

# FRPの歩道床材としての適用性

## Application of FRP Members for Sidewalk Deck

久保 圭 吾\*<sup>1</sup>  
Keigo KUBO

### Summary

Sidewalk are increasingly being installed on bridges to improve safety for pedestrians, so the weight of the sidewalk needs to be light to reduce the load on existing girders and piers. Also, in the area of the seaside or sprinkling melting snow material, corrosion is a problem and high corrosion resistance is required. We therefore developed a way to apply FRP panels to sidewalk decks. This paper reports the results of testing FRP members as deck plates.

キーワード：FRP、デッキプレート、すべり抵抗試験、引張接着試験、静的耐荷力

### 1. はじめに

FRPは軽量で高強度であり、鋼材やコンクリートと比べ比強度が大きい材料であるため、近年、航空機などの構造材料として多く用いられるようになってきた。また、FRPは耐食性、耐薬品性が高い材料であることから、海洋構造物や薬品容器にも多く用いられている。

このような特性を生かし、土木用構造材としてはFRPパネルを用いた合成床版や、FRP製点検通路などをすでに実用化してきた<sup>1) 2)</sup>。このうち、FRP合成床版は、リップ付きの一体断面として引抜き成形することで構造の合理化を図っており、**図-1**に示す6種類の断面形状が成形可能である。

一方、歩行者の安全対策のため、歩道のない既設橋梁に歩道を添架する事例が増加している。この場合、既設の桁や橋脚への負担を極力軽減するため、一般的には鋼製が用いられるが、さらなる軽量化が求められている。また、海岸部や融雪材を散布する地域では、塩害による鋼材の腐食も問題となっており、高耐食性が望まれている。

このような観点から、軽量、高強度で耐食性に優れるπ型FRPパネルを反転して、歩道を添架する際の床材へ適用することを考案した。しかし、π型FRPパネルに関しては、合成床版の型枠・支保工、および鉄筋コンクリートとの合成断面としての耐荷力、耐久性については、種々の実験等により検証されているものの、歩道床材としての表面処理方法や、耐火性、耐荷力、変形・振

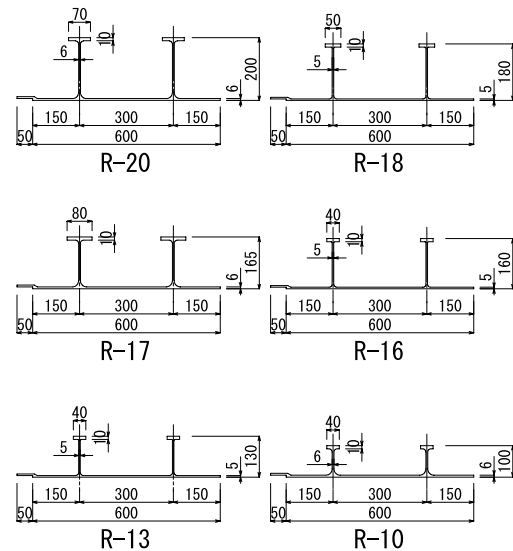


図-1 π型FRPパネルの断面形状

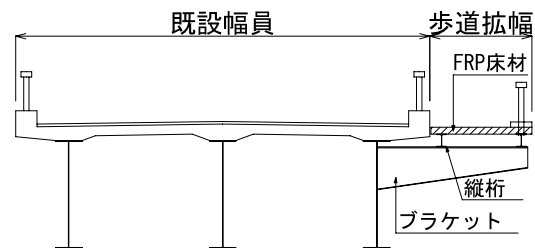


図-2 歩道拡幅の概要図

動特性は確認されていない。

このため、本研究では、FRP材の床材としての適用性を確認するため、各種試験により性能の検証を行った。ここでは、これらの結果について報告する。

\*1(株)宮地鐵工所 技術本部設計部技術開発グループ課長代理

## 2. 路面仕様によるFRPの表面処理方法

歩道の路面は、鋼床版の場合、アスファルト舗装やタイル舗装が一般的に用いられている。これは、路面の平坦性や耐滑性、耐摩耗性を確保するためであるが、舗装を省略すると大幅な死荷重軽減が可能となる。したがって、ここでは、舗装を施す場合と省略する場合に対しFRPの表面処理方法の検討を行うこととする。

### (1) 舗装を省略する場合

舗装を施さない場合は、FRP材の上を直接歩行するため、安全上、路面のすべり抵抗度が重要となってくる。このため、すべり抵抗（BPN）試験によりすべり抵抗度の確認を行った。なお、FRPの表面処理は、①無処理、②ピールプライはく離面（FRP成形時に最表層に目の粗い布を入れ、この布をはがすことで表面を粗面としたもの）、③砂を接着剤により接着したもの、④サンドペーパーで目粗を施したものの4種類とした。

試験は、図-3に示す試験機により、ゴムプレートを先端に設置した振り子を所定の高さより振り下ろし、試験体と接触した後の振り上げ角度で摩擦抵抗度を評価するものである。

表-1に、すべり抵抗試験結果を示す。なお、本表には、すべり抵抗値の低い湿潤面の結果のみを示している。これより、BPN値が40以上であれば歩行者の安全性が確保される<sup>3)</sup>ことから、表面処理を行っていないもの以外は、十分なすべり抵抗値を有していることが確認できた。

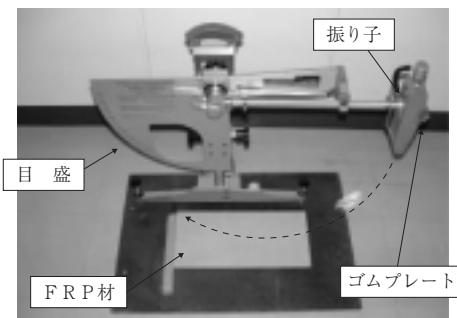


図-3 すべり抵抗試験の概要

表-1 すべり抵抗試験結果

表面処理方法	乾燥 or 湿潤	すべり抵抗値（BPN）					路面温度 ℃	
		1	2	3	4	5		平均
表面処理なし	湿潤面	30	26	24	23	23	25.2	22
砂接着面	湿潤面	68	67	66	67	69	67.4	22
ピールプライ剥離面	湿潤面	84	86	87	84	86	85.4	20
目荒らし	湿潤面	61	62	60	61	59	60.6	29

### (2) 舗装を施す場合

舗装を施す場合、アスファルト舗装とタイル舗装が考えられるが、タイル舗装の場合、タイルと床材との間にはモルタルが施工される。このため、アスファルトとモルタルに対しFRPの表面処理の影響を検討するものとする。

FRP上に舗装を施す場合、FRP材と舗装の間ではく離が生じると、舗装の割れ等の問題が発生する可能性がある。したがって、舗装とFRPの接着力の確認を行った。

試験は、建研式接着力試験器により実施し、FRP材の表面処理はすべり抵抗試験時と同様のものに加えて、アスファルト舗装に対しピールプライはく離面に石油アスファルト乳剤（タックコート）を用いたケースを追加した。なお、FRP材の成形用樹脂は合成床版として使用しているビニルエステル樹脂の他に、一般的に多く用いられているイソフタル酸系不飽和ポリエステル樹脂についても試験を行った。

表-2に引張接着試験結果を示す。この結果、コンクリート床版とアスファルト舗装との付着強度が0.33MPa程度であることから判断して、アスファルト舗装に対しては、タックコートを用いた場合が有効であり、モルタルに対してはピールプライはく離面が有効であることがわかった。

また、無処理のものにアスファルト舗装を行う場合、FRPの成形樹脂によって付着力が異なる結果となったため、適用にあたっては注意が必要である。

表-2 引張接着試験結果

FRP材表面	No.	接着力 (N)	接着面積 (mm <sup>2</sup> )	引張接着強度 (MPa)	破壊形式	試験温度 (℃)
表面処理なし (ビニルエステル樹脂)	1	2,500	7,853	0.32	FRP材とアコンの界面	23
	2	4,700	7,853	0.60	FRP材とアコンの界面	
	3	3,100	7,853	0.39	FRP材とアコンの界面	
平均	—	—	0.44	—	—	—
ピールプライはく離面 (イソフタル酸樹脂)	1	500	7,853	0.06	FRP材とアコンの界面	23
	2	700	7,853	0.09	FRP材とアコンの界面	
	3	600	7,853	0.08	FRP材とアコンの界面	
平均	—	—	0.08	—	—	—
アスファルト ピールプライはく離面 (イソフタル酸樹脂) +タックコート(PK-4)	1	2,500	7,853	0.32	タックコートの凝集破壊	29
	2	2,200	7,853	0.28	タックコートの凝集破壊	
	3	2,500	7,853	0.32	タックコートの凝集破壊	
	平均	—	—	0.31	—	
目荒らし (イソフタル酸樹脂) +タックコート(PK-4)	1	4,000	7,853	0.51	タックコートの凝集破壊	30
	2	4,300	7,853	0.55	タックコートの凝集破壊	
	3	3,700	7,853	0.47	タックコートの凝集破壊	
	平均	—	—	0.51	—	
砂接着面 (ビニルエステル樹脂)	1	アスファルト舗装時の熱（約160℃）で砂接着樹脂が				23
	2	収縮することによりFRP材が湾曲しはく離				
	3	—				
	平均	—				
表面処理なし (イソフタル酸樹脂)	1	1,100	7,853	0.14	FRP材とアコンの界面	29
	2	700	7,853	0.09	FRP材とアコンの界面	
	3	500	7,853	0.06	FRP材とアコンの界面	
	平均	—	—	0.10	—	
表面処理なし (ビニルエステル樹脂)	1	接着力が弱く、コアボーリング時にはく離				23
	2	—				
	3	—				
	平均	—				
モルタル ピールプライはく離面 (イソフタル酸樹脂) +タックコート(PK-4)	1	8,900	7,853	1.13	モルタルの凝集破壊	29
	2	6,200	7,853	0.79	FRP材とモルタルの界面	
	3	—	—	0.96	—	
	平均	—	—	0.96	—	
砂接着面 (ビニルエステル樹脂)	1	100	7,853	0.01	FRP材とアコンの界面	29
	2	接着力が弱く、コアボーリング時にはく離				
	3	—				
	平均	—				
表面処理なし (イソフタル酸樹脂)	1	接着力が弱く、コアボーリング時にはく離				29
	2	—				
	3	—				
	平均	—				

### 3. アスファルト舗装の適用性

#### (1) アスファルト舗装の施工性

アスファルト舗装は、施工に際し締め固めが行われるが、FRP上に施工する場合、FRPの変形により十分な締め固めができない可能性が考えられる。このため、実物大による試験施工を行い、施工性について確認を行った。

試験は、FRPパネルにR-13を用い、リブ間に継手を有する供試体と継手のない供試体を2体横に並べ、全長2mに対して支間1.5mで支持した状態でパネル単体毎に型枠を設け、厚さ50mmのアスファルト舗装を施工した。なお、FRPの表面処理は、引張接着試験において十分な接着性が確認された表面処理なし（ビニルエステル樹脂）とした。

図-4にアスファルト舗装の締め固め状況を示す。この結果、舗装締め固め時にFRP材が若干たわむことが確認されたが、作業に支障をきたすほどのものではなく、問題なく施工が可能であることがわかった。このときのR-13パネル中央点における鉛直たわみおよびアスファルト舗装温度の計測結果を図-5に示す。これより、舗装直後に負のたわみが生じている。これは、アスファ



図-4 締め固め状況

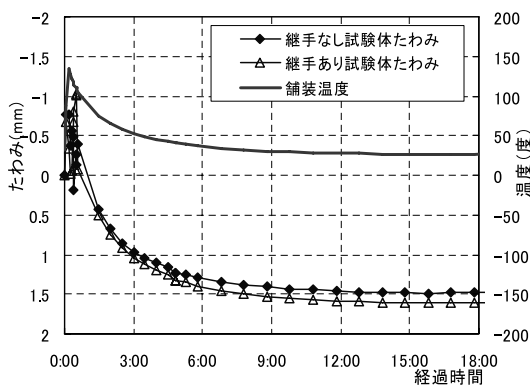


図-5 アスファルト舗装時の支間中央たわみ

ルト施工時の熱影響によりFRP板が伸びたためと考えられる。その後、舗装温度の低下とともにパネルのたわみが増加し、約1.5mmで停留するが、アスファルト舗装の死荷重による計算たわみの0.1mmと比べ大きい傾向にある。これは、舗装の収縮によりパネル表面部に圧縮力が作用したためと考えられる。また、2体の試験体の挙動に着目すると、両者ともほぼ同様の挙動を示しており継手による影響はないものと考えられる。

#### (2) 温度履歴を受けた材料の特性

アスファルト舗装施工時は、表面温度が約160度となることから、FRP材への温度影響が懸念されるが、舗装の施工試験ではFRP材の変状は見られず、熱影響に対する外観上の問題はないことが確認できた。ここでは、温度履歴を受けることによる、材料特性の変化を調べるため、温度履歴を与えた供試体による引張り試験を実施した。なお、温度履歴は、アスファルト舗装の施工を模擬し、160℃に保った加熱炉に供試体を1時間入れ、その後炉内から取り出し自然冷却により常温に戻す方法により与えた。

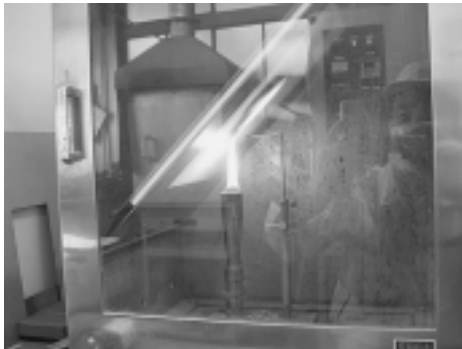
表-3に、熱履歴を受けた供試体の引張試験結果を示す。なお、表中には比較のため、温度履歴を与えない常温供試体の結果も併記した。これより、長手方向、幅方向ともに、引張強さ、弾性係数の変化はわずかであり、熱影響によるFRP材の材料特性の変化はほとんど生じないことがわかった。また、幅方向の引張強度は、長手方向と比較して1/4程度であり、異方性を有する材料であることがわかる。

表-3 引張試験結果

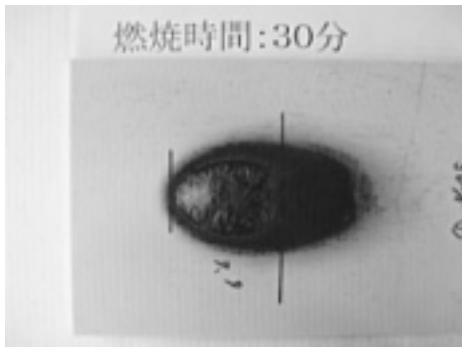
	No.	常温		熱履歴後	
		引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )	引張弾性率 (kN/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )	引張弾性率 (kN/mm <sup>2</sup> )
長手方向	1	434.4	32.1	421.1	35.5
	2	455.3	33.7	425.5	32.6
	3	458.7	30.8	408.0	32.4
	4	423.6	32.4	428.4	33.7
	5	448.6	31.1	479.9	35.4
	平均	444.1	32.0	432.6	33.9
幅方向	1	77.9	14.1	103.6	15.8
	2	99.4	17.6	100.4	17.6
	3	105.4	15.7	95.8	14.3
	4	115.3	15.9	103.8	15.7
	5	104.8	14.0	97.6	17.7
	6	105.6	17.9	102.7	17.8
	7	95.2	20.6	91.9	15.8
	8	95.9	15.9	100.9	17.6
	9	94.8	15.8	97.8	15.7
	10	104.6	15.8	92.9	17.7
平均	99.9	16.3	98.7	16.6	

#### 4. 耐火性能

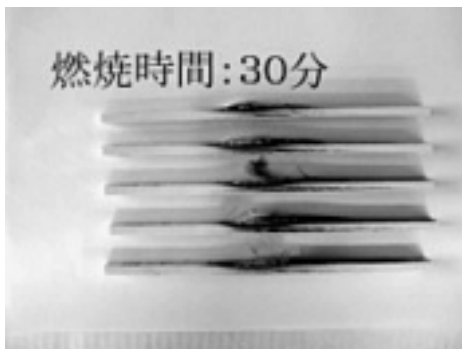
F R P床板を舗装なしで用いる場合、路上での煙草の火などに対する耐火性能が問題となる。F R Pは、難燃度の高い樹脂の使用や、樹脂に添加剤を加えることにより難燃化・不燃化することが可能である。このため、 $\pi$ 型F R Pパネルでは、成形の際、添加剤を加えることでJIS A 1322（建築用薄物材料の難燃性試験方法）の防火3級以上に相当する性能を付加している。したがって、煙草の火程度ではF R Pが延焼することはないが、燃焼後の強度保持率を確認するため、燃焼試験を実施した。試験は、**図一六**に示すJIS A 1322の試験方法に準じ、



図一六 燃焼試験状況



燃焼面



断面

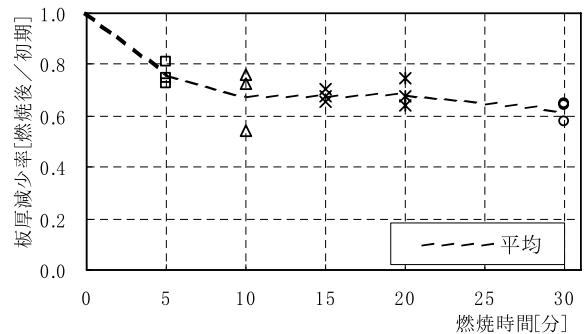
図一七 燃焼試験後の供試体の状況（30分）

0分、5分、15分、20分、30分の燃焼後に強度試験を行う方法とした。**図一七**に30分燃焼後の燃焼面および切断面の状況を示す。これより、直接炎が当たる箇所では表面樹脂の燃焼が見られるものの、延焼はほとんどしていないことが確認できる。また、切断面における燃焼範囲は表層部分のみであり、裏面は熱影響により変色している程度であった。

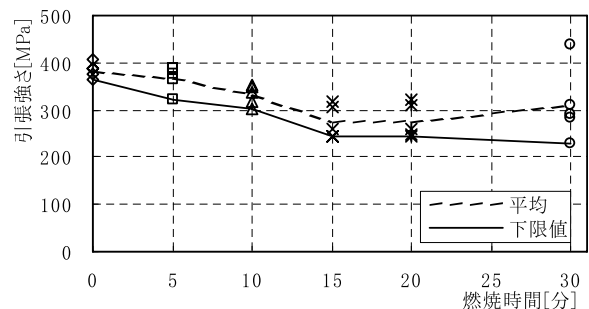
**図一八**に、燃焼による板厚減少率を示す。なお、板厚計測は、樹脂が燃焼しガラス繊維が露出した部分をマイクロメータで圧縮して計測した。これより、燃焼時間10分程度までは板厚の減少が見られるものの、それ以降の板厚減少率は停留することがわかる。これは、不燃であるガラス繊維が炎を遮断し、内部の樹脂の燃焼が抑制されているためと考えられる。

**図一九**に、燃焼による強度変化を示す。このときの引張り強さは、燃焼により減少した板厚を有効断面として算出している。この結果、引張り強さは15分間の燃焼により、燃焼前の約70%に低下するが、その後の強度低下は少ないことがわかる。

以上より、F R P材は30分の燃焼により板厚減少と強度低下を合わせても初期材料強度の40%程度は保持しており、燃焼により崩壊に至るようなことはないことが確認できた。



図一八 燃焼による板厚減少率



図一九 燃焼による強度変化

## 5. 耐荷性能

### (1) 材料特性

$\pi$ 型FRPパネルは引抜き成形材であるため、引抜き方向である長手方向に対して、幅方向の強度・弾性係数が小さい直交異方性の材料特性を有している。このため、合成床版として使用する場合は、FRPの長手方向に対してのみ強度部材として扱い、幅方向に対してはFRPを無視した設計としており、幅方向の材料特性は特に規定していない。しかしながら、歩道床材として使用する場合は、リブ間への集中荷重なども作用するため、幅方向に対しても荷重分担する必要がある。このため、幅方向の材料特性を把握することを目的として、JIS K 7054に基づいた引張試験を行った。試験結果を、長手方向の材料試験結果とともに、表-4に示す。なお、本試験における $\pi$ 型FRPパネルは、強化繊維にガラス繊維、樹脂にビニルエステル樹脂を使用している。

表-4 材料特性

	引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )	引張弾性率 (kN/mm <sup>2</sup> )
長手方向	444	32
幅方向	100	16

### (2) 静的耐荷力

FRPパネルの歩道床材としての耐荷力を確認するため、静的載荷試験を実施した。試験は、R-13パネル（表面処理なし）を用いて行い、幅600mmのFRPパネル単体に対し、継手による影響および、舗装による影響を確認するため、それぞれのケースに応じた試験体を準備した。試験は、アムスラー型万能試験機を載荷フレームとして利用し、図-10に示すように、油圧ジャッキにより支間1.8mの中央に荷重を載荷する方法とした。

載荷荷重は、設計荷重である群集荷重（5 kN/m<sup>2</sup>）と、歩行者による集中荷重（1 kN）を考慮した。なお、群集荷重の載荷は、支間中央でのたわみが等価となるように換算した5.625kN/mの線荷重（載荷荷重3.375kN）を支間中央に載荷した。また、集中荷重は歩行者の設置面積を模擬し、100mm×100mmの載荷板にて支間中央部のリブ間に載荷した。なお、載荷は、漸増載荷により各荷重の3倍まで行いFRPパネルの挙動を確認した。ただし、継手のない試験体の集中荷重に対しては、5倍まで載荷している。図-11に試験の実施状況を示す。

また、静的載荷試験を解析的に検証するために、FE

M解析を実施した。対象とする試験ケースは、舗装なしパネルに集中荷重を載荷した場合とし、解析モデルは、図-12に示す3次元シェル要素を用いた。

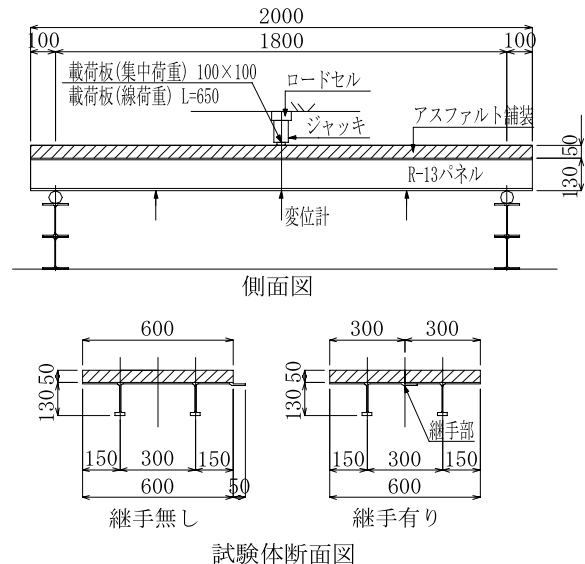


図-10 静的載荷試験の概要

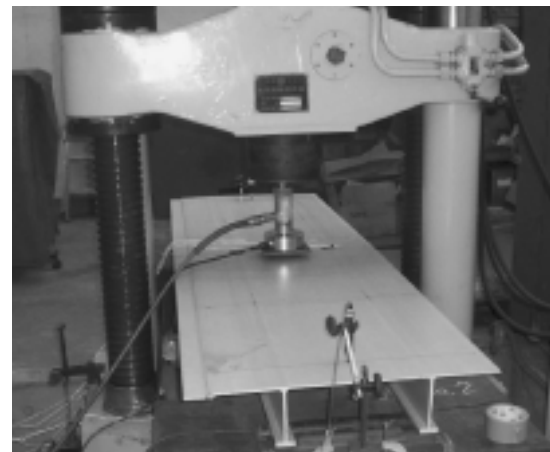


図-11 静的載荷試験状況（単体パネル）

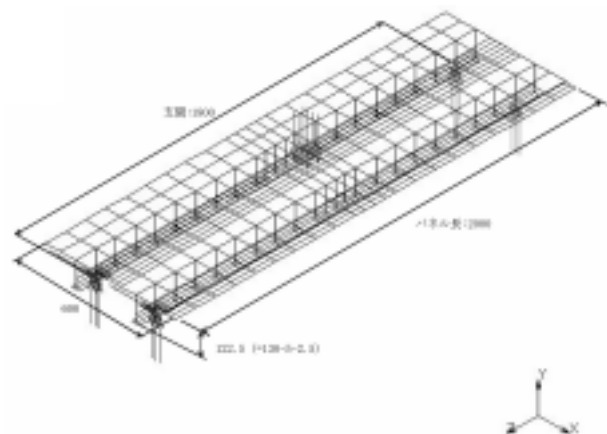


図-12 解析モデル

図-13に線活荷重載荷時における支間中央部のリブ下面の荷重とたわみの関係を示す。これより線荷重載荷時においては、いずれのケースにおいてもほぼ線形挙動を示しており、設計荷重の3倍の荷重に対しても線形性を保持していることがわかる。また、舗装ありの供試体は、ないものと比べ若干たわみが小さい傾向がある。

図-14に集中荷重載荷時における載荷点直下の荷重とたわみの関係を示す。これより、継手の有無にかかわらず、舗装がない場合に比べ舗装を打設したものは、たわみが大幅に減少していることがわかる。これは、舗装により全体剛性が高まったこと、および舗装により荷重が分散されることに起因すると考えられる。

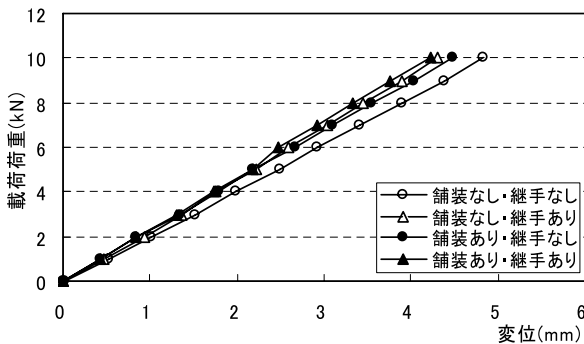


図-13 線荷重載荷時の支間中央部変位

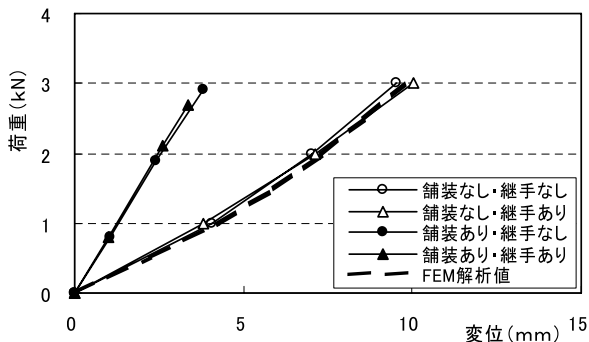


図-14 集中荷重載荷時の支間中央部変位

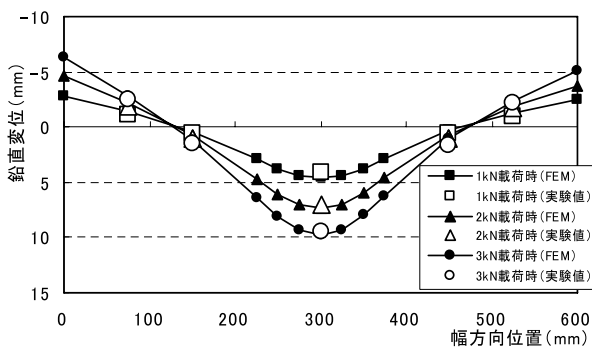


図-15 幅方向における変位分布

集中荷重載荷時のFRPパネルの幅方向および長手方向のたわみ分布を、それぞれ図-15、16に示す。これより、継手の有無によるたわみ分布の差はほとんどなく、継手がFRPパネルの変形におよぼす影響は少ないことがわかった。また、FEM解析結果と試験結果が、ほぼ一致しており、FEM解析により直交異方性の材料特性を有するFRPパネルの変形挙動を再現出来ることが確認できた。

図-17に、集中荷重載荷時における継手なし供試体中央部の荷重とひずみの関係を示す。FRPの破断ひずみは、表-3に示す常温供試体の材料特性から求めると、長手方向13875 $\mu$ 、幅方向6250 $\mu$ となる。これらより、長手方向に対しては基本荷重の5倍の荷重を載荷しているにもかかわらず、ひずみは20%以下であるが、幅方向に対しては、破断ひずみに近いひずみが生じていることがわかる。しかし、今回の試験は、パネル単体での試験であり、パネル継手部が自由端となっていることから、実際の境界条件と異なった試験となっている。このため、実際のFRPパネルでは、幅方向の応力が長手方向に分配されることを勘案すると、歩道床材として十分な耐力を有していることが確認できた。

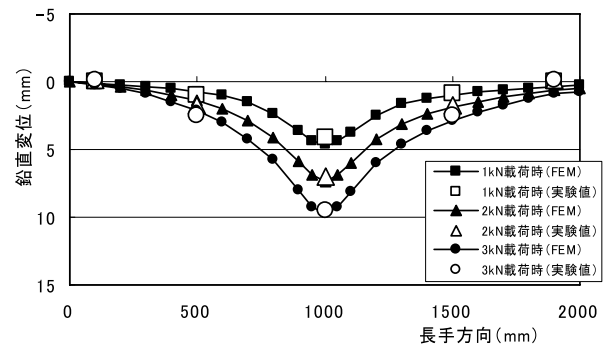


図-16 長手方向における変位分布

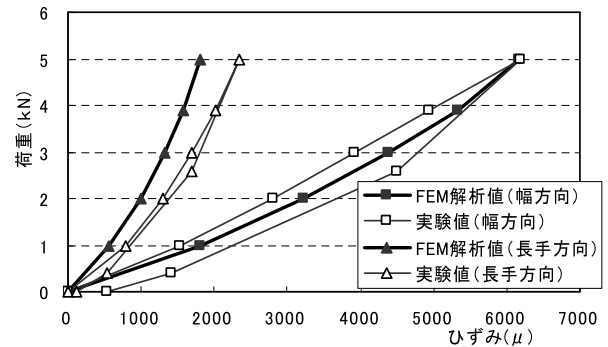


図-17 支間中央部におけるひずみ性状

## 6. 変形・振動性能

F R Pは、鋼材と比べ強度は同程度であるものの、弾性係数が小さいため、断面が応力ではなくたわみで決定される傾向にある。したがって、活荷重たわみおよび振動性状に対する照査を行う必要があり、前項において部分試験の結果に対する整合性を確認したF E M解析によりたわみおよび振動の検討を行った。

解析モデルは、床版支間1.5mとした一定面積を有する連続した床版を想定し、F R Pパネルの縁端部が全て対称となるような境界条件を与えた。また、解析にあたり、活荷重（群集荷重 5 kN/m<sup>2</sup>）たわみに対しては、舗装の剛性を考慮せず、固有振動数に対しては、質量増加に伴い振動数が減少する傾向にあるため、舗装の質量（ $\rho = 22.5\text{kN/m}^3$ ）のみを考慮した。このときの解析モデルを、**図-18**に示す。

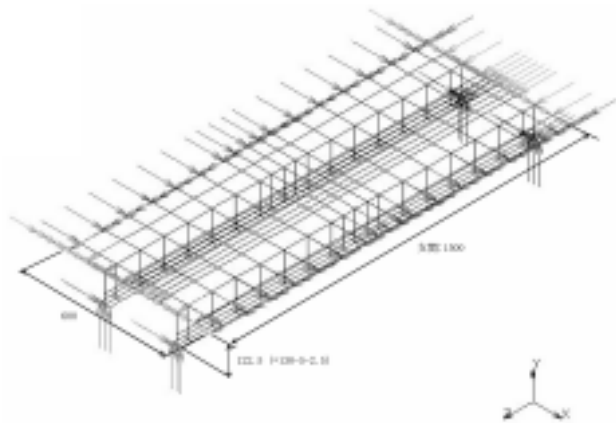


図-18 解析モデル

Time: 0.13  
Time: 0.000e+00  
Time: 5.999e+03

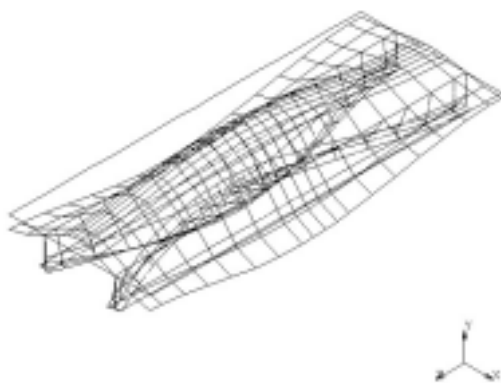


図-19 1次モードでのF R Pパネルの挙動

なお、F R Pパネルの許容たわみは、立体横断施設技術基準・同解説に準じ、 $L/400$ （ $L$ ：床材支間長） $= 3.750\text{mm}$ とし、人が不快に感じる固有振動数 $1.5 \sim 2.3\text{Hz}$ を避けることとした。

この結果、活荷重たわみは、 $0.984\text{mm}$ 、1次モードにおける固有振動数は $19.89\text{Hz}$ となり、いずれも許容値を満足することから、 $1.5\text{m}$ の支間においては、F R Pパネルは十分な変形・振動性能を有していることが確認できた。なお、**図-15**に、1次モードの固有値解析結果を示す。

## 7. おわりに

F R P材は軽量・高強度・耐食性など優れた材料特性を有していることから、近年、様々な分野で活用され、新材料として確固たる地位を得ている。しかし、F R Pは強化繊維と樹脂の複合材であり、ある程度自由な材料設計が可能であることから、適用にあたっては要求性能に合致した材料設計が必要である。

本研究では、既に合成床版として使用されている $\pi$ 型F R Pパネルの土木構造物への適用拡大を目指して、歩道床材への適用性の検討を行った。この結果、歩道床材として要求性能に対し、各種要素試験やF E M解析を実施することで、適用性を確認することができた。

今後は、F R Pの特性を生かした有用な構造の開発を検討していきたいと考えている。

最後に、今回の研究に関し、ご指導・ご協力いただいたA G Cマテックス（株）、ニチレキ（株）の関係各位に感謝の意を表します。

## <参考文献>

- 1) 久保圭吾, 古谷賢生, 能登宥愿: F R P合成床版の紹介, 宮地技報No20, pp.23-28, 2005.3.
- 2) 稲田博史, 栗田繁実, 小林智則, 佐藤昌義, 久保圭吾: F R P材を用いた橋梁付属物の紹介, 宮地技報No22, pp.15-18, 2007.3.
- 3) 山田優, 牧恒雄, 村井哲夫: 滑り抵抗調査の概要について(1), 第20回日本道路会議論文集

2008.2.9 受付