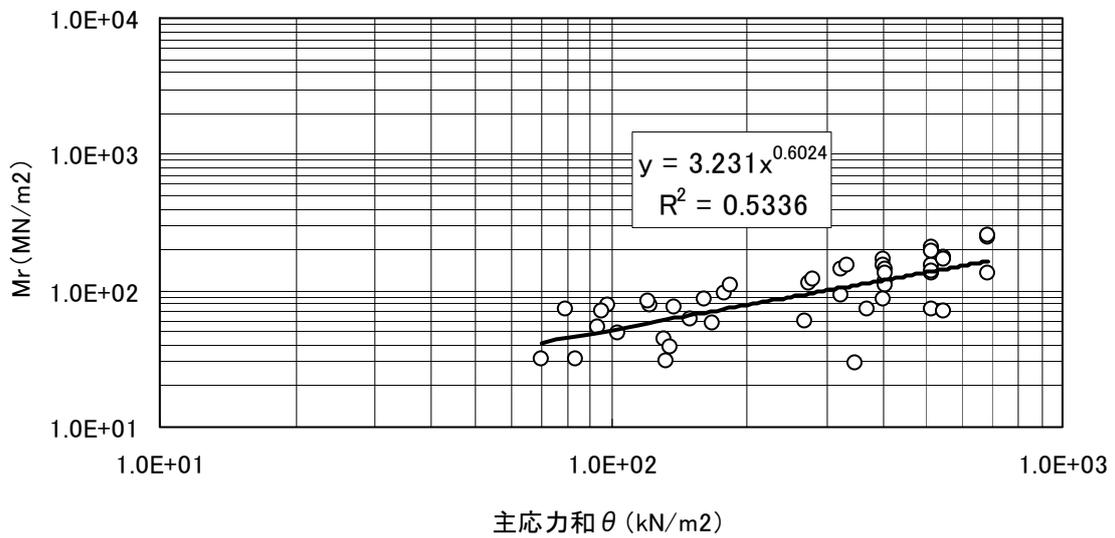
図-4.9 試験結果 M-30 100%(予備載荷有)

(3) RC-40 予備載荷無

① 締固め度90%



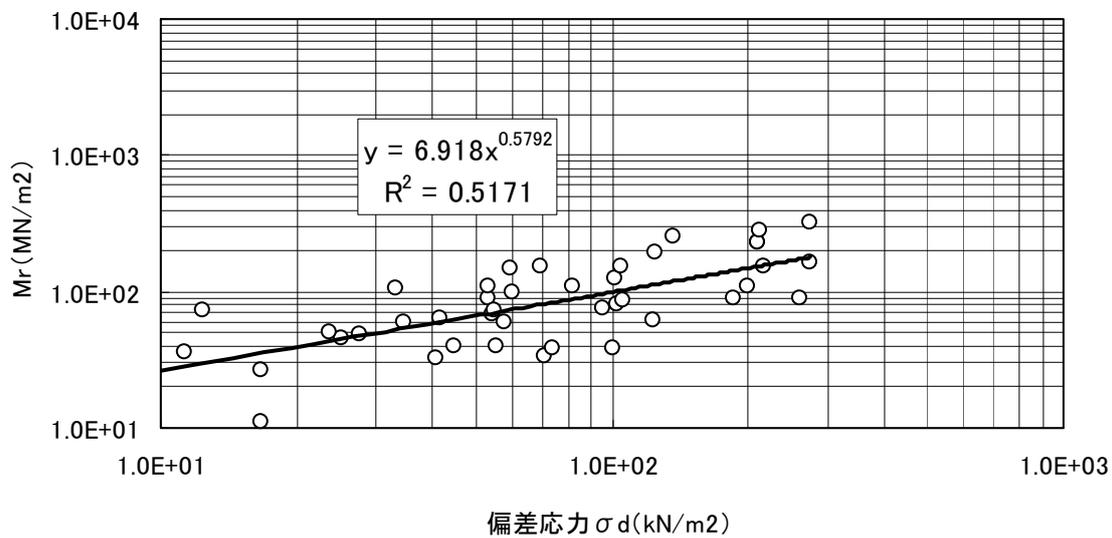
(a) 偏差応力と $M_r$ の関係



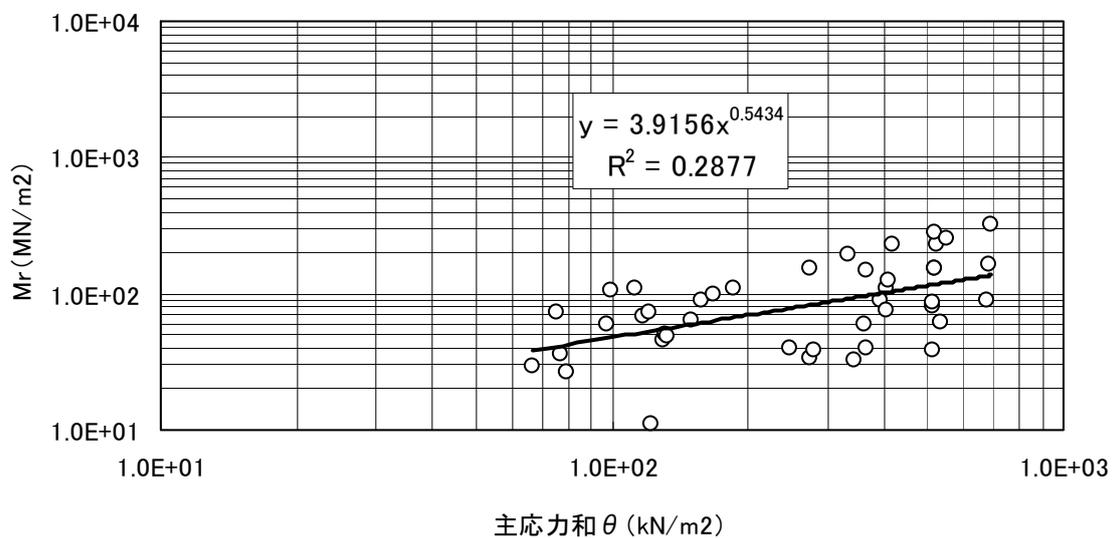
(b) 主応力と $M_r$ の関係

図-4. 10 試験結果 RC-40 90%(予備載荷無)

②締固め度95%



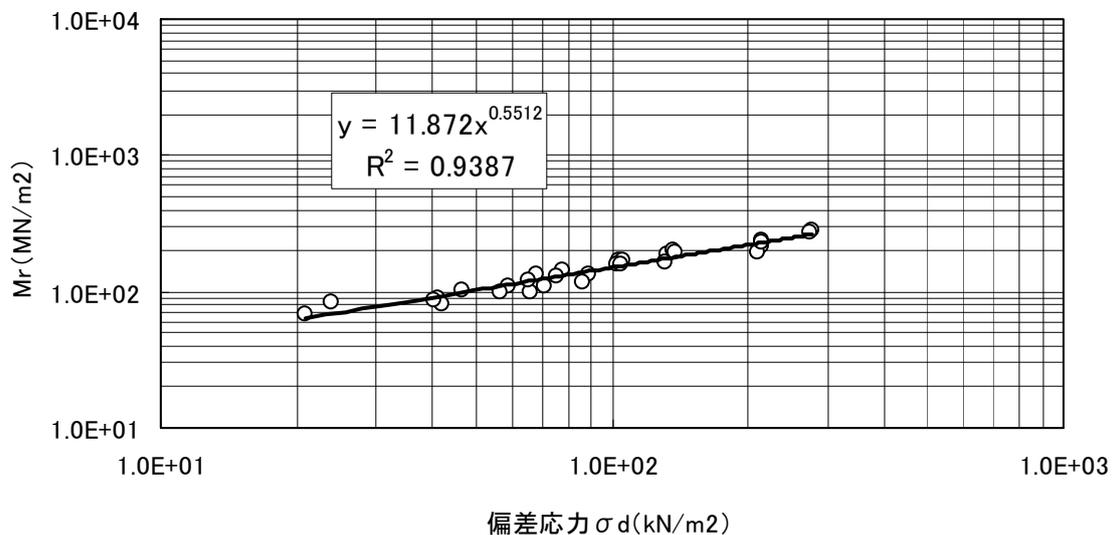
(a) 偏差応力と $M_r$ の関係



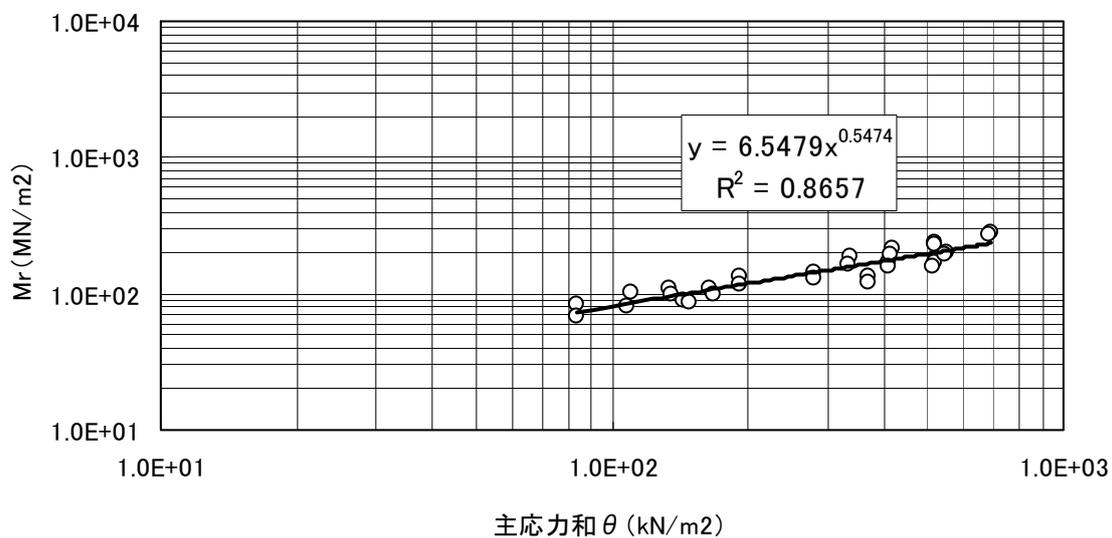
(b) 主応力和と $M_r$ の関係

図-4. 11 試験結果 RC-40 95%(予備載荷無)

③ 締固め度100%



(a) 偏差応力と $M_r$ の関係



(b) 主応力と $M_r$ の関係

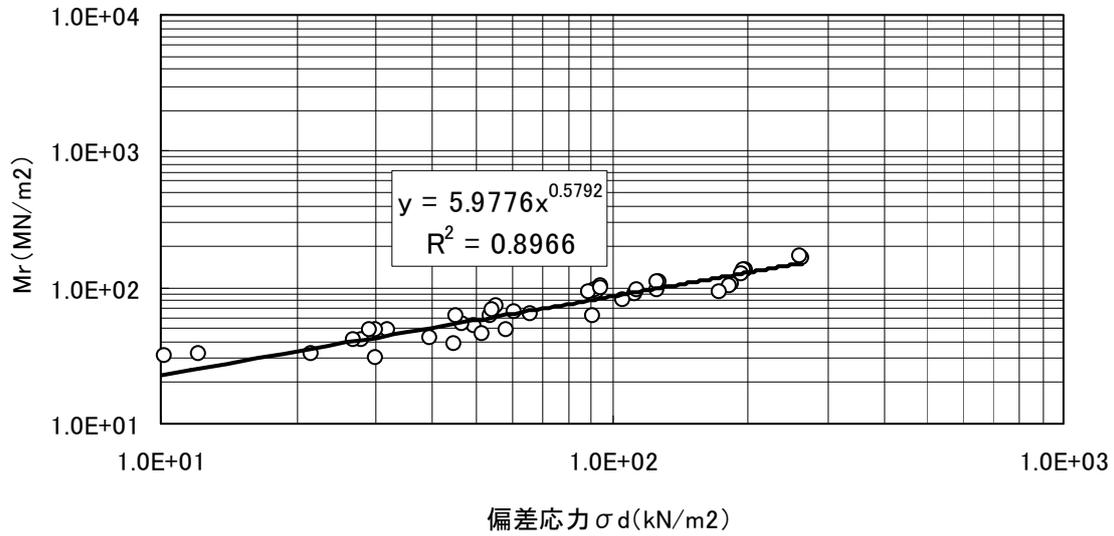
図-4. 12 試験結果 RC-40 100%(予備載荷無)

#### 4. 4. 2 オイル混合物のMr

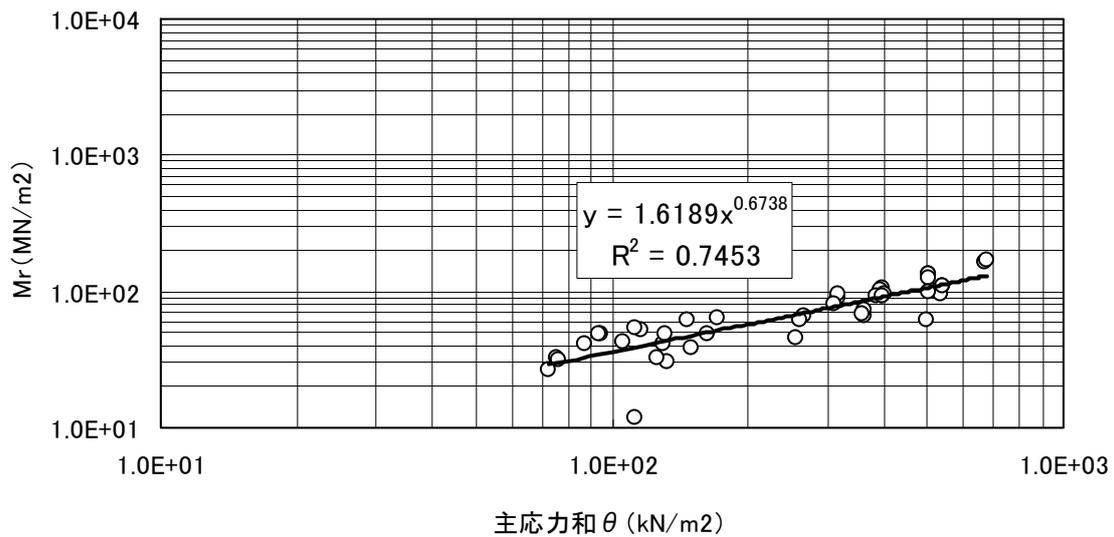
各試験条件におけるオイル混合物のMr試験結果を示す(図-4. 13～4. 24)。

(1) 試験温度 20℃

① 締固め度90%



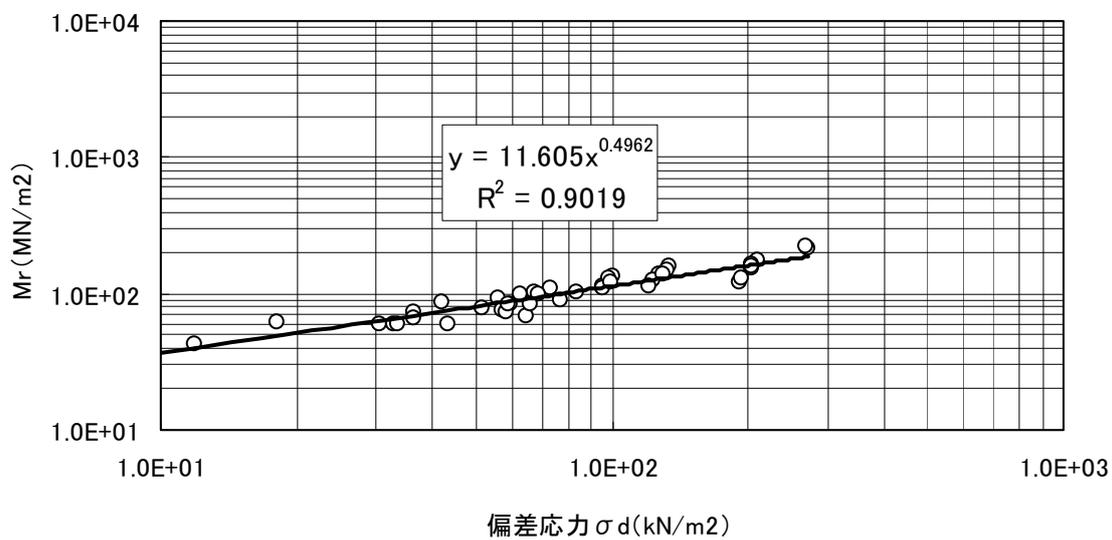
(a) 偏差応力とMrの関係



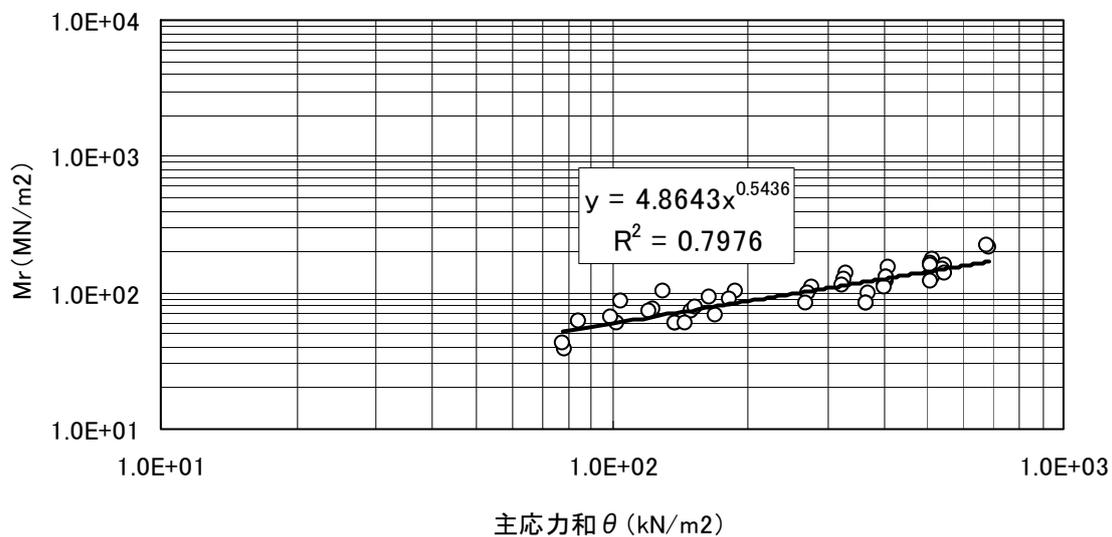
(b) 主応力とMrの関係

図-4. 13 試験結果 20℃ 90%

② 締固め度95%



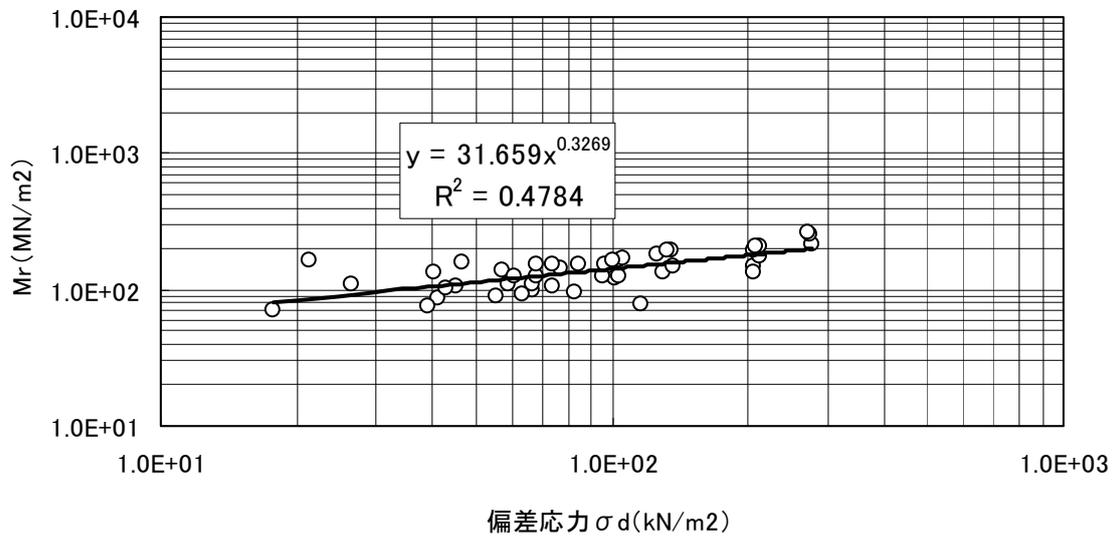
(a) 偏差応力とMrの関係



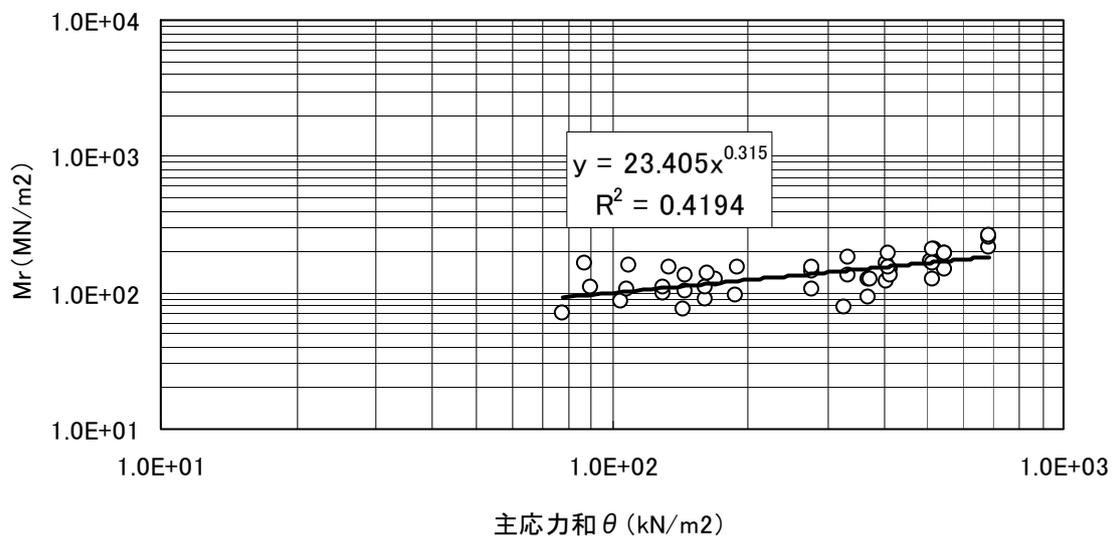
(b) 主応力和とMrの関係

図-4.14 試験結果 20°C 95%

③ 締固め度100%



(a) 偏差応力と $M_r$ の関係

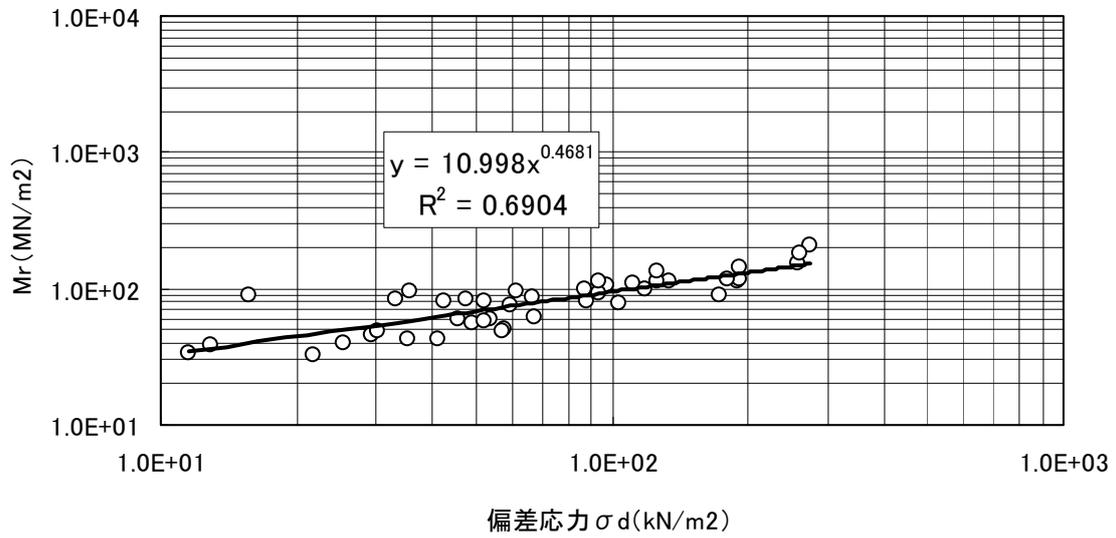


(b) 主応力和と $M_r$ の関係

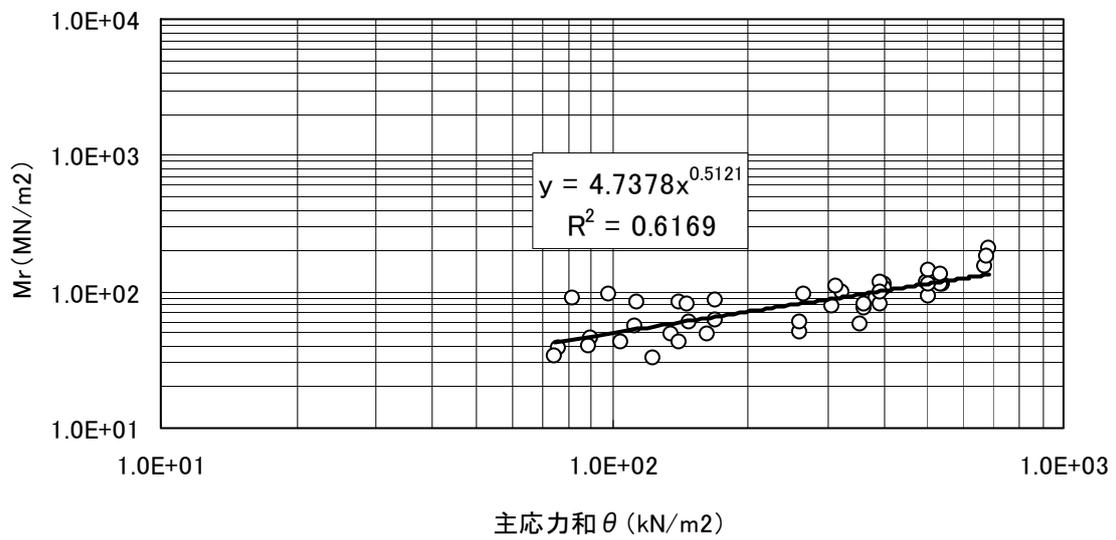
図-4. 15 試験結果 20°C 100%

(2) 試験温度 27°C

① 締固め度90%



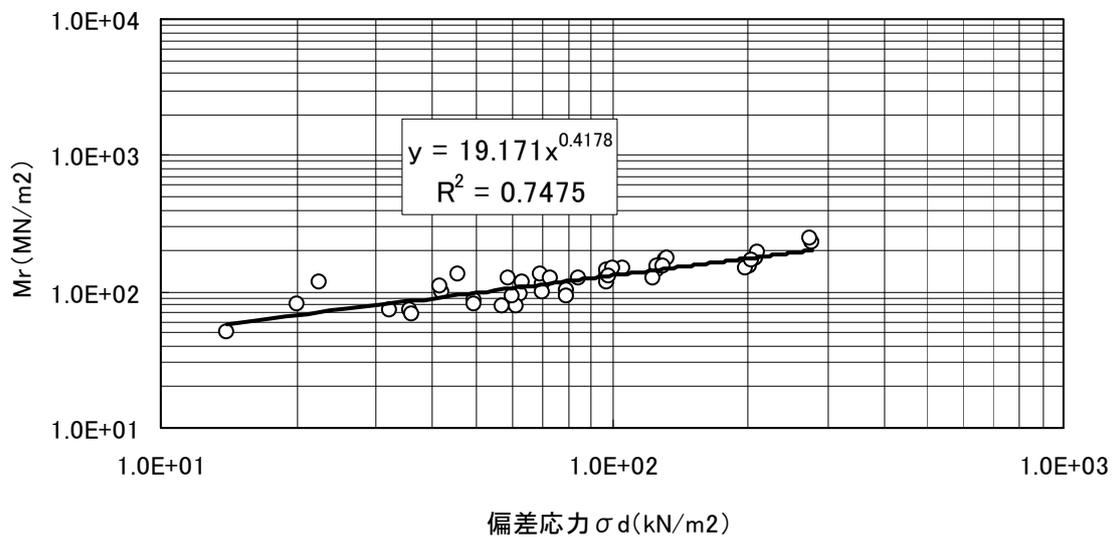
(a) 偏差応力と $M_r$ の関係



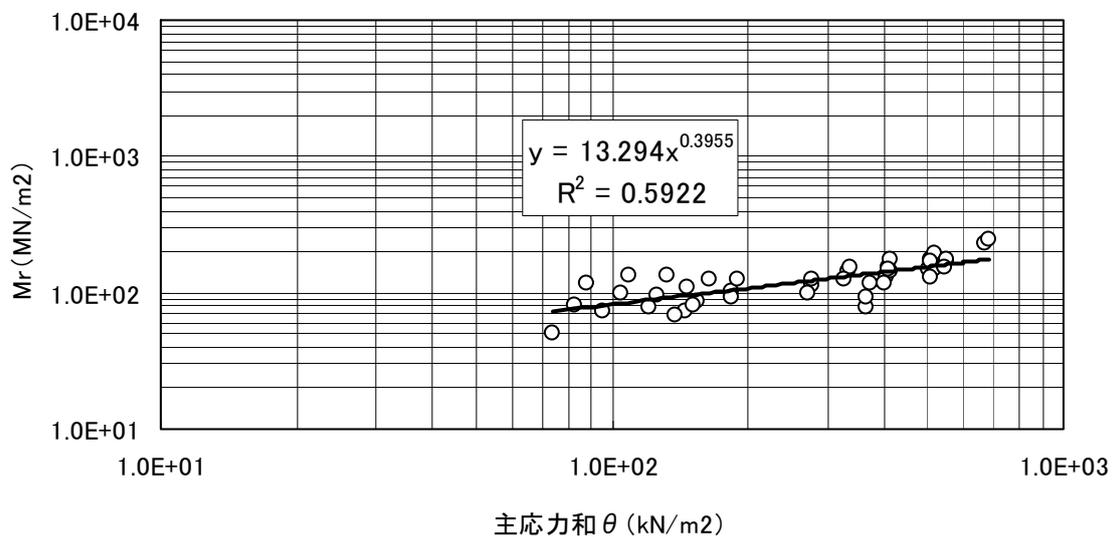
(b) 主応力和と $M_r$ の関係

図-4.16 試験結果 27°C 90%

② 締固め度95%



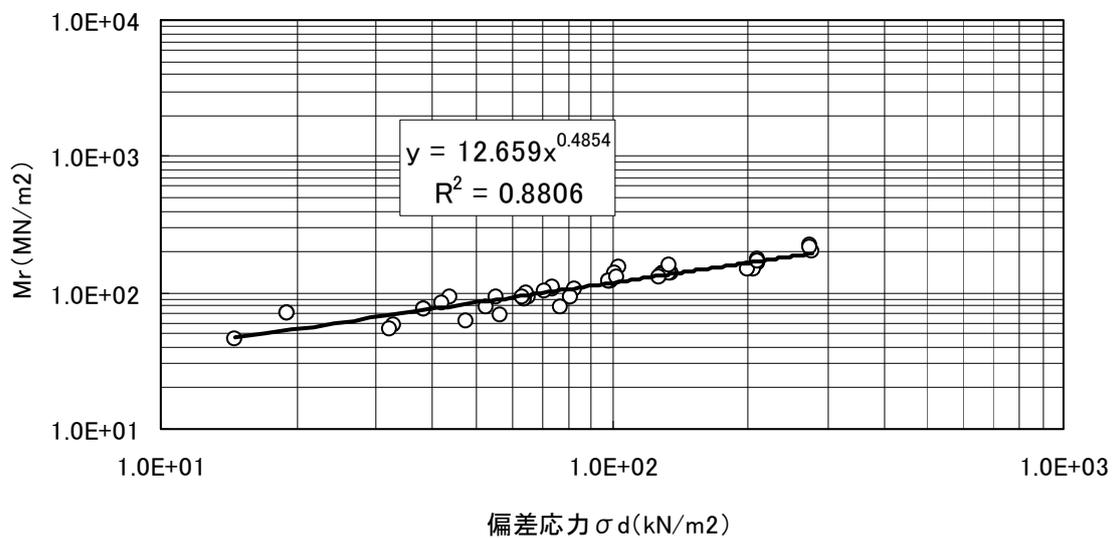
(a) 偏差応力と $M_r$ の関係



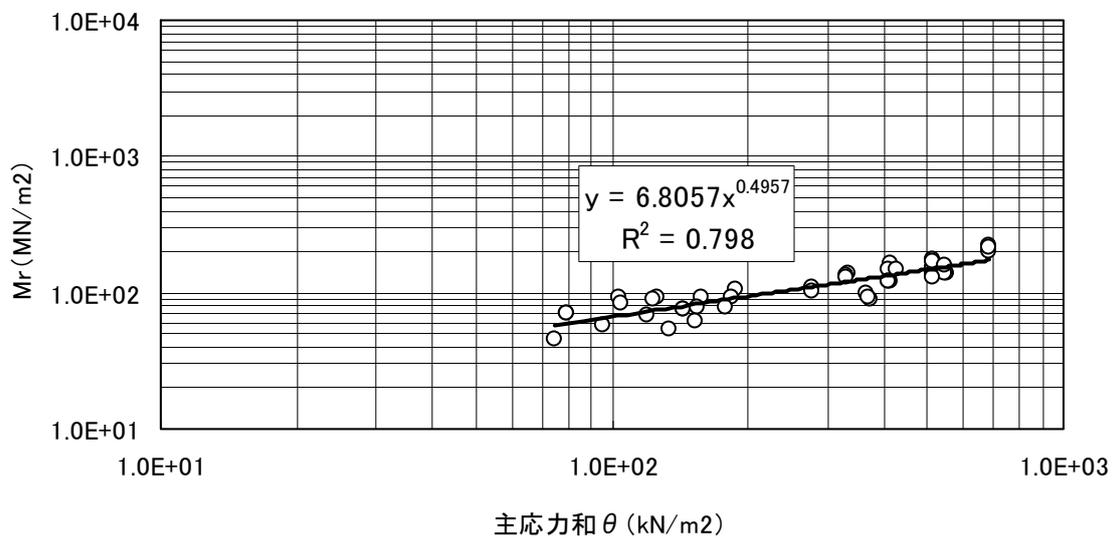
(b) 主応力和と $M_r$ の関係

図-4.17 試験結果 27°C 95%

③ 締固め度100%



(a) 偏差応力と $M_r$ の関係

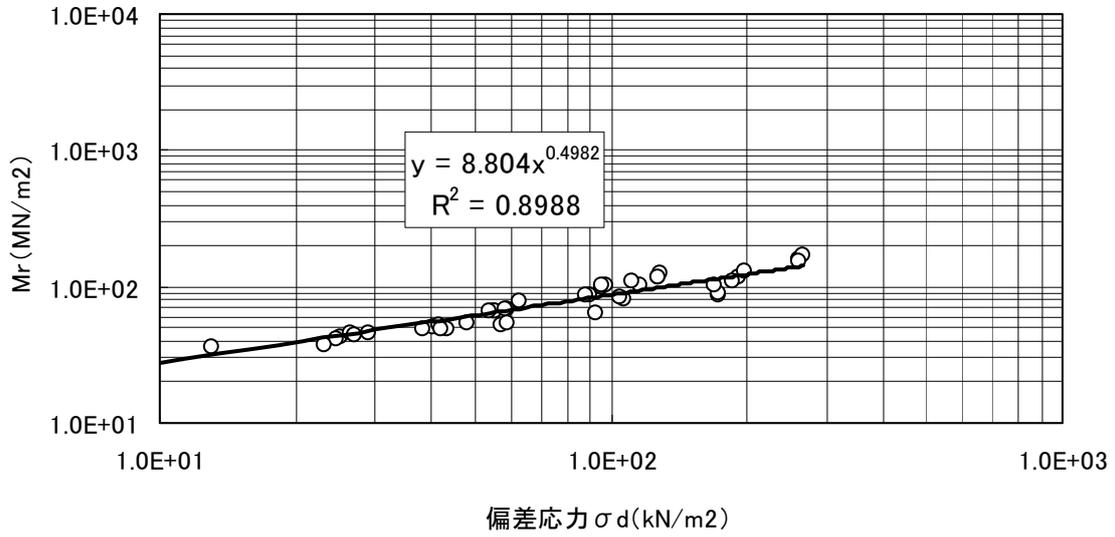


(b) 主応力和と $M_r$ の関係

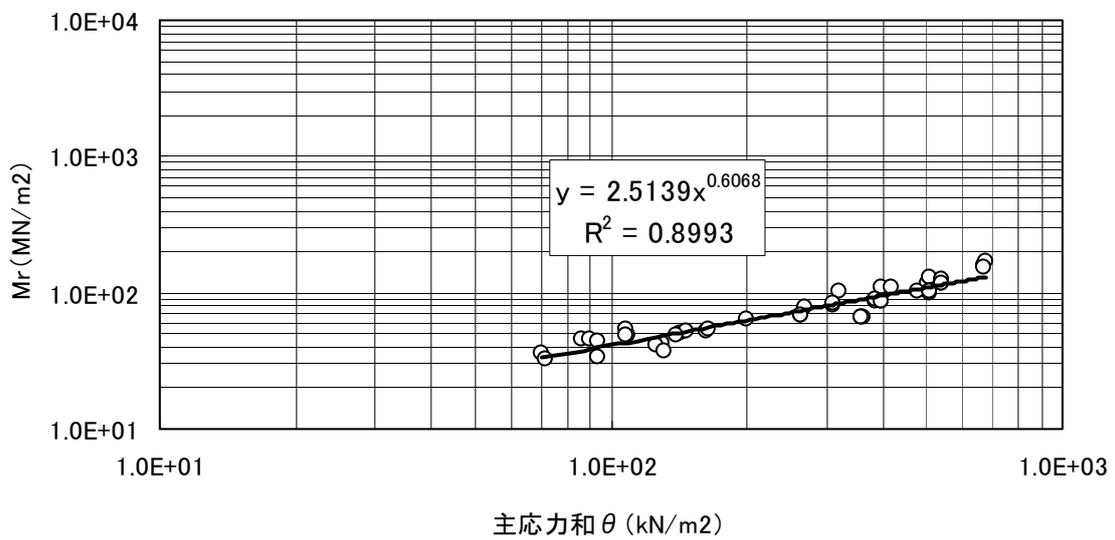
図-4. 18 試験結果 27°C 100%

(3) 試験温度 35°C

① 締固め度90%



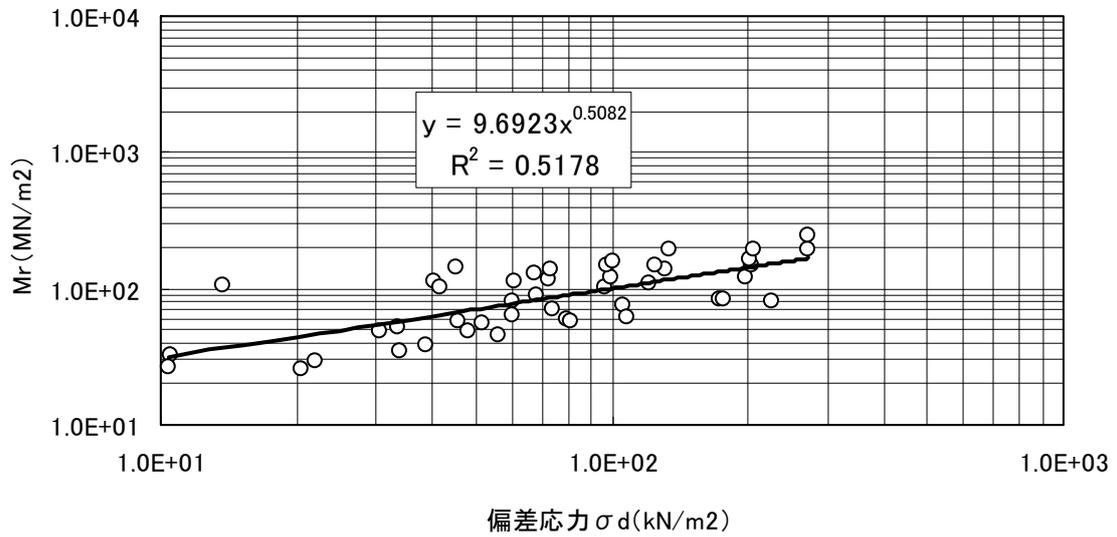
(a) 偏差応力とMrの関係



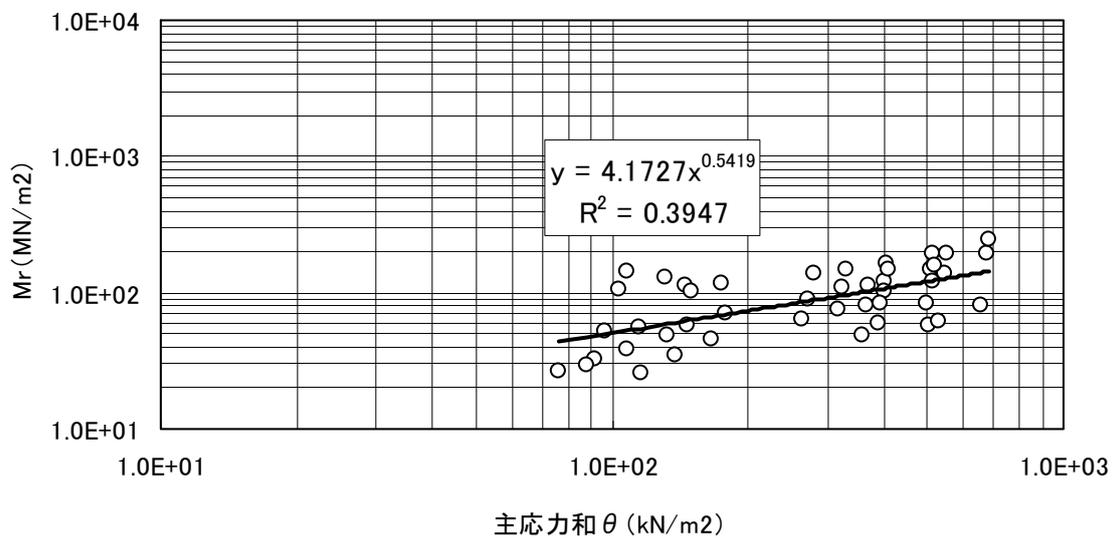
(b) 主応力和とMrの関係

図-4.19 試験結果 35°C 90%

② 締固め度95%



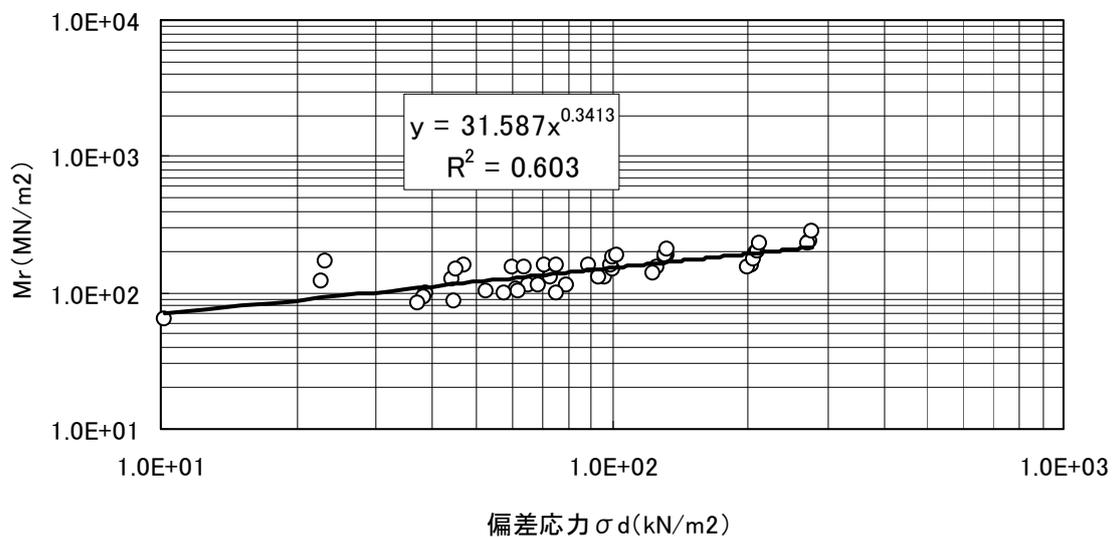
(a) 偏差応力と $M_r$ の関係



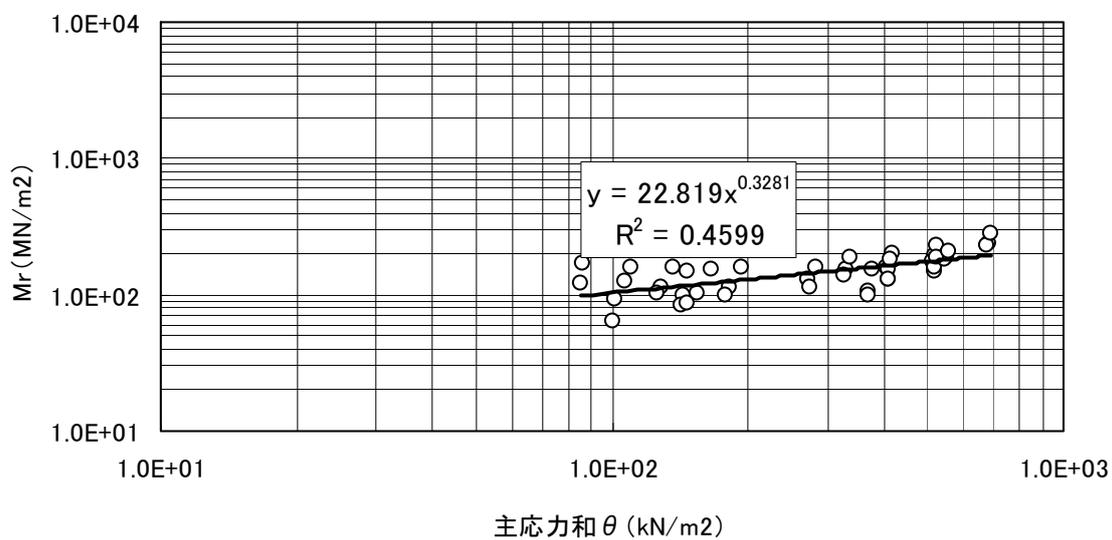
(b) 主応力和と $M_r$ の関係

図-4. 20 試験結果 35°C 95%

③ 締固め度100%



(a) 偏差応力と $M_r$ の関係

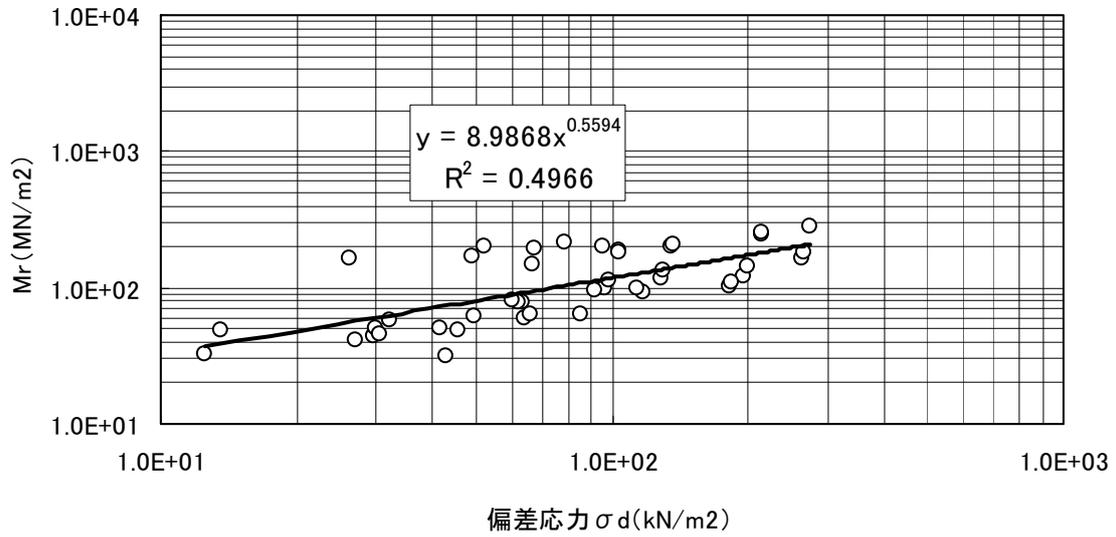


(b) 主応力和と $M_r$ の関係

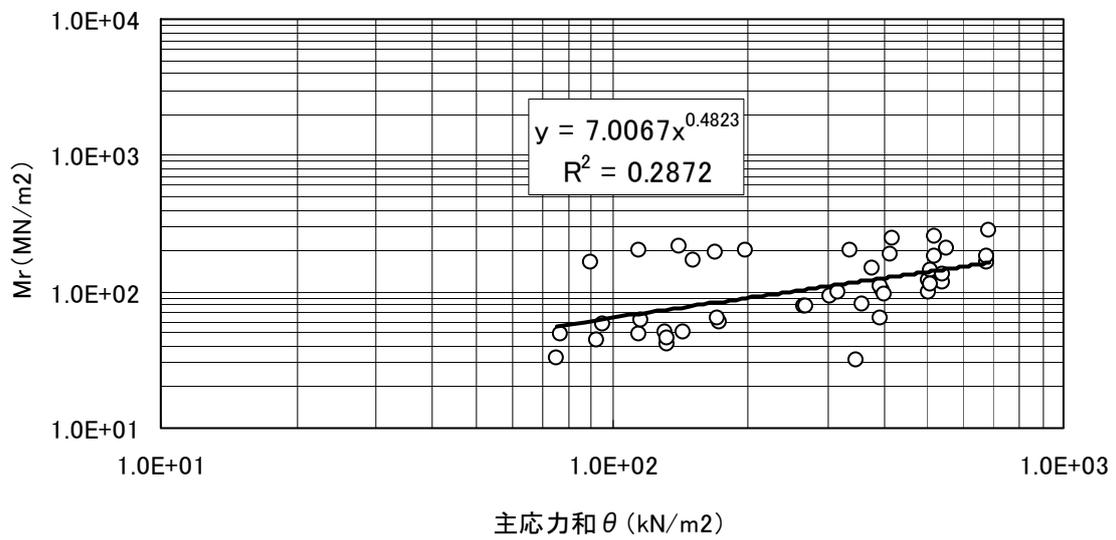
図-4. 21 試験結果 35°C 100%

(4) 試験温度 40°C

① 締固め度90%



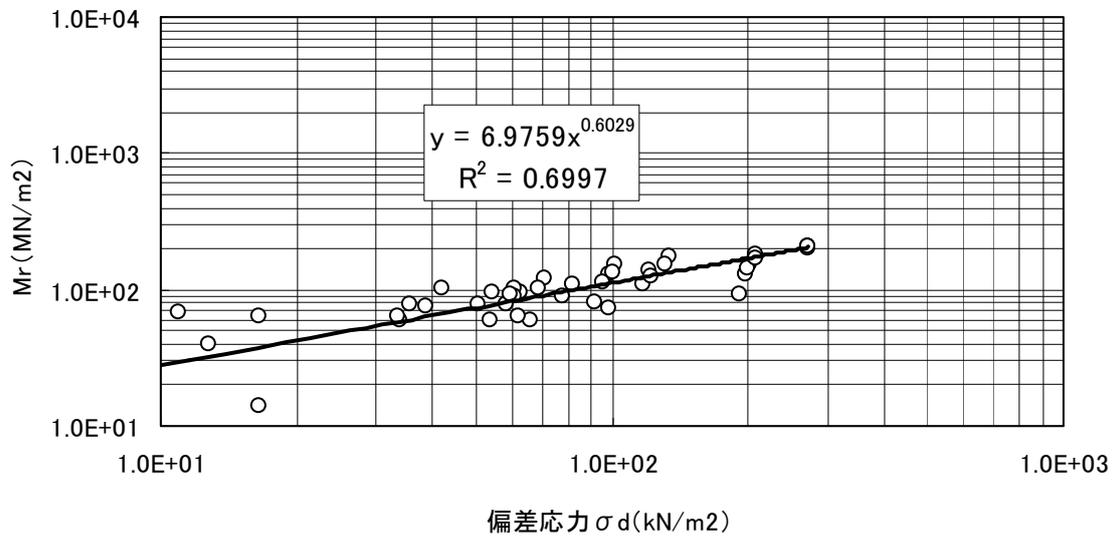
(a) 偏差応力と $M_r$ の関係



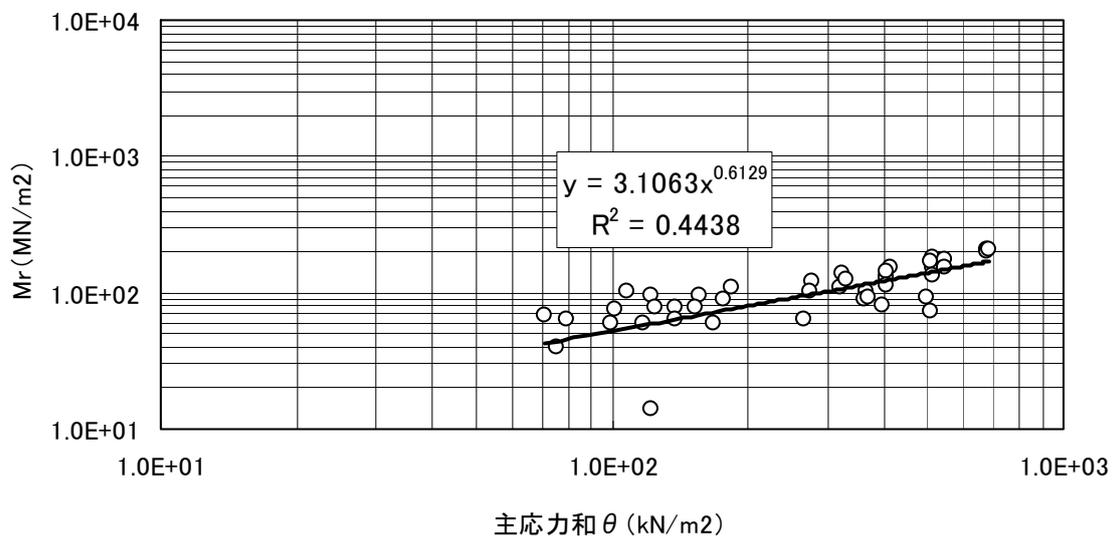
(b) 主応力和と $M_r$ の関係

図-4.22 試験結果 40°C 90%

② 締固め度95%



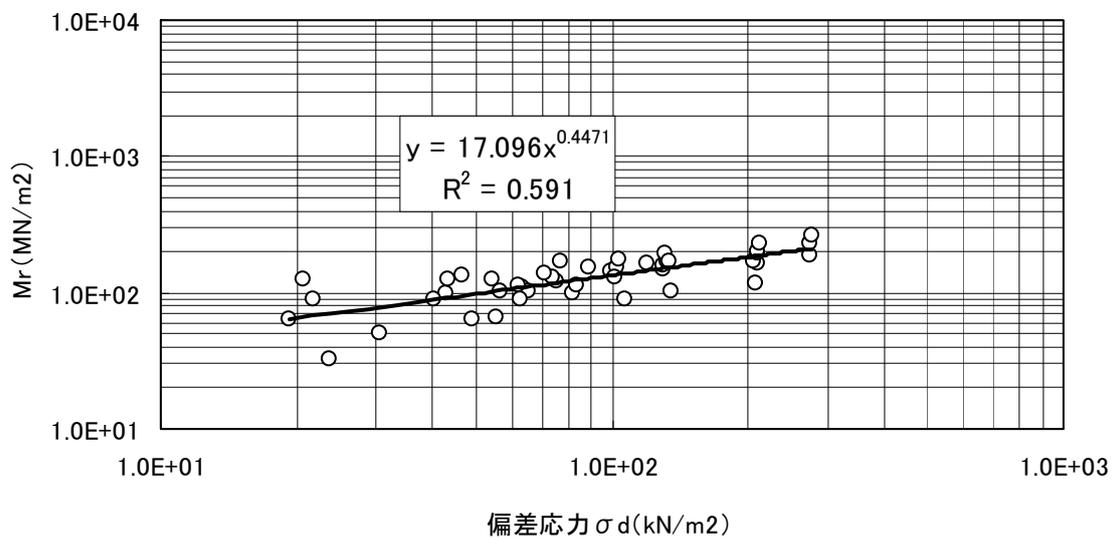
(a) 偏差応力と $M_r$ の関係



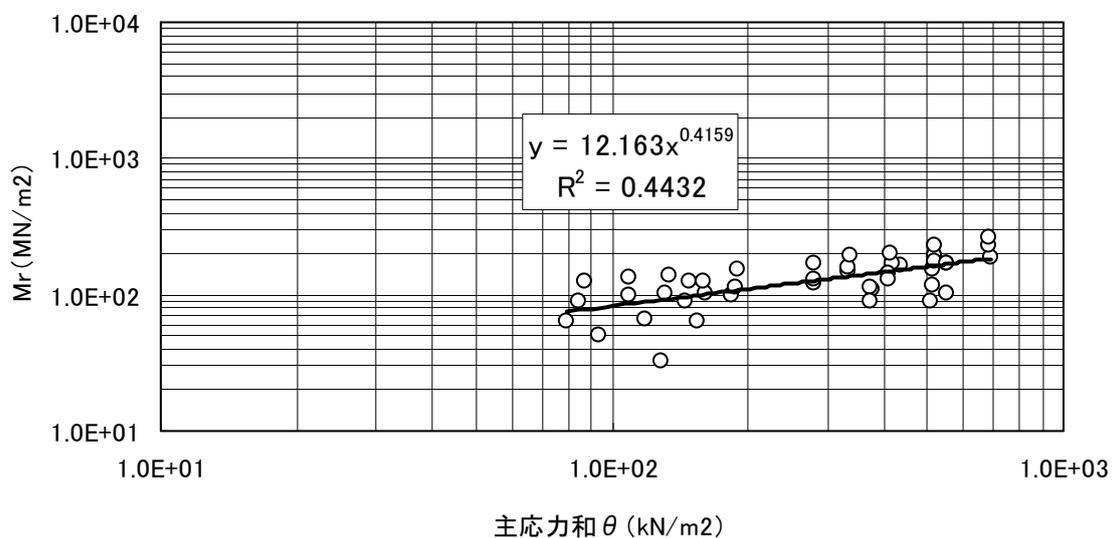
(b) 主応力和と $M_r$ の関係

図-4. 23 試験結果 40°C 95%

③ 締固め度 100%



(a) 偏差応力と $M_r$ の関係



(b) 主応力和と $M_r$ の関係

図-4. 24 試験結果 40°C 100%

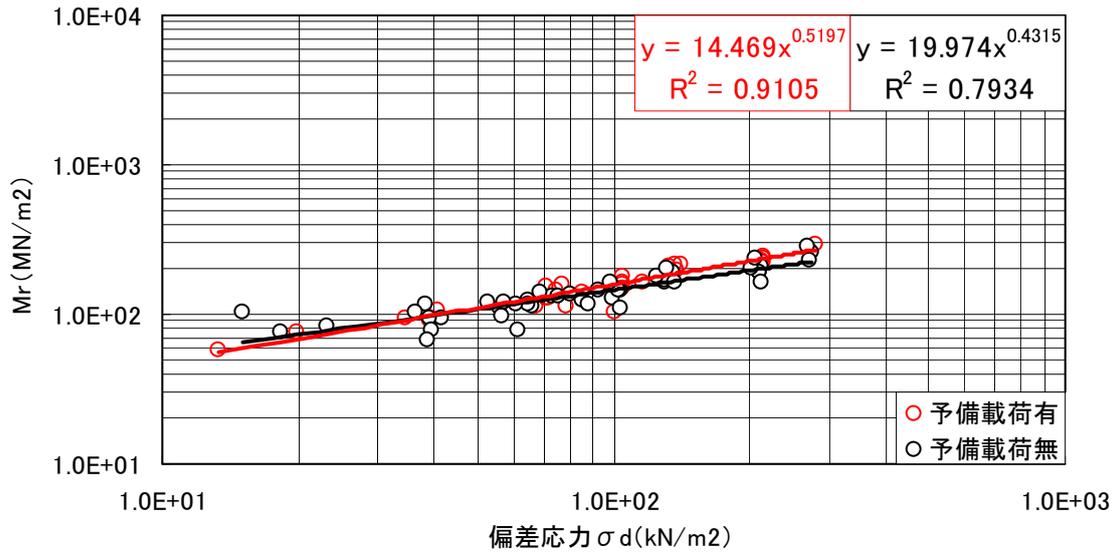
#### 4. 5 試験結果比較

##### 4. 5. 1 路盤材料のMr

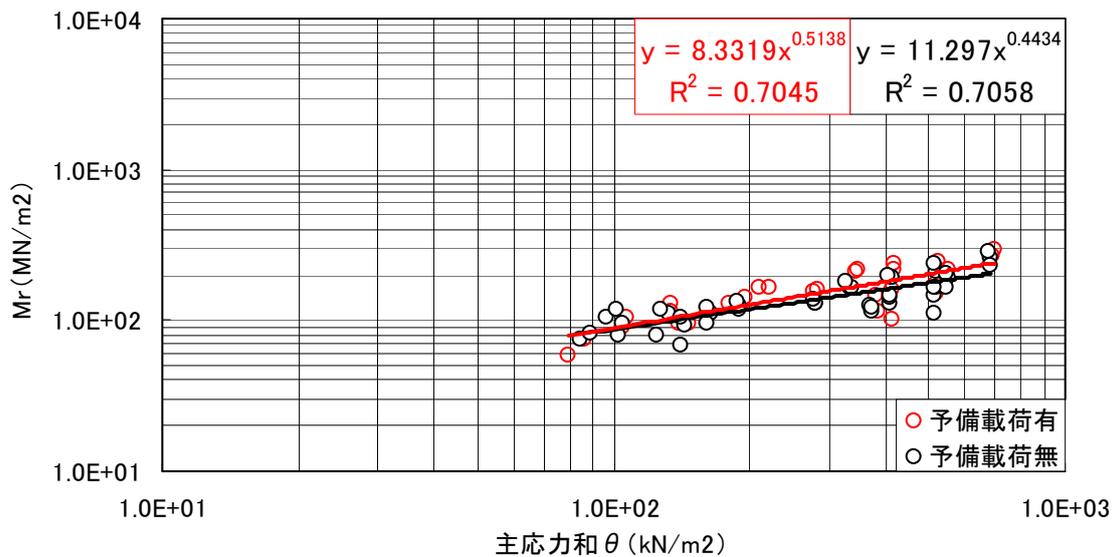
###### (1) C-30 予備載荷有・無の比較

C-30の各締固め度における予備載荷有の試験結果と予備載荷無の試験結果を比較したものを示す（図-4. 25～4. 27）。

###### ①締固め度90%



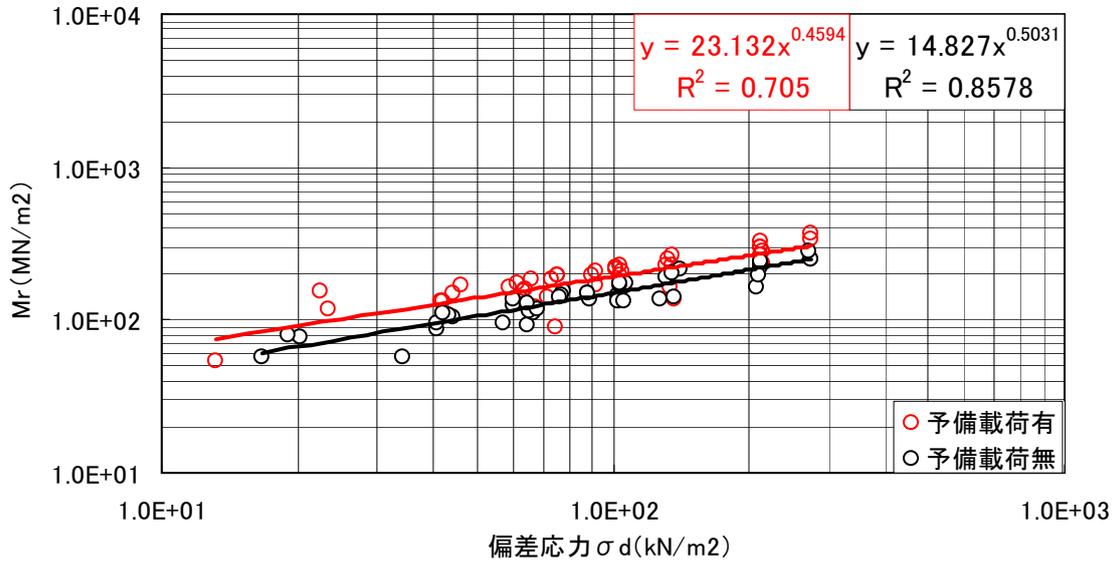
(a) 偏差応力とMrの関係



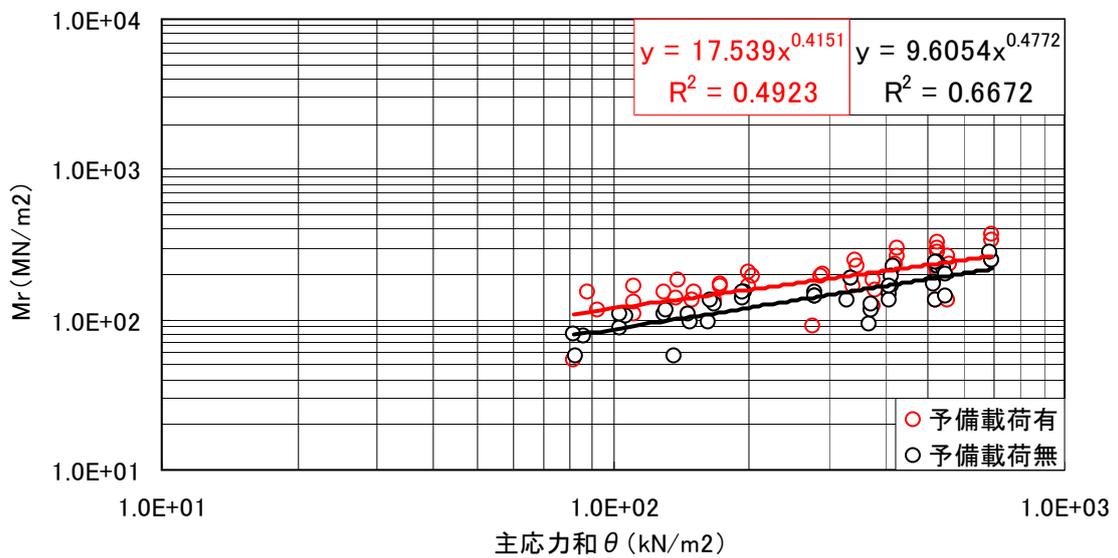
(b) 主応力とMrの関係

図-4. 25 C-30 予備載荷有無比較(90%)

② 締固め度95%



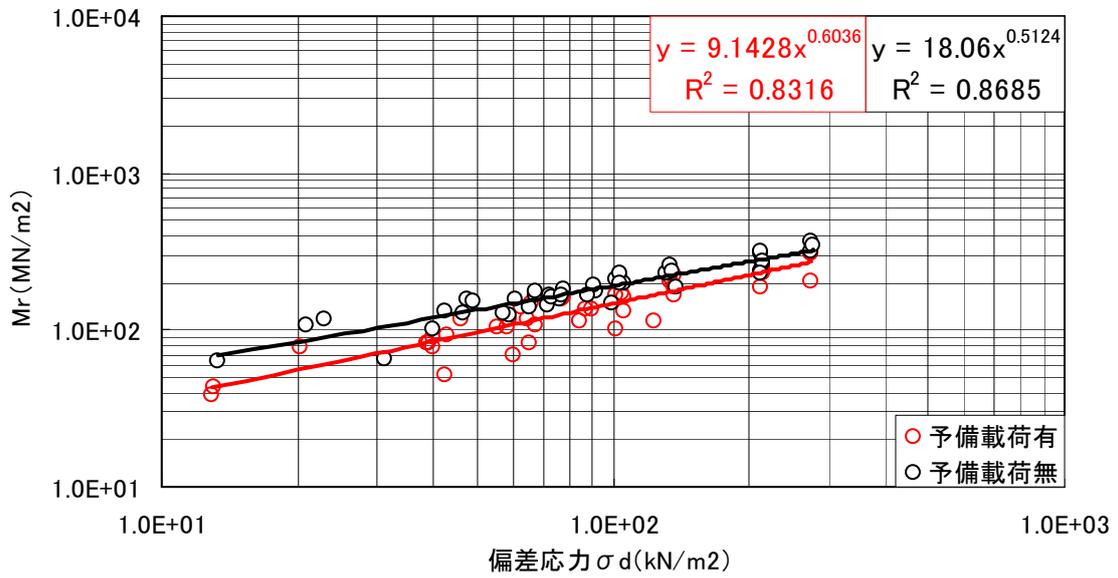
(a) 偏差応力と $M_r$ の関係



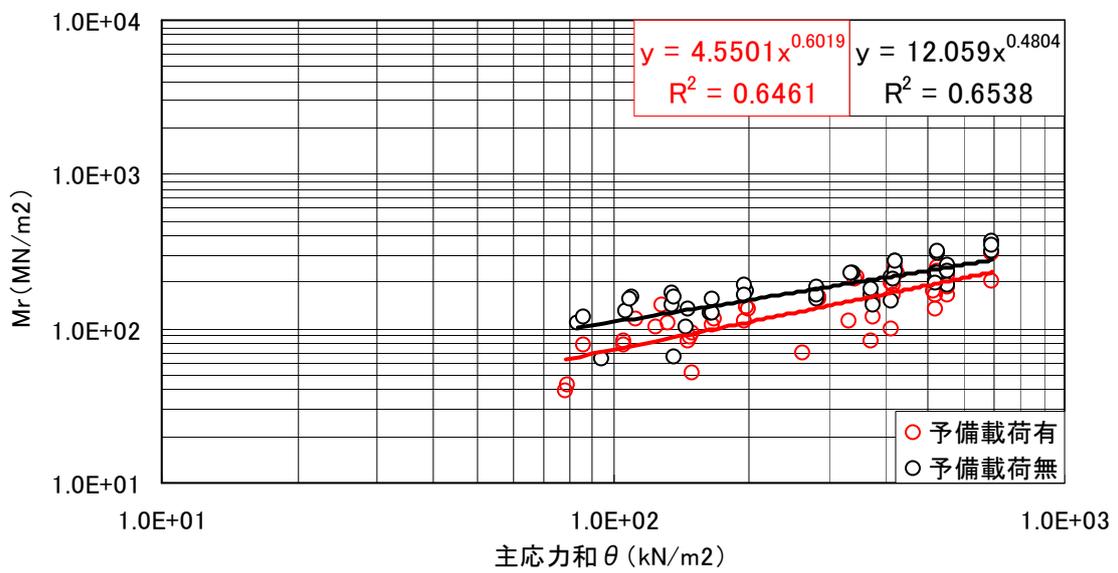
(b) 主応力和と $M_r$ の関係

図-4. 26 C-30 予備载荷有無比較(95%)

③ 締固め度100%



(a) 偏差応力とMrの関係



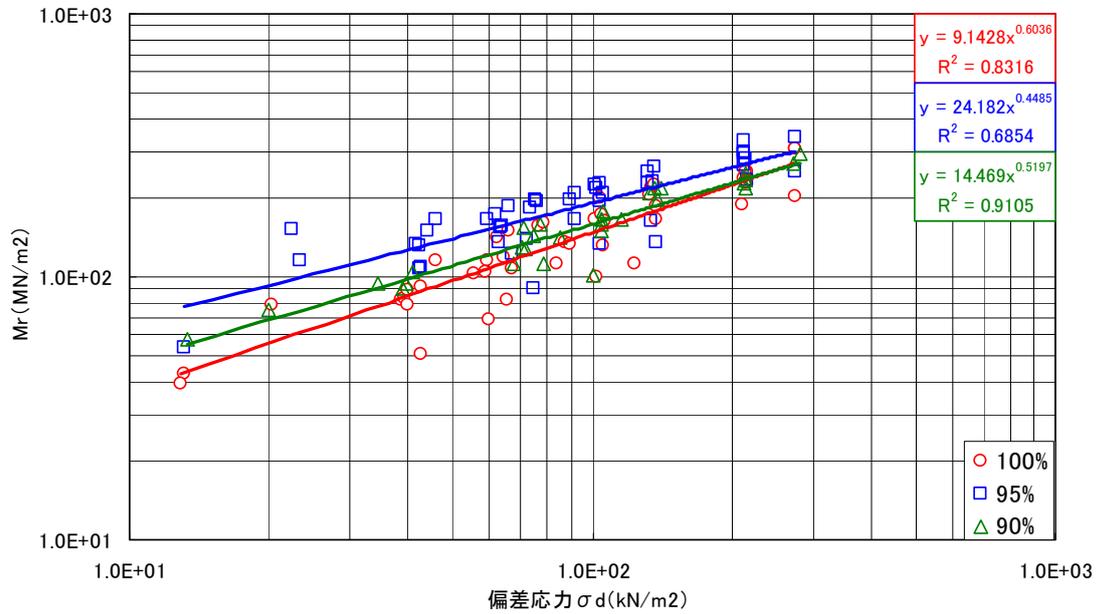
(b) 主応力和とMrの関係

図-4.27 C-30 予備载荷有無比較(100%)

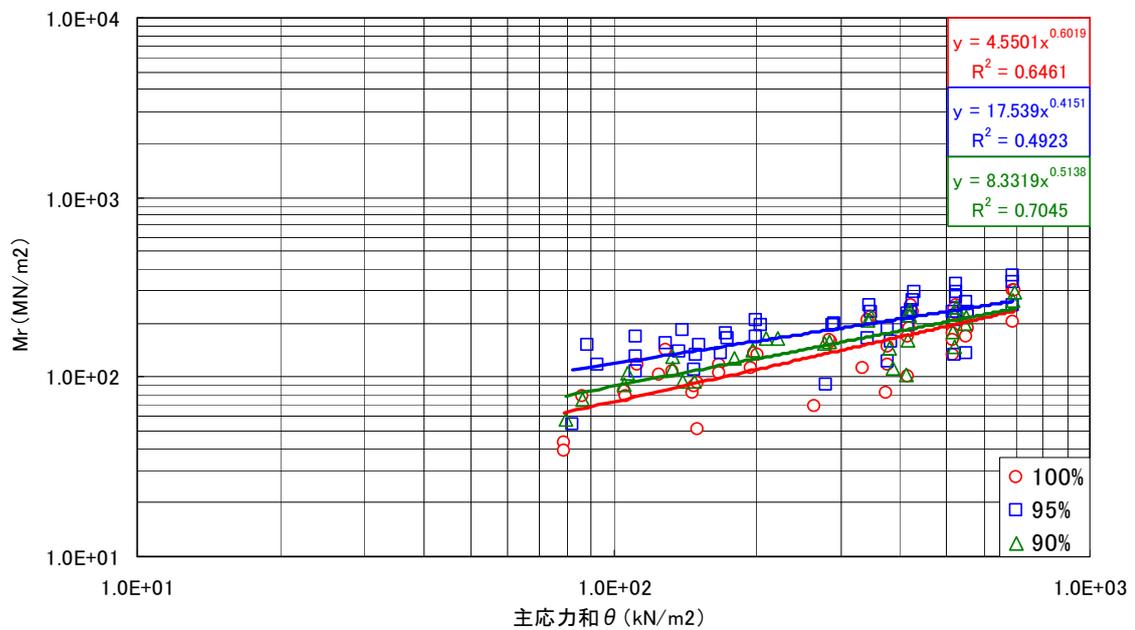
(2) 締固め度比較

各材料における各締固め度の $M_r$ を比較した結果を示す(図-4.28~4.31)。

①C-30 予備載荷有



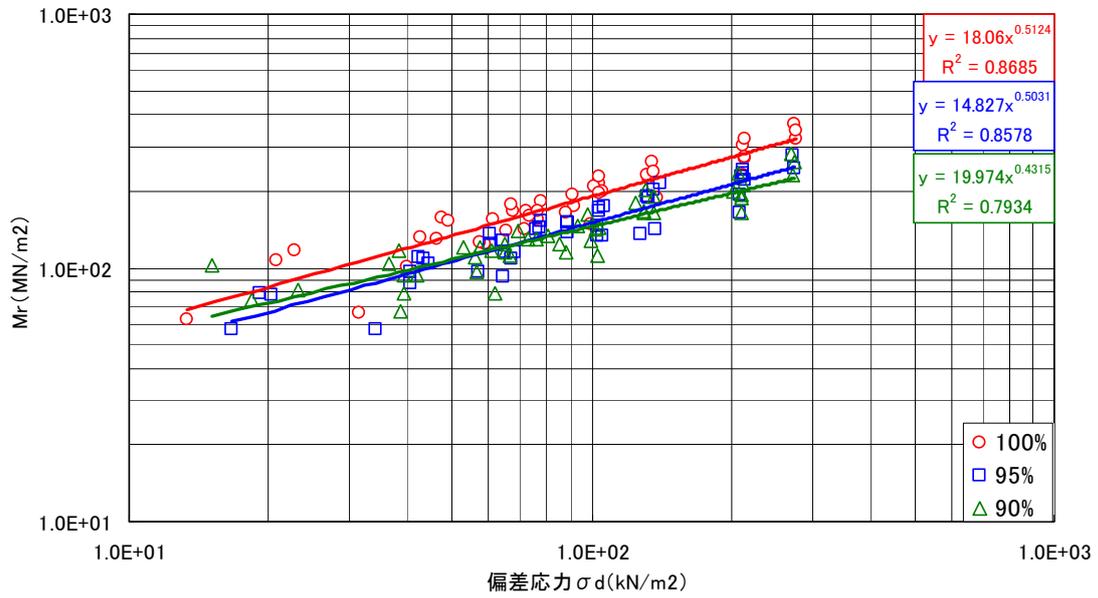
(a) 偏差応力と $M_r$ の関係



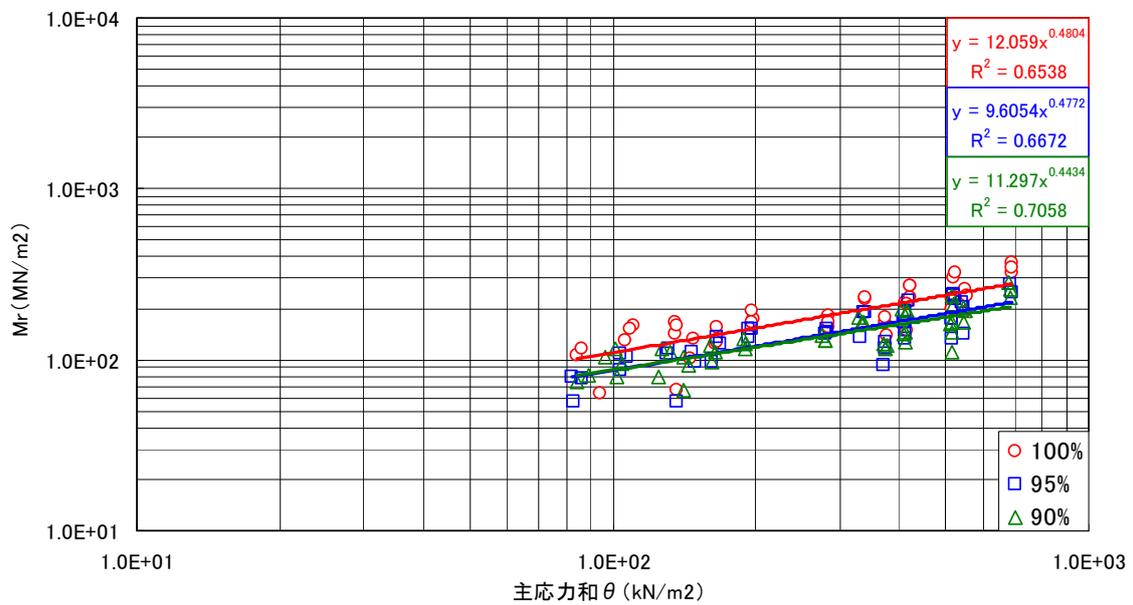
(b) 主応力和と $M_r$ の関係

図-4.28 締固め度比較 C-30(予備載荷有)

②C-30 予備載荷無



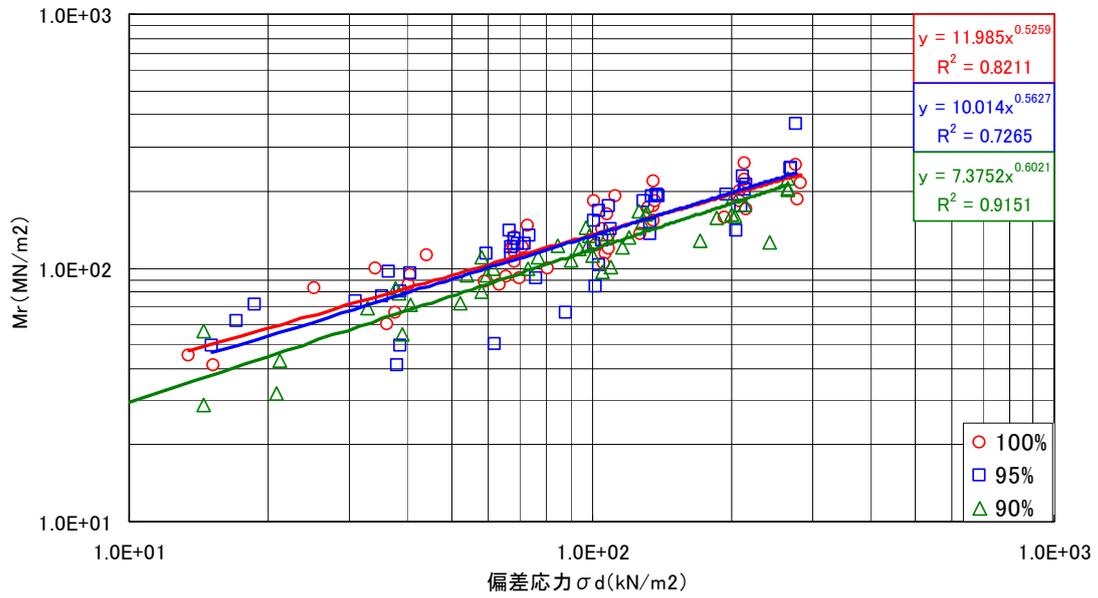
(a) 偏差応力と $M_r$ の関係



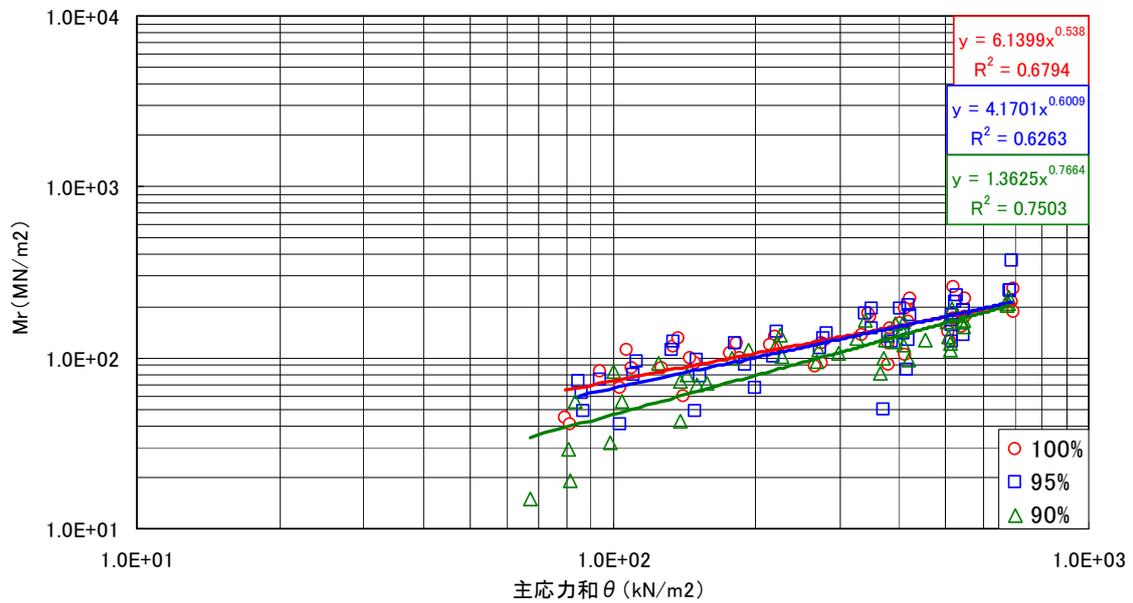
(b) 主応力和と $M_r$ の関係

図-4. 29 締固め度比較 C-30(予備載荷無)

③M-30 予備載荷有



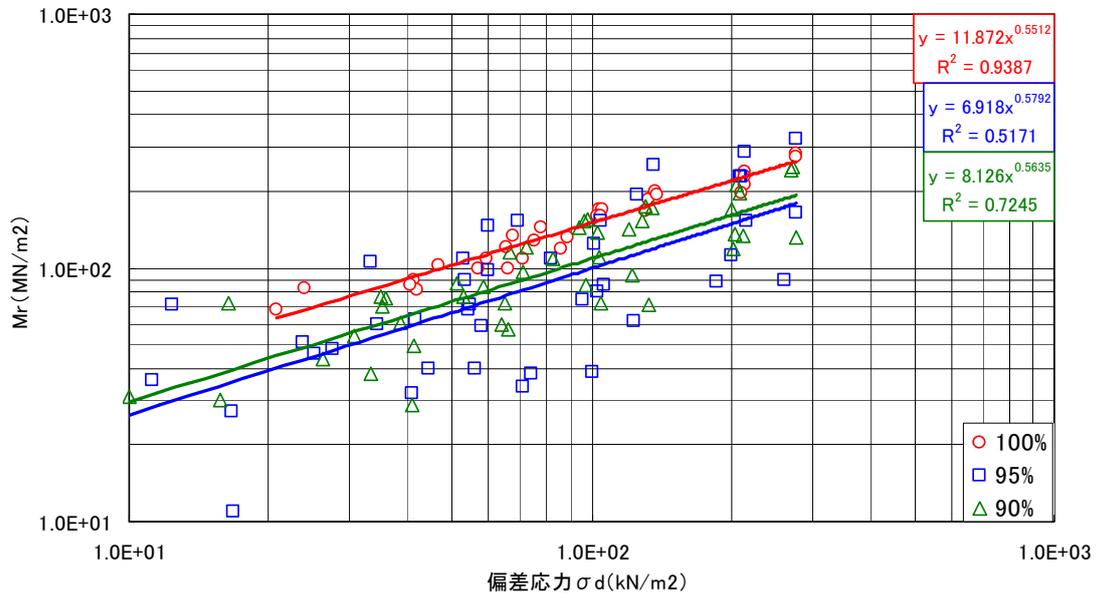
(a) 偏差応力とMrの関係



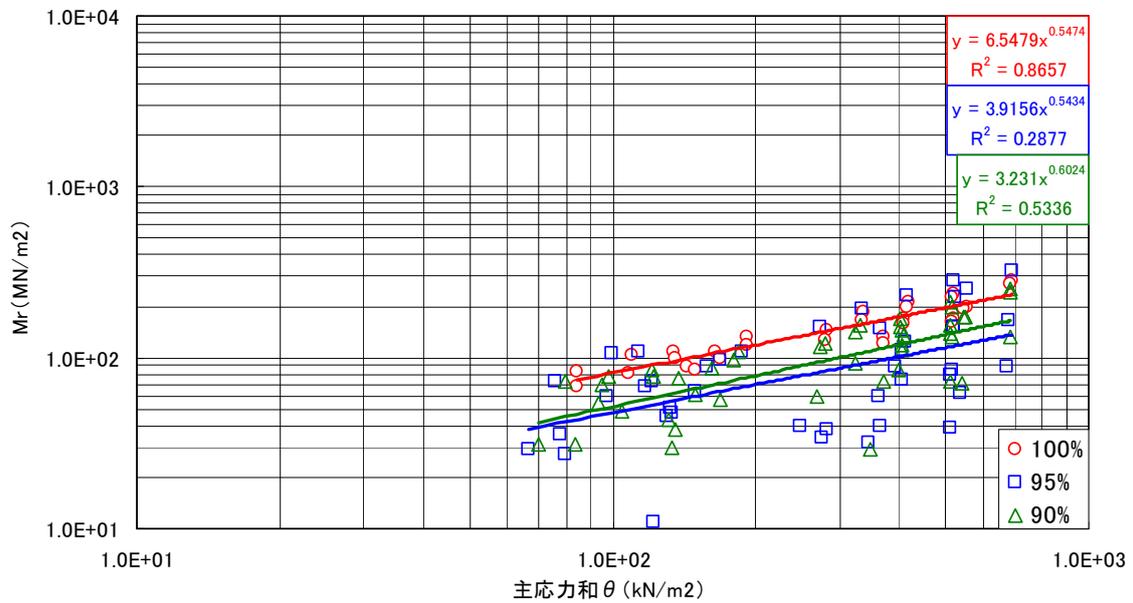
(b) 主応力和とMrの関係

図-4. 30 締固め度比較 M-30(予備載荷有)

④RC-40 予備載荷無



(a) 偏差応力と $M_r$ の関係



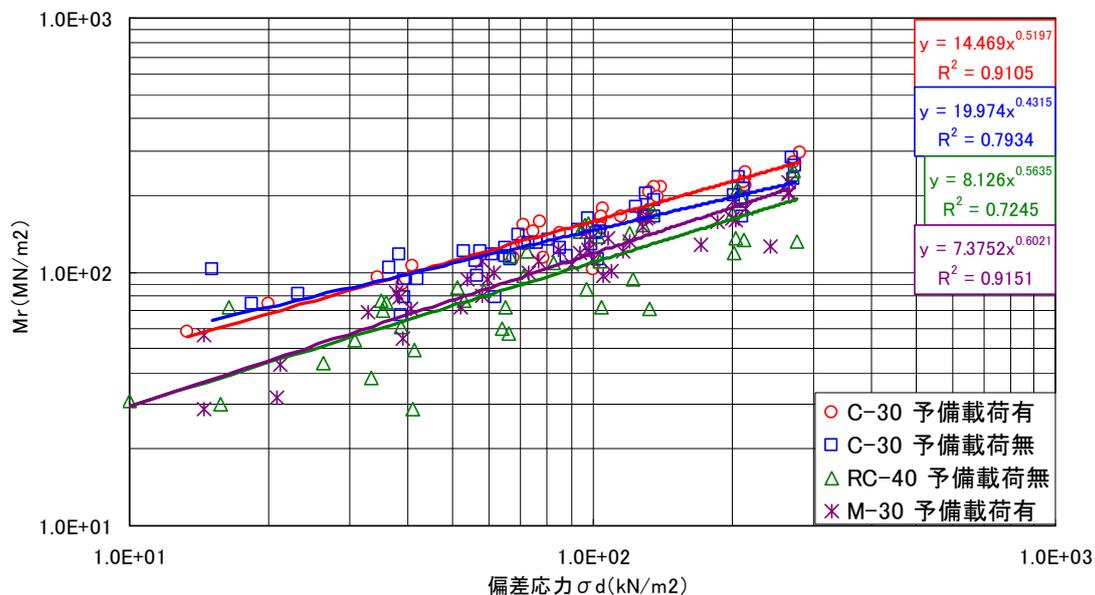
(b) 主応力和と $M_r$ の関係

図-4. 31 締固め度比較 RC-40(予備載荷無)

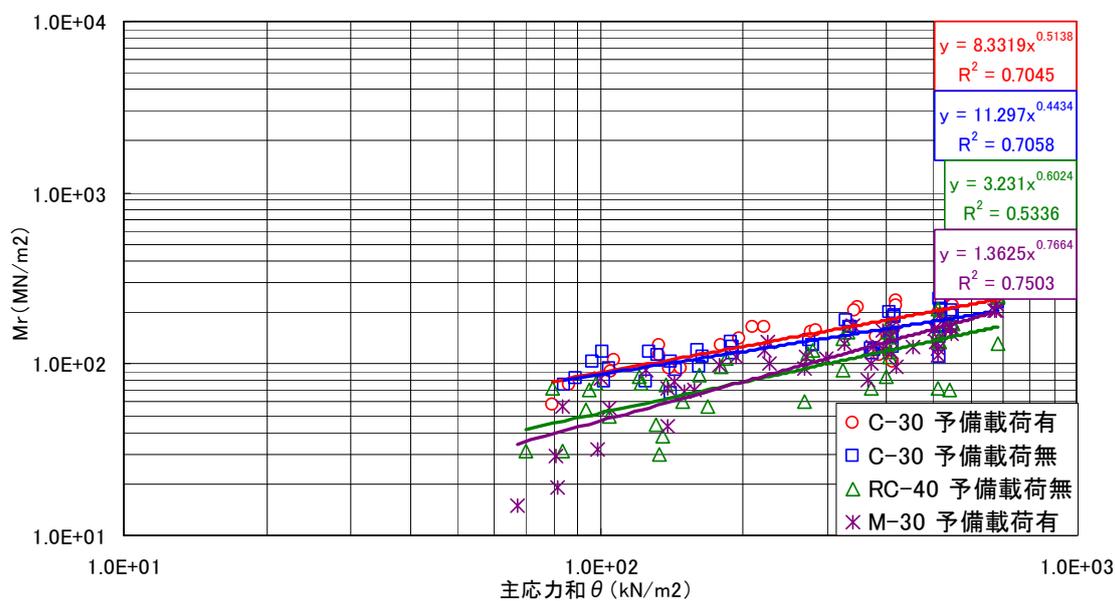
(3) 材料比較

各締固め度における各材料の $M_r$ を比較した結果を示す。(図-4. 32～4. 34)

① 締固め度90%



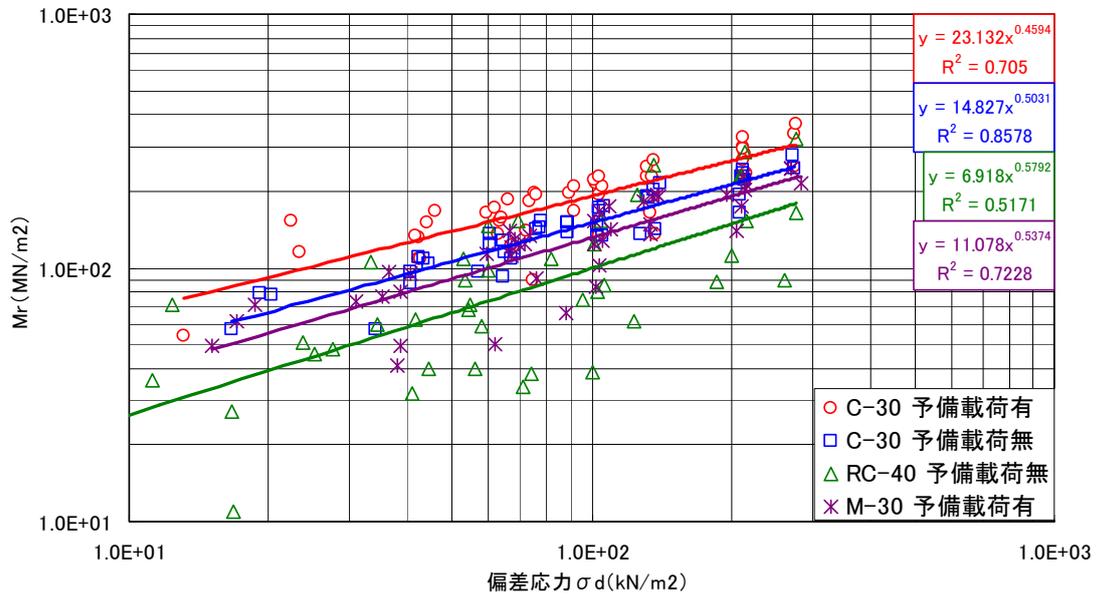
(a) 偏差応力と $M_r$ の関係



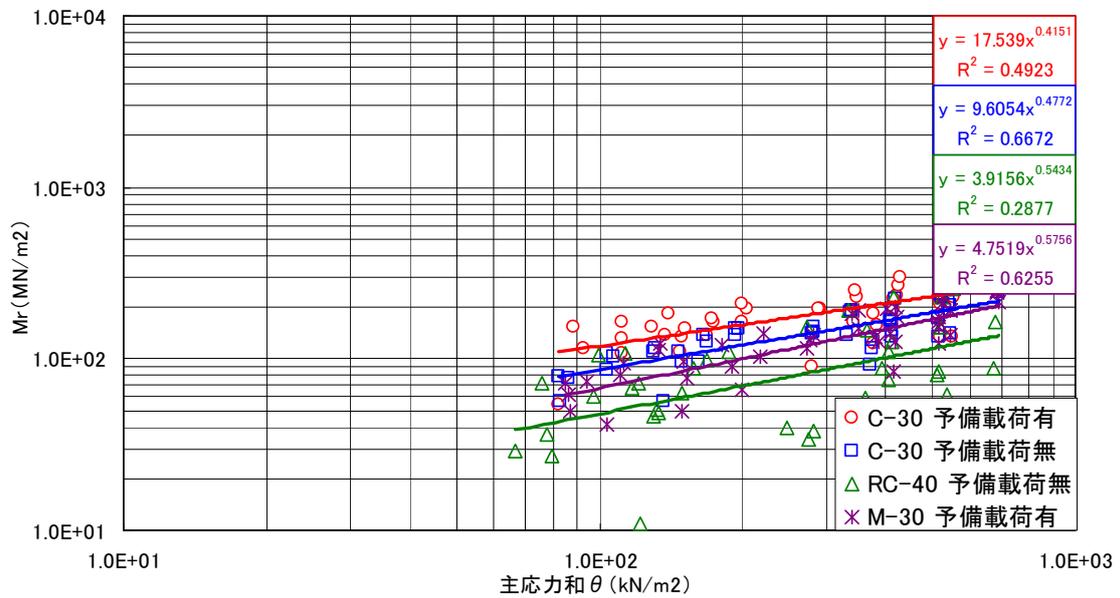
(b) 主応力和と $M_r$ の関係

図-4. 32 材料比較 締固め度 90%

② 締固め度95%



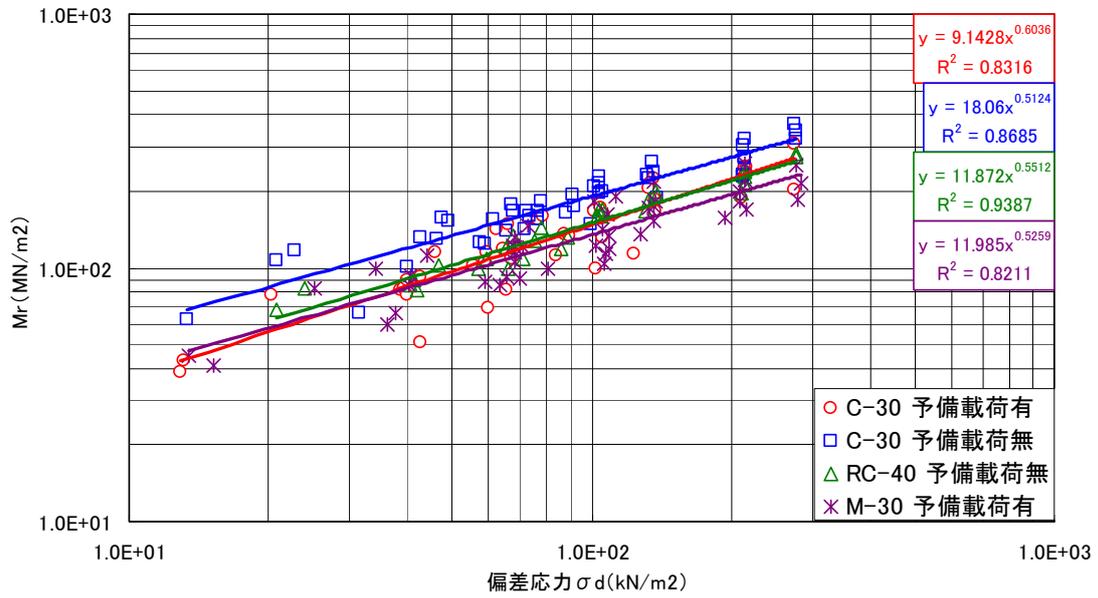
(a) 偏差応力とMrの関係



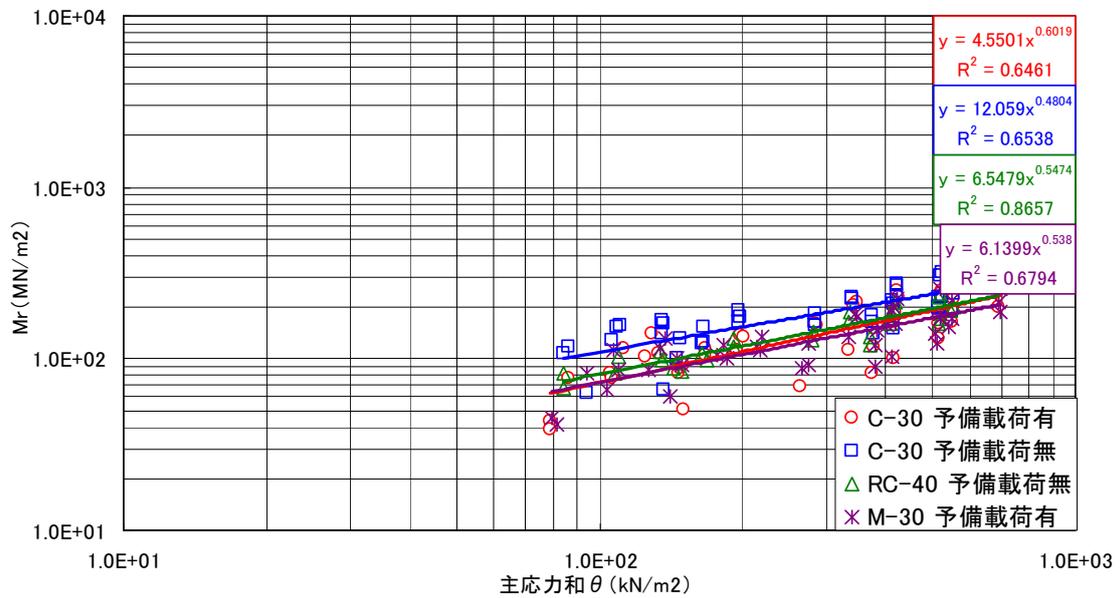
(b) 主応力和とMrの関係

図-4.33 材料比較 締固め度 95%

③ 締固め度100%



(a) 偏差応力と $M_r$ の関係



(b) 主応力と $M_r$ の関係

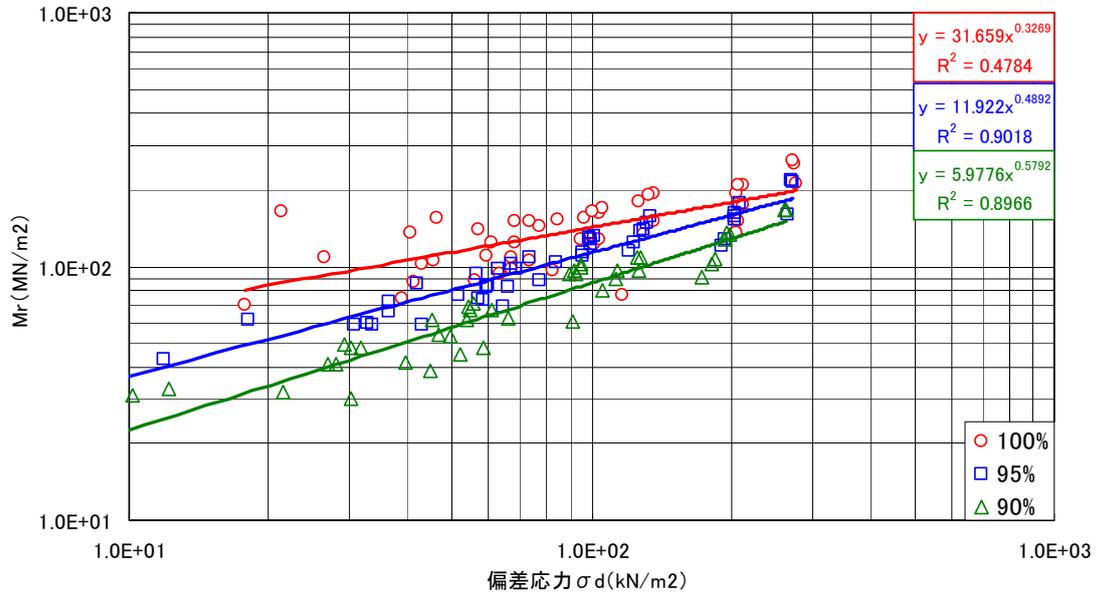
図-4. 34 材料比較 締固め度 100%

#### 4. 5. 2 オイル混合物のMr

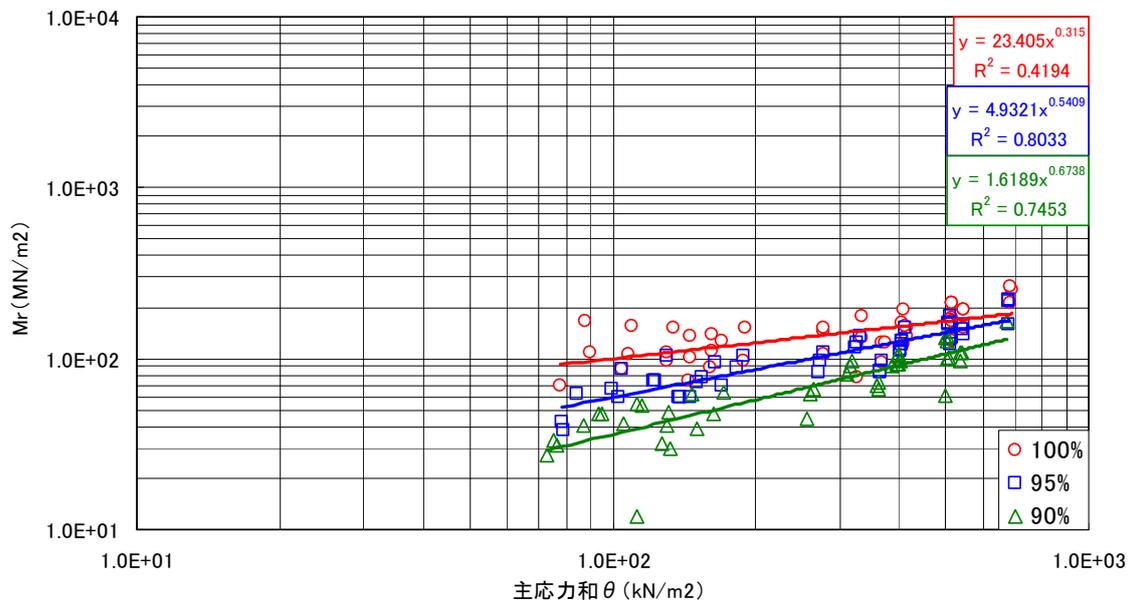
##### (1) 締固め度比較

各試験温度における各締固め度のMrを比較した結果を示す。(図-4. 35～4. 38)

##### ①試験温度 20℃



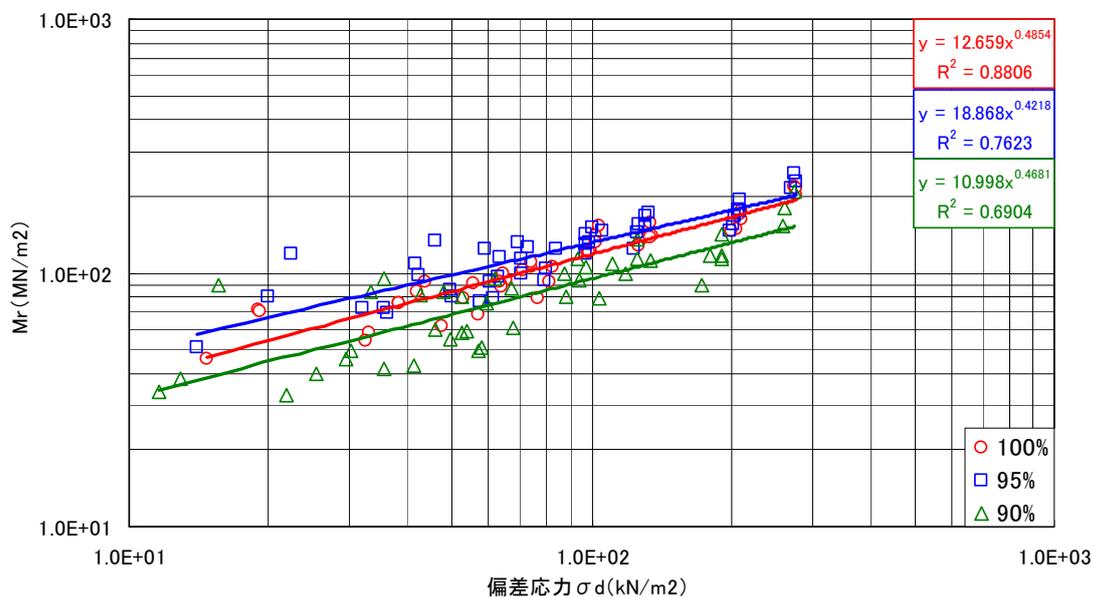
(a) 偏差応力とMrの関係



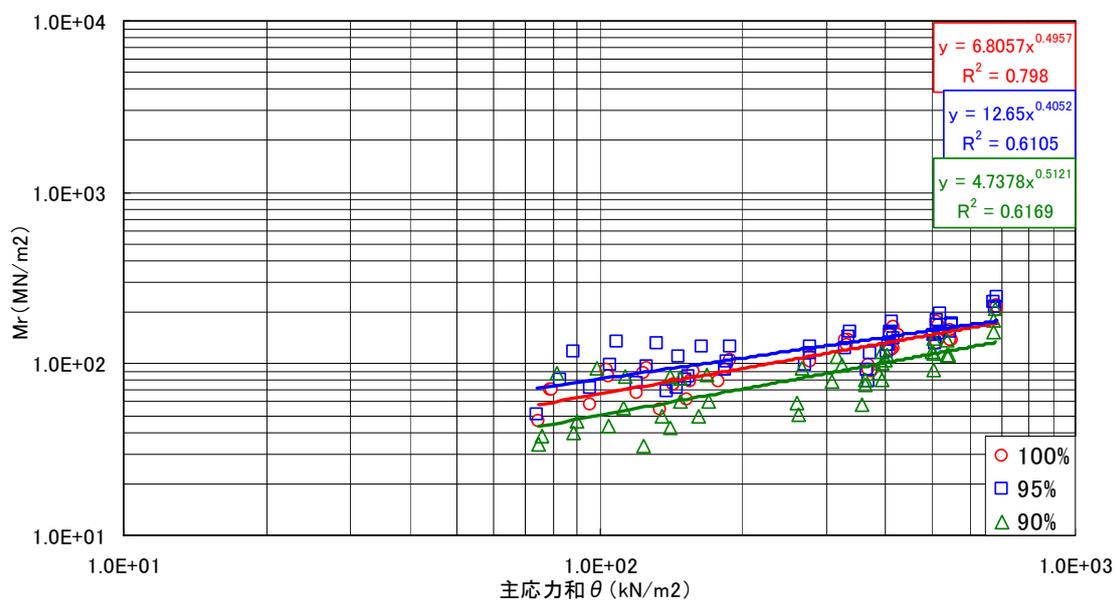
(b) 主応力之和とMrの関係

図-4. 35 締固め度比較 試験温度 20℃

②試験温度 27°C



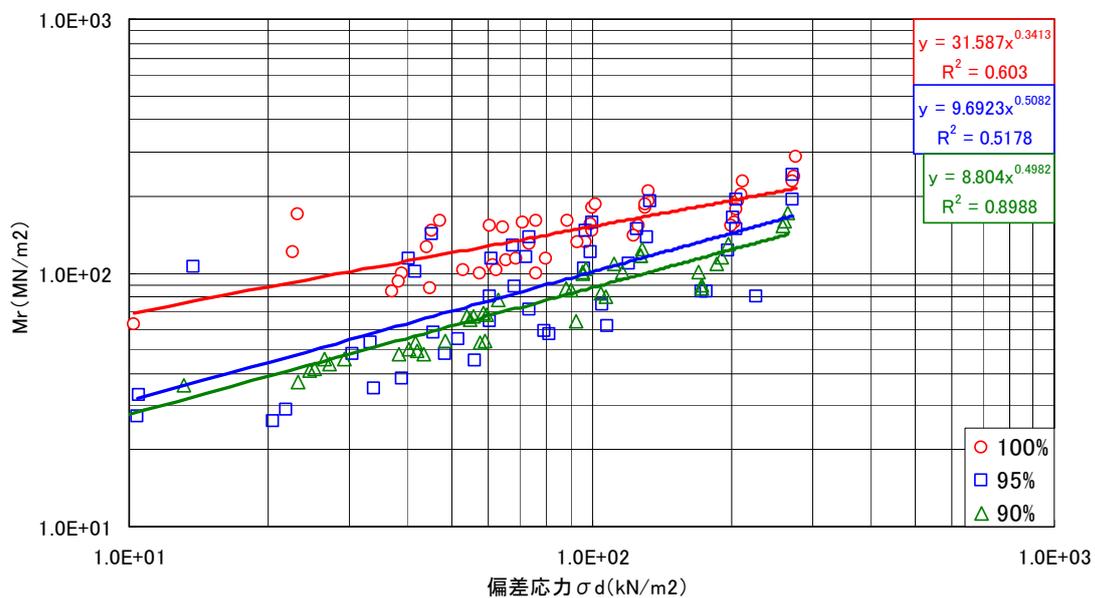
(a) 偏差応力とMrの関係



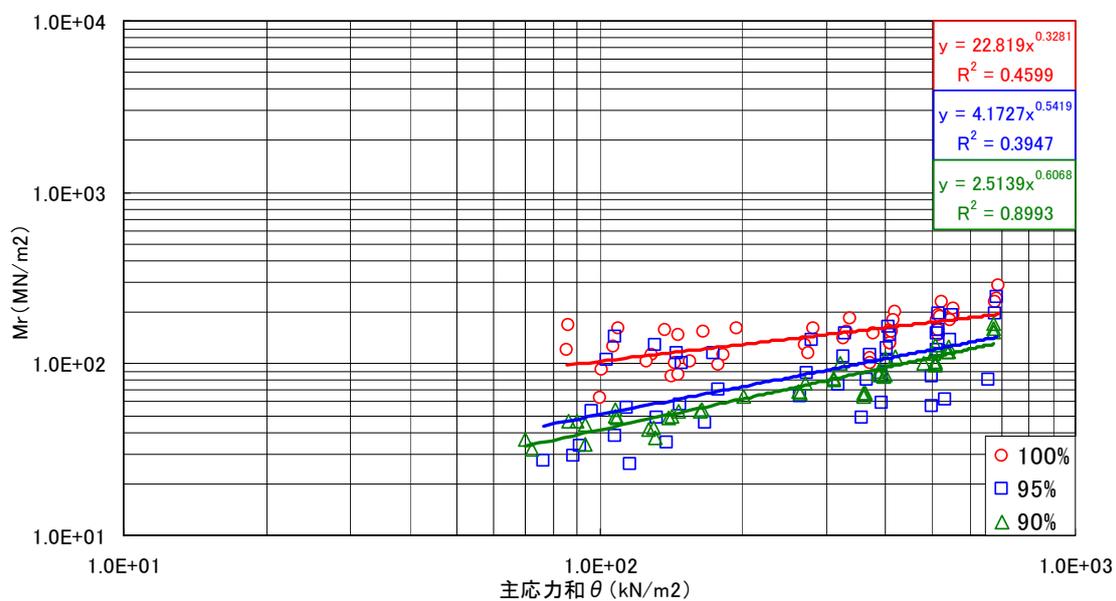
(b) 主応力とMrの関係

図-4.36 締固め度比較 試験温度 27°C

③試験温度 35°C



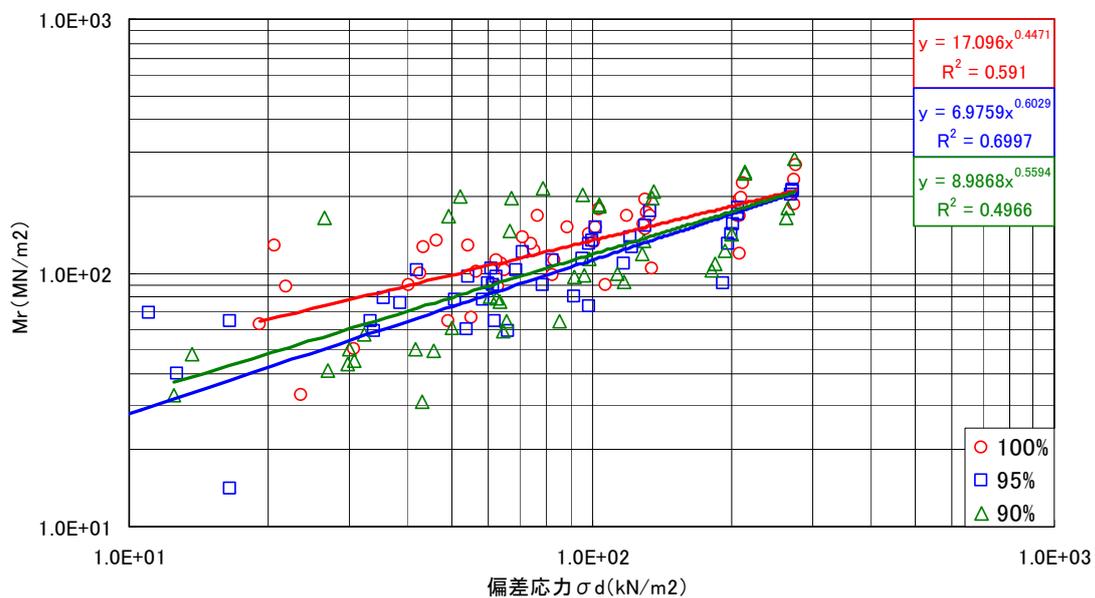
(a) 偏差応力とMrの関係



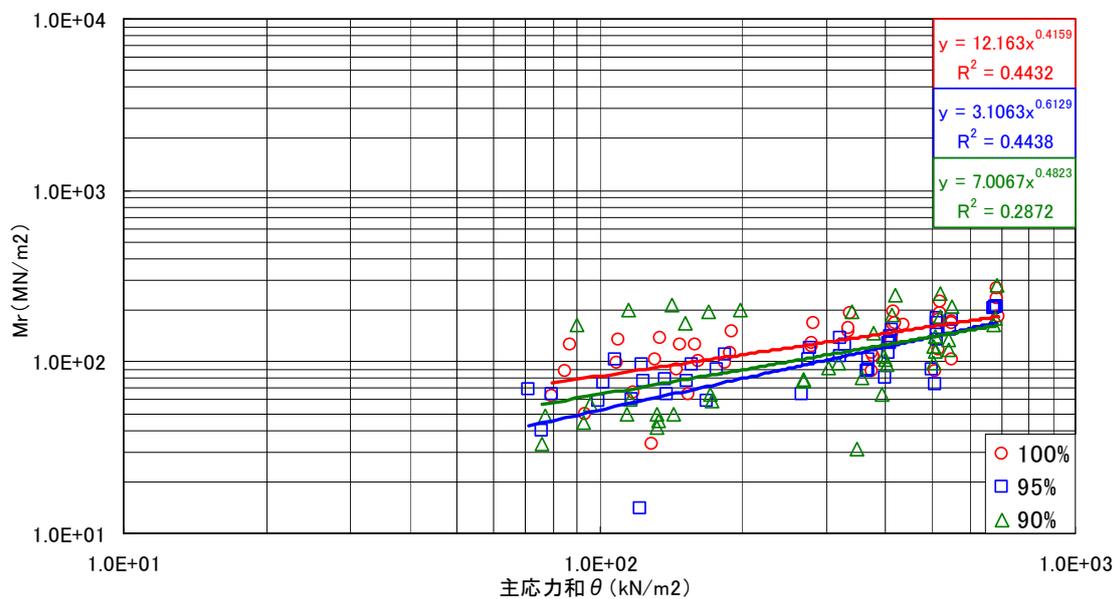
(b) 主応力とMrの関係

図-4.37 締固め度比較 試験温度 35°C

④試験温度 40°C



(a) 偏差応力とMrの関係



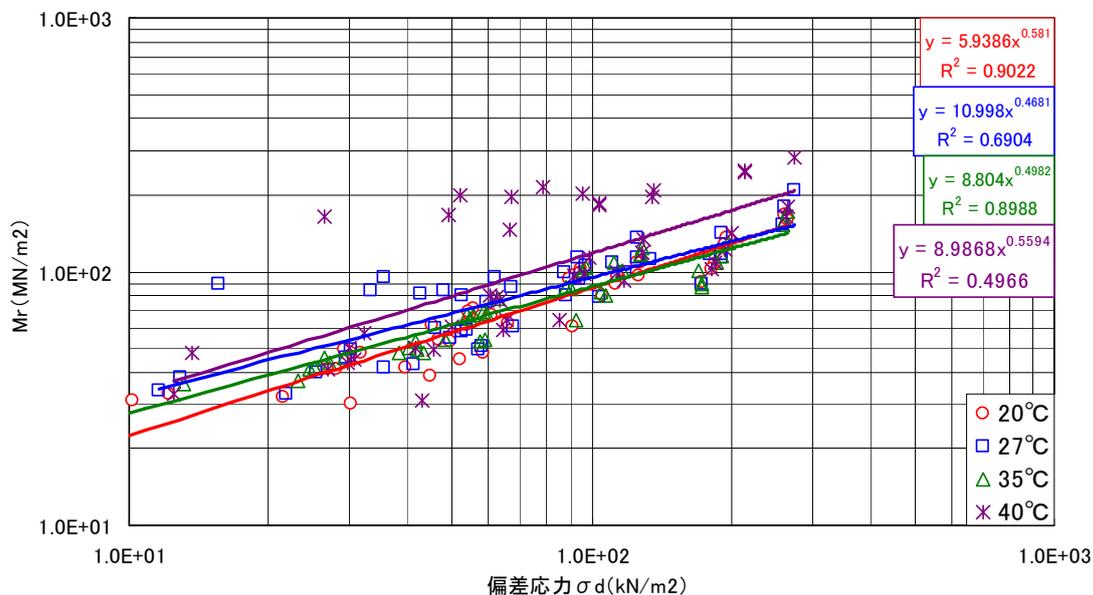
(b) 主応力とMrの関係

図-4.38 締固め度比較 試験温度 40°C

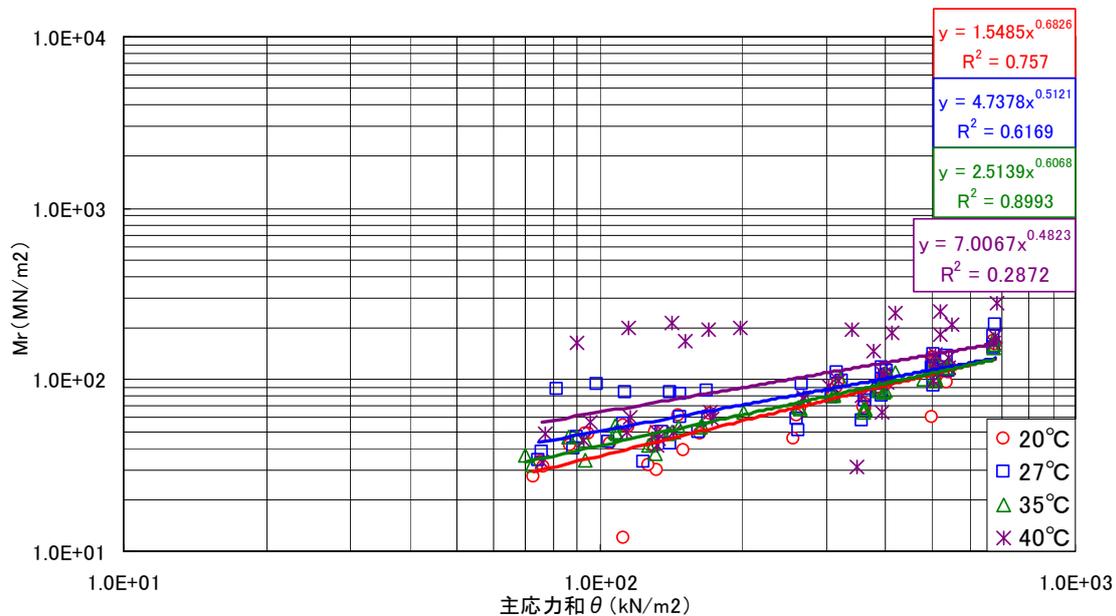
(2) 温度比較

各締固め度における各試験温度のMrを比較した結果を示す。(図-4. 39~4. 41)

①締固め度 90%



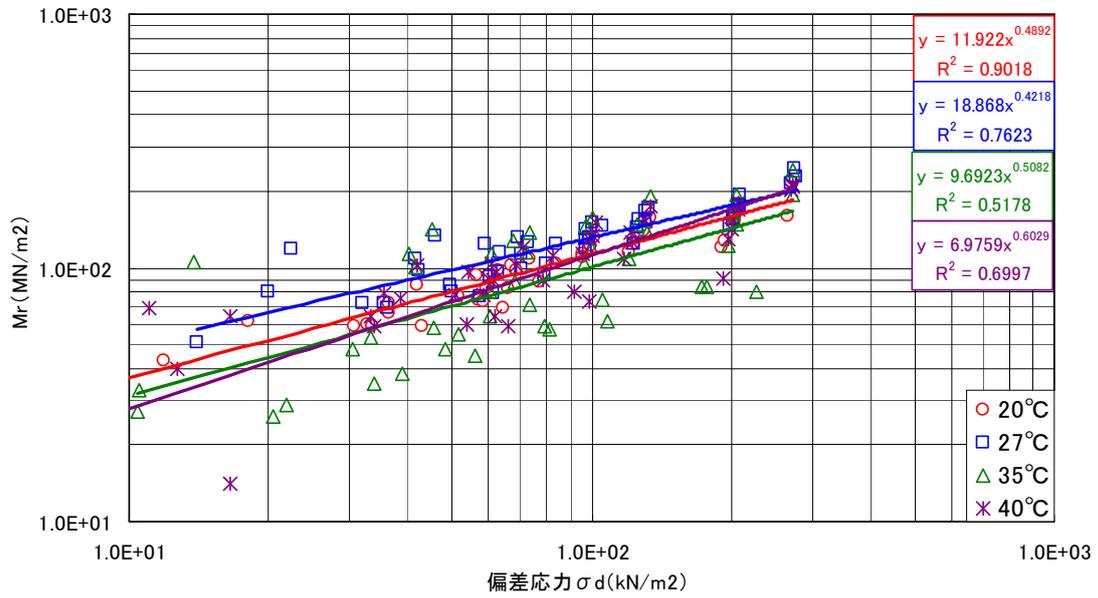
(a) 偏差応力とMrの関係



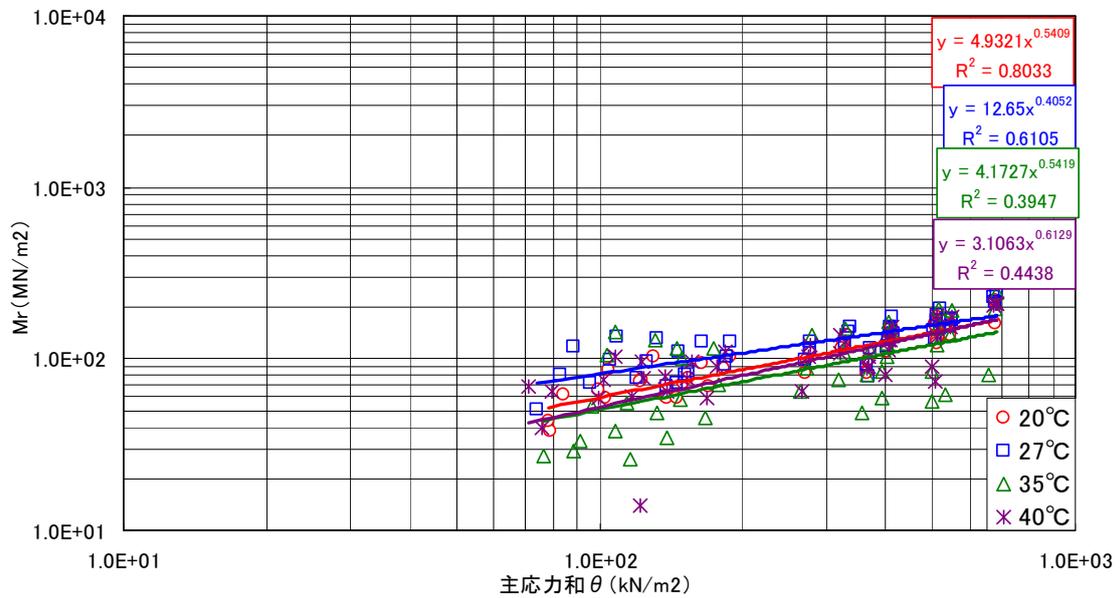
(b) 主応力とMrの関係

図-4. 39 温度比較 締固め度90%

② 締固め度 95%



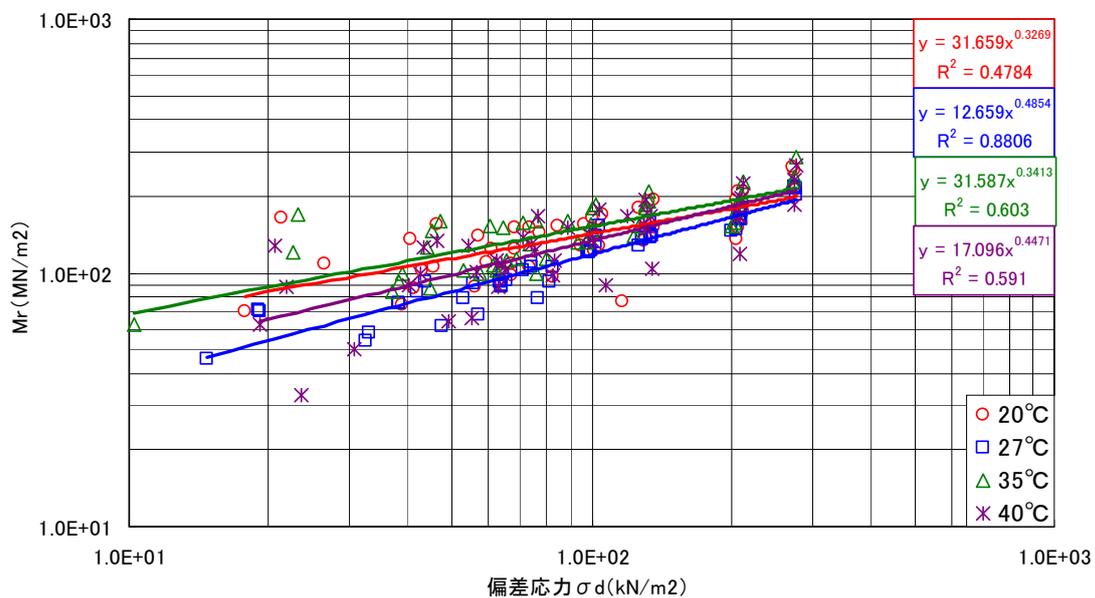
(a) 偏差応力とMrの関係



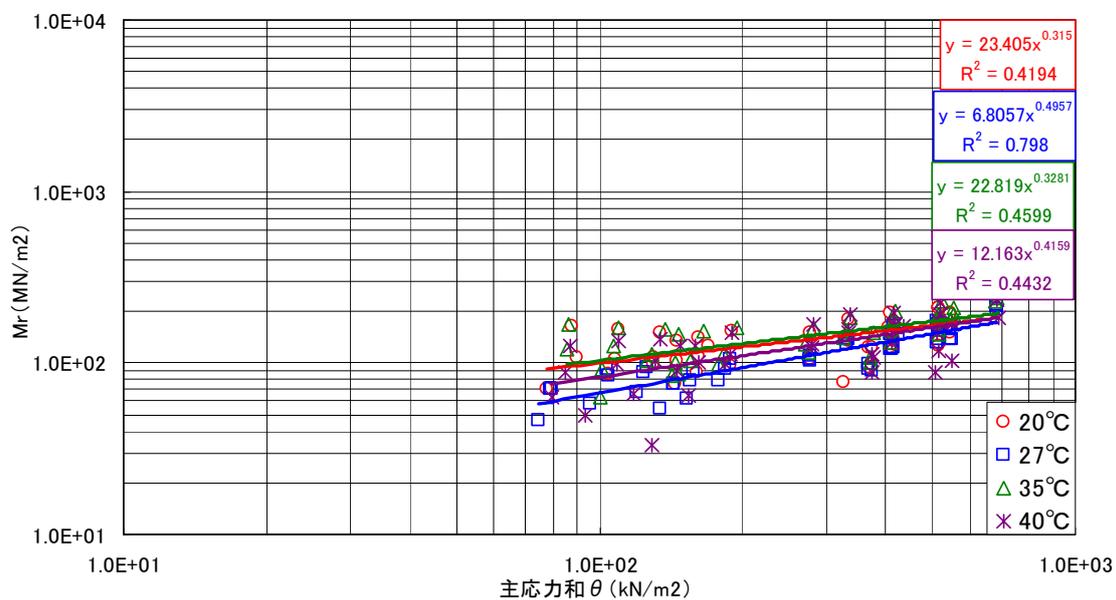
(b) 主応力とMrの関係

図-4. 40 温度比較 締固め度95%

③ 締固め度 100%



(a) 偏差応力とMrの関係



(b) 主応力とMrの関係

図-4. 41 温度比較 締固め度100%

#### 4. 6 参 考

##### 4. 6. 1 グリセリン混合物のMr

###### (1) 試験条件

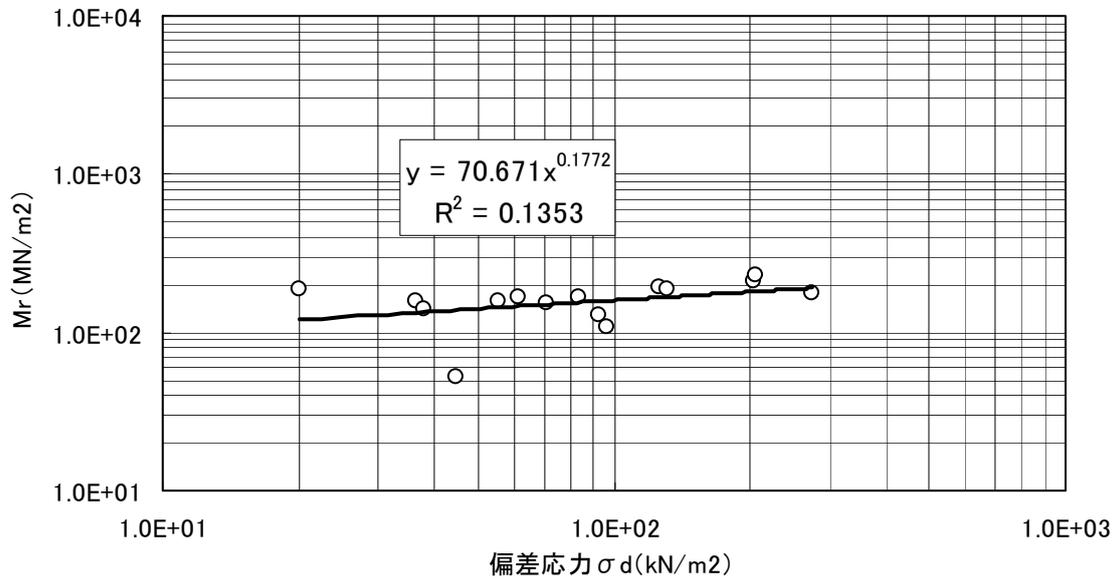
今回の試験で、粘度が $200\text{mm}^2/\text{s}$ ～ $800\text{mm}^2/\text{s}$ (ストアス温度 $150^\circ\text{C}$ ～ $120^\circ\text{C}$ )ではMrの値に差が見られなかった。そのため、グリセリン(比重1.264)をストアスの代替として用い、さらに低温(高粘度)でのMr試験を行った。試験温度・粘度を表-4. 5に示す。なお、供試体は締固め度100%で作製した。なお、試験個数はN=1である。

表-4. 5 試験温度・粘度(ストアス, グリセリン)

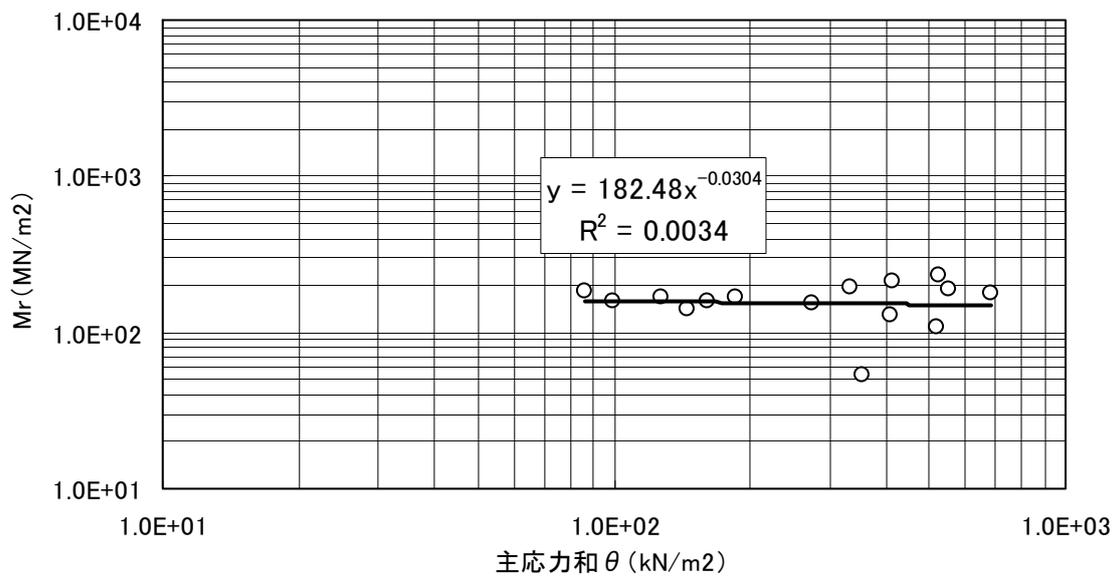
ストレートアスファルトの粘度	グリセリンの粘度
$100^\circ\text{C}$ -約 $2000\text{mm}^2/\text{s}$	$2000\text{mm}^2/\text{s}$ -約 $40^\circ\text{C}$
$85^\circ\text{C}$ -約 $7000\text{mm}^2/\text{s}$	$7000\text{mm}^2/\text{s}$ -約 $10^\circ\text{C}$

(2) 試験結果

グリセリン混合物の $M_r$ 試験結果を図-4.42, 4.43に, オイル混合物の結果と比較したものを図-4.44に示す。なお, オイル混合物の結果は, 締固め度100%における3回の試験結果で最も $R^2$ が大きかった結果である。

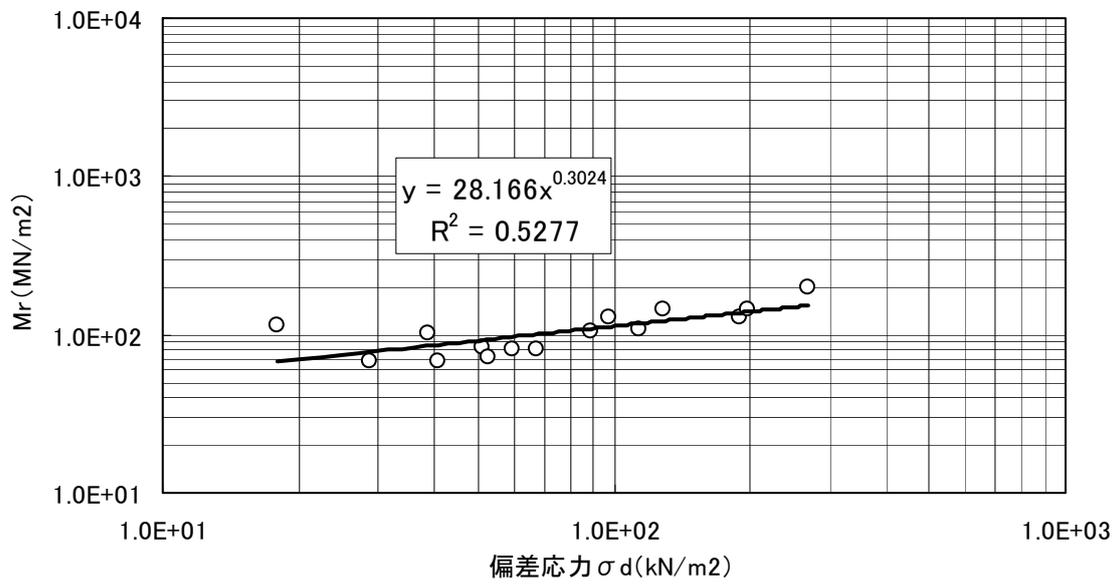


(a) 偏差応力と $M_r$ の関係

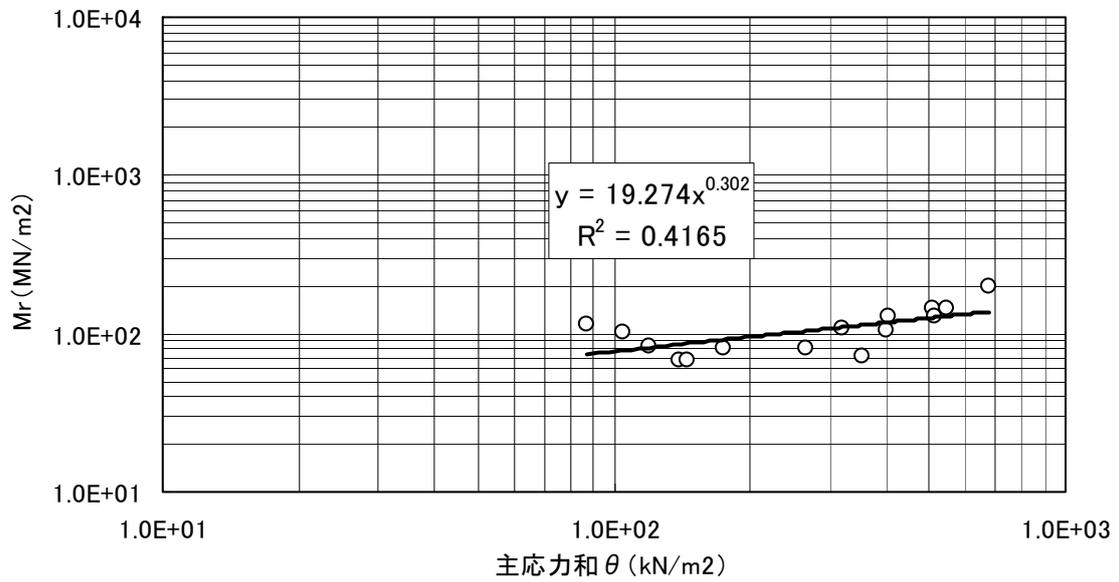


(b) 主応力和と $M_r$ の関係

図-4.42 グリセリン混合物 10°C

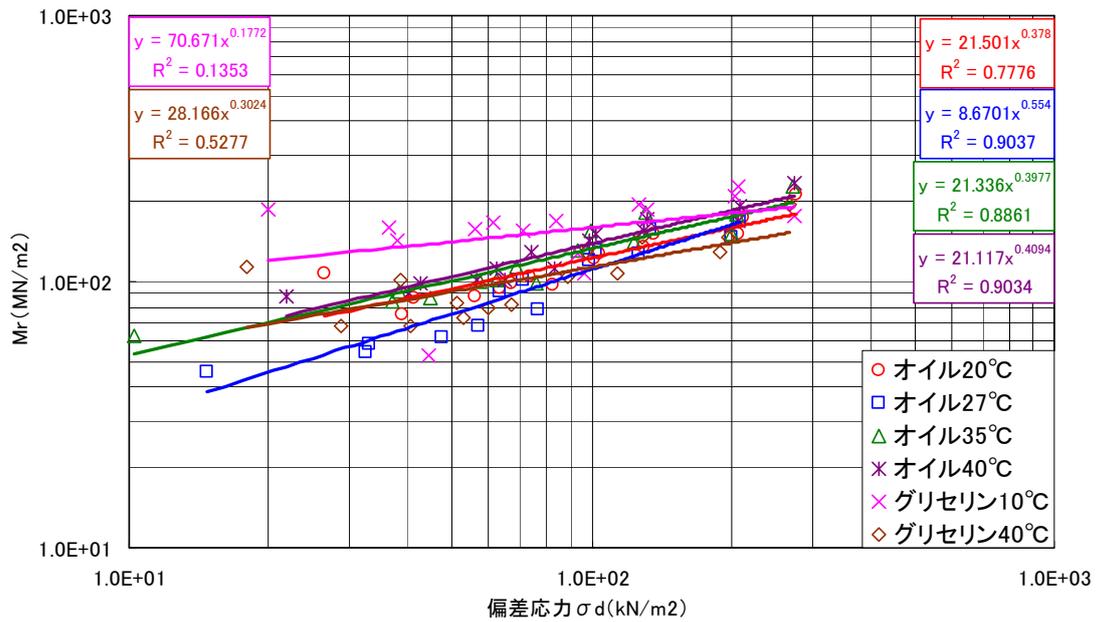


(a) 偏差応力とMrの関係

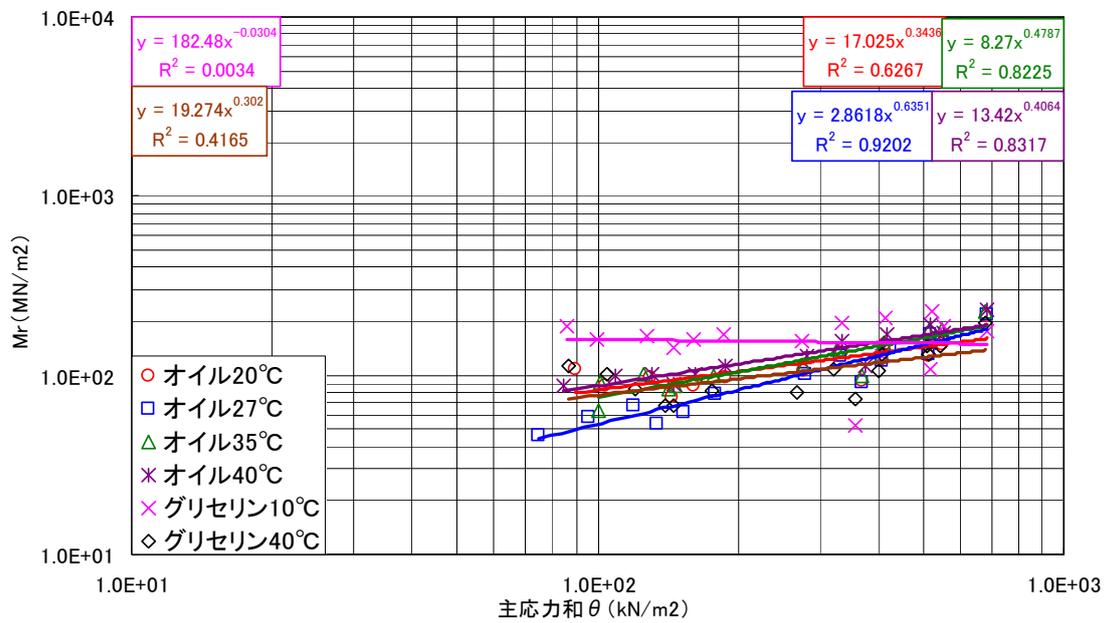


(b) 主応力和とMrの関係

図-4. 43 グリセリン混合物 40°C



(a) 偏差応力と $M_r$ の関係

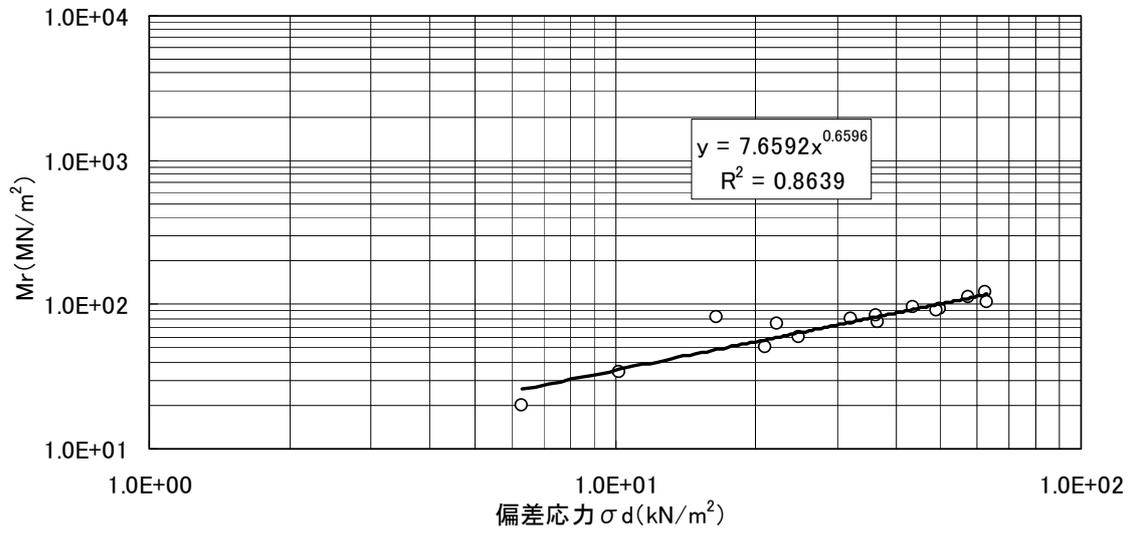


(b) 主応力と $M_r$ の関係

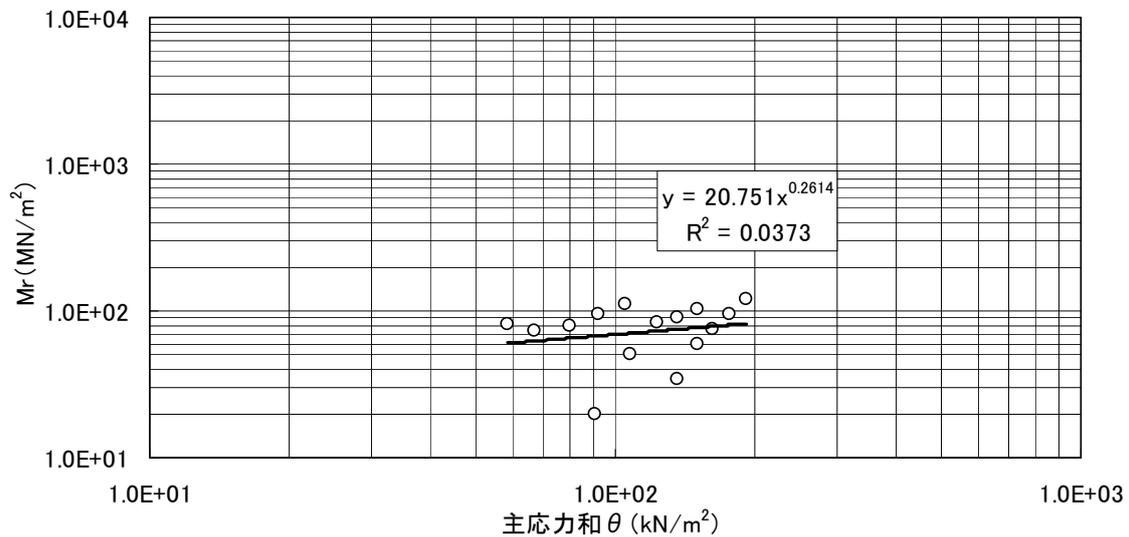
図-4.44 グリセリン混合物とオイル混合物の比較

#### 4. 6. 2 砕砂のMr

設計 $E_h$ を算出するためには、路床の $M_r$ 値が必要である。砕砂においても締固め度95%の供試体を作成し $M_r$ 試験を行った。結果を図-4. 4 5に示す。なお、試験個数は $N=1$ である。



(a) 偏差応力と $M_r$ の関係



(b) 主応力和と $M_r$ の関係

図-4. 45 砕砂 締固め度95%

#### 4. 7 設計Ehの算出

室内試験で行ったMr試験結果を用いて、設計Ehを算出した。締固め度95%時を対象とし、久喜での試験施工の断面で算出した。設計Ehは表-4. 6のMr算出式を用いた。各レーンの設計Ehを算出した結果を表-4. 7～4. 10に示す。

表-4. 6 締固め度95%のMr

層の種類別	材料名	Mr算出式
路床	砕砂	$Mr=7.659 \sigma_d^{0.6596}$
	C-30	$Mr=14.827 \sigma_d^{0.5031}$
下層路盤	RC-40	$Mr=6.918 \sigma_d^{0.5792}$
上層路盤	M-30	$Mr=10.916 \sigma_d^{0.5374}$
表層	密粒(13)120°C	$Mr=11.922 \sigma_d^{0.4892}$
	密粒(13)130°C	$Mr=18.868 \sigma_d^{0.4218}$
	密粒(13)140°C	$Mr=9.6923 \sigma_d^{0.5082}$
	密粒(13)150°C	$Mr=6.9759 \sigma_d^{0.6029}$

表-4. 7 締固め度95%の各層設計Eh(1レーン)

ローラ位置	層の種類別	深さ z(cm)	偏差応力 $\sigma_d$ (kPa)	弾性係数 Mr(MPa)	厚さ H(cm)	平均弾性係数 Eh(MN/m <sup>2</sup> )
路床面	路床	25.0	72.115	128.7	50.0	128.7
下層路盤面	下層路盤	7.5	231.307	161.9	15.0	111.7
	路床	40.0	44.680	93.9	35.0	
上層路盤面	上層路盤	5.0	343.592	257.2	10.0	112.0
	下層路盤	17.5	101.994	100.8	15.0	
	路床	50.0	34.875	79.7	25.0	
表層	表層	2.5	679.793	289.7	5.0	89.2
	上層路盤	10.0	174.997	178.6	10.0	
	下層路盤	22.5	79.947	87.5	15.0	
	路床	55.0	31.177	74.0	20.0	

表-4. 8 締固め度95%の各層設計Eh(2レーン)

ローラ位置	層の種類別	深さ z(cm)	偏差応力 $\sigma_d$ (kPa)	弾性係数 Mr(MPa)	厚さ H(cm)	平均弾性係数 E <sub>h</sub> (MN/m <sup>2</sup> )
路床面	路床	25.0	126.763	186.8	50.0	186.8
下層路盤面	下層路盤	7.5	406.648	224.5	15.0	160.8
	路床	40.0	79.834	137.7	35.0	
上層路盤面	上層路盤	5.0	605.105	349.4	10.0	159.1
	下層路盤	17.5	178.821	139.5	15.0	
	路床	50.0	63.389	118.2	25.0	
表層	表層	2.5	1202.906	383.0	5.0	126.1
	上層路盤	10.0	307.245	242.1	10.0	
	下層路盤	22.5	140.348	121.2	15.0	
	路床	55.0	57.211	110.5	20.0	

表-4. 9 締固め度95%の各層設計Eh(3レーン)

ローラ位置	層の種類別	深さ z(cm)	偏差応力 $\sigma_d$ (kPa)	弾性係数 Mr(MPa)	厚さ H(cm)	平均弾性係数 E <sub>h</sub> (MN/m <sup>2</sup> )
路床面	路床	25.0	126.763	169.5	50.0	169.5
下層路盤面	下層路盤	7.5	406.648	224.5	15.0	158.2
	路床	40.0	79.834	134.3	35.0	
上層路盤面	上層路盤	5.0	605.105	349.4	10.0	159.9
	下層路盤	17.5	178.821	139.5	15.0	
	路床	50.0	63.389	119.6	25.0	
表層	表層	2.5	1202.906	383.0	5.0	127.4
	上層路盤	10.0	307.245	242.1	10.0	
	下層路盤	22.5	140.348	121.2	15.0	
	路床	55.0	57.211	113.6	20.0	

表-4. 10 締固め度95%の各層設計Eh(4レーン)

ローラ位置	層の種類別	深さ z(cm)	偏差応力 $\sigma_d$ (kPa)	弾性係数 Mr(MPa)	厚さ H(cm)	平均弾性係数 E <sub>h</sub> (MN/m <sup>2</sup> )
路床面	路床	25.0	72.115	127.6	50.0	127.6
下層路盤面	下層路盤	7.5	231.307	161.9	15.0	116.7
	路床	40.0	44.680	100.3	35.0	
上層路盤面	上層路盤	5.0	343.592	257.2	10.0	117.4
	下層路盤	17.5	101.994	100.8	15.0	
	路床	50.0	34.875	88.5	25.0	
表層	表層	2.5	679.793	289.7	5.0	93.5
	上層路盤	10.0	174.997	178.6	10.0	
	下層路盤	22.5	79.947	87.5	15.0	
	路床	55.0	31.177	83.7	20.0	

## 4. 8 4章のまとめ

### (1) まとめ

今回の結果をまとめると下記のとおりである。

- ① 路盤材料については、予備荷の有無によって、 $M_r$  が若干異なる結果となった。しかし、予備荷によって、供試体が締固まり  $M_r$  が大きくなるという傾向は認められない。
- ② 路盤材料については、締固め度 100%が最も大きな  $M_r$  となる傾向が認められる。しかし、試験結果のバラツキは大きい。
- ③ 路盤材料については、バラツキが大きいため、材料による  $M_r$  の差は明確ではない。
- ④ オイル混合物については、バラツキが大きいが、締固め度が大きい方が  $M_r$  も大きい傾向がある。
- ⑤ ストレートアスファルトで 120~150°Cに相当する粘度では、温度による  $M_r$  の差は明確ではない。
- ⑥ グリセリン混合物により、スレートアスファルト 85°C相当の粘度で試験した結果は、偏差応力が小さい領域で  $M_r$  が大きい結果となった。
- ⑦ レジリエントモデュラス試験により、各施工面における設計  $E_h$  を導くことができた。

### (2) 今後の課題

今後、本技術を実施工に適用するにあたっての課題を以下に示す。

#### ①設計 $E_h$ について

理論的に算出した $E_h$ が、締固め度95%を目標とした場合、路盤面、表層面で小さくなるのは、管理値として適切か。

#### ②レジリエントモデュラス試験について

バラツキが大きい試験であり、試験値の信頼性の向上が必要である。

#### ③ $E_h$ と $E_{roller}$ の関係について

$E_h$ と $E_{roller}$ の関係を明らかにする必要がある。

#### ④施工時のアスファルト混合物の $M_r$ について

混合物およびバインダによる違いによる温度と $M_r$ の関係を検証する必要がある。

## 5. 施工管理システムの実現場適用

### 5. 1 はじめに

本章は、3章、4章にて実施した試験施工および室内試験の結果を基に、「道路舗装工事の施工の効率化と品質向上に関する技術開発」の要素技術の一つである「新しい品質管理システムの開発」のために行われた実現場を用いての施工調査結果をまとめる。

### 5. 2 試験概要

#### (1) 試験の目的

現在、盛土工事の施工管理手法として $\alpha$ システムが開発されている。このシステムは、振動ローラに取り付けた加速度計から出力される転圧時加速度応答の解析から地盤剛性を連続的に評価するものである。

本試験施工は、舗装構築時の新しい施工管理としてこの $\alpha$ システムの適用性評価を目的として行ったものである。

#### (2) 試験概要

##### ①実施場所

試験の実施場所は、宮崎県航空自衛隊新田原基地内発注工事にて行った。図-5. 1および図-5. 2に実施場所を示す。



図-5. 1 試験実施位置図

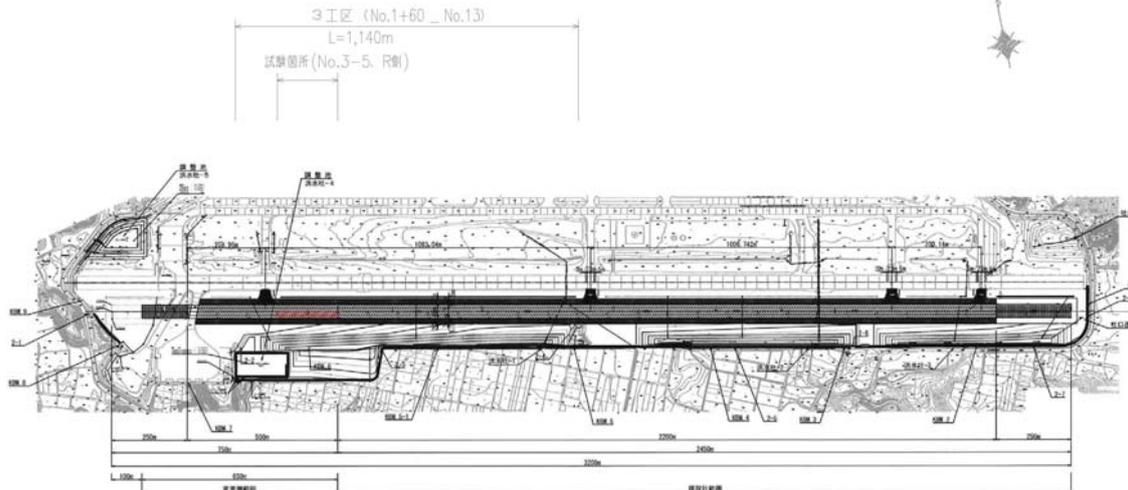


図-5.2 新田原基地工事 試験箇所配置図

②試験施工断面

試験施工における舗装断面を図-5.3に示す。

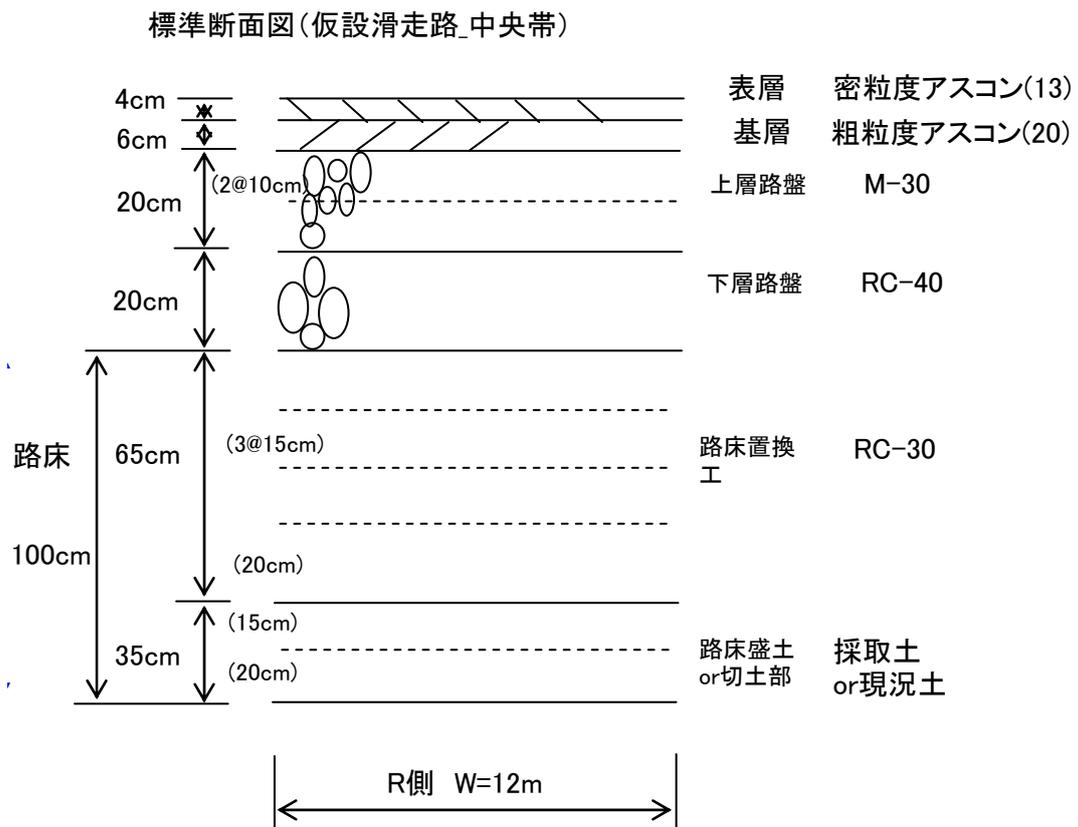


図-5.3 試験箇所断面図

③調査項目

試験において実施した調査項目および測定位置を表-5.1, 表-5.2および図-5.4に示す。

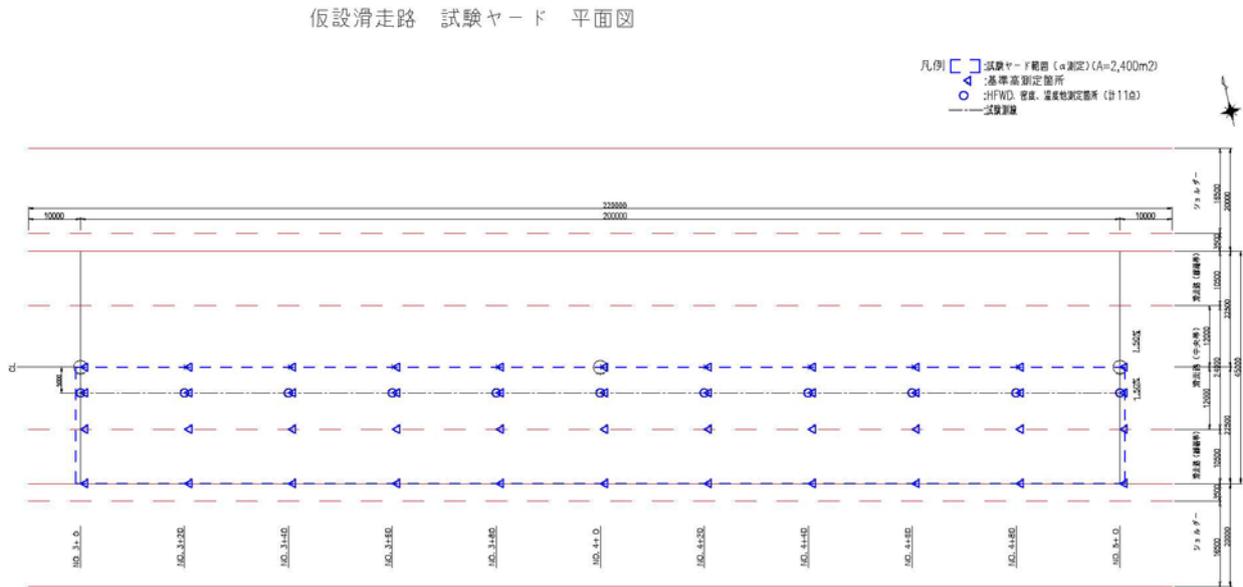


図-5.4 調査項目測定位置

表-5.1 現地調査一覧表

工種 試験項目	路床切土部	路床置換	下層路盤	上層路盤	基層
	仕上り面	仕上り面	仕上り面	仕上り面	仕上り面
αシステム計測 7t		○	○	○	●
HFWD		○	○	○	○
現場CBR					
密度		○	○	○	コア○、PQI●
転圧温度					●
基準高測定	△	○	○	○	○

凡例 ○:実施する項目 ●:転圧各回で実施する項目  
 △:現場サイドで実施する項目, 結果を入手

表-5.2 室内試験項目一覧表

試験項目 工種 材料名		材料試験		摘要
		路盤材・路床土のレジリエントモデュラス試験	アスコンのレジリエントモデュラス試験	
路床切土部	黒土		1水準	
路床置換工	RC-30		1水準	
下層路盤工	RC-40		1水準	
上層路盤工	M-30		1水準	
基層工	粗粒度As20		1水準	1水準

### 5.3 調査項目および測定方法

#### (1) $\alpha$ システム測定

測定は各層全面及び試験測線にて数回行った。今回はGPSを装着して測定を行い、時間・座標値・Erollerデータ（ピーク乱れ率）を取得した。なお比較のために必要となる分散乱れ率でのErollerは計算により求めた。

試験測線でのデータは前進で4回採取し、結果表へは最終回のみ提示している。

測定状況を写真-5.1～5.3に示す。



写真-5.1  $\alpha$  システム測定状況



写真-5. 2 路床置換工  $\alpha$ 測定状況



写真-5. 3 基層工  $\alpha$ 測定状況

なお、今回は舗装の施工管理であることを考慮して、舗装工事で一般的に使われている7 t振動ローラ（SAKAI SW650，締固め幅：148cm，起振力：7000kg）を使用した。

## (2) FWD測定

小型FWD（HFWD）の装置概要を図-5. 5に、測定状況を写真-5. 4に示す。FWDは載荷版における衝撃荷重と変位を測定することにより、載荷面の力学的な性状を評価する装置である。FWD測定方法は「FWDおよび小型FWD運用の手引き」（土木学会，舗装工学ライブラリー2）に準拠して行い，K30値及び弾性係数を計算より得た。

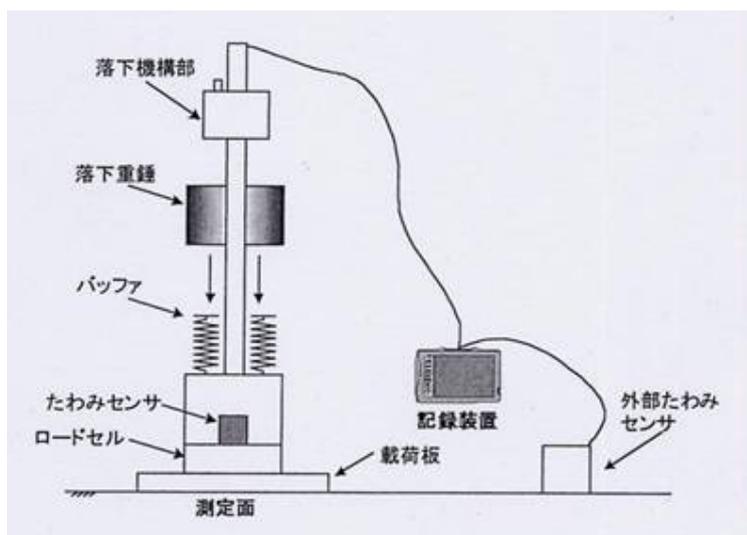


図-5.5 小型FWD装置概要



写真-5.4 小型FWD測定状況

### (3) 現場密度測定

上層路盤工までの現場密度測定は、舗装調査・試験法便覧「G021-1 突砂法による路床の密度の測定方法」に準拠して行った。

基層工においてはコアを採取し、舗装調査・試験法便覧「B008 アスファルト混合物の密度試験方法」に準拠して行った。

測定状況を写真3.4、基層工コア採取状況を写真3.5に示す。



写真-5.5 現場密度測定試験状況



写真-5.6 基層コア採取状況

(4) 基層工 平坦性試験

基層工表面において、振動ローラで $\alpha$ 測定をすることによって、仕上がりに悪影響を与えるようなローラ痕が発生するかどうかを検証するため、有振位置と無振位置の2測線において仕上げ完了後に平坦性測定を行った。実施位置図と断面図を図-5.6、図-5.7に示す。

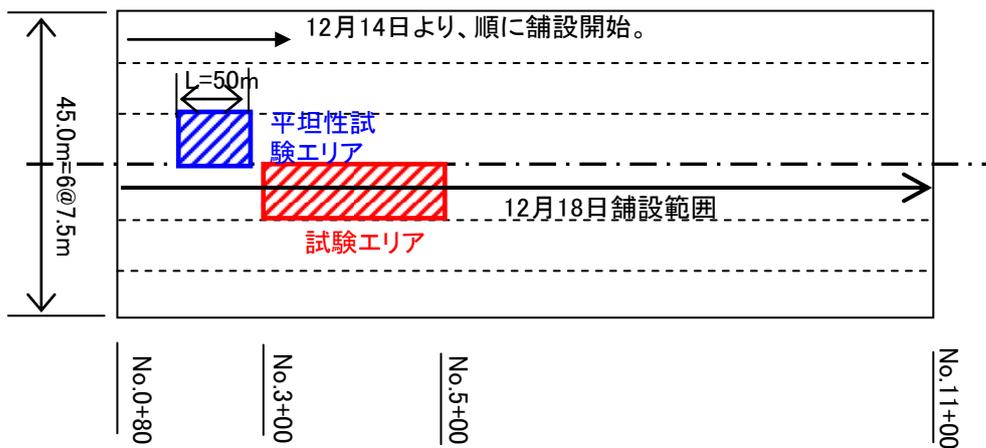


図-5.6 平坦性試験実施位置図

NO. 2 + 0

GH=  
FH=

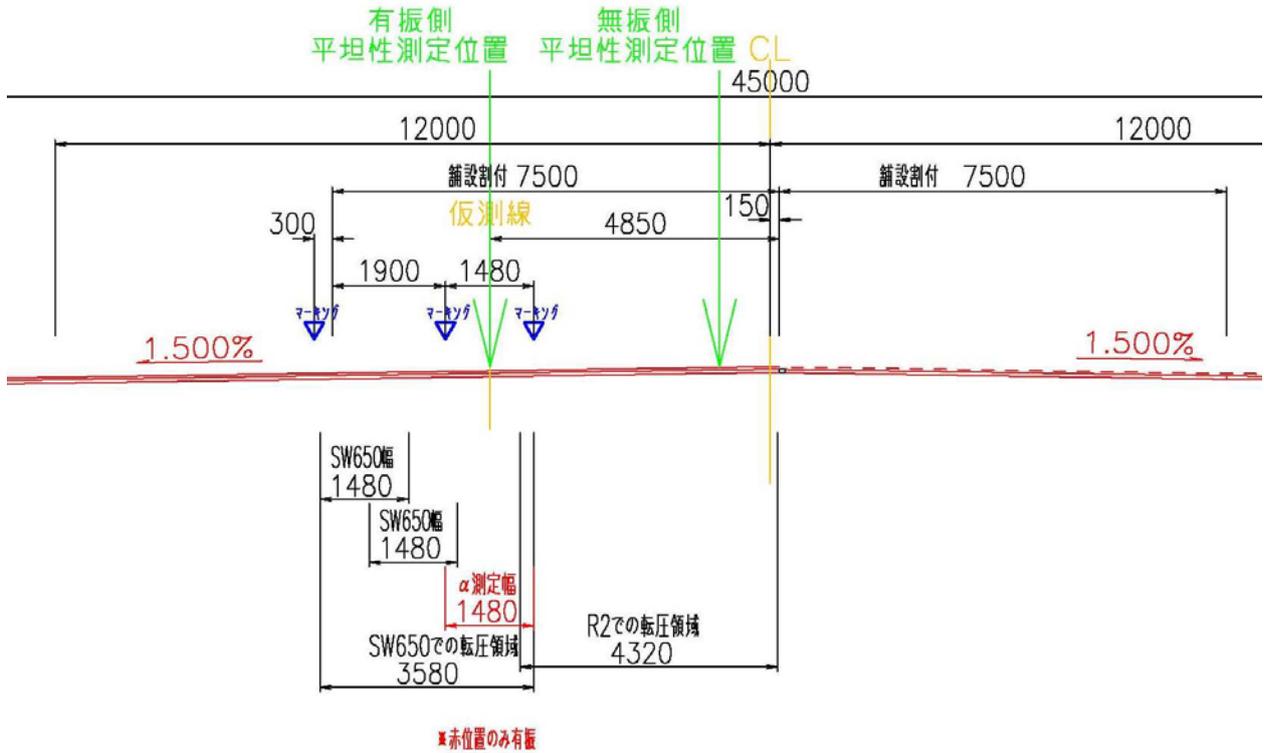


図-5. 7 平坦性試験測定断面図

(5) 基層混合物のレジリエントモデュラス値

基層混合物のレジリエントモデュラス値の測定は、舗装調査・試験法便覧「B015 アスファルト混合物のレジリエントモデュラス試験」に準拠して行った。測定状況を写真-5. 7に示す。



写真-5. 7 基層混合物のレジリエントモデュラス値測定状況

(6) 路床土および路盤材のレジリエントモデュラス値

路床土および路盤材のレジリエントモデュラス値の測定は、舗装調査・試験法便覧「B016 路盤材・路床土のレジリエントモデュラス試験」に準拠して行った。ただし、供試体サイズはφ100mm x H200mmとしている。測定状況を写真-5.8に示す。



写真-5.8 路盤材・路床土のレジリエントモデュラス値測定状況

## 5. 4 測定結果

### 5. 4. 1 現地調査

#### (1) 路床置換工および下層路盤工測定結果

路床置換工および下層路盤工での各種測定結果を表-5. 3に示す。

表-5. 3 路床置換工, 下層路盤工 測定結果一覧

項目 測点	路床置換						下層路盤					
	ピークEr 出力値	分散Er 計算値	密度	締固め度	HFWDK30値 (MN/m <sup>3</sup> )	HFWD弾性係数 (MN/m <sup>2</sup> )	ピークEr 出力値	分散Er 計算値	密度	締固め度	HFWDK30値 (MN/m <sup>3</sup> )	HFWD弾性係数 (MN/m <sup>2</sup> )
No.3+00R5m	24.8	33.8	1.741	88.4	241.0	129.0	26.4	35.0	2.088	106.2	295.0	159.0
No.3+20R5m	32.1	51.6	1.750	88.9	297.0	160.0	24.2	36.2	2.067	105.1	290.0	155.0
No.3+40R5m	28.7	39.5	1.790	90.9	296.0	160.0	19.8	28.9	2.211	112.5	300.0	161.0
No.3+60R5m	28.1	41.4	1.763	89.5	268.0	146.0	22.9	32.7	2.082	105.9	317.0	172.0
No.3+80R5m	27.2	39.4	1.969	100.0	280.0	152.0	22.9	31.5	2.213	112.6	320.0	174.0
No.4+00R5m	25.9	43.3	1.793	91.1	275.0	146.0	24.0	34.6	1.927	98.0	257.0	137.0
No.4+20R5m	24.5	37.6	1.778	90.3	314.0	168.0	25.0	38.0	2.096	106.6	322.0	175.0
No.4+40R5m	24.5	35.9	1.766	89.7	233.0	122.0	20.3	30.7	1.866	94.9	226.0	120.0
No.4+60R5m	20.8	27.8	1.755	89.1	202.0	108.0	23.3	33.9	1.998	101.6	264.0	142.0
No.4+80R5m	22.9	29.6	1.815	92.2	259.0	137.0	21.1	30.8	2.012	102.3	216.0	114.0
No.5+00R5m	19.4	28.0	1.801	91.5	204.0	110.0	24.0	33.8	2.132	108.4	265.0	142.0
最大乾燥密度			1.969						1.966			
平均値	25.4	37.1	1.793	91.1	260.8	139.8	23.1	33.3	2.063	104.9	279.3	150.1
標準偏差	3.5	6.9	0.060	3.0	35.5	19.5	1.9	2.6	0.102	5.2	35.0	20.0
変動係数(%)	13.7%	18.5%	3.3%	3.3%	13.6%	13.9%	8.3%	7.7%	5.0%	5.0%	12.5%	13.3%

(2) 上層路盤工および基層工測定結果

上層路盤工および基層工での各種測定結果を表-5.4に示す。

表-5.4 上層路盤工, 基層工 測定結果一覧

項目 測点	上層路盤						基層					
	ピークEr 出力値	分散Er 計算値	密度	締固め度	HFWDK30値 (MN/m3)	HFWD弾性係数 (MN/m2)	ピークEr 出力値	分散Er 計算値	密度	締固め度	HFWDK30値 (MN/m3)	HFWD弾性係数 (MN/m2)
No.3+00R5m	25.1	35.4	2.072	97.1	198.0	104.0	54.9	79.3	2.321	97.8	700.0	375.0
No.3+20R5m	25.9	38.5	2.017	94.6	198.0	104.0	41.4	75.3	2.320	97.8	679.0	379.0
No.3+40R5m	28.9	36.6	2.101	98.5	220.0	116.0	48.8	63.5	2.281	96.2	676.0	382.0
No.3+60R5m	25.6	33.8	2.087	97.8	217.0	115.0	44.6	58.9	2.294	96.7	657.0	376.0
No.3+80R5m	24.1	32.2	2.030	95.2	196.0	104.0	32.9	61.8	2.247	94.7	659.0	375.0
No.4+00R5m	24.2	34.6	2.054	96.3	189.0	99.0			2.270	95.7	604.0	339.0
No.4+20R5m	22.8	37.5	2.068	97.0	181.0	95.0	55.1	115.5	2.332	98.3	609.0	344.0
No.4+40R5m	24.5	33.4	1.996	93.6	170.0	90.0	50.9	101.7	2.278	96.0	611.0	342.0
No.4+60R5m	26.2	37.6	2.111	99.0	194.0	102.0	57.0	88.2	2.343	98.8	551.0	305.0
No.4+80R5m	25.8	35.0	2.144	100.5	224.0	119.0	50.4	64.8	2.347	98.9	490.0	268.0
No.5+00R5m	26.1	33.3	2.121	99.4	194.0	101.0	49.5	68.3	2.335	98.4	473.0	258.0
最大乾燥密度			2.133						2.372			
平均値	25.4	35.3	2.073	97.2	198.3	104.5	48.6	77.7	2.306	97.2	609.9	340.3
標準偏差	1.5	2.0	0.044	2.0	15.7	8.5	6.9	17.8	0.032	1.3	72.9	42.8
変動係数(%)	5.9%	5.5%	2.1%	2.1%	7.9%	8.2%	14.2%	23.0%	1.4%	1.4%	12.0%	12.6%

ここで、基層のデータは二次転圧完了後の最終仕上がり面での測定データである。

(3) 基層工 転圧回数ごとの測定結果

基層工での転圧回数ごとのEr, 温度等各種測定結果を表-5.5に示す。

なお, ここでのErはピークのみを示す。

表-5.5 基層工 転圧回数ごとのEr 測定結果一覧

測点	項目	基層									備考
		2回転圧(無振)	3回転圧	4回転圧	5回転圧	6回転圧	7回転圧	8回転圧	仕上り面1	仕上り面2	
No.3+00R5m	Er	—	15.3	16.2	21.7	25.8	23.9	25.7	—	54.9	
	表面温度(°C)	83	—	75	—	70	—	65	—	25	
	内部温度(°C)	134	—	123	—	98	—	92	—	—	
No.3+20R5m	Er	—	22.1	30.0	26.6	26.0	27.5	26.4	55.6	41.4	
	表面温度(°C)	87	—	80	—	73	—	69	—	30	
	内部温度(°C)	125	—	117	—	98	—	86	—	—	
No.3+40R5m	Er	—	24.2	23.0					42.9	48.8	
	表面温度(°C)	102	—	96					—	29	
	内部温度(°C)	135	—	134					—	—	
No.3+60R5m	Er								36.9	44.6	
	表面温度(°C)								—	31	
	内部温度(°C)								—	—	
No.3+80R5m	Er								37.3	32.9	
	表面温度(°C)								—	34	
	内部温度(°C)								—	—	
No.4+00R5m	Er								—	—	
	表面温度(°C)								—	20	
	内部温度(°C)								—	—	
No.4+20R5m	Er	—	23.9	22.7	27.3	25.1	25.8	26.5	52.8	55.1	
	表面温度(°C)	85	—	79	—	67	—	63	—	26	
	内部温度(°C)	140	—	136	—	124	—	107	—	—	
No.4+40R5m	Er	—	23.9	20.5	25.0	24.6	27.9	28.1	77.9	50.9	
	表面温度(°C)	87	—	71	—	69	—	59	—	26	
	内部温度(°C)	130	—	122	—	112	—	100	—	—	
No.4+60R5m	Er	—	22.5	22.0	25.3	24.9	26.0	29.0	49.4	57.0	
	表面温度(°C)	97	—	82	—	75	—	63	—	30	
	内部温度(°C)	152	—	145	—	132	—	99	—	—	
No.4+80R5m	Er	—	24.6	22.2	23.7	23.9	24.0	24.2	40.6	50.4	
	表面温度(°C)	96	—	87	—	76	—	72	—	31	
	内部温度(°C)	150	—	139	—	121	—	108	—	—	
No.5+00R5m	Er	—	23.2	25.0	22.9	27.1	25.3	25.8	41.3	49.5	
	表面温度(°C)	91	—	89	—	79	—	69	—	29	
	内部温度(°C)	149	—	127	—	118	—	106	—	—	
平均	Er	—	22.5	22.7	24.6	25.3	25.8	26.5	48.3	48.6	

なお空欄箇所は, ローラの装置不調とAs合材供給休止により計測不能となった箇所である。

(4) 基層工 転圧各回における PQI 密度, 温度の測定結果

基層工での転圧回数ごとのPQI密度計, 表面温度, 内部温度等各種測定結果を表-5. 6～表-5. 9に示す。

表-5. 6 PQI密度測定器による測定密度(1)(基層工12/18測定)

測定位置	転圧回数 (回)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )		表面温度 (°C)		内部温度 (°C)	測定時刻	備考
		測定値	平均	測定値	平均			
No.3+00	2	2.333	2.336	86.4	82.6	134.0	11:18	
		2.333		78.4				
		2.341		83.0				
	4	2.390	2.384	72.8	75.1	123.0	11:22	
		2.371		79.5				
		2.392		72.9				
	6	2.407	2.408	67.7	69.5	98.0	11:25	
		2.405		70.8				
		2.412		70.0				
	8	2.378	2.386	65.9	65.4	92.0	11:29	
		2.378		61.8				
		2.402		68.5				
	仕上げ	2.370	2.363	26.2	25.1	—		
		2.374		23.7				
		2.344		25.4				
No.3+20	2	2.294	2.316	88.9	87.4	125.0	11:41	
		2.302		91.6				
		2.353		81.6				
	4	2.387	2.387	78.8	79.5	117.0	11:45	H2O=10以上
		2.409		78.2				
		2.364		81.5				
	6	2.339	2.374	74.9	72.9	98.0	11:50	
		2.393		74.1				
		2.391		69.6				
	8	2.363	2.379	70.3	69.1	86.0	11:55	
		2.422		69.3				
		2.352		67.8				
	仕上げ	2.323	2.320	29.2	29.5	—		
		2.305		30.9				
		2.332		28.5				
No.3+40	2	2.368	2.351	106.0	102.3	135.0	11:50	
		2.348		102.2				
		2.338		98.6				
	4	2.413	2.396	97.9	96.3	134.0	11:54	
		2.399		97.5				
		2.375		93.4				
	6							
	8							
	仕上げ	2.332	2.340	29.1	29.0	—		
		2.342		28.3				
		2.346		29.6				

表-5.7 PQI密度測定器による測定密度(2)(基層工12/18測定)

測定位置	転圧回数 (回)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )		表面温度 (°C)		内部温度 (°C)	測定時刻	備考
		測定値	平均	測定値	平均			
No.3+60	2							
	4							
	6							
	8							
	仕上げ	2.382	2.383	30.4	30.8			
	2.395	31.3						
	2.372	30.7						
No.3+80	2							
	4							
	6							
	8							
	仕上げ	2.334	2.319	38.3	33.9		13:18	
	2.294	34.1						
	2.329	29.2						
No.4+00	2							
	4							
	6							
	8							
	仕上げ	2.283	2.281	22.5	19.8			
	2.282	19.7						
	2.278	17.2						

表-5. 8 PQI密度測定器による測定密度(3)(基層工12/18測定)

測定位置	転圧回数 (回)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )		表面温度 (°C)		内部温度 (°C)	測定時刻	備考
		測定値	平均	測定値	平均			
No.4+20	2	2.308	2.330	92.1	84.6	140.0	13:28	
		2.317		80.5				
		2.365		81.2				
	4	2.366	2.354	82.1	79.3	136.0	13:33	
		2.351		78.3				
		2.346		77.6				
	6	2.428	2.424	71.5	67.2	124.0	13:37	
		2.419		62.5				
		2.424		67.5				
	8	2.375	2.387	63.0	63.2	107.0		H2O=10以上
		2.414		66.6				
		2.373		59.9				
	仕上げ	2.308	2.311	28.1	26.2	—		
		2.312		26.0				
		2.312		24.5				
No.4+40	2	2.254	2.256	87.4	86.7	130.0		
		2.255		94.3				
		2.260		78.5				
	4	2.345	2.313	66.7	71.2	122.0	13:41	
		2.297		82.4				
		2.296		64.4				
	6	2.348	2.359	69.3	69.1	112.0	13:45	H2O=10以上
		2.368		79.0				
		2.361		59.0				
	8	2.343	2.361	59.1	58.7	100.0	13:49	
		2.392		65.1				
		2.348		51.9				
	仕上げ	2.295	2.288	27.6	25.9	—		
		2.293		27.4				
		2.275		22.8				
No.4+60	2	2.309	2.301	97.1	96.8	152.0	13:49	
		2.302		97.6				
		2.292		95.8				
	4	2.404	2.401	84.1	81.5	145.0	13:53	H2O=10以上
		2.382		84.8				
		2.416		75.6				
	6	2.430	2.399	75.3	75.1	132.0	13:57	
		2.381		76.2				
		2.386		73.9				
	8	2.434	2.428	63.4	62.9	99.0		
		2.425		62.8				
		2.426		62.5				
	仕上げ	2.349	2.346	30.4	30.3	—		
		2.349		32.8				
		2.340		27.8				

表-5. 9 PQI密度測定器による測定密度(4)(基層工12/18測定)

測定位置	転圧回数 (回)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )		表面温度 (°C)		内部温度 (°C)	測定時刻	備考
		測定値	平均	測定値	平均			
No.4+80	2	2.377	2.348	96.5	95.3	150.0	13:57	
		2.307		99.4				
		2.359		90.0				
	4	2.385	2.390	89.9	87.1	139.0	14:02	
		2.385		91.3				
		2.401		80.1				
	6	2.433	2.432	74.5	76.7	121.0		
		2.420		81.0				
		2.444		74.6				
	8	2.396	2.417	70.3	72.2	108.0		
		2.422		73.8				
		2.432		72.4				
	仕上げ	2.351	2.358	32.6	31.0	—		
		2.364		32.1				
		2.358		28.2				
No.5+00	2	2.447	2.401	94.2	90.9	149.0	14:05	H2O=10以上
		2.393		96.7				H2O=10以上
		2.363		81.8				
	4	2.473	2.449	92.9	88.6	127.0	14:10	H2O=10以上
		2.437		89.6				
		2.436		83.4				H2O=10以上
	6	2.467	2.446	77.8	78.6	118.0	14:15	
		2.414		79.9				
		2.456		78.2				
	8	2.481	2.473	67.9	68.5	106.0	14:20	
		2.499		69.6				
		2.438		67.9				
	仕上げ	2.390	2.382	29.9	29.3	—	15:34	
		2.375		28.8				
		2.380		29.3				

ここで、備考の「H2O=10以上」などは水分量を表す指数であり、取扱説明書によると測定結果に影響を与えるとはされているが、計測値は極端な値となっていないため参考までに提示する。

(5) 各層の施工厚さ 測定結果

各層の基準高の差より計算した測線の厚さ測定結果を表-5. 10に示す。

表-5. 10 測線での各層の施工実測厚さ一覧表

測線での各層実測厚さデータ

		工種名				備考
		路床置換	下層路盤	上層路盤	基層	
設計厚さ		65.0	20.0	20.0	6.0	単位:cm
実測厚さ	No.3+00R5m	67.1	19.4	19.9	6.5	
	No.3+20R5m	63.0	21.4	20.1	6.5	
	No.3+40R5m	66.2	20.6	19.8	6.3	
	No.3+60R5m	68.0	19.7	21.2	6.5	
	No.3+80R5m	70.8	20.1	20.3	7.1	
	No.4+00R5m	63.3	19.1	21.5	7.4	
	No.4+20R5m	61.0	18.3	21.0	7.3	
	No.4+40R5m	62.3	13.2	24.1	7.1	
	No.4+60R5m	62.7	17.4	21.5	6.6	
	No.4+80R5m	64.0	16.8	21.7	6.6	
	No.5+00R5m	64.1	20.3	20.1	6.8	

(6) 基層工 ローラ有振部と無振部での平坦性測定結果

本試験前に、前記3. (4)の位置、要領にて、初期転圧を有振とした場合と無振とした場合の仕上がり後の平坦性をL=50mにて測定したので、その測定結果総括を表-5. 11に、データを表-5. 12, 5. 13, および図-5. 8, 5. 9に示す。

表-5. 11 有振時と無振時の平坦性測定結果表

測定箇所	平坦性(mm)
有振側	0.96
無振側	0.99

このように、有振時と無振時では同様な測定結果になり、有振のまま停止、反転する等の極端な運転をしなければ、振動が施工に悪影響を与える心配はないと考えられる。

表-5. 12 予備試験 有振時の平坦性測定データ

--	--	--	--

舗装路面の平坦性測定										試験報告用紙					
工事名		新田原 基層 α 予備試験 3レーン 左 有振													
測定開始点		No.1+95				測定年月日		平成21年12月17日							
測定終了点		No.2+45				測定器		MRP-1000							
測定距離		49.13m				測定者		下館 鎮							
シート番号		1 枚中の 1 枚目													
No.	d	d <sup>2</sup>	No.	d	d <sup>2</sup>	No.	d	d <sup>2</sup>	No.	d	d <sup>2</sup>	No.	d	d <sup>2</sup>	
1	-0.1	0.01	21	1.0	1.00	41			61			81			
2	1.7	2.89	22	0.3	0.09	42			62			82			
3	-1.3	1.69	23	-0.8	0.64	43			63			83			
4	-0.1	0.01	24	-2.5	6.25	44			64			84			
5	0.9	0.81	25	0.7	0.49	45			65			85			
6	0.4	0.16	26	0.8	0.64	46			66			86			
7	-0.1	0.01	27	0.3	0.09	47			67			87			
8	0.1	0.01	28	-0.8	0.64	48			68			88			
9	-1.1	1.21	29	-0.7	0.49	49			69			89			
10	0.9	0.81	30	-0.6	0.36	50			70			90			
計①	1.30	② 7.61	計①	-2.30	② 10.69	計①		②	計①		②	計①		②	
11	-0.4	0.16	31	3.0	9.00	51			71			91			
12	-0.3	0.09	32	0.3	0.09	52			72			92			
13	0.4	0.16	33	-0.7	0.49	53			73			93			
14	0.3	0.09	34			54			74			94			
15	-0.1	0.01	35			55			75			95			
16	-0.2	0.04	36			56			76			96			
17	-0.1	0.01	37			57			77			97			
18	-1.0	1.00	38			58			78			98			
19	0.0	0.00	39			59			79			99			
20	-0.2	0.04	40			60			80			100			
計①	-1.60	② 1.60	計①	2.60	② 9.58	計①		②	計①		②	計①		②	
③	Σ ① (mm)		0.0				⑥	各シートのΣ ③ (mm)				0.0			
④	Σ ② (mm <sup>2</sup> )		29.48				⑦	各シートのΣ ④ (mm <sup>2</sup> )				29.48			
⑤	データ数		33				⑧	各シートのΣ ⑤				33			
⑨	標準偏差 $\sqrt{((⑦-⑥)^2/⑧)/(⑧-1)}$ (mm)						0.96								
備考															

工事名: 新田原 基層  $\alpha$  予備試験 3レーン 左 有振 (0.00-49.13 / 49.13m)

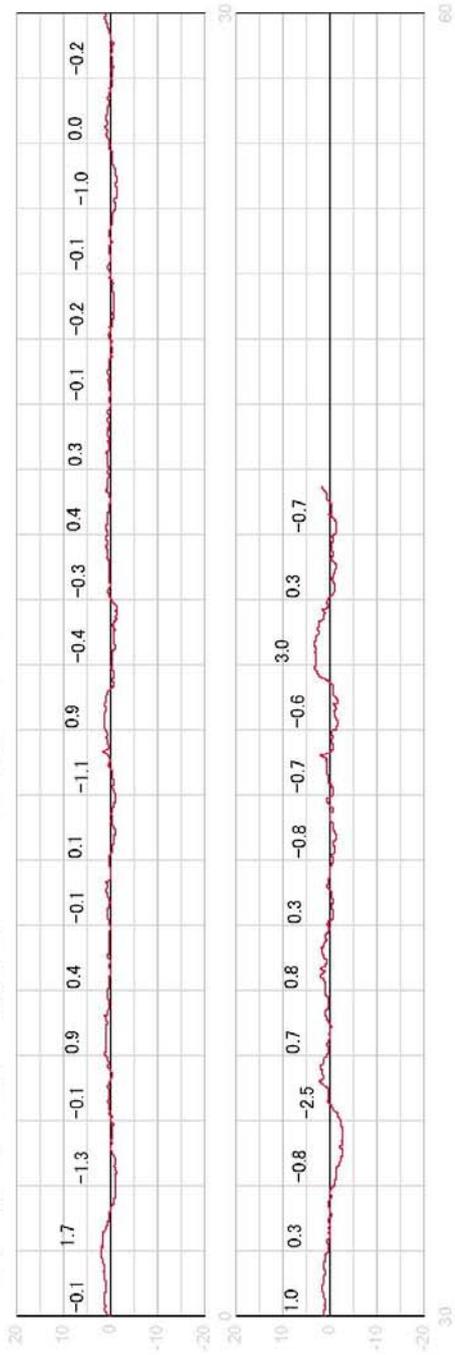


図-5.8 予備試験 有振時の平坦性測定プロット図

表-5. 13 予備試験 無振時の平坦性測定データ

--	--	--	--

舗装路面の平坦性測定										試験報告用紙				
工事名		新田原 基層 α 予備試験 3レーン 右 無振												
測定開始点		No.1+95				測定年月日		平成21年12月17日						
測定終了点		No.2+45				測定器		MRP-1000						
測定距離		49.55m				測定者		下館 鎮						
シート番号		1 枚中の 1 枚目												
No.	d	d <sup>2</sup>	No.	d	d <sup>2</sup>	No.	d	d <sup>2</sup>	No.	d	d <sup>2</sup>	No.	d	d <sup>2</sup>
1	-1.5	2.25	21	0.4	0.16	41			61			81		
2	-0.2	0.04	22	-1.4	1.96	42			62			82		
3	1.7	2.89	23	1.8	3.24	43			63			83		
4	-0.5	0.25	24	-1.3	1.69	44			64			84		
5	1.0	1.00	25	1.0	1.00	45			65			85		
6	-0.4	0.16	26	0.4	0.16	46			66			86		
7	-0.2	0.04	27	-1.1	1.21	47			67			87		
8	0.6	0.36	28	0.5	0.25	48			68			88		
9	1.4	1.96	29	-0.7	0.49	49			69			89		
10	-1.7	2.89	30	-0.2	0.04	50			70			90		
計①	0.20	② 11.84	計①	-0.60	② 10.20	計①	②	計①	②	計①	②	計①	②	
11	-0.2	0.04	31	-0.3	0.09	51			71			91		
12	-1.0	1.00	32	-0.3	0.09	52			72			92		
13	0.7	0.49	33	0.7	0.49	53			73			93		
14	0.0	0.00	34	-1.4	1.96	54			74			94		
15	0.6	0.36	35			55			75			95		
16	-1.5	2.25	36			56			76			96		
17	0.2	0.04	37			57			77			97		
18	0.8	0.64	38			58			78			98		
19	0.1	0.01	39			59			79			99		
20	1.6	2.56	40			60			80			100		
計①	1.30	② 7.39	計①	-1.30	② 2.63	計①	②	計①	②	計①	②	計①	②	
③	Σ① (mm)		-0.4				⑥	各シートのΣ③ (mm)		-0.4				
④	Σ② (mm <sup>2</sup> )		32.06				⑦	各シートのΣ④ (mm <sup>2</sup> )		32.06				
⑤	データ数		34				⑧	各シートのΣ⑤		34				
⑨	標準偏差 $\sqrt{((⑦-⑥)^2/⑧)/(⑧-1)}$ (mm)						0.99							
備考														

工事名: 新田原 基層 α 予備試験 3レーン 右 無振 (0.00-49.55 / 49.55m)

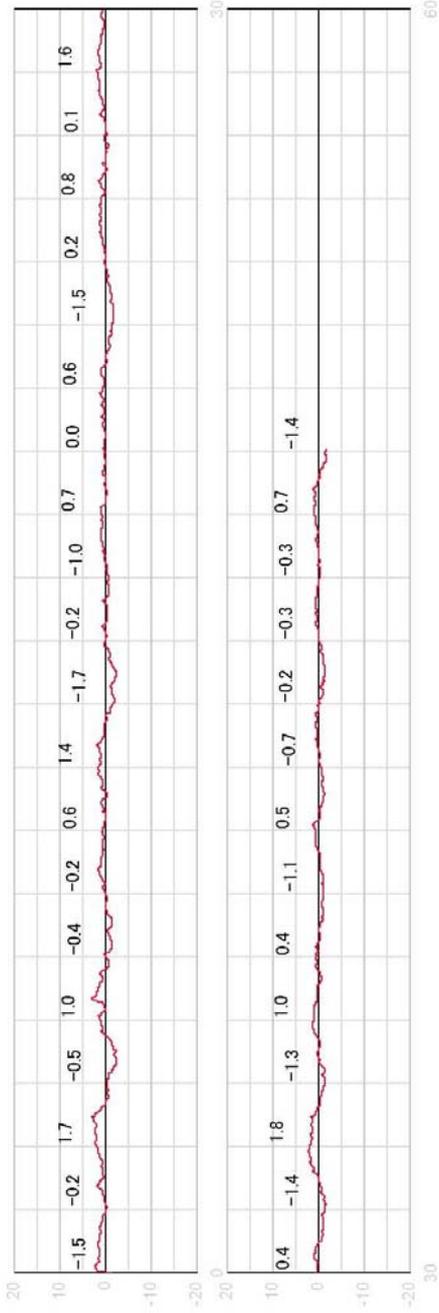


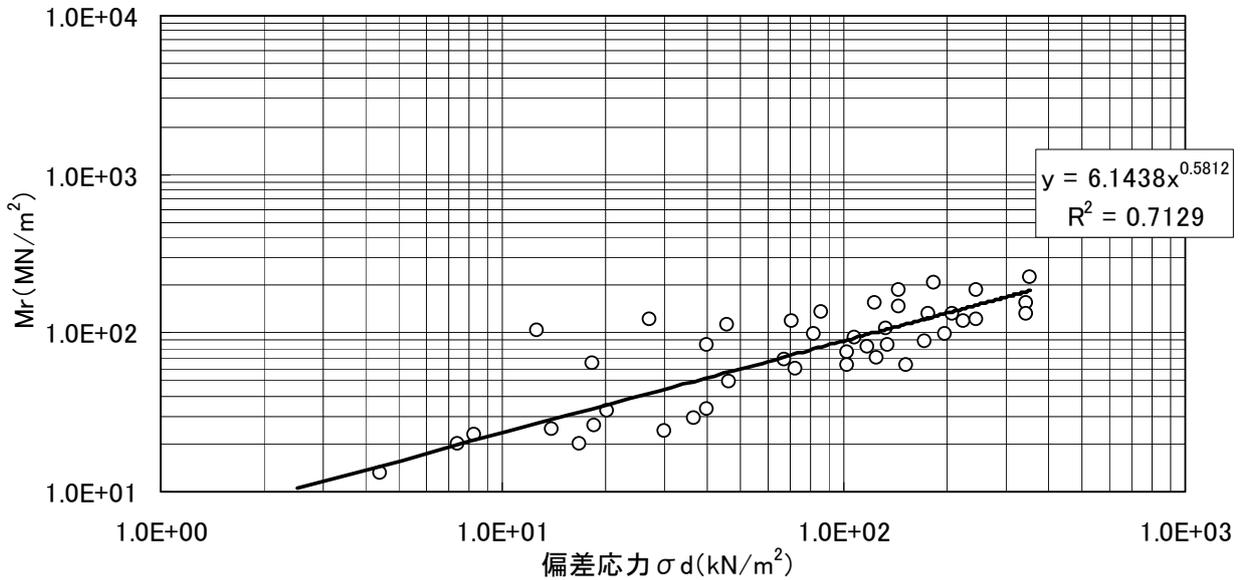
図-5. 9 予備試験 無振時の平坦性測定プロット図

## 5. 4. 2 室内試験

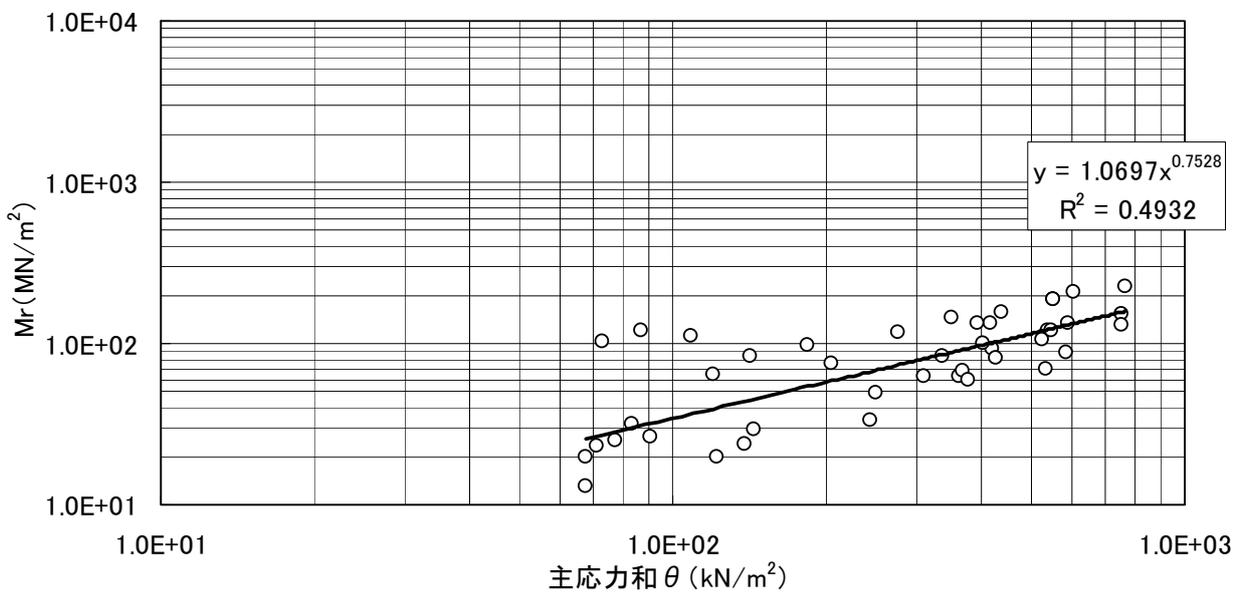
### (1) 路床置換工材レジリエントモデュラス試験

路床置換工材 (RC-30) のレジリエントモデュラス試験測定結果を図-5. 10 に示す。

締固め度は材料試験表における最大乾燥密度の96%で行った。



(a) 偏差応力と $M_r$ の関係



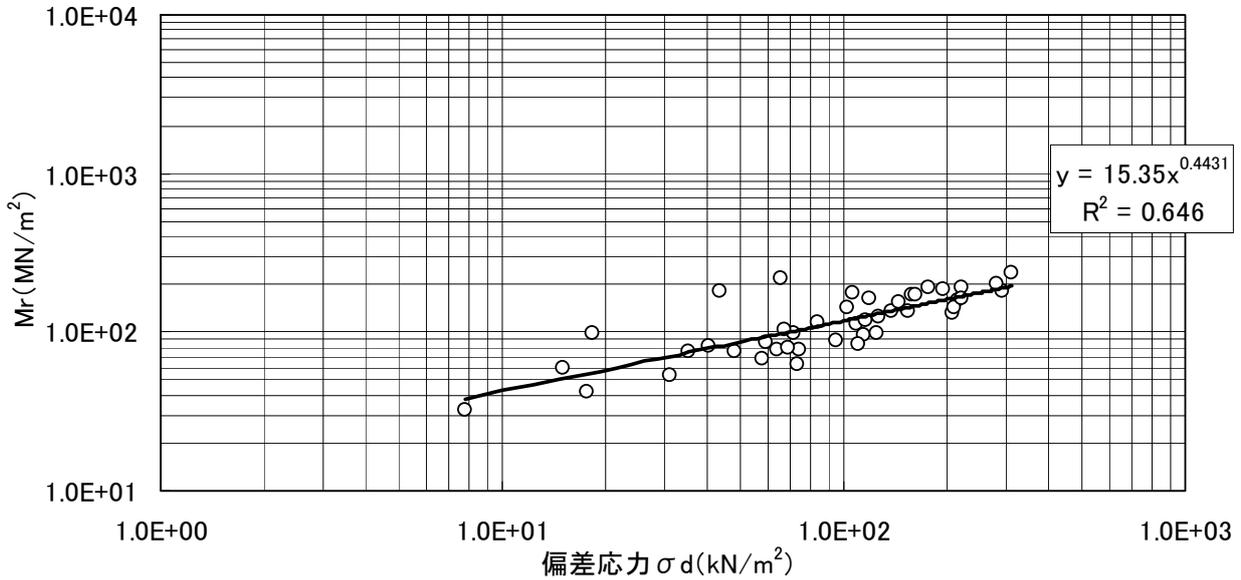
(b) 主応力と $M_r$ の関係

図-5. 10  $M_r$ 試験結果 RC-30

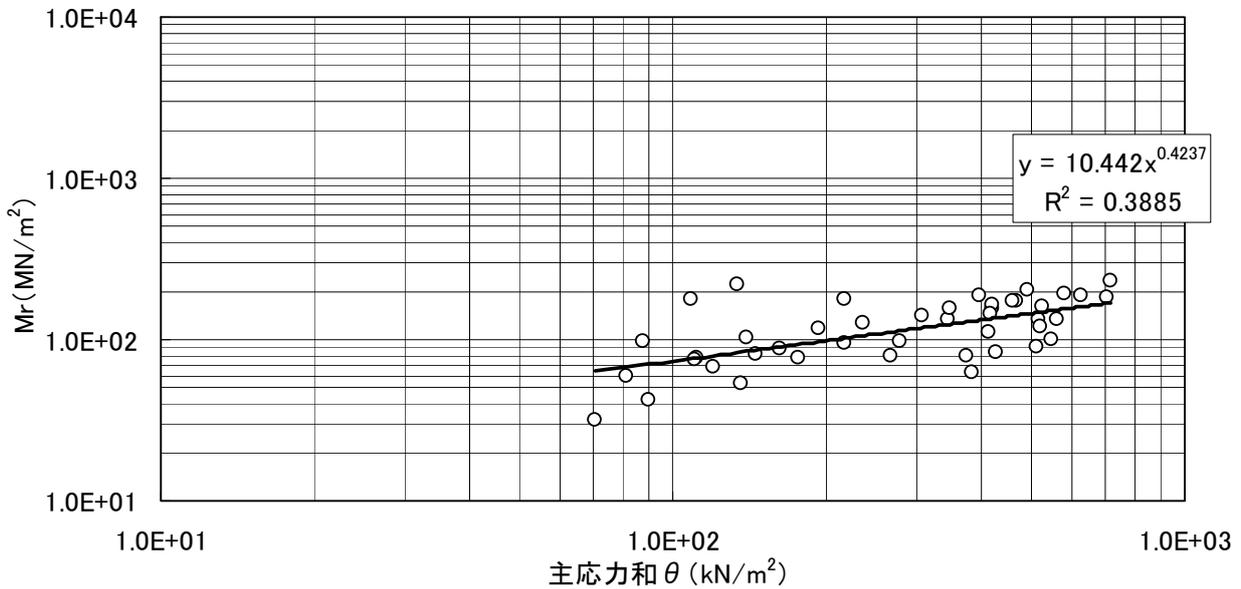
(2) 下層路盤工材レジリエントモデュラス試験

下層路盤工材 (RC-30) のレジリエントモデュラス試験測定結果を図-5. 1 1 に示す。

締固め度は試験表における最大乾燥密度の96%で行った。



(a) 偏差応力と $M_r$ の関係



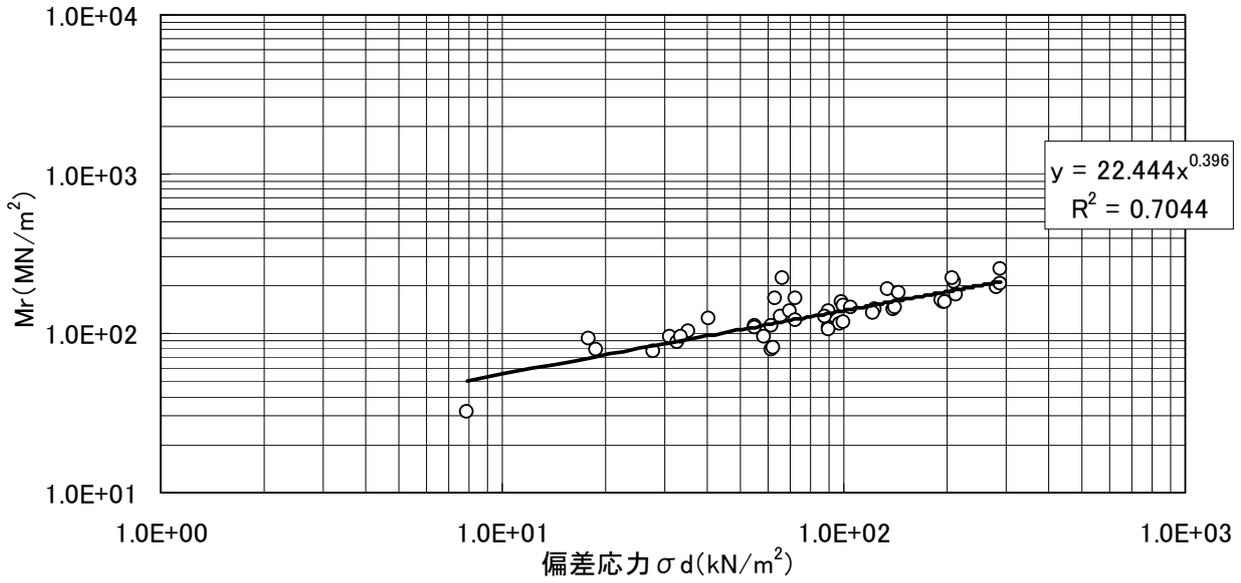
(b) 主応力と $M_r$ の関係

図-5. 11  $M_r$ 試験結果 RC-40

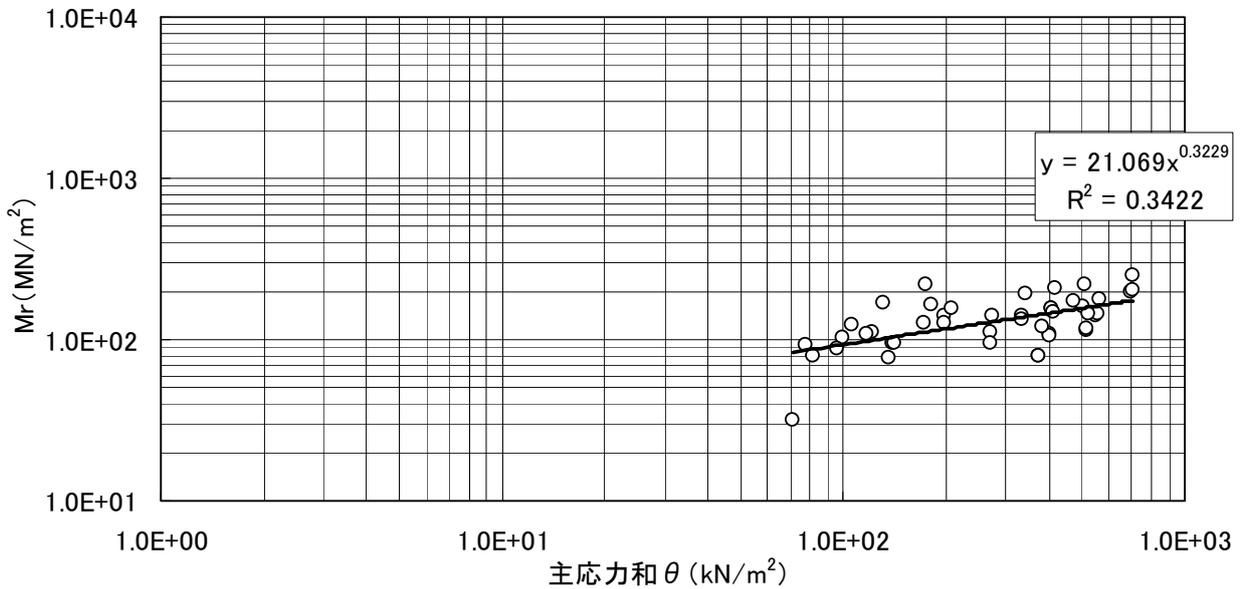
(3) 上層路盤工材レジリエントモデュラス試験

上層路盤工材 (M-30) のレジリエントモデュラス試験測定結果を図-5. 12に示す。

締固め度は試験表における最大乾燥密度の96%で行った。



(a) 偏差応力と $M_r$ の関係



(b) 主応力と $M_r$ の関係

図-5. 12  $M_r$ 試験結果 M-30

(4) 基層混合物Mr試験

基層混合物(再生粗粒(20))採取コアのMr試験結果を表-5. 14, 図-5. 13に示す。

表-5. 14 Mr試験結果 再生粗粒(20)

全復元レジリエントモデュラス ERT( $\mu=0.35$ )			
試験温度 (°C)	No. 3-2 (MPa)	No. 4 (MPa)	No. 5 (MPa)
5	1063	931	814
25	1992	2020	1914
40	4058	3542	3919

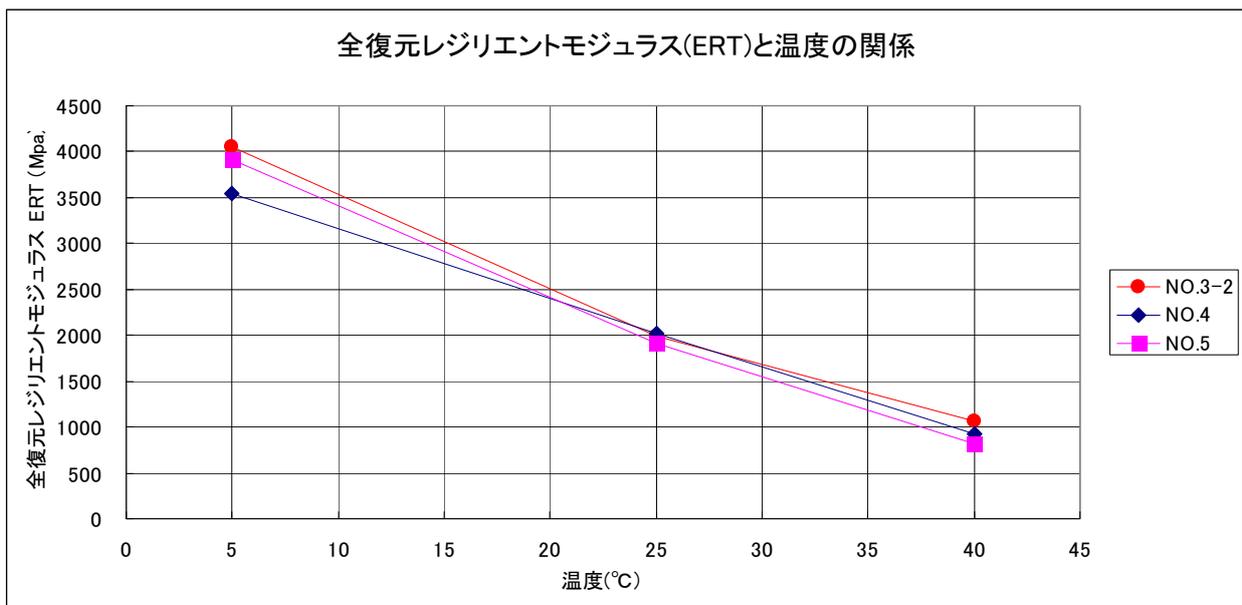


図-5. 13 Mr試験結果 再生粗粒(20)

## 5. 5 測定結果比較

測定した各試験の結果を比較したものを以下に記す。

### (1) ピークE<sub>roller</sub>と締固め度の関係

各層におけるピークE<sub>roller</sub>と締固め度の関係を図-5. 14～図-5. 17に示す。ピークE<sub>roller</sub>と締固め度の関係は、値にばらつきがあり傾向も一定でなく、明確な関係は見られなかった。

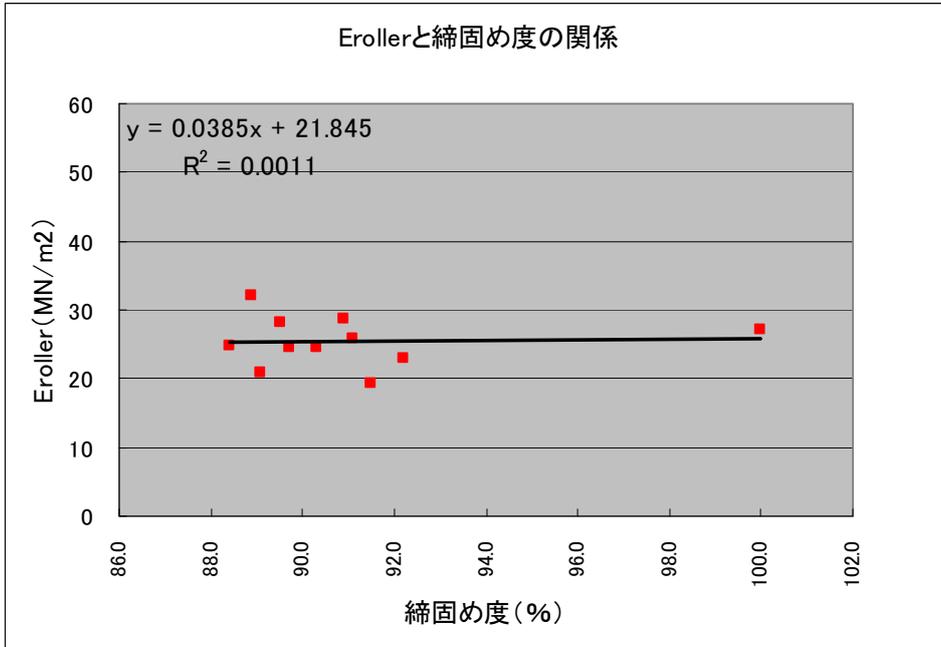


図-5. 14 ピークE<sub>roller</sub>と現場密度試験による締固め度の関係(路床置換工)

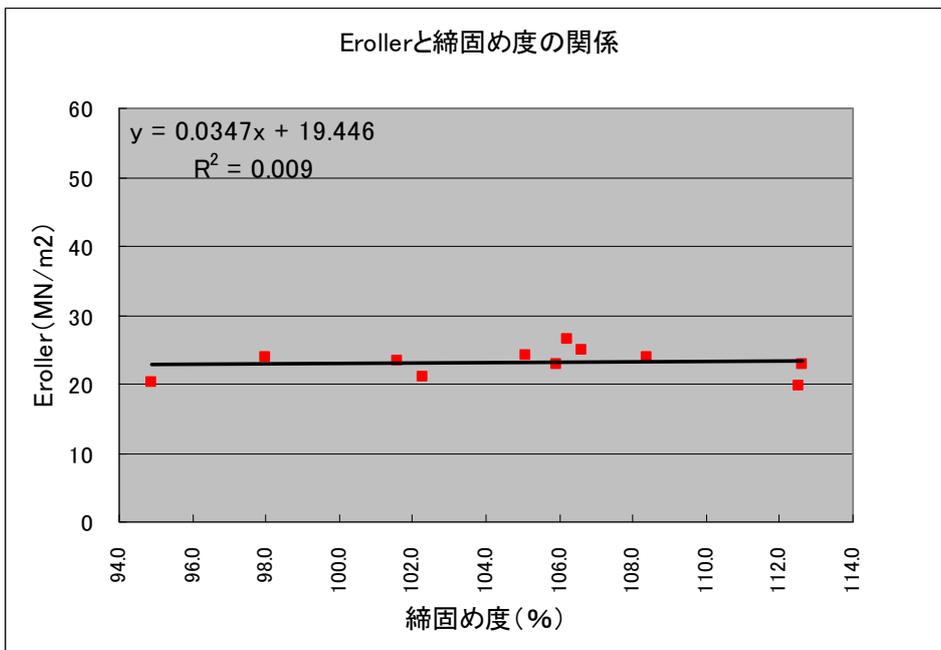


図-5. 15 ピークE<sub>roller</sub>と現場密度試験による締固め度の関係(下層路盤工)

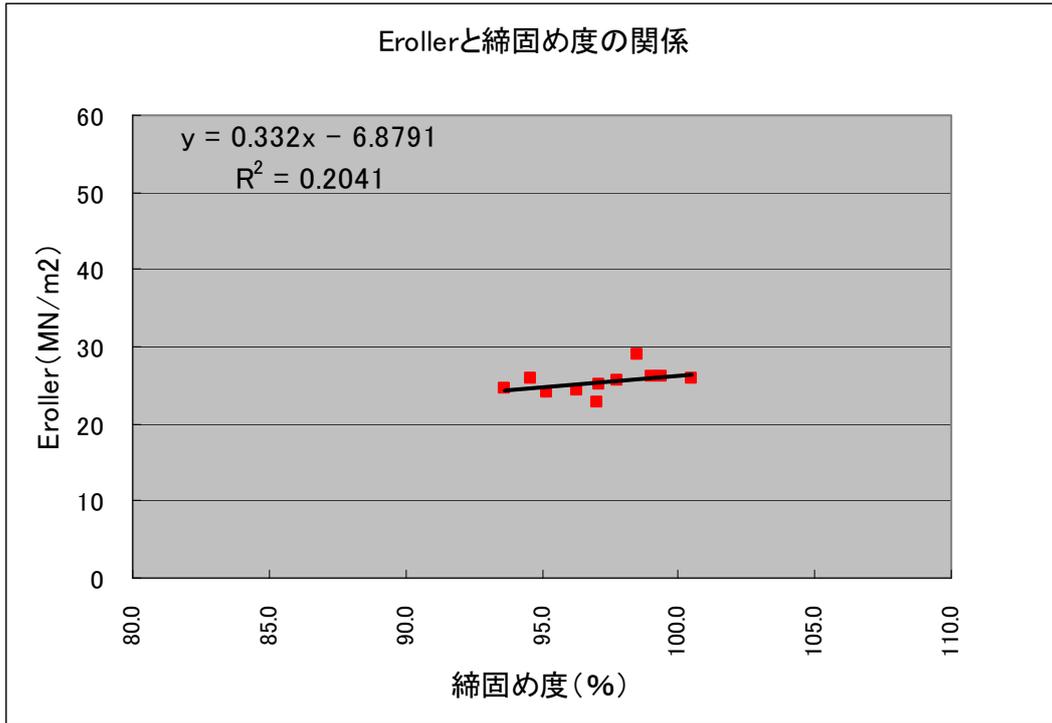


図-5. 16 ピークErollerと現場密度試験による締固め度の関係(上層路盤工)

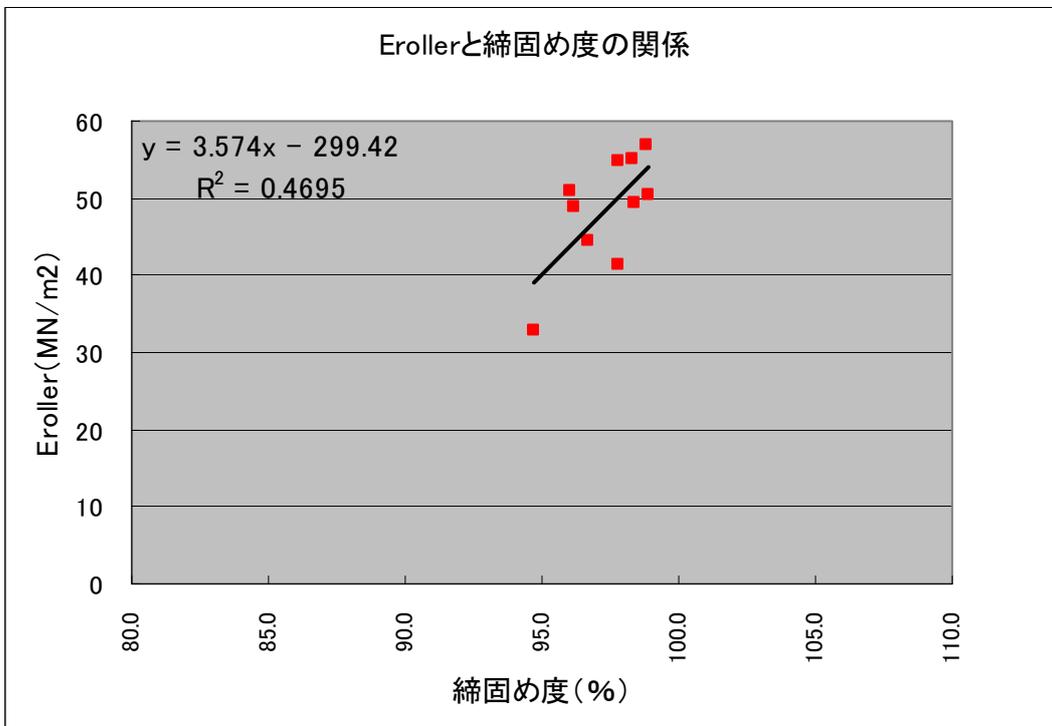


図-5. 17 ピークErollerとコア密度試験による締固め度の関係(基層工)

(2) ピーク $E_{roller}$ とEHFWDの関係

各レーンにおけるピーク $E_{roller}$ とEHFWDの関係を図-5. 18～5. 22に示す。路床置換と全層データの関係からはある程度相関性が認められる。なお、各層とも仕上がり面での値であり、表層は表面温度40℃以下で $\alpha$ 測定後、順次HFWDを測定した。

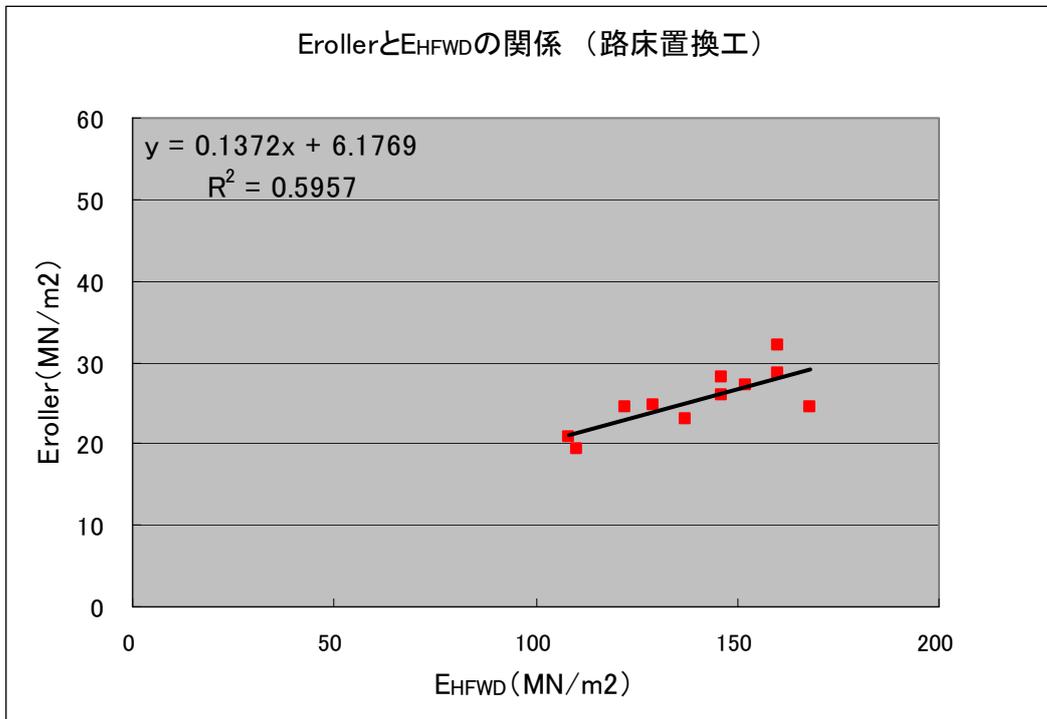


図-5. 18 ピーク $E_{roller}$ とEHFWDの関係(路床置換工)

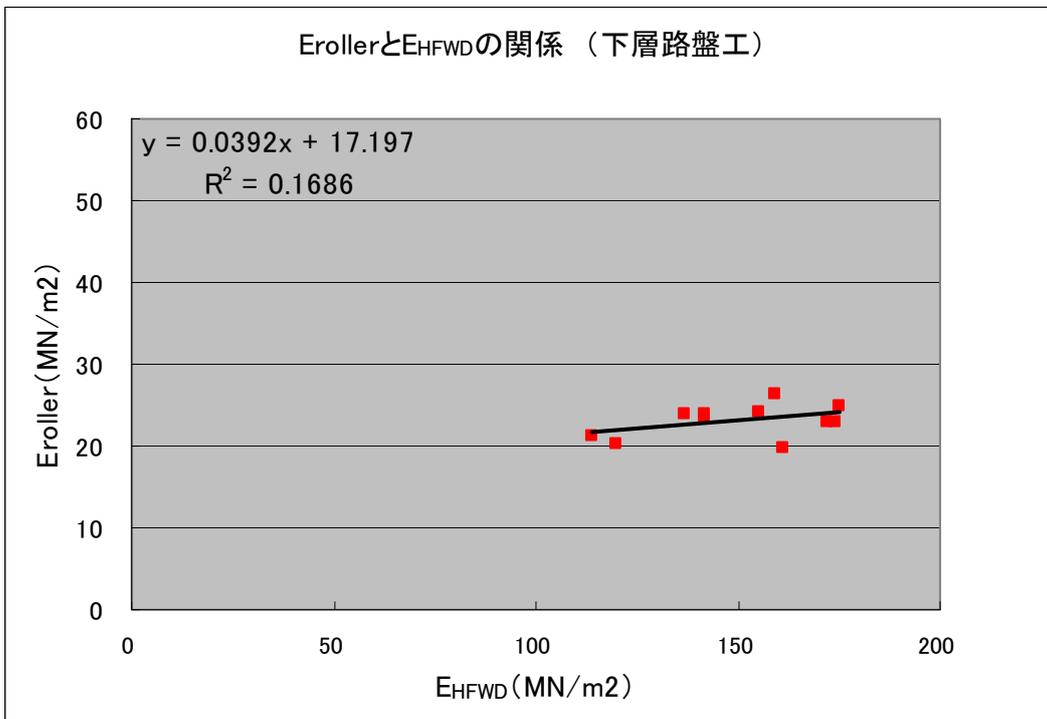


図-5. 19 ピーク $E_{roller}$ とEHFWDの関係(下層路盤工)

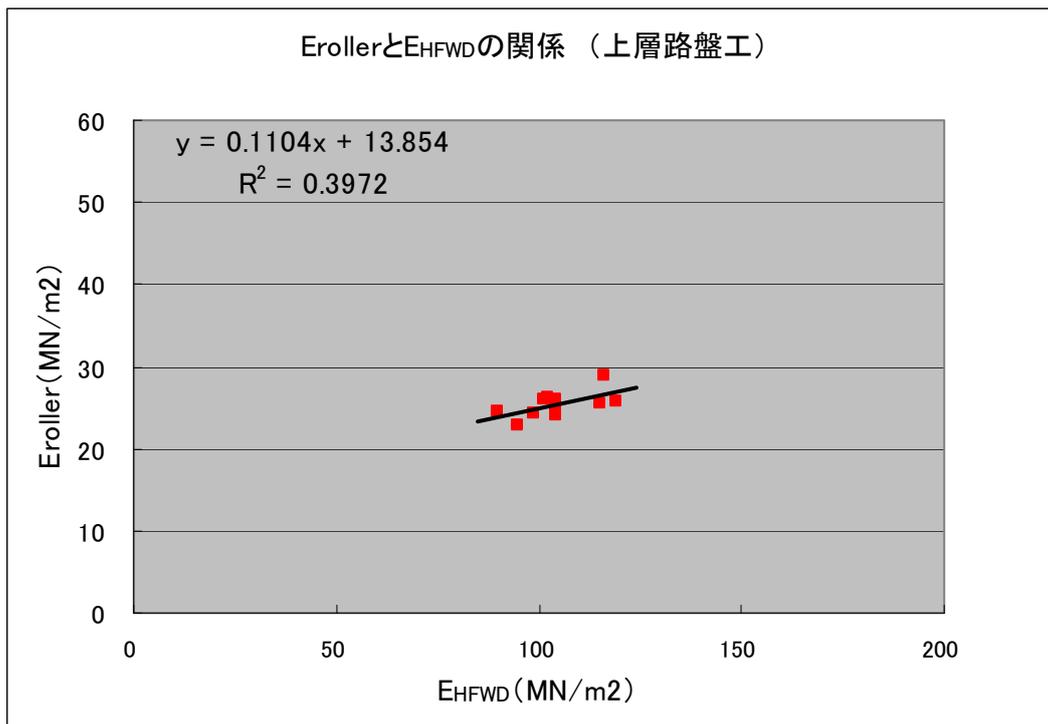


図-5. 20 ピークErollerとEHFWDの関係(上層路盤工)

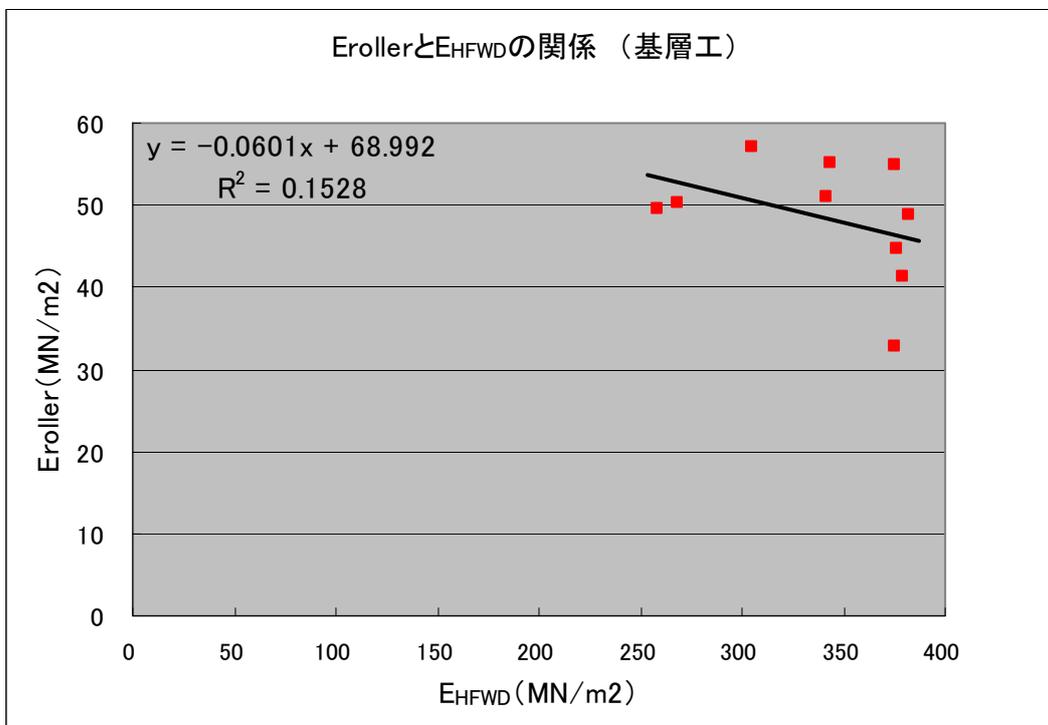


図-5. 21 ピークErollerとEHFWDの関係(基層工)

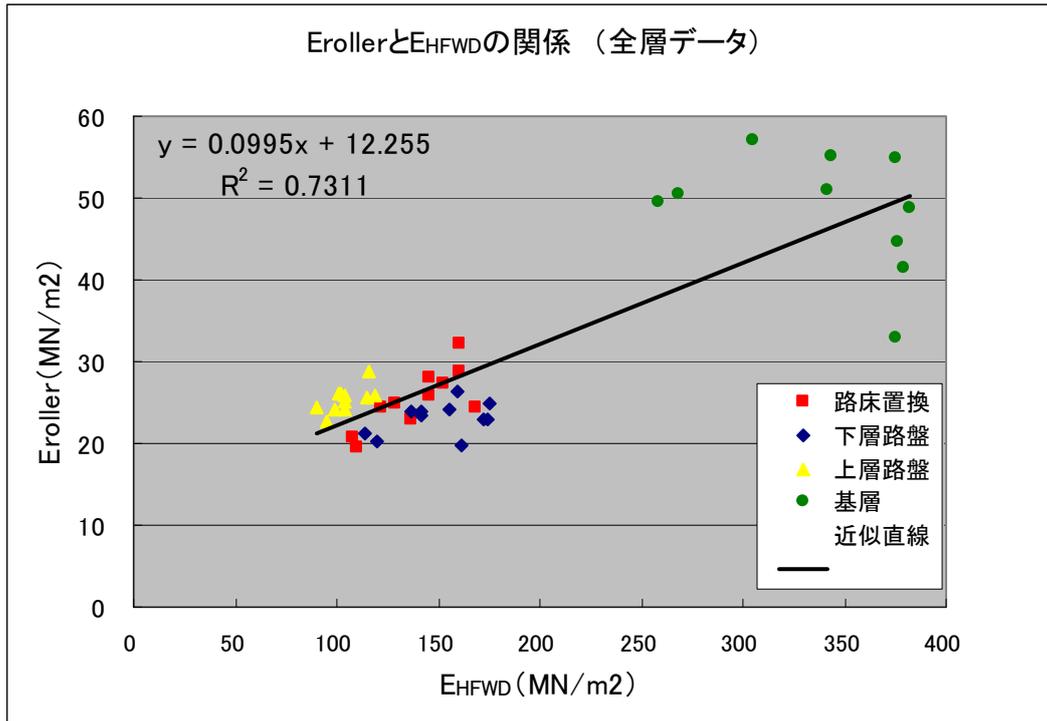


図-5. 22 ピークErollerとEHFWDの関係(全層データ)

(3) ピーク $E_{roller}$ と表面温度, 内部温度の関係(基層)

各レーンにおけるピーク $E_{roller}$ と表面温度, 内部温度の関係を図-5. 23~5. 26に示す。ピーク $E_{roller}$ は低温度時にばらつきが大きく, 温度低下とともに増加する傾向が認められる。また, 通常締固め効果が得られるとして転圧作業を行っている表面温度 $60^{\circ}\text{C}$ 以上の温度領域内ではピーク $E_{roller}$ の示す数値は粒状材と同程度の $20\sim 30\text{MN}/\text{m}^2$ 付近である。

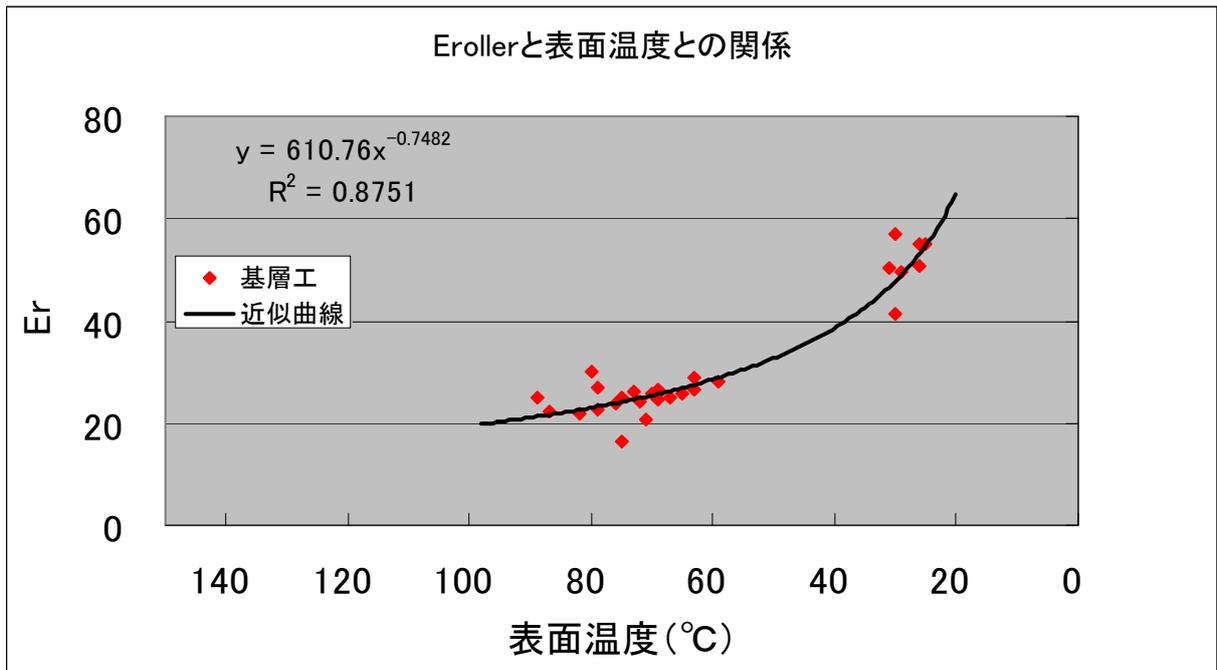


図-5. 23 ピークErollerと表面温度の関係(基層工)

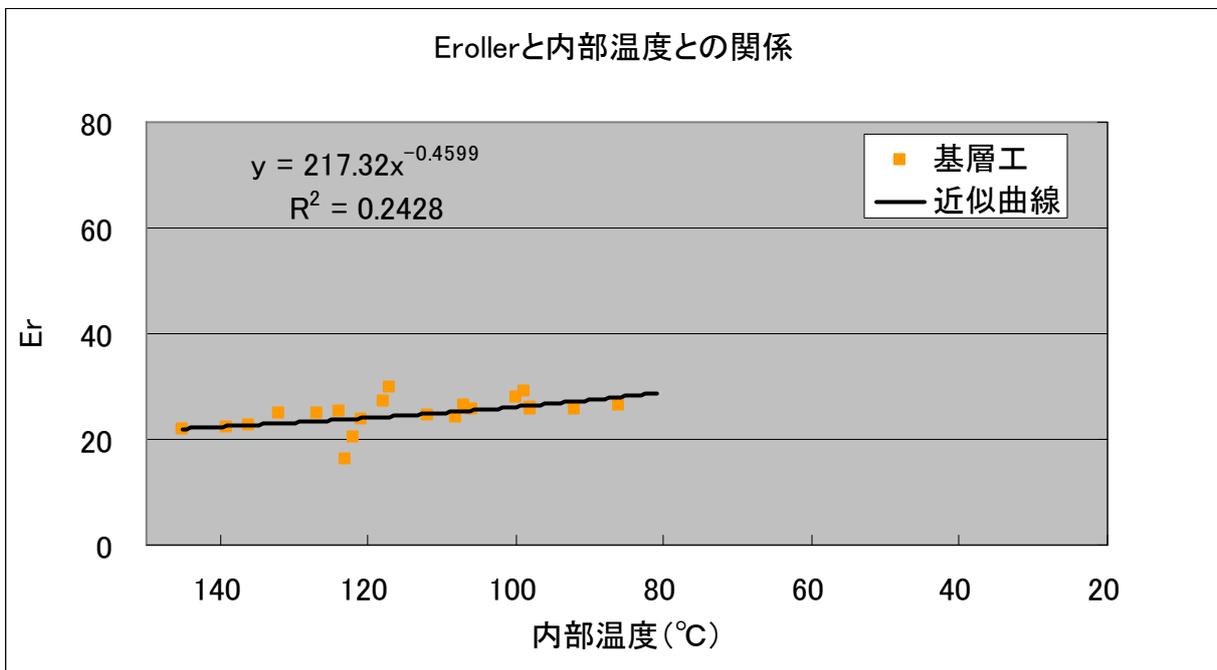


図-5. 24 ピークErollerと内部温度の関係(基層工)

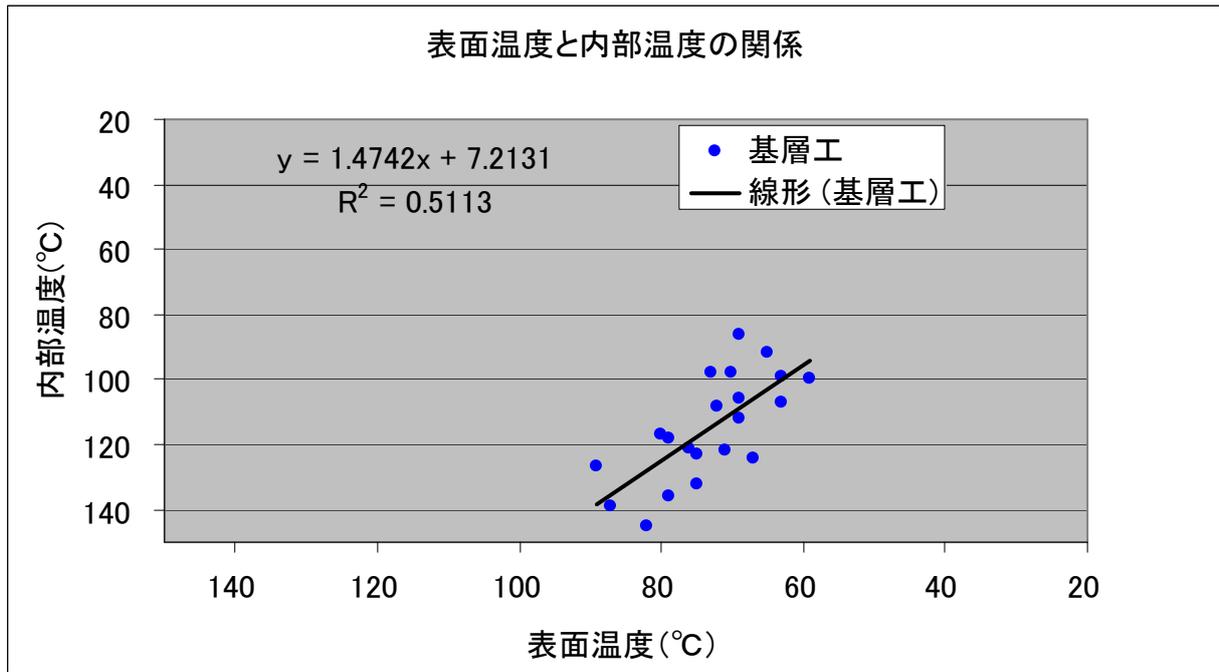


図-5. 25 表面温度と内部温度の関係(基層工)

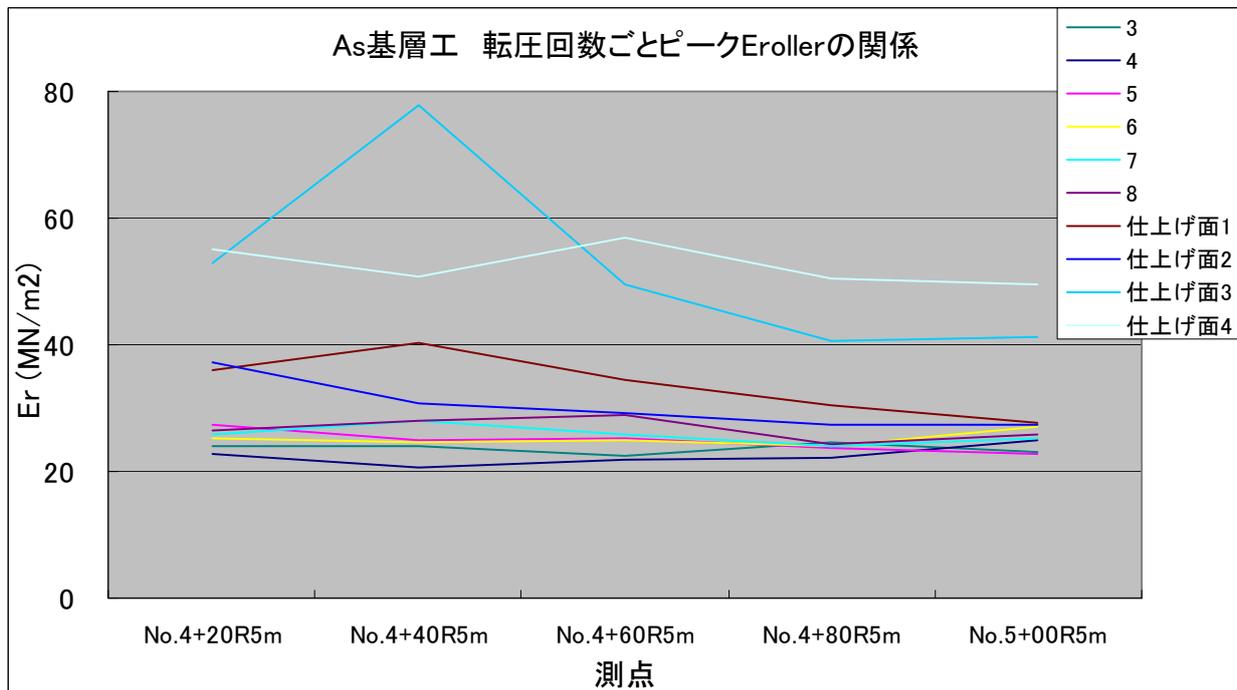


図-5. 26 転圧回数ごとのピークErollerの関係(基層工)

(4) コアとPQI密度計での締固め度の関係(基層)

基層工において仕上がり後採取したコアとPQI密度計での密度から求めた締固め度の関係を図-5. 27に示す。

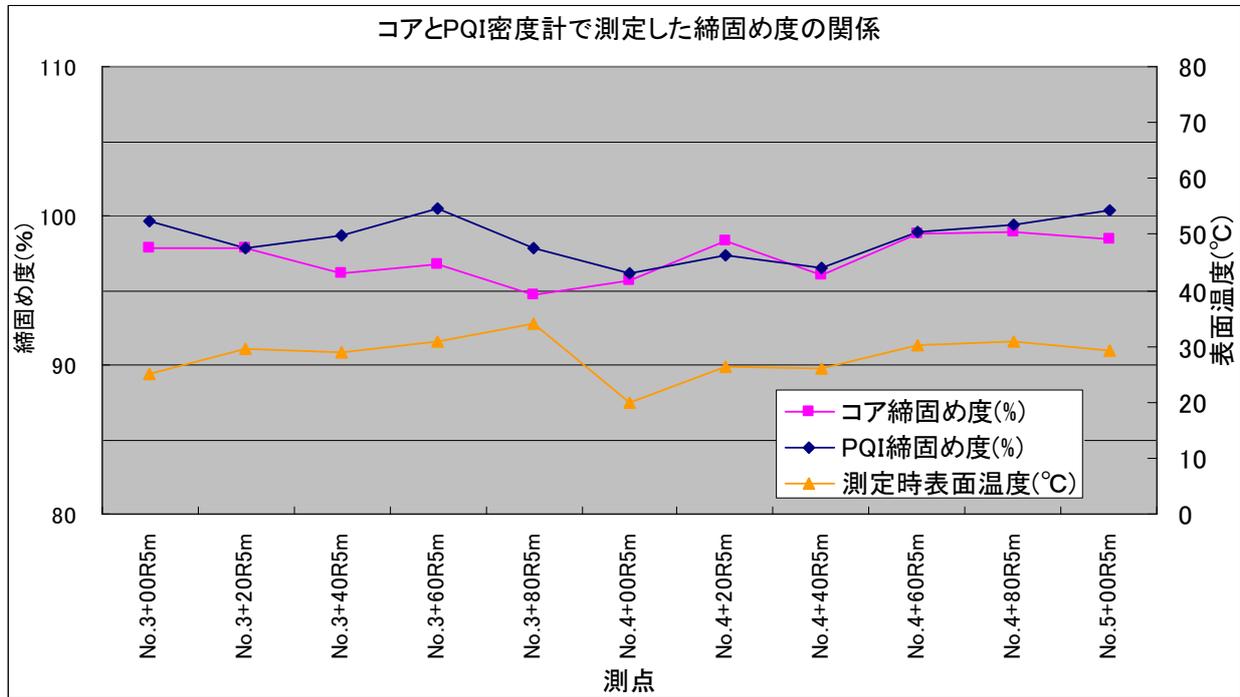


図-5. 27 コアとPQI密度計から求めた締固め度の関係(基層工)

(5) 路床置換材～上層路盤材のMrと偏差応力 $\sigma_d$ の関係

室内試験における締固め度96%での路床置換材～上層路盤材のMr（レジリエントモデュラス値）と偏差応力 $\sigma_d$ の関係を図-5. 28に示す。

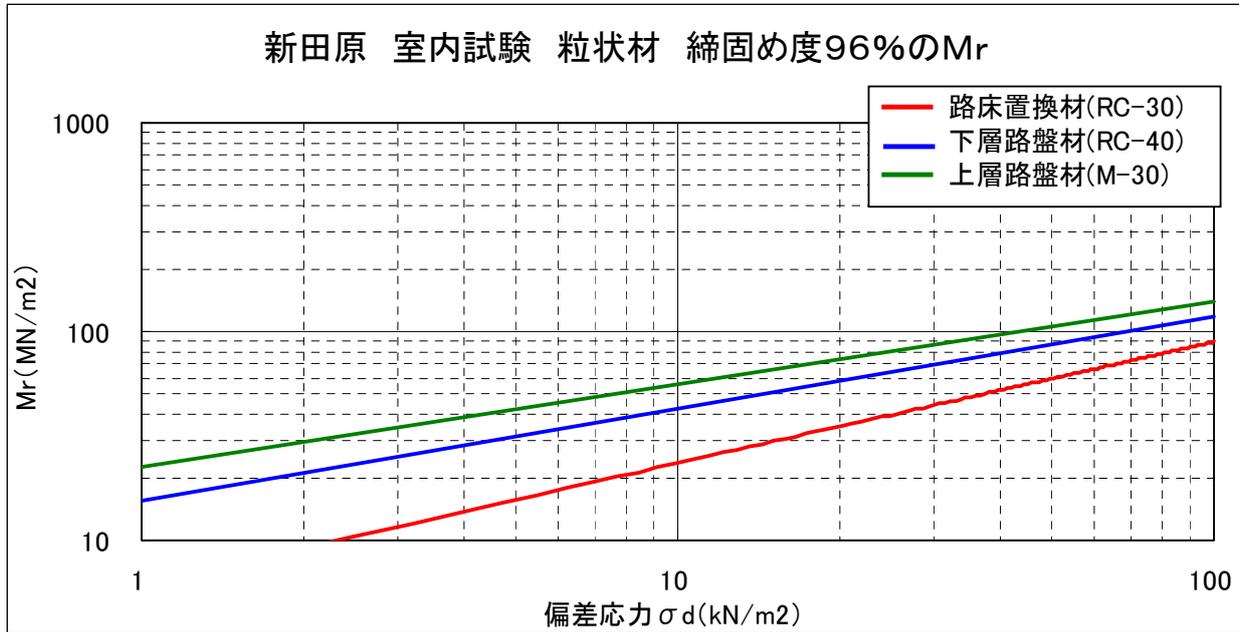


図-5. 28 路床置換材～上層路盤材のMrと偏差応力 $\sigma_d$ の関係

(6) 現場データの各種比較

現場採取データを各種比較したものを図-5. 29～5. 33に示す。

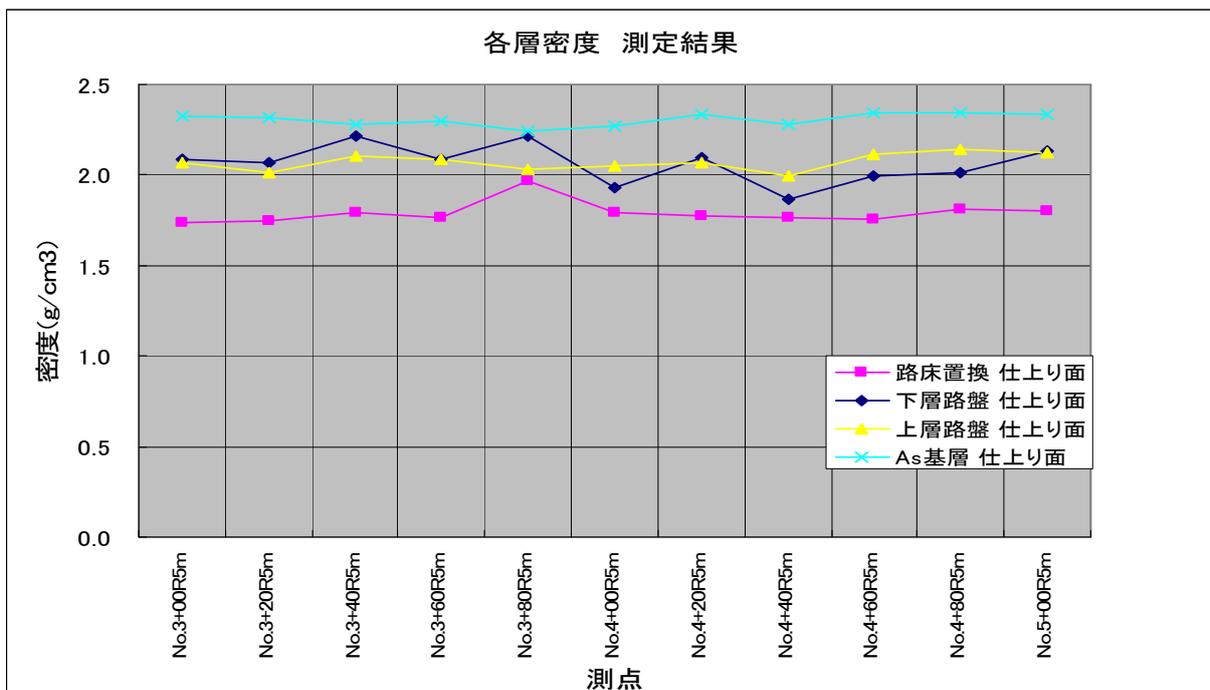


図-5. 29 測線上の各層仕上がり面での密度

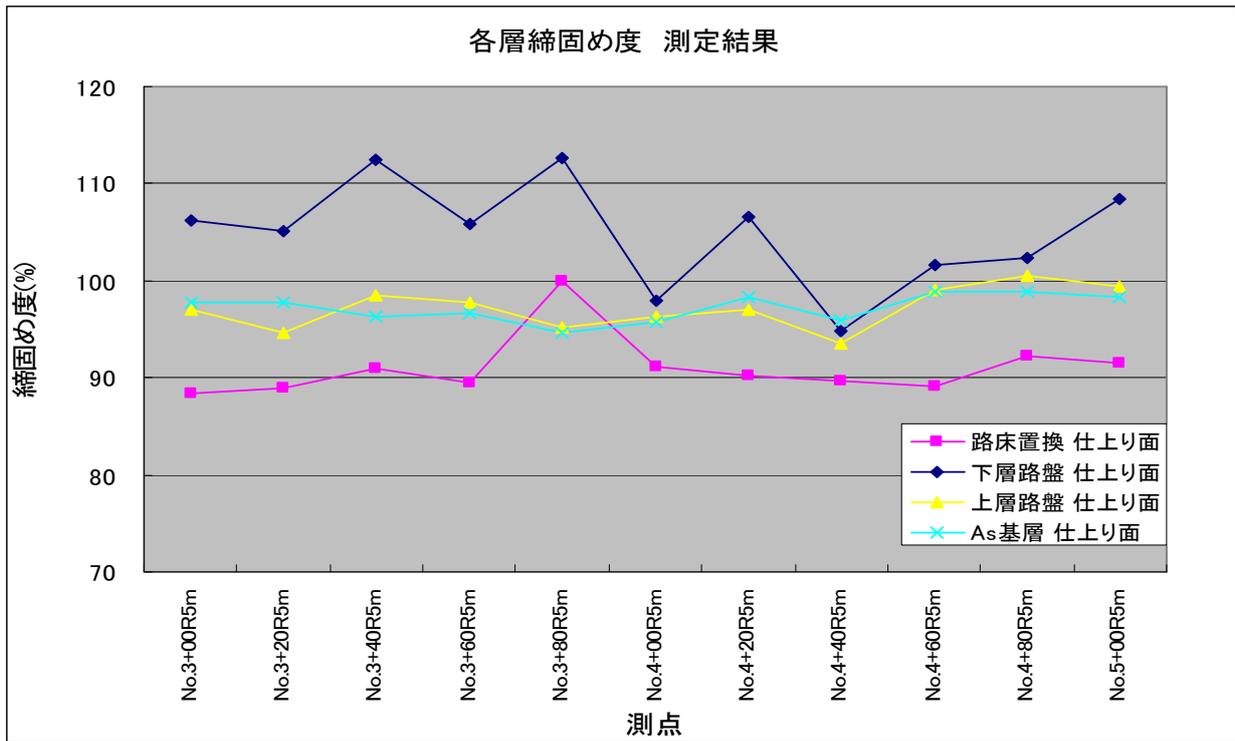


図-5. 30 測線上の各層仕上がり面での締固め度

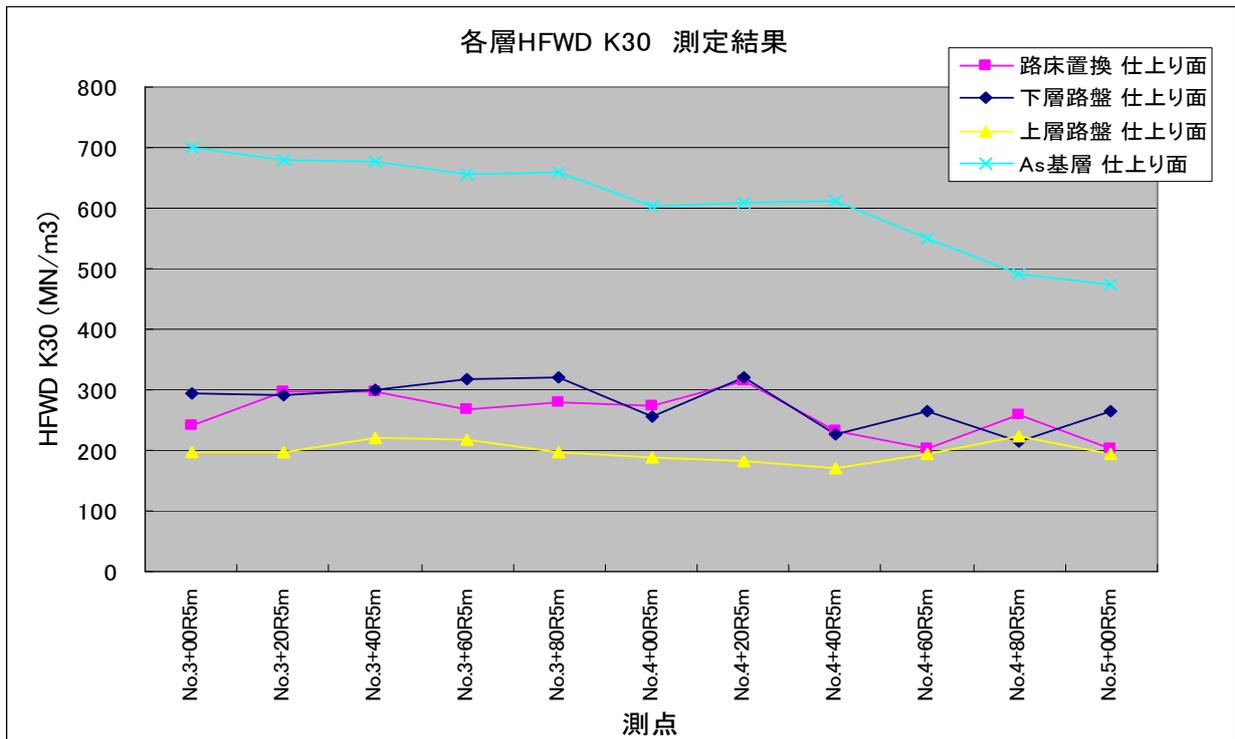


図-5. 31 測線上の各層仕上がり面でのHFWD K30値

路床置換と下層路盤がほぼ同じで、上層路盤工が低い結果となった。

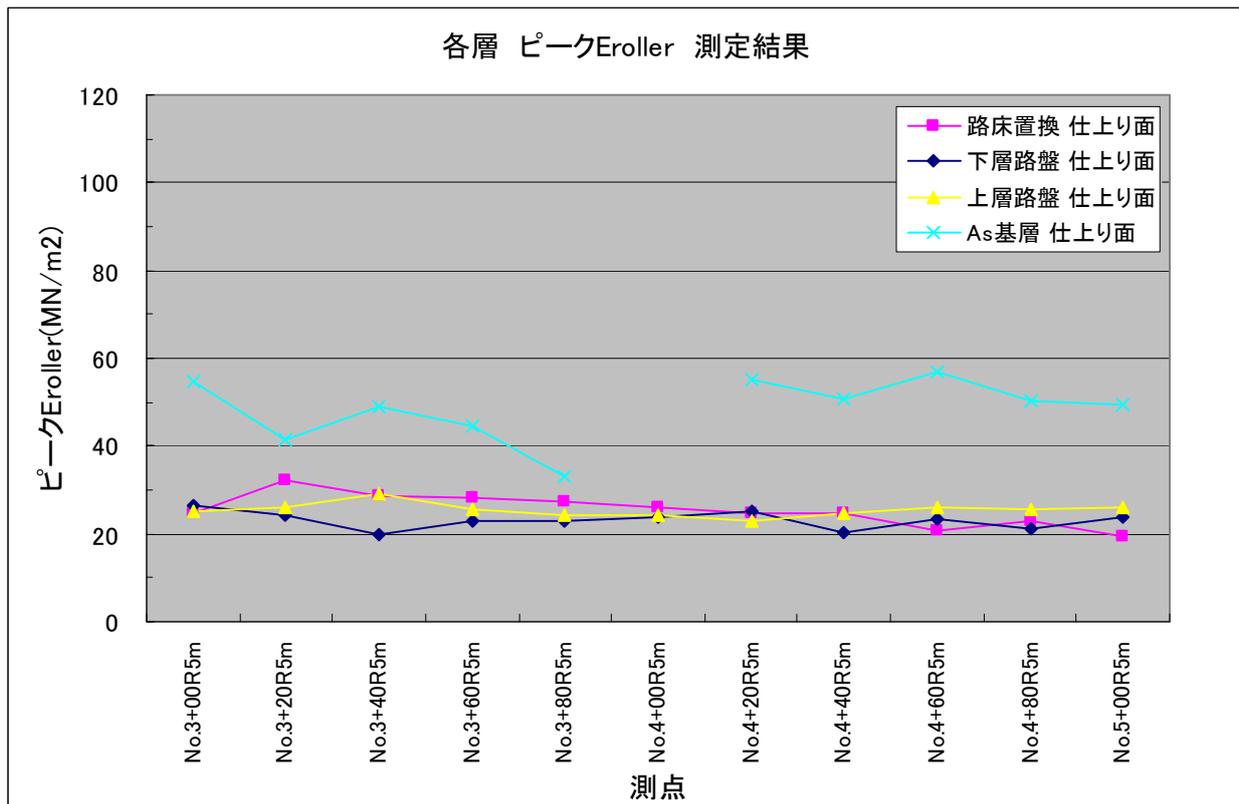


図-5. 32 測線上の各層仕上がり面でのピークEroller値

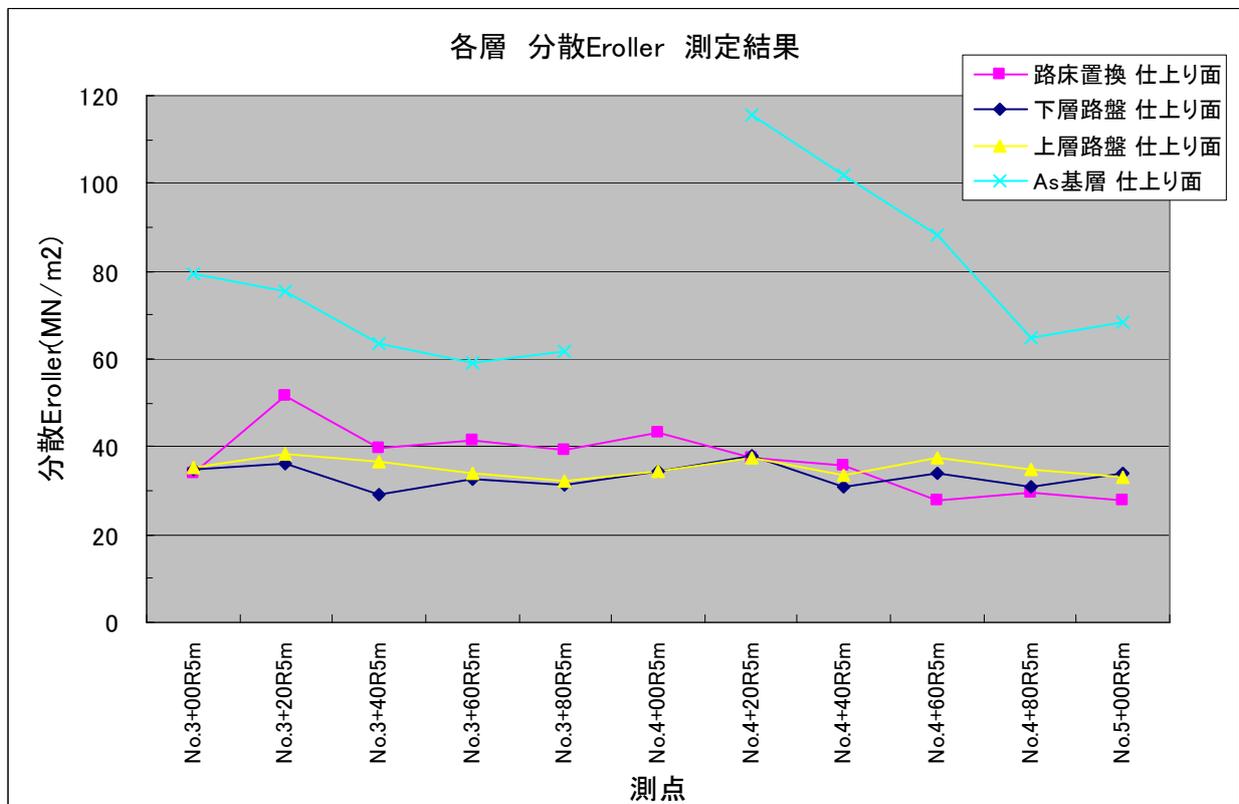


図-5. 33 測線上の各層仕上がり面での分散Eroller値

(7) 粒状材各層での測定回数ごとのErの比較

Erの再現性，連続性をみるため，路床置換工～上層路盤工における測線上で計測したすべての値を測定回数ごとにプロットしたものを図-5. 34～5. 36に示す。

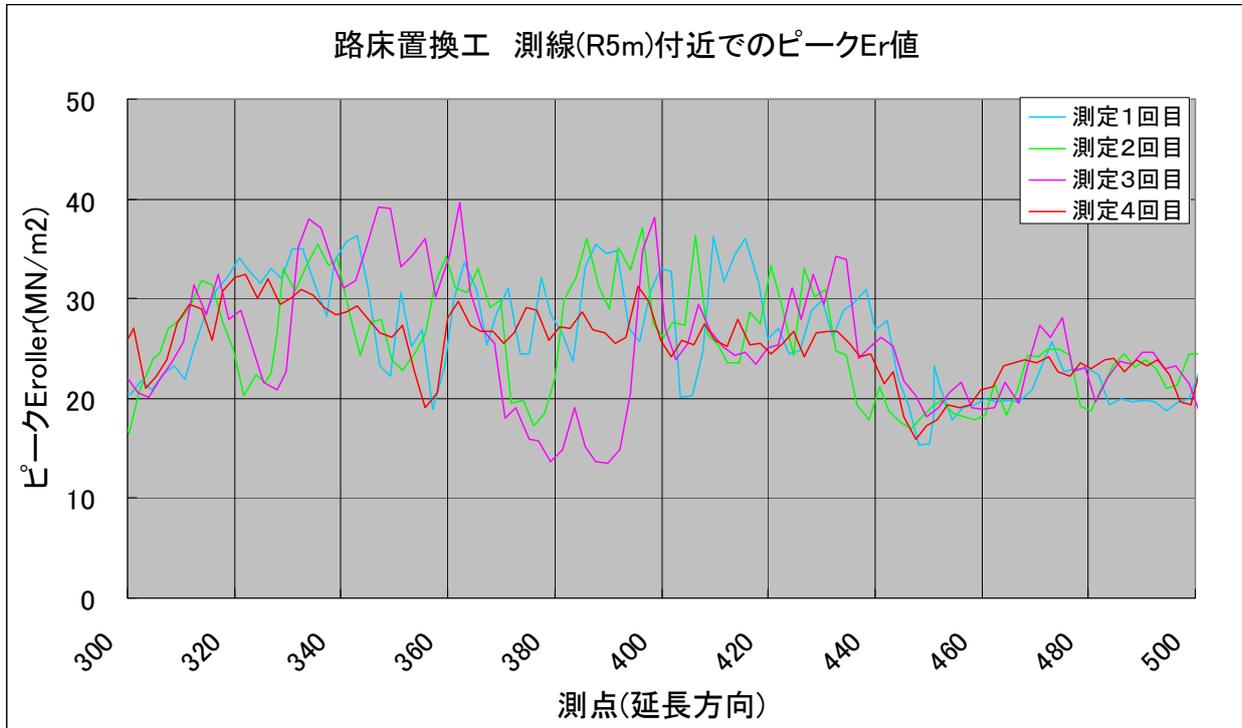


図-5. 34 路床置換工 測定各回毎のピークEroller値(全データ)

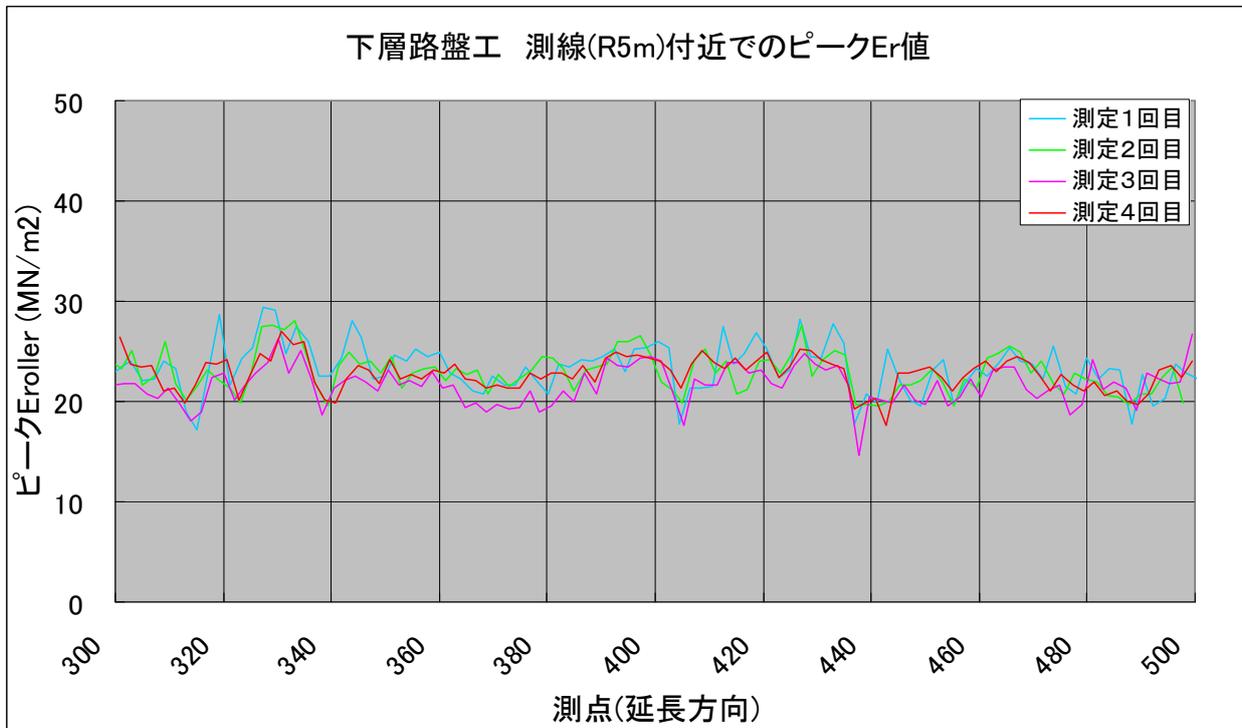


図-5. 35 下層路盤工 測定各回毎のピークEroller値(全データ)

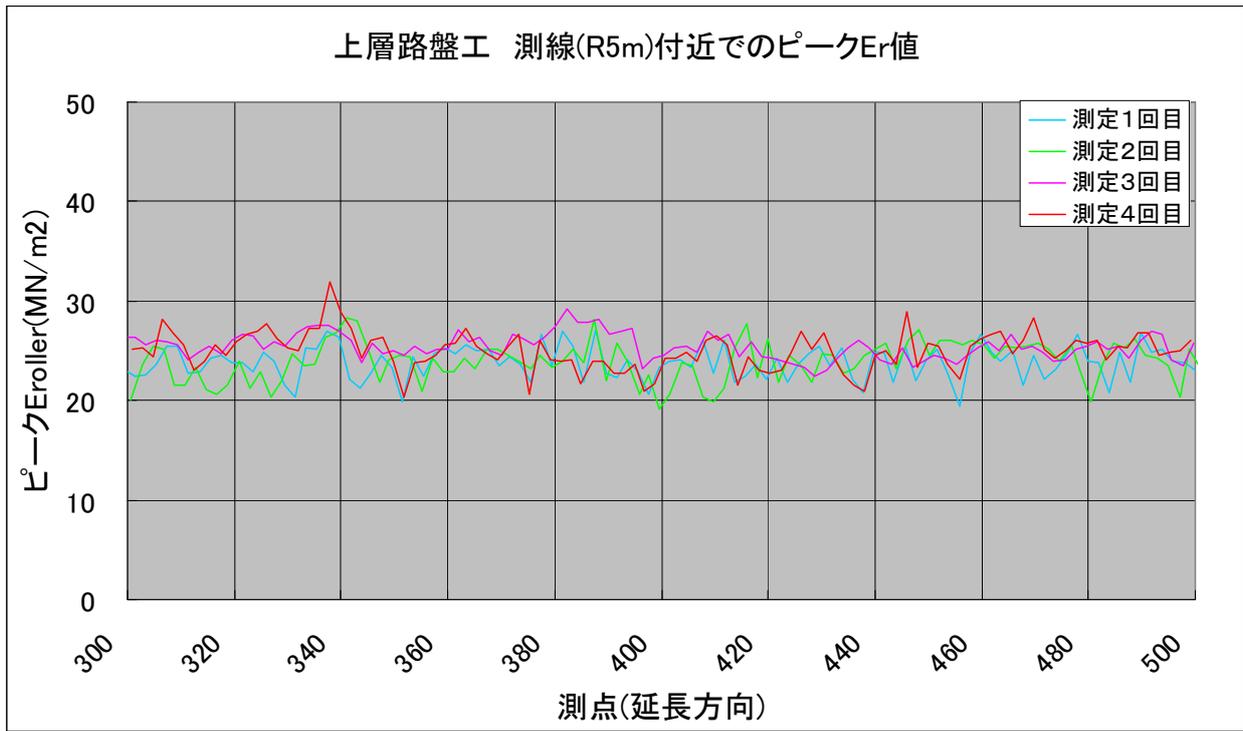


図-5. 36 上層路盤工 測定各回毎のピークEr値(全データ)

(8) 基層仕上がり面での  $E_r$

基層工仕上がり後における測線上で計測したすべてのピークと分散それぞれの  $E_r$  値をプロットしたものを図-5. 37, 5. 38に示す。

施工の進捗に合わせて計測したため、最初に起点側を、次に終点側の1往復の計測を行い、 $E_r$ が低かったためもう一度2往復目を計測したものである。

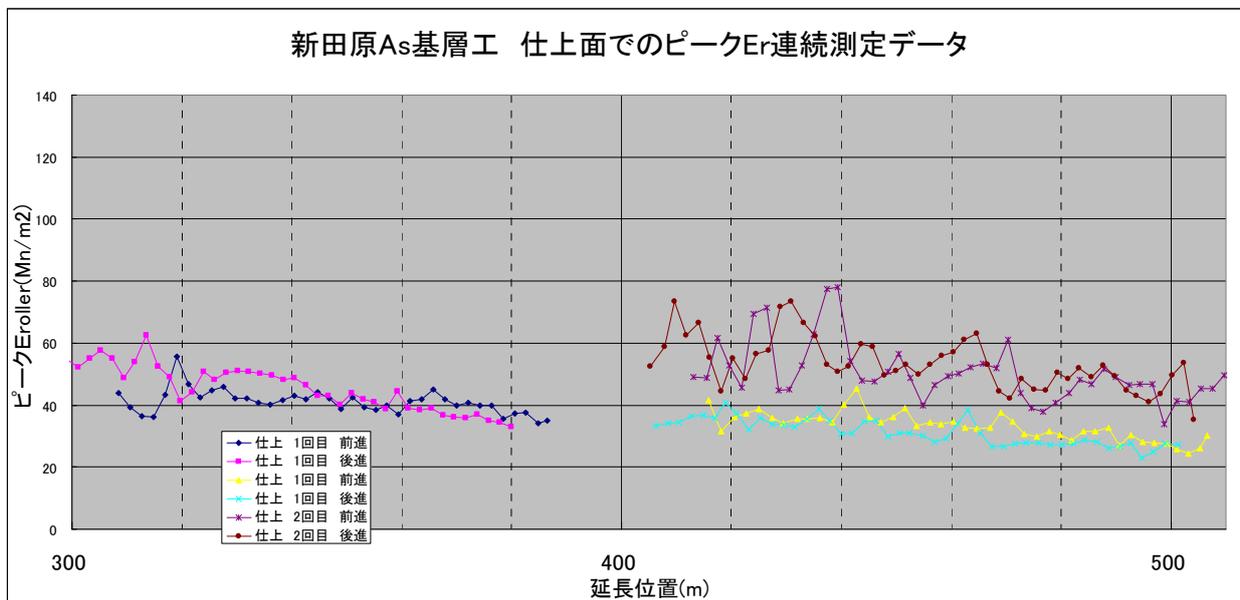


図-5. 37 基層工 仕上がり後のピークEroller値(全データ)

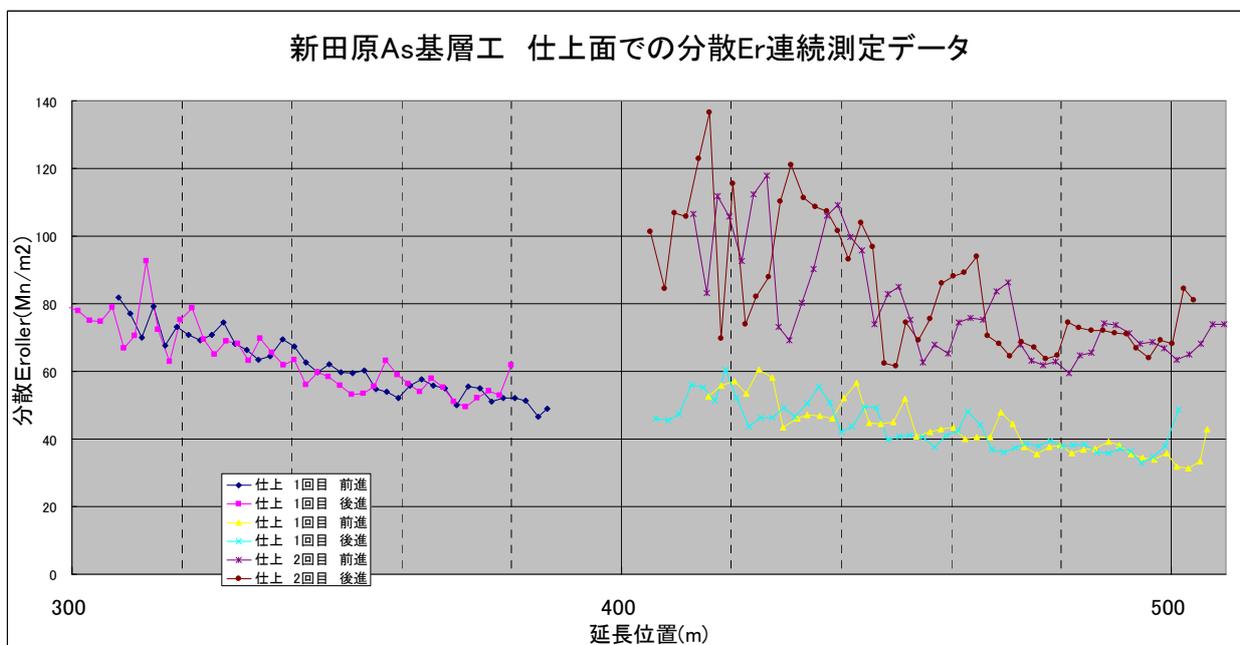


図-5. 38 基層工 仕上がり後の分散Eroller値(全データ)

## 5. 6 5章のまとめ

測定結果及びデータ比較より考えられることを列記する。

- (1) 路床置換～上層路盤工の粒状材を材料とする層で、Eroller値（ここではピーク）と相関があると思われるのはHFWDの値だけであった。

この結果は昨年度の久喜での試験施工と同様である。

しかし、今回のHFWDの数値は路床＝下層＞上層であり、下部層よりも上部の層が通常大きな値を示すこととは違う結果となった。

さらにErollerの数値は、3層の各値に大きな差異は認められない。これは今後精査が必要と思われる。

- (2) Erは、同じところを再度測定した場合、同じ結果となるか。

Erの再現性は、路床置換工では各測定回でばらつきが大きかったものが、上部の2層では各測定回でのばらつきが小さくなっている。締固め作業が完了した仕上がり面では測定方法を同一に（前進で測定、アクセル全開にする等）すれば再現性はあるものと思われる。

なお、前進と後進では測定値に「位置ずれ」（位相差）と思われる箇所が見られる。

- (3) A s 層への適用について。

基層仕上がり面でのEr測定では、合材の温度低下が進めば進むほど剛性が上がり、Er値が大きくなりそのばらつきも大きくなる。

表面温度で60℃以上、内部温度で80℃以上の合材温度では剛性が極端に上昇するような傾向は見られなかったことから、この温度範囲においては、温度等のファクターを追加することで $\alpha$ システムが適用できる可能性はあると思われる。

## 6. 振動タイヤコンバインドローラの路盤材への適応性について

舗装工事の効率化，すなわち工期短縮を行うにあたっては，3章から5章で実験的に行った「新しい品質管理手法」を取り入れることによることの他に，施工機械自体の効率化も重要である。国内では従来から舗装工事にはタイヤローラが用いられ，比較的低速（時速3～4 km/h）での施工が主流である。これに対して，海外では振動ローラを用いての舗装転圧も実施され，比較的高速度での舗装転圧も実施されている。舗装材料の違いはあるが国内でも新しい転圧機械を用いての施工の効率化を検討するために，振動コンバインドローラという新しい転圧機械を用いた舗装施工実験を試みた。

### 6. 1 はじめに

近年，中小規模の道路工事では，施工品質の向上に加えて施工コストの縮減が緊急かつ重要な課題となっている。これらの課題に対して，転圧ローラの小型高性能化および視界性を含む安全性の改善改良が進められている。これによって機械台数の低減と輸送費や人件費の縮減を可能にするだけでなく，施工トータルコストとCO<sub>2</sub>排出量の低減による環境負荷の軽減にも寄与できる。転圧ローラの小型高性能の試みとして，振動タイヤコンバインドローラ（以下，振動タイヤコンバインドと称す）を試作した。本機は，小中規模の舗装工事に多用されている振動コンバインドローラの後輪タイヤ内部に振動機構を付加しており，空気タイヤ固有のニーディング締固め効果の飛躍的な向上を狙って開発したものである。本報文では，振動タイヤコンバインドの有効性を確認するため，路盤材料に対する締固め試験，並びに同材料に対する従来機（マカダムローラとタイヤローラの組合せ）との性能比較の結果を以下報告する。

### 6. 2 試験施工実施状況

#### 1) 試験場所および試験日

試験場所：酒井重工業(株) 技術研究所内 試験場

試験日：2008年11月4日

#### 2) 試験状況

試験施工は試験場の既設アスファルト舗装上で実施した。使用材料は粒度調整碎石（最大粒径30mm）である。材料データと含水比と乾燥密度の関係（締固め曲線）を表-6. 1および図-6. 1に示す。

表-6.1 供試材料のデータ

材料区分	第二種建設発生土
土質	細粒分まじり礫
細粒分	$5\% \leq X < 15\%$
砂分	$X \leq 5\%$
最適含水比	7.7%
試験時含水比 (平均)	3.2%~4.0%
基準最大乾燥密度	2.185g/cm <sup>3</sup>

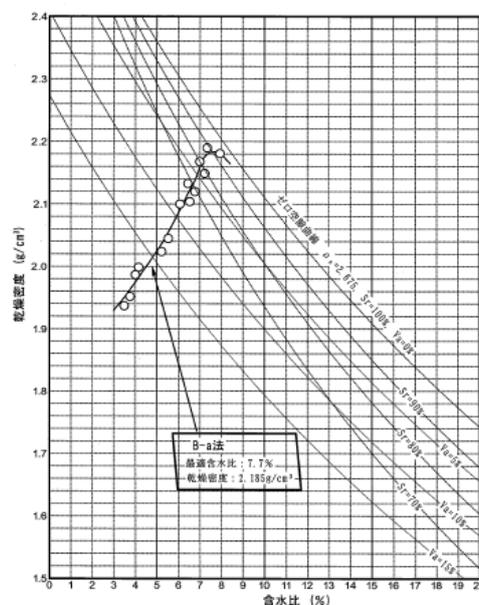


図-6.1 含水比と乾燥密度の関係

試験工区の概要を図2に示す。供試材料を各工区にアスファルトフィニッシャ（酒井重工業製PT310型，以下，フィニッシャと称す）にて厚さ10cmに敷均した。工区両端には型枠を設置し，アンカボルトで固定した。1工区では振動タイヤコンバインドとの性能比較を行うために従来転圧ローラを用いた。10トマカダムローラ（酒井重工業製R2-1型，以下，マカダムと称す）と15トタイヤローラ（酒井重工業製TZ701型，以下，タイヤと称す）を組合せて施工した。2工区では振動タイヤコンバインドの前後（両）輪を共に振動させて施工した。3工区ではタイヤ振動だけの効果を見るために振動タイヤコンバインドの後輪（タイヤ）のみ振動して施工した。各工区の転圧パターンを表-6.2に示す。使用したフィニッシャおよび転圧機械を写真-6.1～6.4に，その概略仕様を表-6.3に示す。

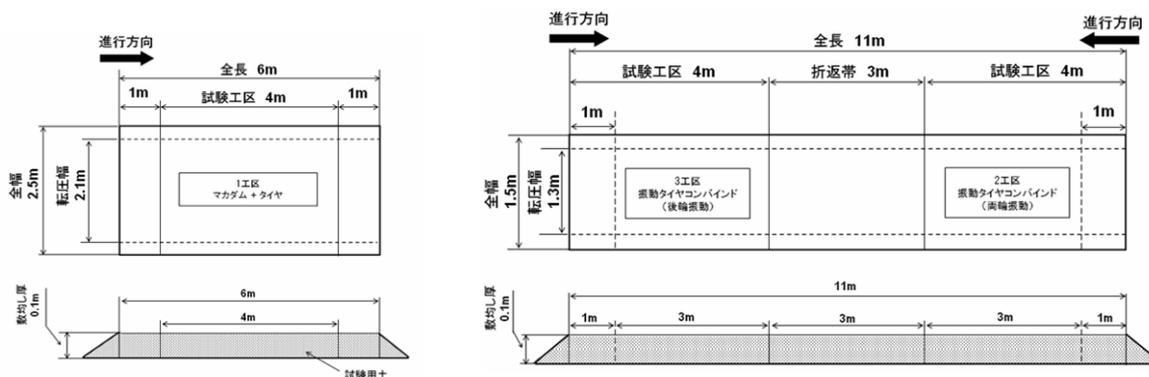


図-6.2 試験工区の概要

表-6. 2 各工区の転圧パターン

転圧回数 (回)		1工区	2工区	3工区
1～4	計8	マカダム	振動タイヤコンバインド 前後 (両) 輪振動 <sup>※1</sup>	振動タイヤコンバインド 後輪 (タイヤ) 振動のみ <sup>※1</sup>
5～8				
9～12	計8	タイヤ	—	—
13～16				

※1 : 2工区では後輪 (タイヤ) から進入し, 3工区では前輪 (ロール) から進入。



写真-6. 1 フィニッシャ敷均し状況



写真-6. 2 マカダム転圧状況



写真-6. 3 タイヤ転圧状況



写真-6. 4 振動タイヤコンバインド外観

表-6. 3 試験施工に使用したフィニッシャおよび各転圧ローラの概略仕様(施工時)

名称	フィニッシャ	マカダム	タイヤ	振動タイヤコンバインド
機種型式	PT310型	R2-2型	TZ701型	GT502 (仮称)
運転質量 (kg)	5,350	9,980	15,000	3,800
全長 (mm)	4,470	5,020	4,985	3,100
全幅 (mm)	3,110	2,100	2,275	1,390
全高 (mm)	1,785	3,060	2,905	1,705
作業幅 (mm)	1,700 ~ 3,100	2,100	2,275	1,300
起振力-高振幅 (前/後輪) (kN)	—	—	—	26.5 / 34.3
振動数-高振幅 (前/後輪) (Hz)	—	—	—	55 / 41
振幅-高振幅 (前/後輪) (mm)	—	—	—	0.35 / 0.70
散水タンク (L)	—	680	4,000	300

### 3) 測定項目

試験では締固め度と沈下量の測定、および転圧後路面の目視観察を行った(表-6. 4)。各測定は、敷均し後及び転圧4回後と8回後に行った。但し、1工区ではタイヤ4回後と8回後(通算12, 16回後)にも実施した。

表-6. 4 測定項目と試験方法等

項目		試験方法	備考
締固め度	%	砂置換法によって締固め密度測定後、締固め度を算出	93%以上
沈下量	cm	各転圧回数毎の沈下量をランダムに3箇所計測	—
目視観察	—	タイヤマーク、ヘアークラック等の路面の状態を観察	—

## 6. 3 試験結果

### (1) 締固め密度の結果

各工区の締固め度を図-6. 3に示す。従来ローラの1工区と振動タイヤコンバインド(両輪振動)の2工区は、締固め基準93%を満足した。しかし、振動タイヤコンバインドの後輪(タイヤ)のみを振動した3工区では、既定値を満足しなかった。1工区の締固め度は、2工区のそれより若干低い。2工区の振動タイヤコンバインド(両輪振動)の締固め結果は、転圧回数8回にも拘わらず、1工区の転圧16回後の結果以上であった。また、3工区は転圧不足と言える。

これらのことより、運転質量4tの振動タイヤコンバインドは、従来転圧ローラ2台の組合せと同等以上の締固め能力があることが明らかになった。

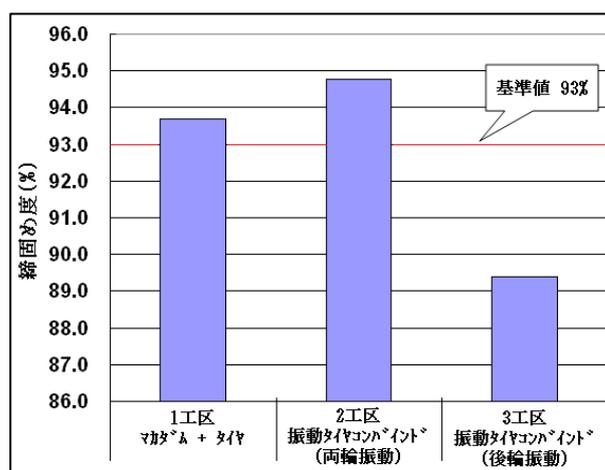


図-6. 3 各工区の締固め度

(2) 沈下量の結果

各工区の転圧後の沈下量を図-6. 4 に示す。1工区では、初期転圧時のマカダムによる沈下量が最大であった。これは、転圧中に観察された材料の流動と押出し（後述）に関連すると考えられる。一方、2、3工区では材料の押出しと流動は観察されず、締固めが効率的に行われたと言える。

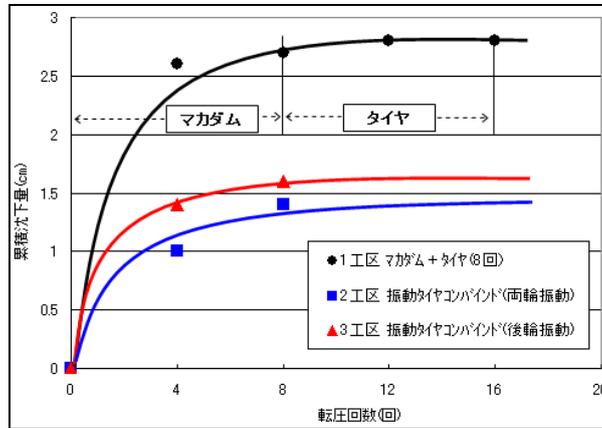


図-6. 4 各工区の沈下量

(3) 転圧路面の観察結果

1工区でのマカダム8回とタイヤ8回転圧後の路面状況を写真-6. 5 に示す。写真 (a) のマカダム8回後の路面には、ヘアークラックが観察された。タイヤ8回転圧後は写真 (b) に示すようにヘアークラックが接着されタイヤ固有のニーディング効果が見られる。なお試験中、供試土の含水比は最適含水比より乾燥側 (3.2~4.0%) であり、クラックの発生しやすい状況であったことを付記する。

2工区での振動タイヤコンバインド（両輪振動）の4回と8回転圧後の路面状況を写真-6. 6 に示す。

(a) の4回および (b) の8回転圧後においてもヘアークラックは確認されなかった。

3工区での振動タイヤコンバインド（後輪振動）の4回と8回転圧後の路面状況を写真-6. 7 に示す。4回転圧時までは若干ヘアークラックが発生（写真-6. 7 (a)）したが、全体的には非常に滑らかな表面に仕上がった。8回後にはヘアークラックも消滅（写真-6. 6 (b)）した。



(a)マカダム8回後 (b)タイヤ8回後

写真-6. 5 1工区転圧後の路面状況



(a)両輪振動4回後 (b)両輪振動8回後

写真-6.6 2工区転圧後の路面状況



(a)後輪振動4回後 (b)後輪振動8回後

写真-6.7 3工区転圧後の路面状況

材料の押し出し並びにタイヤマーク状態を観察した。1工区ではマカダムによって前後及び側方への材料の流動・押し出し状況が観察された。その後のタイヤ8回転圧後の路面ではタイヤマークは消滅し滑らかに仕上がった。2工区では1工区と比較して押し出しは見られなかったが、8回転圧後の路面にタイヤマークが残った(写真-6.8)。3工区ではタイヤマークや押し出しもなく良好であった。

上述のヘアークラックの発生状況と仕上げ路面の状況を考慮すると、本供試材料と試験条件では、ローラマークや転圧初期に発生したヘアークラックは最終的に後輪(タイヤ)振動の効果により消滅し、滑らかな仕上がりが得られたといえる。これは、従来のマカダムとタイヤの組合せ施工に見られる良好な表面性状と同等と認められる。



写真-6.8 2工区でのタイヤマーク

#### 6.4 6章のまとめ

本章では、振動タイヤコンパインドの有効性を確認するために、路盤材料に対する締固め試験並びに同材料に対する従来機との性能比較試験を行った。振動タイヤコンパインドによる締固めは、本試験施工で用いた路盤材料に対し十分に適応できること、また、従来転圧ローラ2台の組合せと同等、もしくはそれ以上の締固め性能を有するとの結論を得た。また、目視観察によるヘアークラックの抑制効果や良好な締固め試験結

果が検証でき、その有効性を確認した。

参考文献

- 1) 社団法人 日本道路協会：舗装調査試験法便覧，平成 19 年 6 月．

## 7. 舗装工事の効率化に向けて

本研究では、舗装工事の効率化を行うことによって、品質の向上とともに工期短縮を行う事を目指した。3章から6章において、核技術の適用性と効果を検証したが、施工の効率化に関して本章でまとめる。

### 7. 1 新しい施工機械の提案

舗装工事の施工の効率化に関しては、6章でも新しい施工機械の提案とその効果を検証したが、従来のタイヤローラでの施工ではなく、新しい施工機械を用いることによる施工の効率化とその効果を検証することとした。

本章では、舗装工事における振動マカダムローラMW700と振動タイヤローラGW750について、大林道路機械センターで行った試験施工の結果をまとめる。

#### (1) 試験目的

- 1) 端部転圧における、振動マカダムローラMW700の有効性を検証する。
- 2) 二次転圧における振動タイヤローラGW750(振幅2 段)の有効性を検証する。
- 3) 振動マカダムローラMW700と振動タイヤローラGW750の組合せ施工の有効性を検証する。

#### (2) 試験施工概要

- 1) 試験日：2009 年7 月8 日
- 2) 使用材料：再生密粒 (13)
- 3) 天候：曇り時々雨
- 4) 敷きならし機械および転圧ローラ：表-7. 1 を参照

表-7. 1 敷きならし機械と転圧ローラの概略仕様

適用	タイプ	機種名	運転質量
敷きならし	タンバ・バイブ型 アスファルトフィニッシャ	VOGEL 1603-1	17,500 kg
初期転圧	振動マカダムローラ	MW700	8,730 kg
二次転圧	振動タイヤローラ	GW750	9,100 kg
	15t タイヤローラ	T2-1	13,480 kg

#### (3) 試験工区

試験舗装の断面を図-7. 1 に示す。

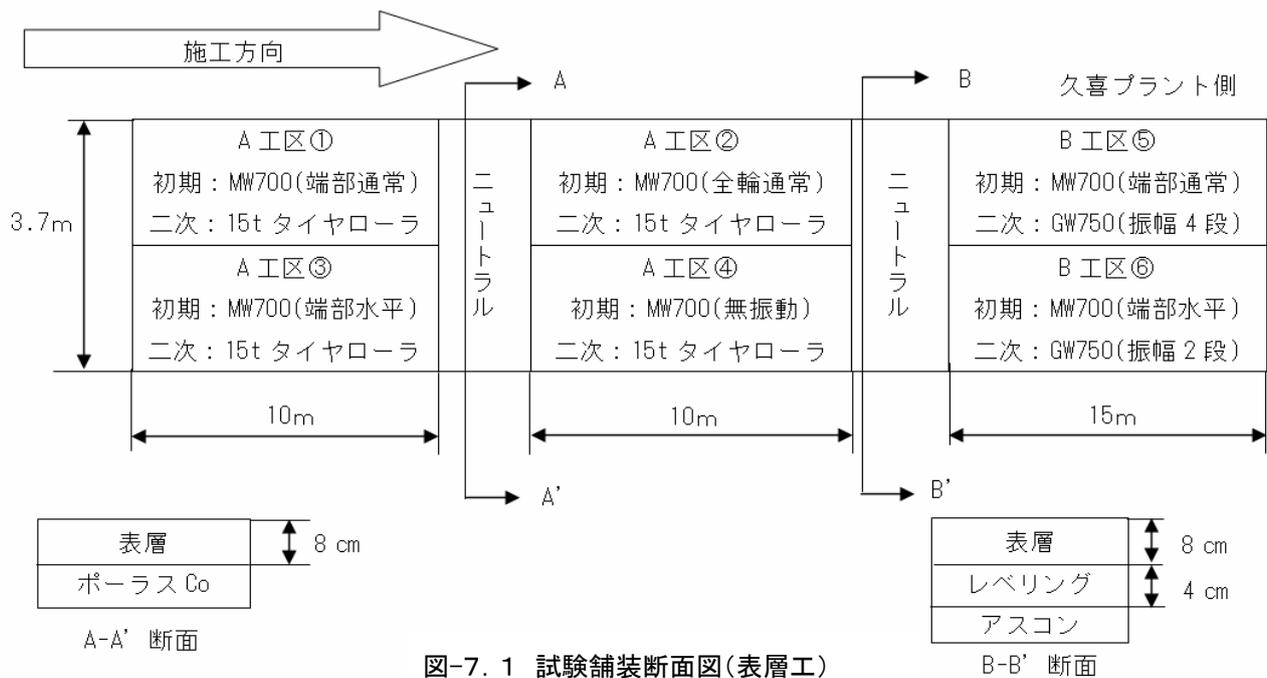


図-7.1 試験舗装断面図(表層工)

#### (4) 試験施工状況

##### 1) 転圧状況

振動マカダムローラの水平振動は通常振動に比べ周囲に及ぼす振動が小さい。一方通常振動では、転圧時の振動が大きく感じられ、過転圧が懸念された。写真-7.1は、振動マカダムローラによる試験施工状況である。



写真-7.1 MW700 での転圧状況

##### 2) 施工温度状況と仕上り厚

図-7.2に施工温度状況を、図-7.3に各工区の仕上り厚を示す。施工温度状況では、レベリング部での温度が低いため以下の考察では表層のみを評価した。また、仕上り厚は、最大で約2.2倍の差であった。

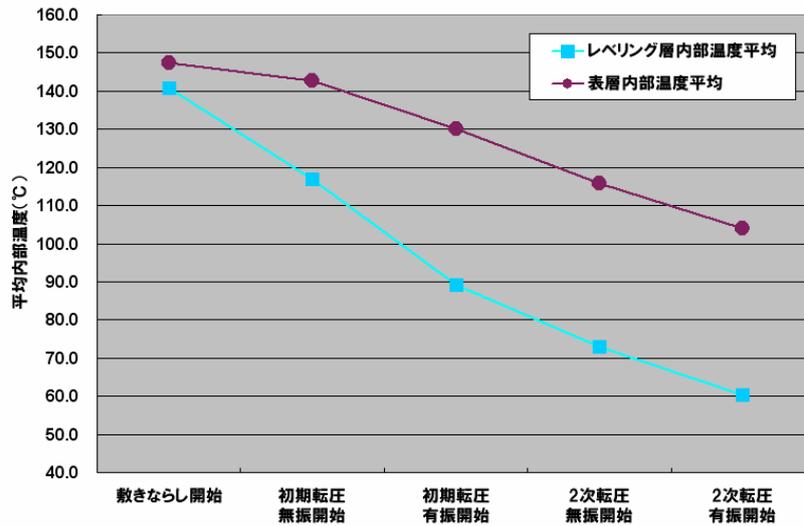


図-7.1 施工温度状況(内部)

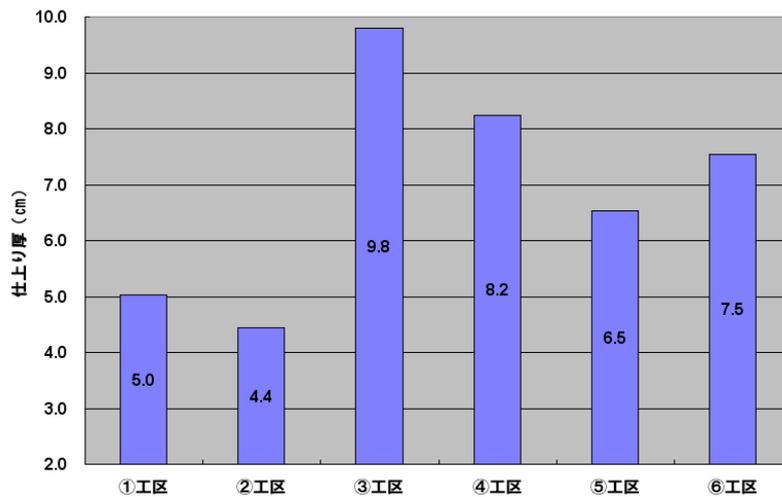


図-7.2 各工区の仕上り厚

(5) 試験施工結果

図-7.3に各工区における端部から中央部までの締固め度の比較を示す。また、表-7.2にその値を示す。全般的に端部(5cm部)が低く中央部(100cm部)が高い傾向である。端部(ジョイント部)の締固めを高めることが舗装全体の品質を向上させるために重要である。中央部では、2工区以外は全て締固め度基準96%を満足した。

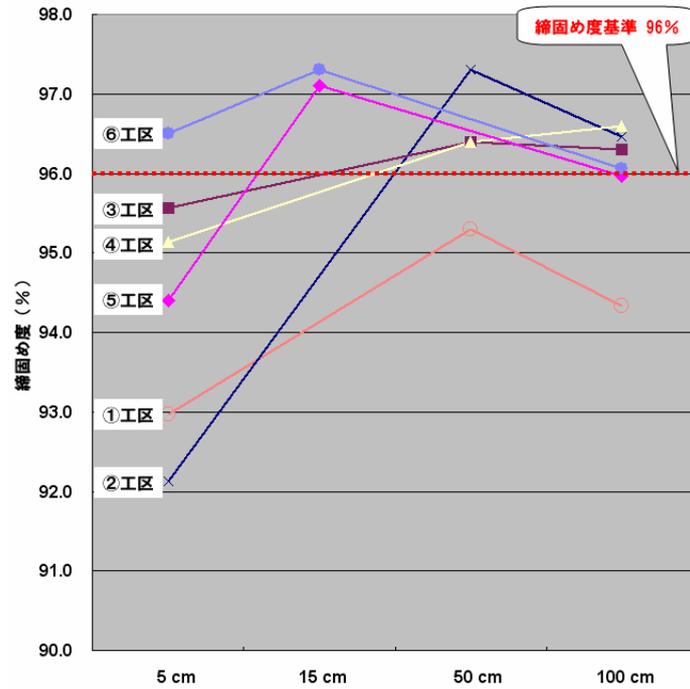


図-7.3 端部からの距離と締固め度の関係

表-7.2 各工区での締固め度

単位：%

転圧パターン		施工端部からのコア採取位置				平均
		5cm	15cm	50cm	100cm	
①工区	初期：MW700 端部通常 二次：15t タイヤローラ	93.0	-	95.3	94.3	94.2
②工区	初期：MW700 全輪通常 二次：15t タイヤローラ	92.1	-	97.3	96.5	95.3
③工区	初期：MW700 端部水平 二次：15t タイヤローラ	95.6	-	96.4	96.3	96.1
④工区	初期：MW700 無振動 二次：15t タイヤローラ	95.1	-	96.4	96.6	96.0
⑤工区	初期：MW700 端部通常 二次：GW750 振幅4段	94.4	97.1	-	96.0	95.8
⑥工区	初期：MW700 端部水平 二次：GW750 振幅2段	96.5	97.3	-	96.1	96.6

(6) 考 察

1) 振動マカダムローラの有効性について

従来機械編成であるマカダムローラとタイヤローラの組合せと振動マカダムローラの端部水平振動（初期転圧に使用）を比較した。図-7.4に各工区の端部（図中5cm）から中央部（図中100cm）でのコア密度による締固め度を示す。前述した通り、施工完了時の仕上り厚さが極端に異なる工区が存在するため、ここでは路盤の支持力が締固めに及ぼす影響を考慮して、振動マカダムローラの端部水平振動で比較的仕上り厚さが均一な③工区と⑥工区を比較に用いた。図より、端部での締固め結果に着目すると、初期転圧で振動マカダムローラにて端部のみ水平振動を使用した工区が従来マカダム+タイヤ工区に比

べ高く、特に⑥工区の二次転圧で振動タイヤローラを使用した工区では、締固め度基準96%を満足しており、中央部と端部がほぼ均一な良好な密度の結果となった。また、中央部の締固め度は、3工区共に96%以上ではほぼ同等と言える。これは、振動マカダムローラの水平振動が端部のみ作用し中央部では無振動仕様であるためと考えられる。

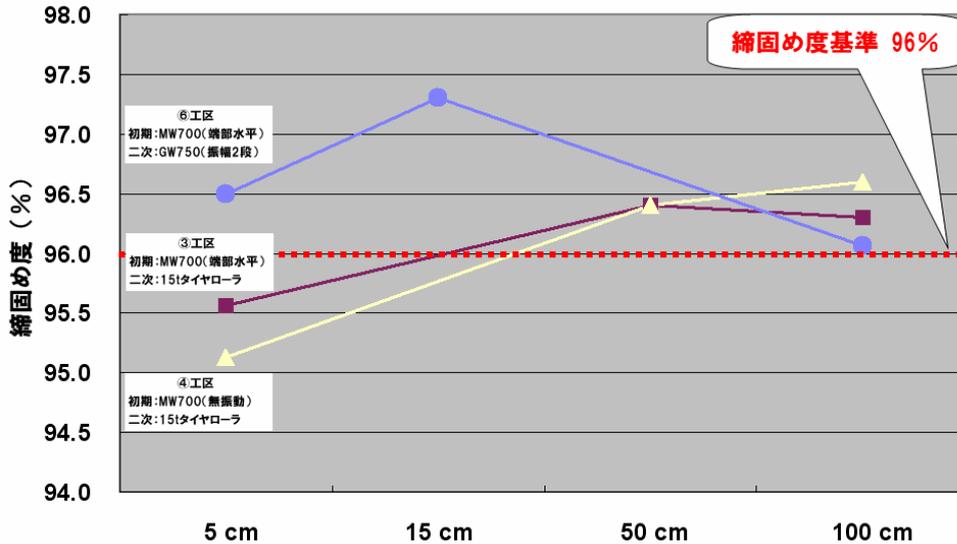


図-7.4 端部からの距離と締固め度の関係

図-7.5に初期転圧を振動マカダムローラにて端部通常振動と端部水平振動で転圧した場合の締固め度の比較を示す。図より、端部通常振動に比べて端部水平振動が高い。また、初期転圧で同じ振動仕様を比べると二次転圧に振動タイヤローラを使用した工区の締固め度が高い。

これらのことより、振動マカダムローラの水平振動は、端部転圧に対して十分に適用可能と考える。

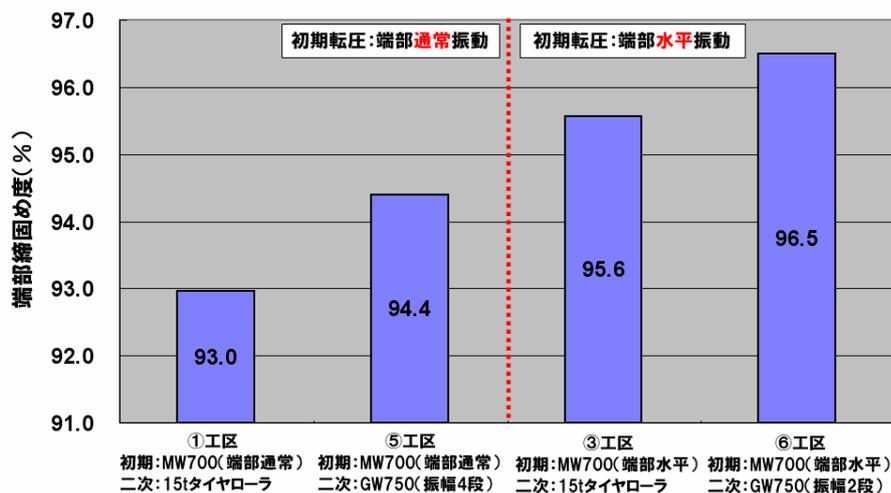


図-7.5 各工区の端部締固め度の比較

2) 振動タイヤローラGW750の有効性について

図-7.6に各転圧工区毎に計測された端部から中央部までの締固め度を平均した舗装面全体の締固め

度を示す。前述した通り、端部のみの締固め度の比較では、二次転圧で振動タイヤローラを使用することにより締固め度が向上することを示したが、舗装面全体の平均締固め度においても同様の傾向が見られた。図より、二次転圧で振動タイヤローラを使用した工区と初期転圧を振動マカダムローラ、二次転圧を15t タイヤローラで転圧した工区で締固め度基準96%を満足している。

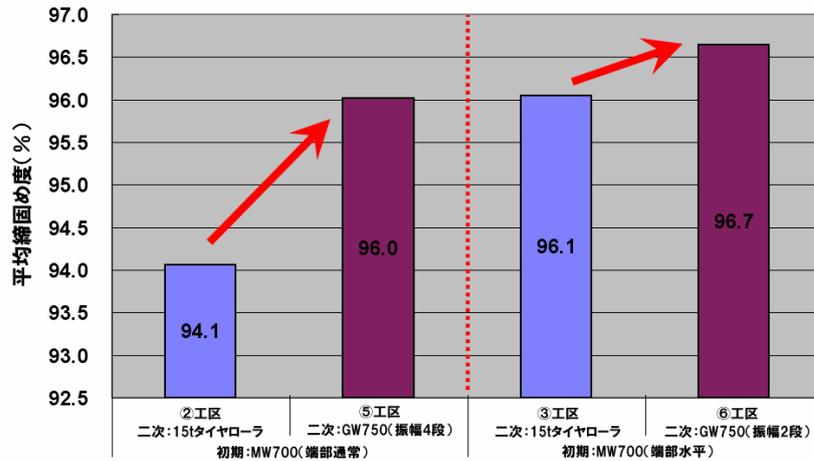


図-7.6 各工区の平均締固め度の比較

一方、各工区の表面性状を確認するためにサンドパッチ法を用いてキメ深さを計測した。写真-7.2 にサンドパッチ計測状況を示す。また、図-7.7 に各工区のキメ深さを示す。

図より、全体的に初期転圧で振動マカダムローラにて端部通常振動を行った工区のキメ深さが小さい。また、二次転圧で振動タイヤローラを使用した工区では、15t タイヤローラに比べキメ深さが小さく、緻密な表面性状を得られている。

これらのことより、振動タイヤローラGW750 は、本転圧材料における締固め度ならびにキメ深さによる表面性状に関して有効であると考えられる。

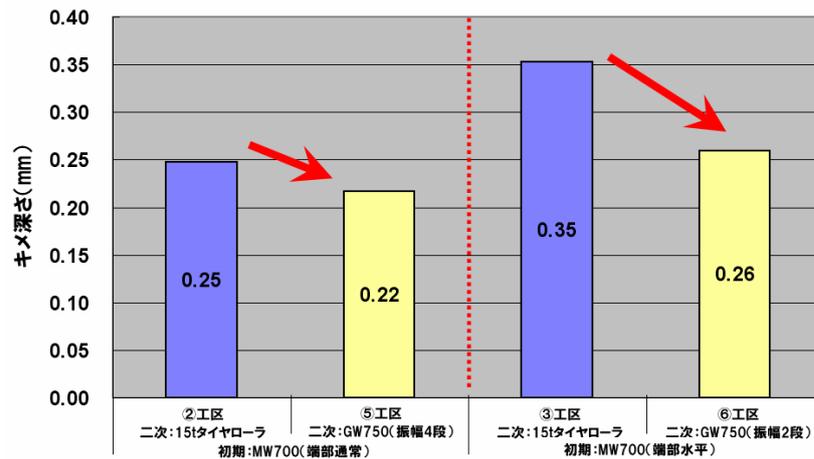


図-7.7 各工区のキメ深さの比較

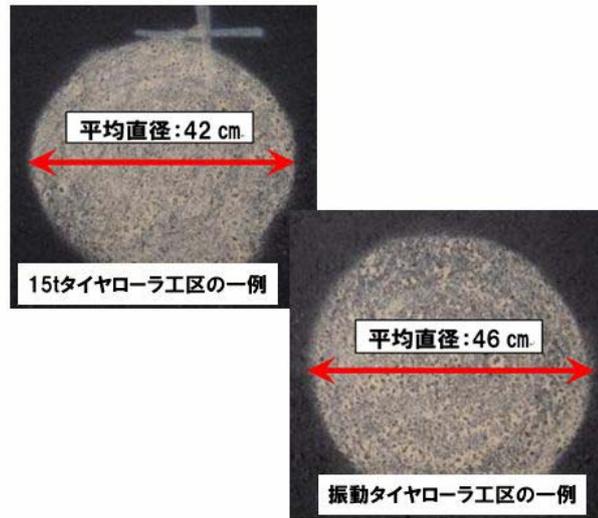


写真-7.2 三度パッチ方によるキメ深さの測定状況

3) 振動マカダムローラMW700 と振動タイヤローラGW750 の組合せ施工の有効性について

前述した通り，端部の締固め度向上には，初期転圧時の振動マカダム水平振動が有効であり，二次転圧で振動タイヤローラを使用することで締固め度を更に向上させる。また，振動タイヤローラの特長として舗装表面のキメが緻密となり良好な表面性状を得ることがわかった。図-7.8に振動マカダムローラ+振動タイヤローラの組合せ施工と従来マカダムローラ+タイヤローラの締固め度の比較を示す。締固め度の値は，端部から中央部までの締固め度を平均した舗装面全体の締固め度を示す。図より，振動マカダムと振動タイヤの組合せ施工は従来マカダム+タイヤ工法に比べ，同等もしくはそれ以上の締固め度が得られることがわかった。

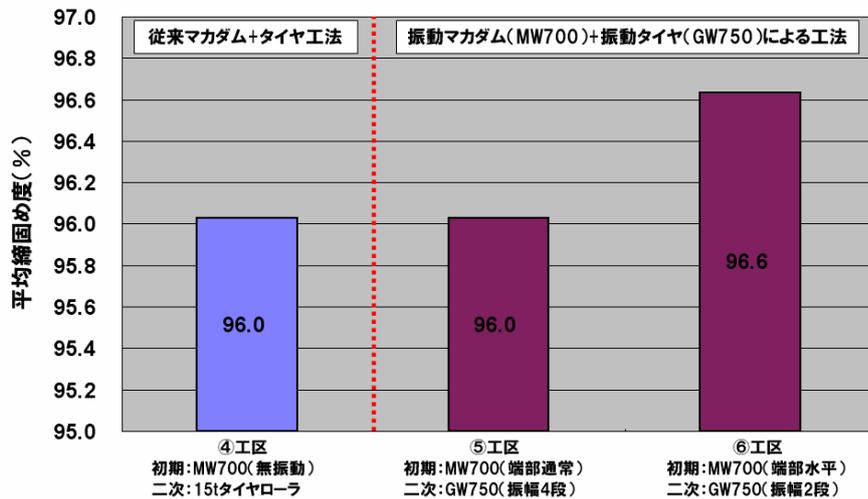


図-7.8 MW700+GW750の組合せ施工の締固め度

<補足説明>

試験施工では，非破壊式で簡易的に密度を計測する電磁波密度計 (PQI) を試験的に用いて，その適用性を検証した。図-7.9にPQIによる締固め度とコア密度による締固め度との関係を示す。PQIによる締固め密度の平均は，コア密度による締固め度に比べ約1%程度高い。その点を考慮すれば，密度管理と

して利用できるものとする。(PQI 測定深さ=40mm)

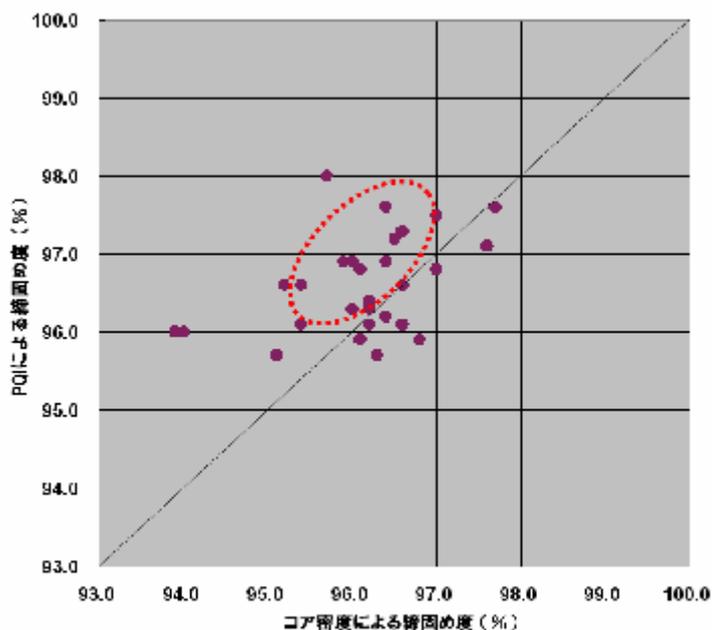


図-7.9 コア密度とPQIによる締固め度の関係

(7) 本節のまとめ

- 1) 振動マカダムローラの水平振動は、従来マカダム+タイヤ工法と比べ、端部の締固め度が向上している。
- 2) 振動マカダムローラの片輪（端部）水平振動と従来マカダム+タイヤ工法の転圧における舗装中央部の締固め度は、何れも締固め度基準96%を満足している。
- 3) 振動マカダムローラの水平振動は、通常振動に比べ端部の締固め度が高い。
- 4) 二次転圧で振動タイヤローラを使用した場合、キメ深さが小さく、良好な表面性状が得られる。
- 5) 端部から中央部までの締固め度の平均値（舗装面全体）は、従来マカダム+タイヤ工法に比べ、振動マカダムローラ（水平振動）と振動タイヤローラの組合せ施工の方が良好であった。
- 6) 本試験施工では、振動マカダムローラの通常振動と15t タイヤもしくは振動タイヤの組合せ施工が従来マカダム+タイヤ工法に比べ締固め度が低く、中央部においても締固め度基準96%を満足していない工区がある。⇒施工時の観察結果より振動伝播が大きく過転圧の影響かは不明。
- 7) 今後は、振動マカダムローラおよび振動タイヤローラの異なる振動モードの組合せが、どのような舗装材料や温度、舗装厚さ等の施工条件に適用可能かの確認が必要と思われる。⇒施工品質や施工効率の向上（例えば転圧回数の低減や作業速度の高速化等）に基づく差別化の方策を検討必要である。

## 7. 2 施工機械の選定による効率化の検討

前節で、新しい施工機械の提案とその効果を検証した。「振動マカダムローラおよび振動タイヤローラの異なる振動モードの組合せ」は非常に有効で、これらを用いることにより従来の施工法に比較して品質が向上することが解った。

ここで、従来と同様な品質を上記の施工機械を組み合わせで施工した場合の効率化に関して机上検討してみることにする。今回の実験では、転圧回数毎の締固め度は取得していない。しかし、上記ローラの通常の施工速度（転圧時の走行速度）は、従来の機械に対して15%程度速い。すなわち、品質の向上とともに施工速度も向上していることとなる。さらにマカダムローラはその構造から、舗装端部の施工に有効であり、この部分の施工は非常に効率化できることとなる。図-7.10によれば同一の転圧回数（6回）でより高い締固め度を得ることができるが、この結果を外挿すると、所定の締固め度を得る転圧回数は、振動マカダムを用いた場合は4回となり、転圧回数は2/3となる。すなわち施工時間の短縮が可能となることが推定される。

よって、新しい施工機械の組み合わせ「振動マカダムローラ+振動タイヤローラ」は、品質向上と20%以上の施工の効率化をもたらすこととなる。

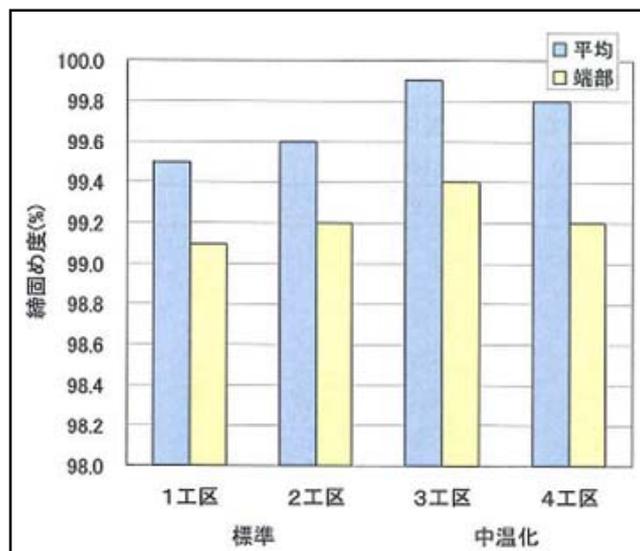


図-7.10 締固め度の比較（青:振動マカダム、黄色:(無振動)マカダム)

### 7. 3 施工管理による効率化の検討

本報告書では、新しい施工管理、特に品質管理において「 $\alpha$ システム（加速度応答法）」を用い、リアルタイムに施工品質を確認する手法の舗装工事への適用を検討してきたが、このシステムは図-7. 1 1のようなシステム構成が考えられる。振動ローラに加速度センサーとその解析装置（ $\alpha$ システム）及びGNSSを用いた盛土の締固め管理システムを搭載している。これらの機器を搭載することにより、予め試験施工にて施工仕様（転圧機械、仕上り厚さ、転圧回数）を決定することで、本施工においては、面的な締固め回数管理を行うことができる。さらに、 $\alpha$ システムの解析装置に予め機械諸元を入力することで「地盤変形係数（ $\alpha$ システムによる変形係数をErollerと称す）」が内部演算により直接取得することができる。取得データは、転圧回数については50cm、Erollerについては2mメッシュごとに得られることとなる。

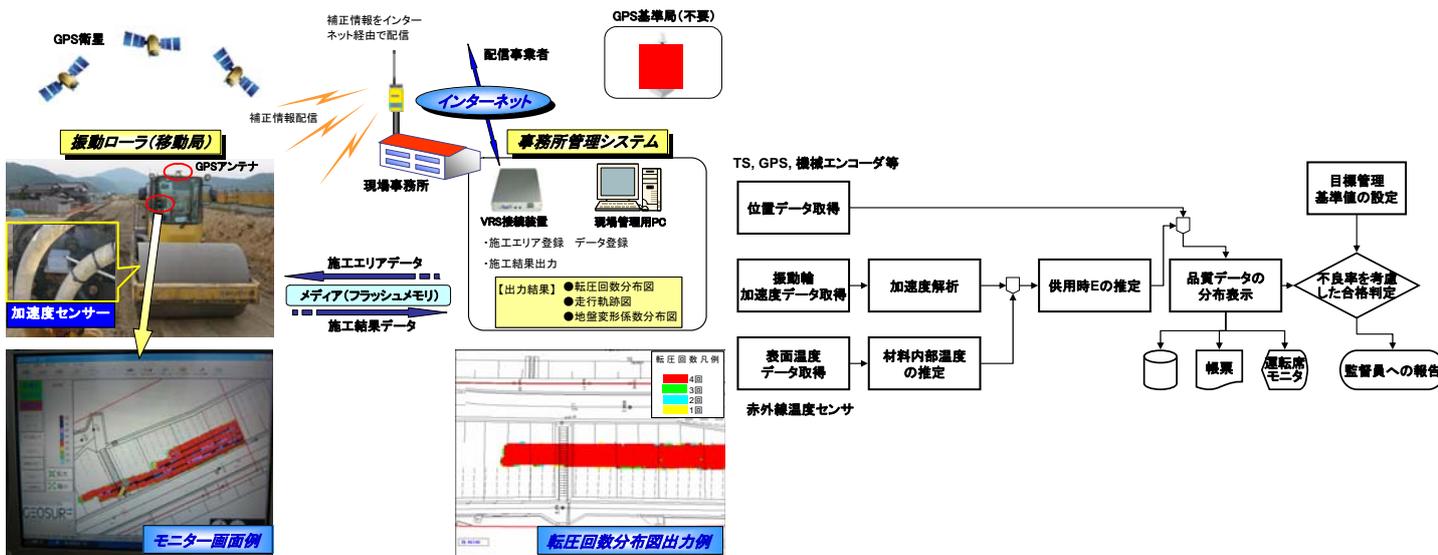


図-7. 11 システム

たとえば、路床盛土の日常管理は、各層ごとに工法規定による転圧回数分布図による管理及びRI計法による締固め度管理は、このシステムを用いることにより低減することが出来、また、仕上り面については、品質管理基準のプルーフローリングに加え、 $\alpha$ システムによる全面的な地盤変形係数分布図にて管理も可能となる。

当システムにより、転圧機械のオペレーターは、施工中は車載PC画面を転圧回数表示にて、漏れなく規定回数まで転圧できたことを確認する。終了後、車載PC画面を変形係数表示に切替え、規格値以上の色表示になっていることを確認することも可能となる。

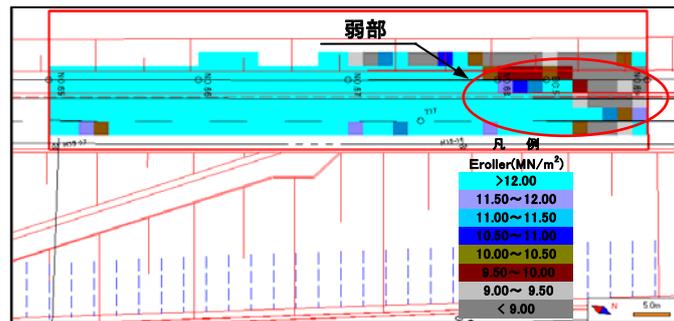
万が一、規格値に満たない弱部があった場合には、その場で再転圧を行い、再度 $\alpha$ システムにて取得されたデータを確認し、地盤変形係数が規格値を満足するかを確認した。図-7. 1 2に規定回数施工後では規格値を満足できなかった箇所での再転圧実施前後での地盤変形係数分布図の一例を示す。このように確実に弱部を見逃さない高品質の施工を行うことができる。また、図-7. 1 3に、河川堤防上でこのシステムを用いて管理した事例（道路施工延長約3km）のうち、施工完了区間、約1,280m区間の路床仕上り面でのErollerの頻度分布を示す。

このように、施工を行いながら品質管理が行えることで、工程の短縮も実現可能となる。特に、いくつかの施工事例では、「盛土の締固め管理を重機のオペレータが運転席上で自ら行えるため、従来型のRI計法と比較して測定時の安全性が格段に向上した。施工ヤードが狭く、重機同士が混在・近接する河川土工におい

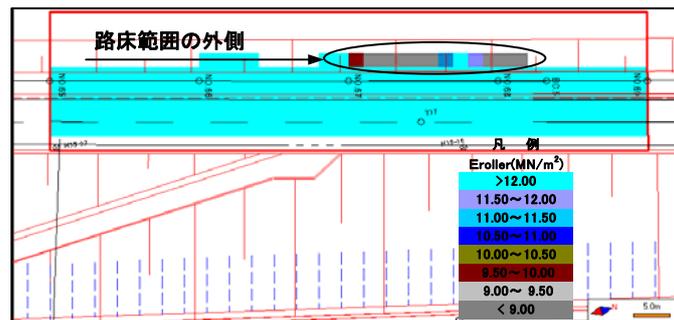
ではその効果は特に高いといえる。また測定にかかる時間と労力を大幅に削減できた。」という作業員および監督員からの感想も頂くことができた。

一般的に、施工管理のうち品質管理に係わる時間は、全行程の7～12%程度と言われている。この部分が本システムを用いることにより半減できたとすれば、おおよそ8%程度の工程短縮を実現できることとなる。

前節の施工機械の速度向上とあわせて、おおよそ20%程度の施工速度の向上は実現可能で、一般的に言われている「情報化施工の効果は大現場でないと得られない」ということは、前述の現場での感想から覆される結果を得ることができた。



(1) 規定回数施工後の地盤変形係数分布図



(2) 再転圧後の地盤変形係数分布図

図-7.12 弱部での再転圧前後の地盤変形係数分布図例

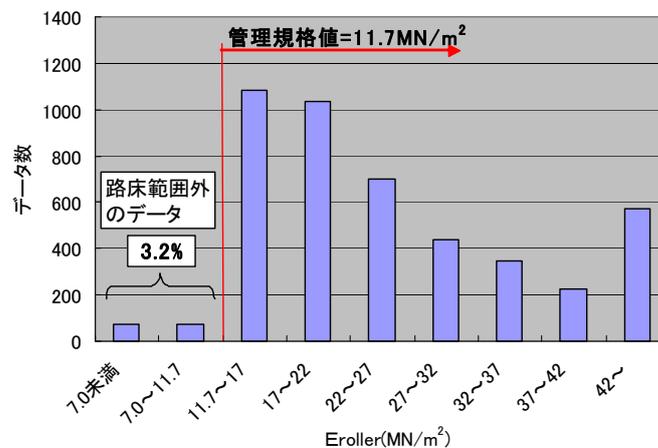


図-7.13 路床仕上り面のErollerの頻度分布

## 8. まとめ

今回の研究開発で、以下の知見を得ることができた。

- ① 舗装工事の品質管理に「加速度応答法 ( $\alpha$ システム)」を用いることができる。その値は従来の品質管理の代替として適用可能で、路床・路盤の仕上り面の品質を面的に管理できる。
- ② 施工時に弱部が明らかとなるので、日常管理段階でその対処（再転圧）が速やかに行える。
- ③ アスファルトに対しても適用の可能性はある。ただし、施工温度を考慮に入れることが必要で、この部分に関してはさらなる研究が必要である。
- ④ 舗装の施工において「振動マカダムローラおよび振動タイヤローラの異なる振動モードの組合せ」は非常に有効で、品質の向上とともに施工速度の向上も望める。
- ⑤ 上記の施工管理手法と施工機械を組み合わせることにより、施工の効率化と高品質化を達成することが出来、おおよそ20%の工期短縮も可能である。