

## 4章 道路橋床版の疲労耐久性試験方法

### 4.1 供試体

本研究では、既設道路橋床版および各種補修補強床版の疲労耐久性の把握を目的とし、表-4.1.1 に示す各種道示に準じて設計・製作した RC 床版供試体および PC 床版供試体と補強工法として鋼板接着工法および上面増厚工法を実施した RC 床版供試体の輪荷重走行試験を実施した。

表-4.1.1 供試体の一覧

供試体名	適用 示方書	供試体寸法 (mm)	支間 (mm)	主鉄筋 (mm)			配力鉄筋 (mm)			補強方法	備考
				呼び径	有効高	間隔	呼び径	有効高	間隔		
RC39-1, 3~9	昭和39年道示	2800×4500×190	2500	D16 (D16)	160 (30)	150 (300)	D13 (D10)	146 (43)	300 (300)	無補強	
RC39-2				D16 (D16)	160 (30)	150 (300)	D10 (D10)	144 (46)	150 (300)		
RC39+鋼板-1, 2				D16 (D16)	160 (30)	150 (300)	D13 (D10)	146 (43)	300 (300)	鋼板接着	1, 2は、同一供試体
RC39+上面-1										上面増厚	せん断補強筋なし
RC39+上面-2											せん断補強筋あり
RC47-1~4	昭和47年道示	2800×4500×200		D19 (D19)	160 (40)	125 (250)	D16 (D16)	142 (58)	100 (200)	無補強	
RC8o-1~3	平成8年道示	2800×4500×250	D19 (D19)	210 (40)	150 (150)	D16 (D13)	192 (55)	125 (125)			
RC8n-1~3			D19 (D19)	210 (40)	150 (300)	D16 (D16)	192 (58)	125 (250)			
PC81, 2			2800×4500×180	D13 (D13)	144 (37)	250 (250)	D19 (D19)	128 (53)	125 (250)		呼び径：1S19.3 有効高さ：101 間隔：250 (mm)

( ) 内は、圧縮鉄筋を示す

供試体は、配力鉄筋量が現行基準と比較して少なく、損傷事例の見られる S39 道示に準じて製作した RC 床版の RC39 供試体を 9 体、大型車交通量により設計曲げモーメントの割り増しを行うものとし、配力鉄筋方向の設計曲げモーメントを与えた S47 道示に準じて設計・製作した RC47 供試体を 4 体、設計輪荷重の改訂および大型車交通量による床版の最小全厚の割り増しを行うものとした現行の H8 道示に準じて設計・製作した RC8 供試体を 6 体とした。なお RC8 供試体は、圧縮鉄筋量を鉄筋径で調整した RC8o と鉄筋の配置間隔で調整した RC8n の各 3 体ずつとした。さらに供試体には、H8 道示により製作した PC 床版の PC8 供試体を 2 体加えるものとした。表-4.1.2 に試験に用いた RC 床版の輪荷重、設計曲げモーメント、床版厚の変遷を、図-4.1.1 ~ 図-4.1.6 に各道路橋示方書に準じて設計した供試体の形状・寸法を示す。

鋼板接着工法および上面増厚工法は、RC39 供試体に対して実施し、各補強工法とも供試体は 2 体とした。

表-4.1.2 試験に用いた RC 床版の基準の変遷

		昭和39年11月 鋼道路橋設計示方書	昭和47年3月 道路橋示方書	平成8年12月 道路橋示方書
輪荷重(tf)	(一等橋)	8	8	10
設計曲げモーメント	主鉄筋方向	$0.4P(L-1)/(L+0.4)$	$(0.12L+0.08)P \times 0.8$	$(0.12L+0.08)P \times 0.8$
	配力筋方向	(主鉄筋量の 25%以上)	$(0.10L+0.04)P \times 0.8$	$(0.10L+0.04)P \times 0.8$
	衝撃係数	$20/(50+L)$	設計曲げ モーメント に含む	設計曲げ モーメント に含む
	割増し		1,000台以上で 設計曲げ モーメントを 20%割増し	床版支間2.5m以上で $1.0+(L-2.5)/12$
床版厚	最小版厚 (cm)	約14	16 or $3L+11$	16 or $3L+11$
	割増し			500未満 1.1 500以上1,000未満 1.15 1,000以上2,000未満 1.20 2,000以上 1.25

供試体の設計は床版支間 3.0m の連続版として行い床版厚および鉄筋量を決定した。供試体は、単純支持にて試験を行うため支間中央の曲げモーメントが同様となる 2.5m で支持するものとした。

ここで RC8 供試体では、大型車交通量を道示に示す 2,000 台以上として最小全厚に 1.25 倍して、PC8 供試体は、プレストレスの導入より床版の最小全厚を 0.9 倍して床版厚さを決定し、プレストレス量および鉄筋量を決定した。

ここで、補強工法の評価方法として、実橋床版を用いる方法と、基準供試体を用いる方法の 2 種類が考えられる。理想的には、実橋床版を用いる法が望ましいが、荷重履歴が不明であり、損傷程度の判断が難しいといえる。一方、基準供試体を用いる方法においては、既設床版に見られる乾燥収縮によるひび割れ等の供用にともない発生している複雑な劣化状況を再現することは非常に難しいと考えられるが、輪荷重走行試験機により実用床版に比較的近い損傷状態を促進して再現できると考えられるため、本研究では基準床版に輪荷重走行試験機によるひび割れを生じさせて補強工法を実施するものとした。

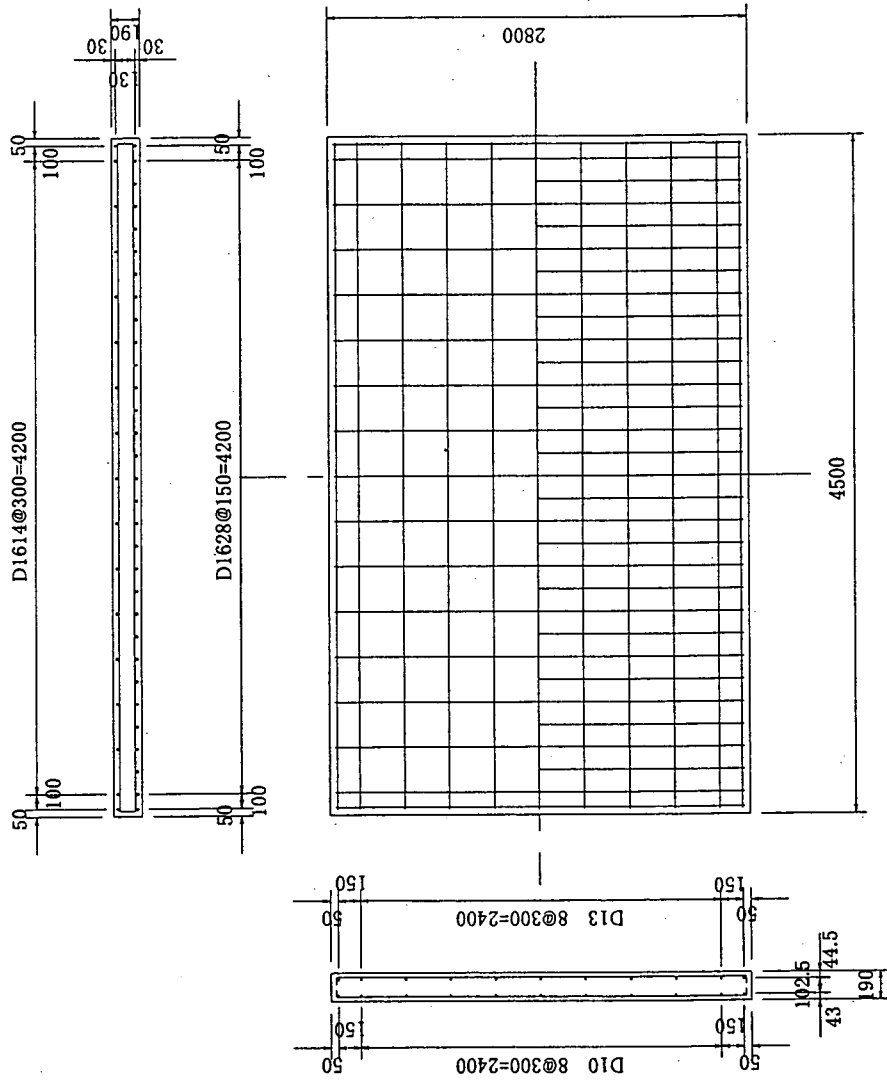


図-4.1.1 RC39-1,3~9供試体の形状・寸法 (単位:mm)

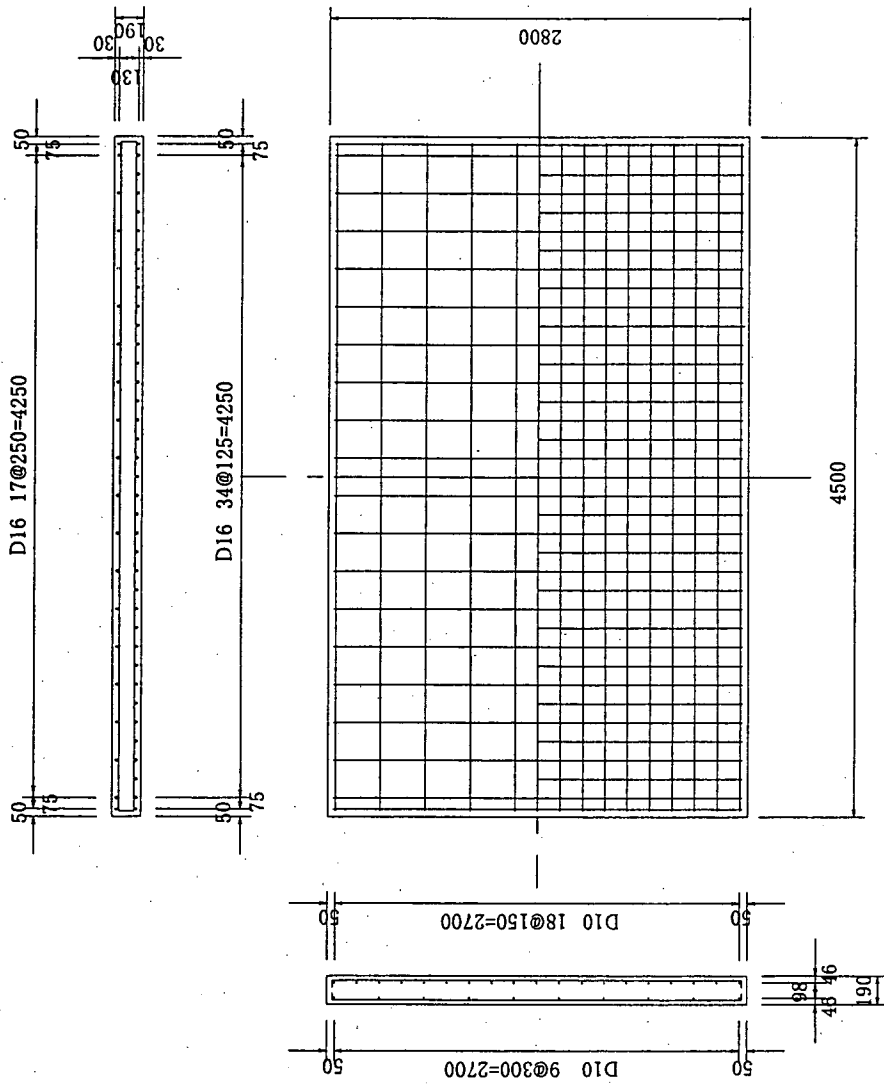


図-4.1.2 RC39-2供試体の形状・寸法 (単位:mm)

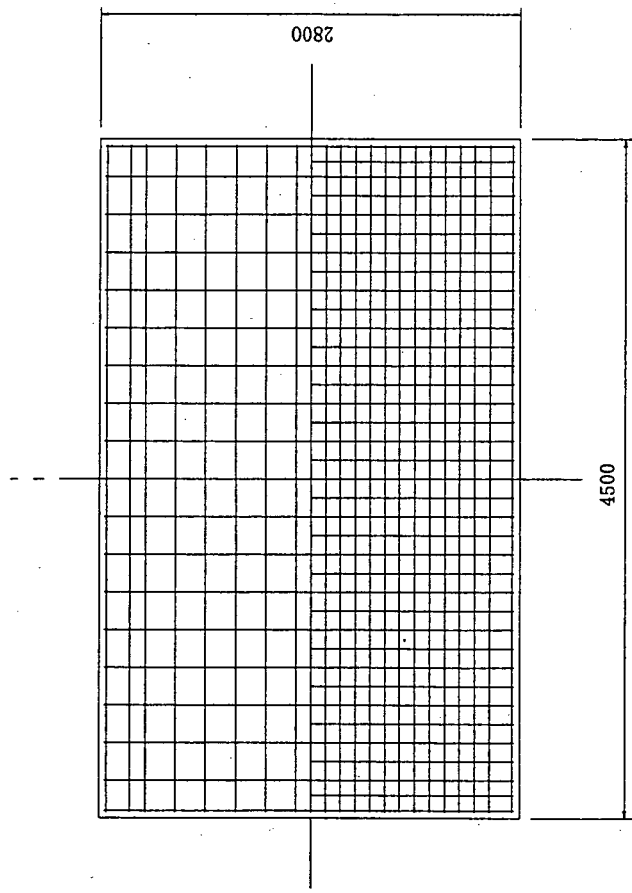
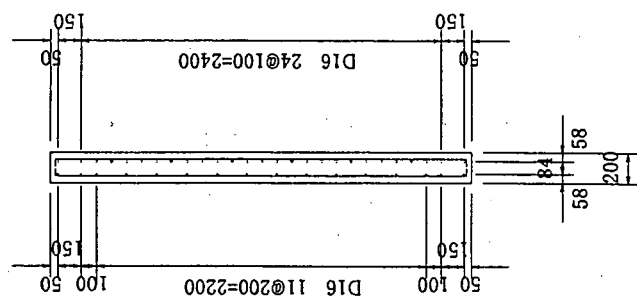
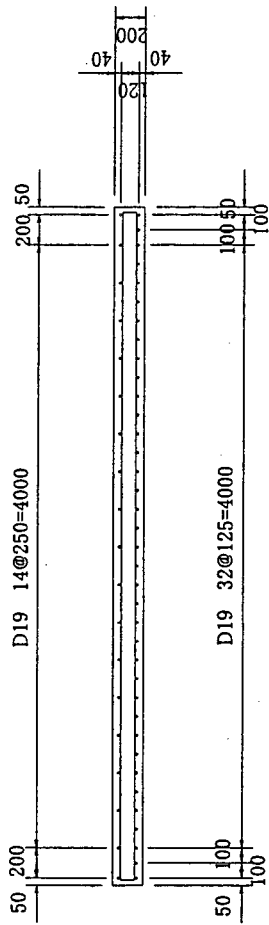


図-4.1.3 RC47供試体の形状・寸法 (単位:mm)

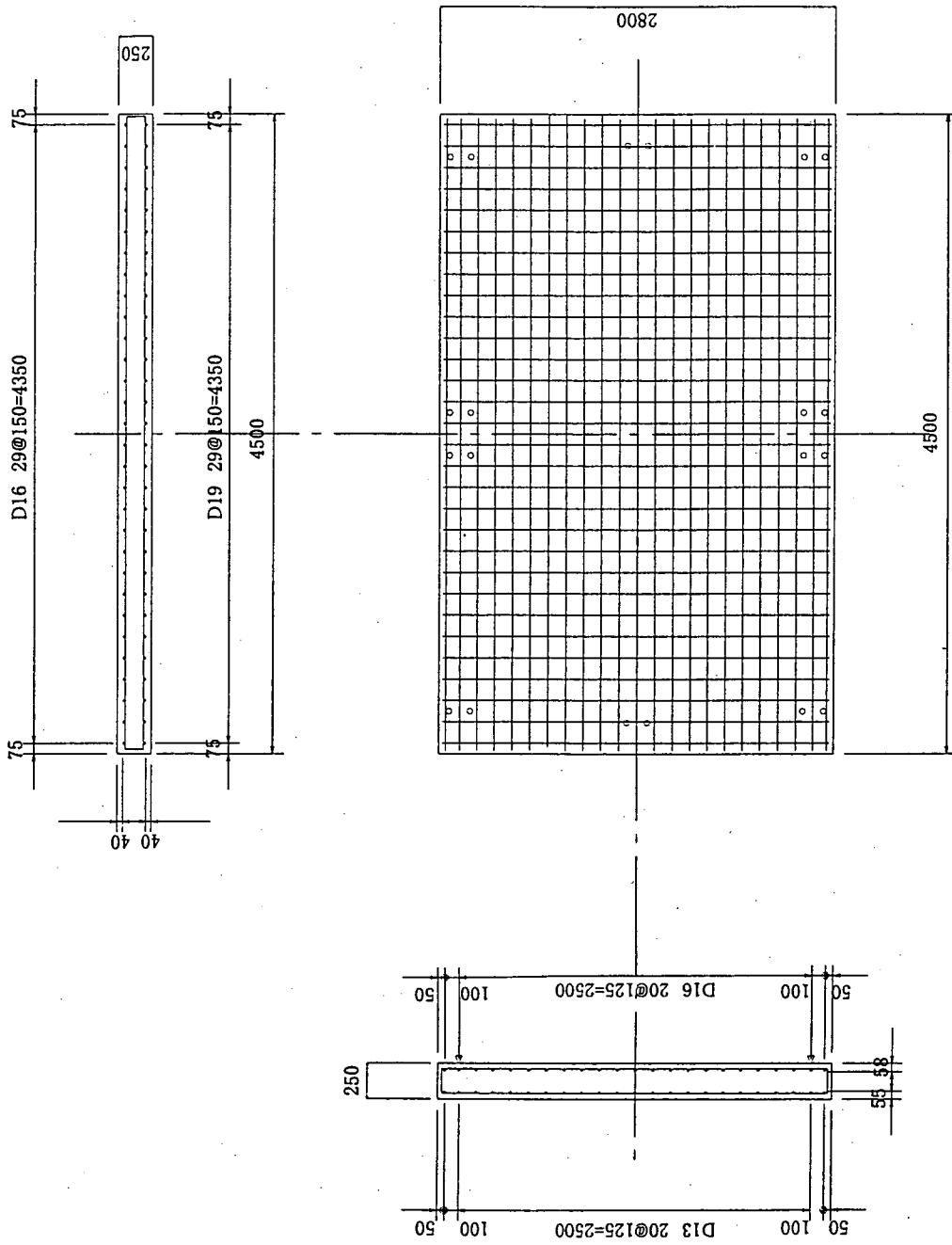


図-4.1.4 RC80供試体の形状・寸法 (単位:mm)

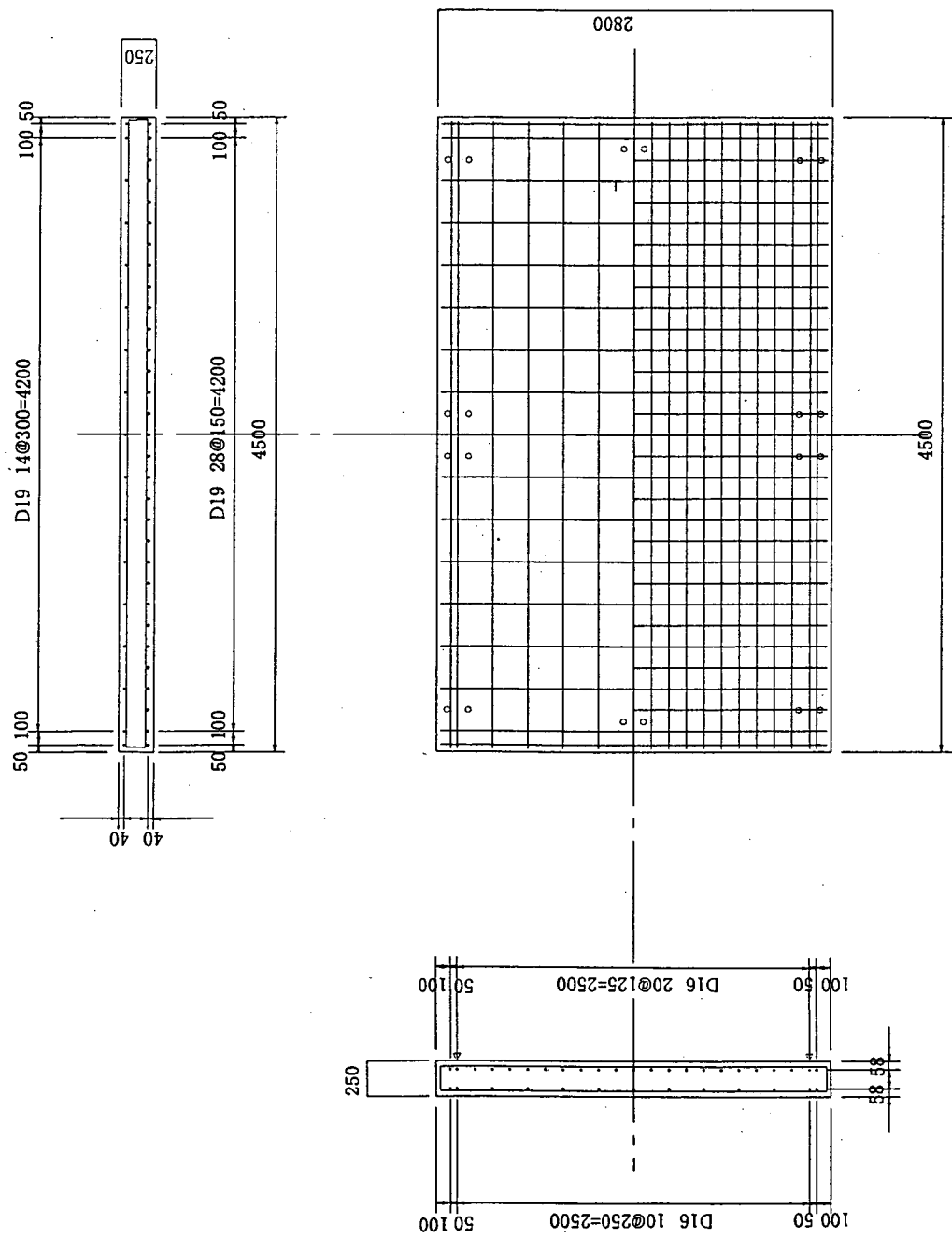


図-4.1.5 RC8n供試体の形状・寸法 (単位:mm)

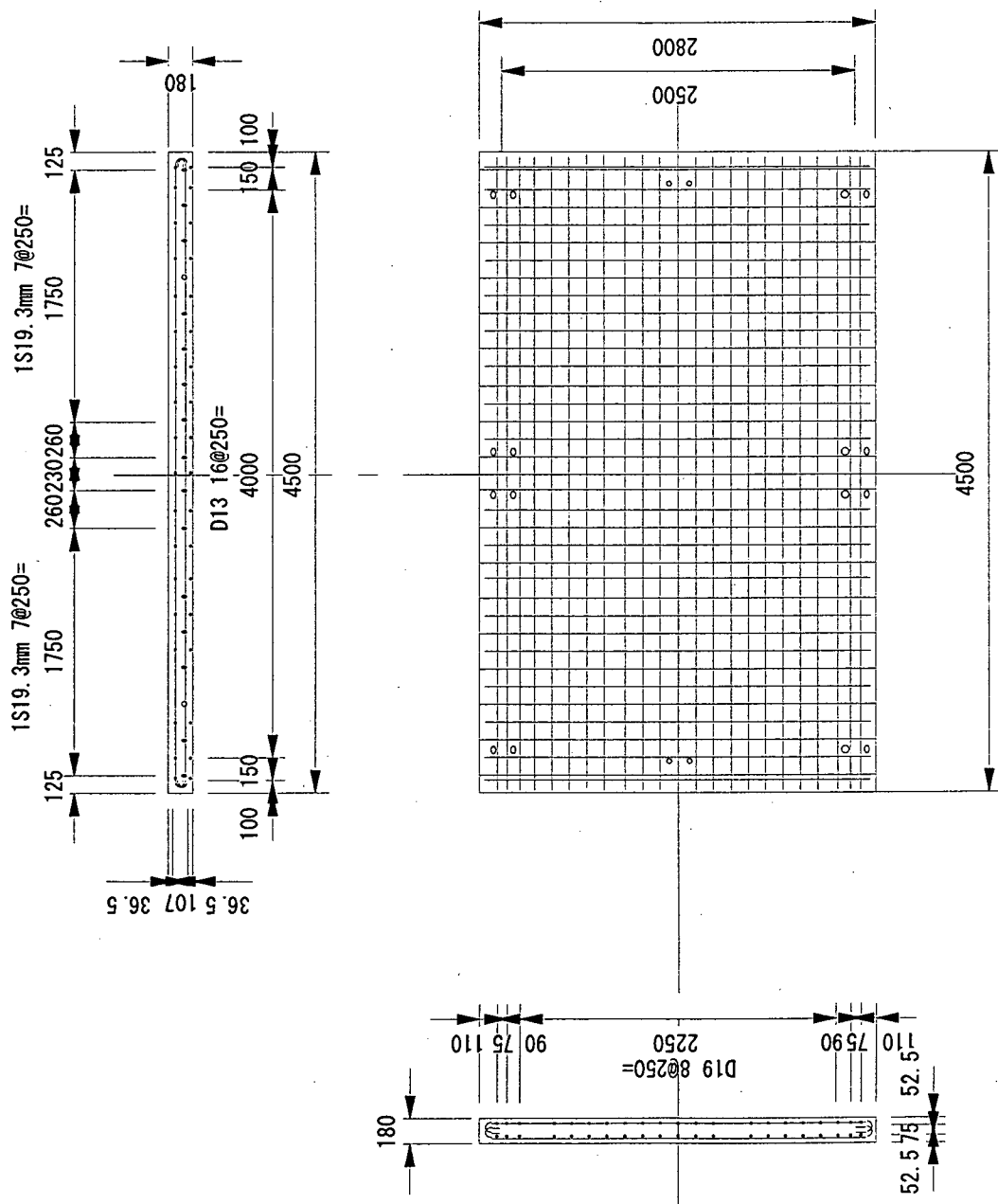


図-4.1.6 PC8供試体の形状・寸法 (単位:mm)



## 4.2 載荷方法

載荷は輪荷重走行試験機を用いて試験を行った。供試体は、輪荷重走行試験機に床版支間 2.5m で単純支持し、橋軸方向には弾性支持した。橋軸方向の弾性支持は、解析により供試体が無限に長いと見なせる長さの解析結果と比較して同様となる様な剛性を持つH型の鋼材を横ばりとして用いることとした。

さらに、供試体は、浮き上がりを防止するために回転拘束を与えないように支持桁に固定した。本試験機は、床版供試体上に 500×200mm の載荷ブロックを一列に並べた軌道上を幅 500mm の鉄輪が±1.5m 往復するものである。

### 4.2.1 階段状荷重漸増載荷

RC8 供試体および補強を実施した供試体等の試験は、RC39 供試体と比較して破壊に至るまでの走行回数が非常に多くなることが予想される。そこで、本試験では走行回数が多くなるに従い段階的に載荷荷重を大きくすることにより、劣化を促進させる階段状荷重漸増載荷(以下、階段載荷)により行うものとした。階段載荷は図-4.2.1 に示すように、157kN を初期荷重として走行回数 4 万回毎に 19.6kN ずつ荷重を増加させ、供試体が破壊に至るまで繰り返し走行を行い、各供試体の破壊に至った走行回数および載荷荷重を相対的に比較するものとした。階段載荷における初期荷重の 157kN は、このとき既に実施していた供試体による輪荷重を一定とした載荷(以下、一定載荷)による載荷荷重を考慮し、階段における走行回数と載荷荷重の増加量は試験機的能力と現実的な試験期間を総合的に考慮して決定している。なお、これらの載荷荷重の実際には、輪荷重の走行に伴う衝撃の影響が加わったものとなるが、これについては評価していない。

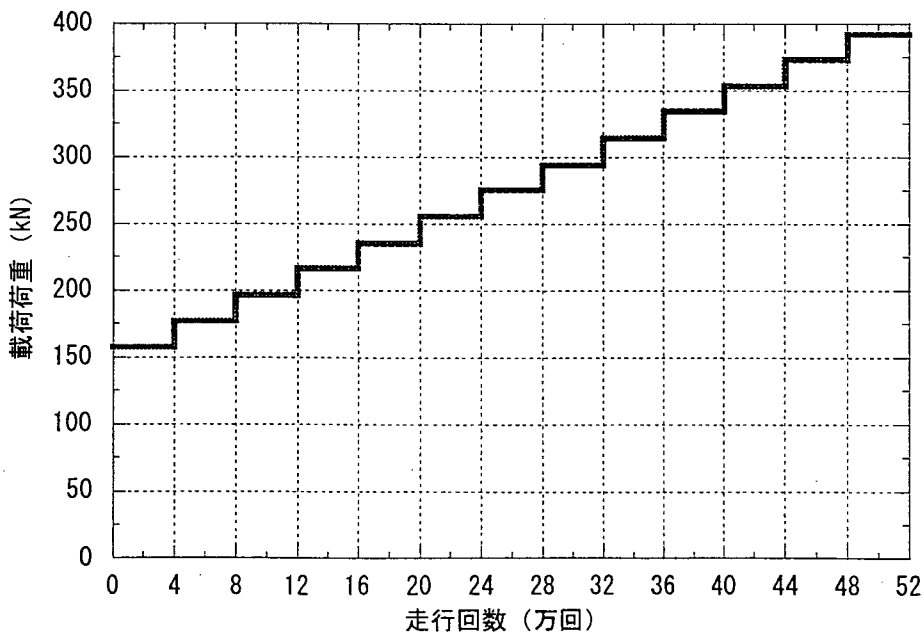


図-4.2.1 階段状荷重漸増載荷試験方法

#### 4.2.2 道示床版の載荷方法

RC39-1, RC47-2~4, RC8 および PC8 供試体は, 図-4.2.2 に示す階段載荷による載荷方法とした。RC39-2 ~9 供試体ならびに RC47-1 供試体は, 表-4.2.1 に示す載荷荷重による一定載荷を行った。一定載荷における各供試体の載荷荷重は, 既往の研究を参考<sup>9)</sup>に, 式(4.2.1)に示す静的押し抜きせん断耐荷力  $P_0$  の約 30% 前後となるように, 試験直前に実施したコンクリートの強度確認試験の結果により決定した。

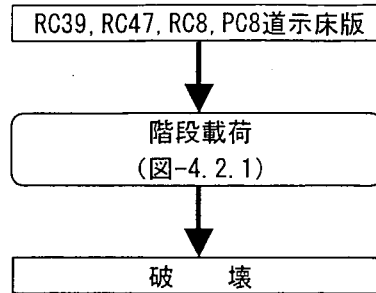


図-4.2.2 RC39-1, RC47-2~4, RC8 および PC8 供試体の階段状荷重漸増載荷試験方法

表-4.2.1 RC39-2~9 供試体および RC47-1 道示床版の載荷荷重

供試体名	載荷荷重 (kN)
RC39-2	175
RC39-3	105
RC39-4	196
RC39-5	167
RC39-6	147
RC39-7	152
RC39-8	118
RC39-9	157
RC47-1	210

$$P_0 = \tau_{smax} (2(a+2x_m)x_d + 2(b+2x_d)x_m) + \sigma_{tmax} (2(4C_d+2d_d+b)C_m + 2(a+2d_m)C_d) \dots \dots \dots \text{式(4.2.1)}$$

ここに,

$\tau_{smax}$ : コンクリートの最大せん断応力度 (kgf/cm<sup>2</sup>) ( $\tau_{smax} = 0.252 \sigma_{ck} - 0.000246 \sigma_{ck}^2$ )

$\sigma_{tmax}$ : コンクリートの最大引張応力度 (kgf/cm<sup>2</sup>) ( $\sigma_{tmax} = 0.583 (\sigma_{ck})^{2/3}$ )

a, b: 載荷版の主鉄筋方向, 配力鉄筋方向の辺長 (cm)

$x_m, x_d$ : 引張側コンクリートを無視した場合の主鉄筋断面, 配力鉄筋断面の圧縮側コンクリート表面から中立軸までの距離 (cm)

$\sigma_{ck}$ : コンクリートの圧縮強度 (kgf/cm<sup>2</sup>)

$d_m, d_d$ : 引張側主鉄筋, 配力鉄筋の有効高さ (cm)

$C_m, C_d$ : 主鉄筋, 配力鉄筋のかぶり厚さ (cm)

### 4.2.3 補強床版の載荷方法

図-4.2.3 に補強床版の試験方法を示す。本試験では、補強を行う供試体については、実橋床版の損傷を想定し、あらかじめ輪荷重走行試験機により所定の初期損傷を与えた後、補強を実施することとした。

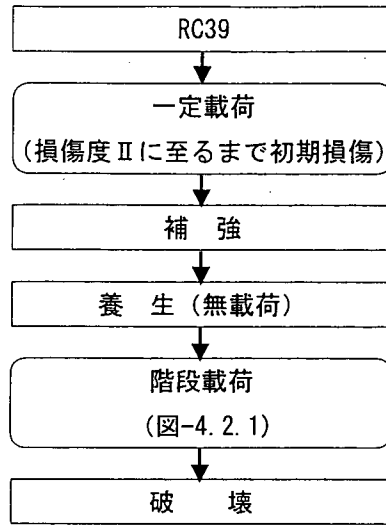


図-4.2.3 補強床版の試験方法

図-4.2.4 に今回行った RC39-1 供試体の繰り返し荷重下におけるたわみ変化の模式図を示す。本試験の初期損傷においては、輪荷重による床版の劣化を促進させる目的で、載荷加重 157kN の一定載荷による輪荷重の走行を行っている。輪荷重走行試験における供試体の損傷度は、たわみの増加割合の違いから 4 つの部分に分割し、変化点 0~D の間をそれぞれ橋梁点検要領 (案)<sup>8)</sup>にある床版の損傷度と対応させて損傷度Ⅳ~Ⅰと定義した (表-4.2.2)。本研究では、損傷度Ⅱ「二方向のひび割れが生じ、漏水や遊離石灰が認められ、さらに、ひび割れの最小間隔が 50cm 未満」を想定し、載荷時のたわみが 8mm、除荷時のたわみが 4mm 程度 (図-4.2.4 の B 点) となった状態とした。ここで各床版の損傷度Ⅱに到達する走行回数は、制作された供試体におけるコンクリートの実強度等の影響により差が出るのが予想された。したがってたわみを損傷の指標とするために、供試体のコンクリートは、実圧縮強度が大きくばらつかないように配慮して製作した。

初期損傷を与えた供試体は、鋼板接着工法または上面増厚工法を実施し、いずれの工法においても補強後に無載荷状態で 7 日間以上の補強材料 (エポキシ樹脂または増厚コンクリート) の養生を行っている。

補強を行った床版の輪荷重走行試験は、階段載荷とし、破壊時の走行回数および載荷荷重を直接比較することとした。

表-4.2.2 初期損傷の指標

橋梁点検要領(案)における損傷度	床版損傷度の変化点	たわみ(mm) 損傷目標値		実験における床版の状態
		除荷	16tf	
O.K.	○			ひび割れ発生前
IV	◇			たわみ、ひび割れ密度が増加する
III	△	3	6	たわみ、ひび割れ密度の増加率が急増から漸増へ、変化する
II	◇	4	8	たわみ、ひび割れ密度の増加率は小さくなり、安定した漸増となる
I	◇	5	10	破壊直前 たわみ、ひび割れ密度の増加率が大きくなる
	◇			押し抜きせん断破壊

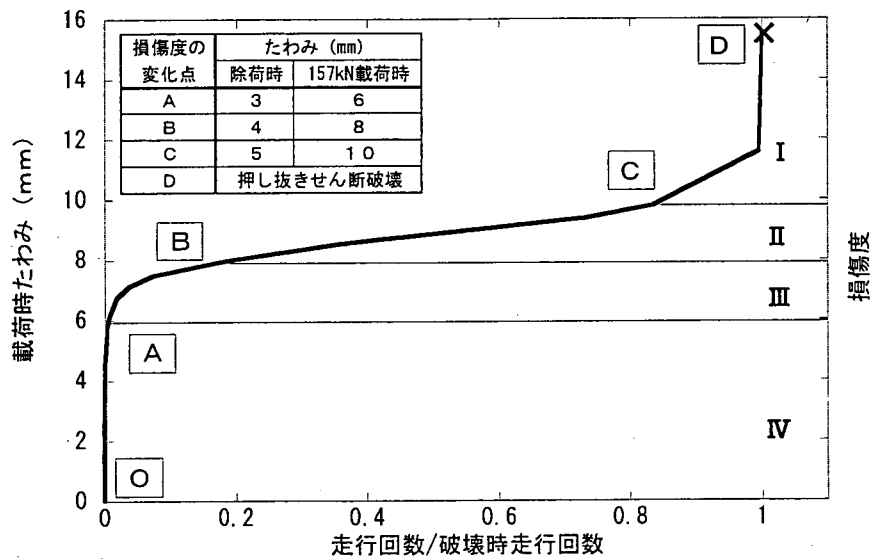


図-4.2.4 RC39-1 の繰り返し荷重下におけるたわみ変化

RC 床版の損傷程度を判定する際には、橋梁点検要領(案)<sup>8)</sup>が参考となる。この中では、5 段階の損傷度の判定標準と各部材毎の判定基準(案)が示されている。判定基準は、損傷の位置 (あるいはパターン)、深さ、広がり の 3 要因に対してそれぞれ各損傷の程度を大、中、小で判断し、損傷ランクが決定されるシステムになっている。表-4.2.3 に損傷の判定標準を、表-4.2.4 に床版の損傷度区分を示す。

表-4.2.3 損傷の判定標準

建設省土木研究所 土木研究所資料第 2651 号 1988.7  
橋梁点検要領 (案)

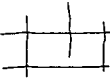
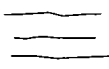
損傷度判定標準

判定区分	一般的状況
I	損傷が著しく、交通の安全確保の支障となる恐れがある。
II	損傷が大きく、詳細調査を実施し補修するかどうかの検討を行う必要がある。
III	損傷が認められ、追跡調査を行う必要がある。
IV	損傷が認められ、その程度を記録する必要がある。
OK	点検の結果から、損傷を認められない。

表-4.2.4 床版の損傷度区分

床版のひびわれ

一方向か二方向かで影響の大小を区別した。また、損傷の深さは損傷のパターンとして錆汁を伴うものを影響大、漏水を伴うものを影響中、ひびわれのみを影響小とした。ひび割れ幅については 0.3mm ~ 0.1mm の範囲で決めた。さらに、拡がりとしてひび割れの間隔を表現し、一つの目安として 50cm を影響度の大小を区別する境界値とした。

		損傷が耐荷力、耐久性に与える影響		
		大	中	小
位置あるいはパターン	区分	二方向ひび割れ	—	一方向ひび割れ
	(X) 具体的事例		—	
深さ	区分	錆汁を伴うひび割れ、またはひび割れ幅大	漏水を伴うひび割れ、またはひび割れ幅中	ひび割れのみ、ひび割れ幅小
	(Y) 具体的事例	ひび割れに沿って鉄筋の錆汁が認められる。または幅 0.3mm 以上である。	ひび割れに沿って漏水や遊離石灰が発生。または幅 0.3mm 未満 0.2mm 以上である。	ひび割れのみ。または幅 0.2mm 未満である。
拡がり	区分	ひび割れ最小間隔小	—	ひび割れ最小間隔大
	(Z) 具体的事例	最小間隔 50cm 未満である。	—	間隔 50cm 以上である。

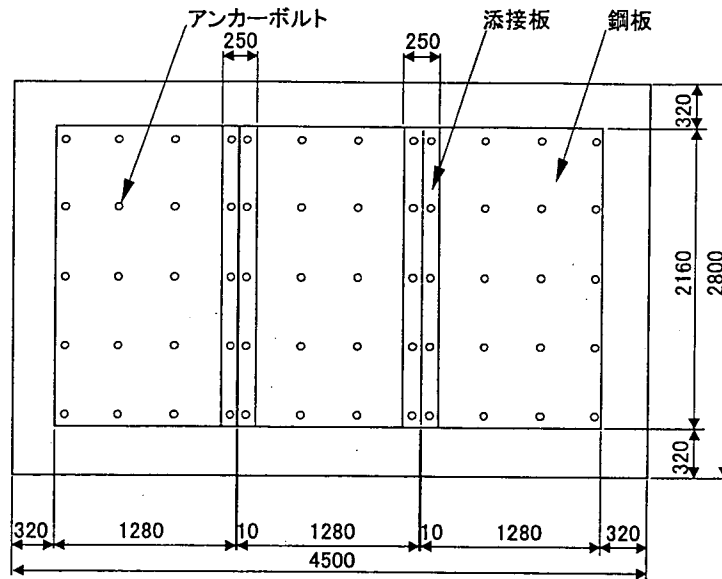
判定区分

X	Y	Z	全部材	X	Y	Z	全部材
大	大	大	II	小	大	大	III
		小	II			小	III
	中	大	II		中	大	III
		小	III			小	IV
	小	大	III		小	大	IV
		小	IV			小	IV

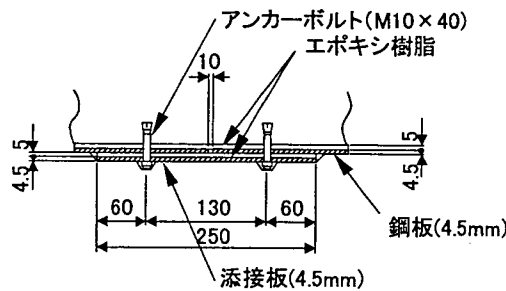
### 4.3 補修補強床版供試体

#### 4.3.1 鋼板接着供試体

図-4.3.1 に鋼板接着工法の概略図を示す。試験において鋼板接着工法は、実橋における施工と同様に、床版下面の下地処理を行った後、厚さ 4.5mm の鋼板 (SS400) をアンカーボルト (M12×70) で固定し、エポキシ樹脂 (5mm) を注入した。なお、鋼板の寸法は実橋の施工と同様に施工性等から決定し、添設板の寸法も一般的に行われている施工を参考にした。



(a) 鋼板割付



(b) 添設部断面

図-4.3.1 鋼板接着工法概略図 (単位: mm)

### 4.3.2 上面増厚供試体

図-4.3.2 に上面増厚工法の概略図を示す。床版コンクリート上面を 1cm 切削して研掃した後、その上面に新たに鋼繊維補強超速硬コンクリート（鋼繊維量  $100\text{kg}/\text{m}^3$ ）を 7cm 打設し、床版厚を 25cm とした。RC39+上面-2 供試体については、RC39+上面-1 供試体が供試体側面の自由端からの既設コンクリートと増厚コンクリートとの界面で剥離したため供試体側面の既設コンクリートと増厚コンクリートとの付着切れを防ぐことを目的に、図-4.3.3 に示す、供試体側面から 10cm 内側の位置にせん断筋（M13×70）を 20cm ピッチ（四隅 50cm は 10cm ピッチ）で配置した。これは、実橋における上面増厚工法は、RC39+上面-1 供試体と比較して広い面積で実施され、供試体側面からの剥離のような損傷形態を示さないと考えたため行った処置である。

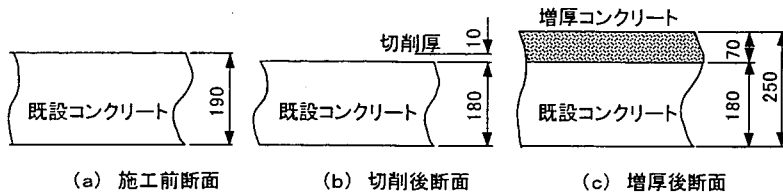


図-4.3.2 上面増厚工法 (単位: mm)

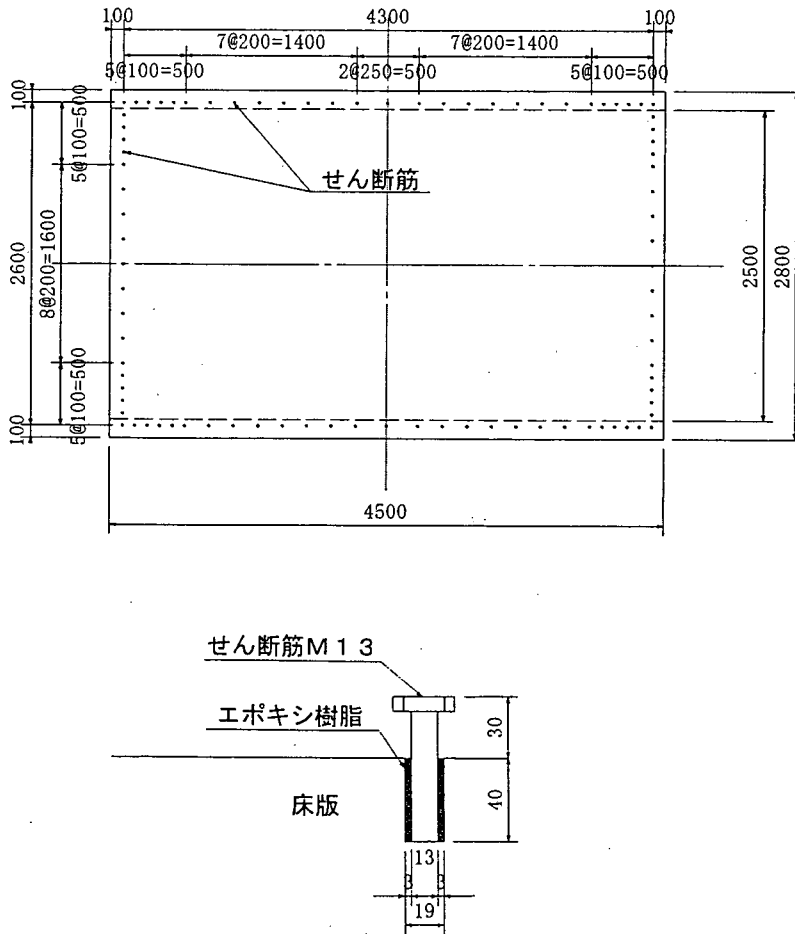


図-4.3.3 RC39+上面-2 供試体のせん断筋配置図 (単位: mm)

#### 4.4 使用材料

試験に用いたコンクリート、鉄筋および補強鋼板の材料試験結果を以下に示す。

コンクリートの材料試験結果を表-4.4.1に、上面増厚供試体の増厚コンクリートの材料試験結果を表-4.4.2に、鋼材の材料試験結果を表-4.4.3に、鋼板接着供試体の補強鋼板の規格を表-4.4.4に示す。

表-4.4.1 コンクリートの材料試験結果 (床版)

供試体名	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (×10 <sup>4</sup> N/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
RC39-1	26.9	2.05	0.178	1.94
RC39-2	28.6	2.19	0.147	2.63
RC39-3	13.6	1.62	0.191	1.44
RC39-4	29.7	2.39	0.172	2.69
RC39-5	31.1	2.34	0.170	2.49
RC39-6	28.4	2.18	0.161	2.21
RC39-7	25.4	2.39	0.123	2.15
RC39-8	27.1	2.32	0.173	2.42
RC39-9	26.6	2.68	0.168	2.34
RC39+鋼板-1	25.9	2.07	0.159	2.50
RC39+鋼板-2	29.2	2.22	0.172	2.02
RC39+上面-1	27.1	2.16	0.131	2.57
RC39+上面-2	25.6	2.18	0.135	2.15
RC47-1	29.9	2.31	0.184	2.92
RC47-2	35.6	2.61	0.169	2.69
RC47-3	36.3	2.65	0.165	2.94
RC47-4	32.9	2.47	0.182	2.52
RC8o-1	27.1	2.42	0.168	2.34
RC8o-2	46.5	2.88	0.152	4.04
RC8o-3	45.4	2.63	0.144	3.91
RC8n-1	33.1	2.79	0.150	2.64
RC8n-2	38.4	2.57	0.130	2.84
RC8n-3	37.4	2.65	0.167	3.14
PC8-1	42.9	2.67	0.166	3.66
PC8-2	50.0	3.31	0.193	3.77

表-4.4.2 増厚コンクリートの材料試験結果 (増厚部)

供試体名	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (×10 <sup>4</sup> N/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
RC39+上面-1	44.2	2.49	0.191	5.51
RC39+上面-2	64.6	3.38	0.194	6.17



表-4.4.3 鋼材の材料試験結果

供試体名	鉄筋径	降伏点 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)
RC39-1	D10	343	489	21.9
	D13	360	531	22.9
	D16	340	507	25.1
RC39-2	D10	358	493	20.9
	D16	353	502	18.8
RC39-3~6	D10	362	505	16.3
	D13	339	478	19.9
	D16	380	553	17.9
RC39-7, 8	D10	368	514	20.0
	D13	326	477	22.2
	D16	345	509	20.3
RC39-9	D10	387	582	18.5
	D13	347	494	22.9
	D16	358	523	19.6
RC39+鋼板-1 RC39+上面-1	D10	332	480	23.9
	D13	331	461	25.1
	D16	343	519	19.3
RC39+鋼板-2 RC39+上面-2	D10	368	514	20.0
	D13	326	477	22.2
	D16	345	509	20.3
RC47-1	D16	353	502	18.8
	D19	344	502	18.2
RC47-2	D16	358	520	27.2
	D19	361	529	25.2
RC47-3	D16	358	520	27.2
	D19	361	529	25.2
RC47-4	D16	358	520	27.2
	D19	361	529	25.2
RC8o-1	D13	331	474	23.2
	D16	347	508	20.7
	D19	353	533	20.0
RC8o-2	D13	338	484	28.5
	D16	358	520	27.2
	D19	361	529	25.2
RC8o-3	D13	338	484	28.5
	D16	358	520	27.2
	D19	361	529	25.2
RC8n-1	D16	358	518	26.1
	D19	334	495	27.3
RC8n-2	D16	358	518	26.1
	D19	334	495	27.3
RC8n-3	D16	358	520	27.2
	D19	361	529	25.2
PC8-1 PC8-2	D13	360	515	25.4
	D19	354	513	25.3
	19.3	-	1974	-

表-4.4.4 補強鋼板の規格

供試体名	使用鋼板	規格	降伏点 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)
RC39+鋼板-1	PL-4.5mm	SS400	319	429	41
RC39+鋼板-2	PL-4.5mm	SS400	282	446	39