

高靱性セメント複合材料で上面増厚した鋼床版の水中環境下の輪荷重走行試験

Wheel Running Test in Water Condition of ECC Overlay Reinforcement Method on Steel Deck Plate

三田村 浩*, 石川 博之**, 福田 一郎***, 加藤 静雄****, 松井 繁之*****

Hiroshi MITAMURA, Hiroyuki ISHIKAWA, Ichiro FUKUDA, Shizuo KATO, Shigeyuki MATSUI

* (独) 土木研究所 寒地土木研究所 寒地基礎技術研究グループ (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)

** (独) 土木研究所 寒地土木研究所 寒地基礎技術グループ (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)

*** 鹿島建設 (株) 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1)

**** (株) ドーコン 構造部 (〒004-8585 札幌市厚別区中央1条5丁目4-1)

***** 工博 大阪工業大学 (〒614-8289 京都府八幡市美濃山一ノ谷4番地)

This study focused the effects of water accumulation on structural performance of steel-ECC composite deck structures. Wheel loading fatigue test was conducted using a steel-ECC composite deck specimen, in which the depth of water accumulation was adopted as an experimental parameter. In the loading test, pressure sensor was equipped in the specimen to record water pressure increase during loading. As a result of the test, it was found that anti-fatigue property of the specimen was secured when shallow water layer was maintained on the top of the ECC component. However, anti-fatigue property was rather remarkably deteriorated when the specimen was completely depressed under water. This deterioration followed water pressure increasing in the specimen, which appears to be a primary mechanism of the phenomena.

Key Words : wheel running test, Engineered Cementitious Composite, fatigue.

キーワード: 輪荷重走行試験, 高靱性セメント複合材料, 疲労, 合成床版

1. はじめに

近年, 既設鋼床版の疲労損傷事例が増加しているが¹⁾, 輪荷重によって発生する鋼床版の局所ひずみが主な原因とされており, 対策の1つとして, 鋼床版の上面にコンクリート等を増厚, 一体化させて合成床版構造とすることが考えられる。著者らは, その増厚材料として, 高靱性セメント複合材料 (Engineered Cementitious Composite ; ECC) を適用する上面増厚補強工法を考案した (以下, 本工法)²⁾。図-1 に本工法の概要図を示す。ずれ止めには, スタッドジベルと比較検討した結果³⁾, FRP製のプレート型ジベル (以下, PLジベル) を使用しており, PLジベルと鋼床版間は接着接合としている。鋼床版の上面は, 鋼床版の腐食抑制の観点から, 防水層により被覆する。ECCは, 繊維の架橋効果により引張力を負担でき, 一軸引張応力下においても擬似ひずみ硬化特性を示す材料である³⁾。輪荷重により鋼床版に発生する局所的な引張力や, ECCの乾燥収縮および鋼床版とECCとの温度差により発生する温度応力に対して, ひび割れ発生後も繊維の架橋効果により引張応力を伝達してひび割れを拘束するため⁴⁾, ひび割れ幅抑制効果と合成鋼床版としての補強効果が期待できる。そのため, 鋼床版のひずみ (応力) を低減し, 疲労耐久性の向上が期待できる。

著者らは, これまでに様々な検討を実施し, 一般的な環境下における本工法の疲労耐久性を確認している²⁾。一方, RC床版の疲労耐久性は, 水の影響により大きく低下することが従来から知られている⁵⁾。そこで, 本工法においても, 1)本工法全体のシス

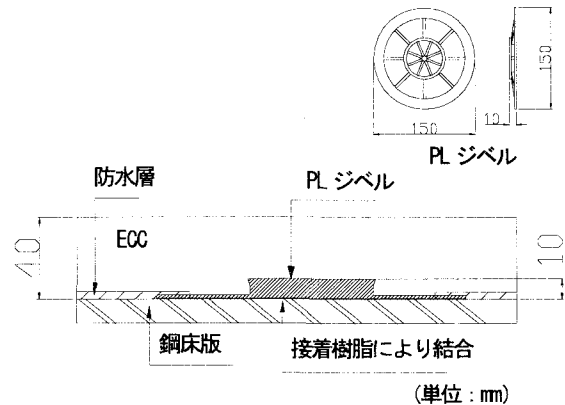


図-1 本工法の概要図

テムとしての構造疲労耐久性, 2) ECCの材料疲労耐久性に及ぼす水の影響を明らかにしておく必要があり, ここでは, 主として1)を対象とし, 実物大の試験体を用いて水の影響を段階的に変化させた輪荷重走行試験を実施した。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体の形状・寸法および載荷概要を図-2に示す。試験体は, 北海道江別市に暴露された試験体からの切り出し試験体であり, 試験開始時は, 1年半程度の材齢が経過している。そのため, 乾燥収縮等の影響および切断時の熱の影響等により, 床版端部から

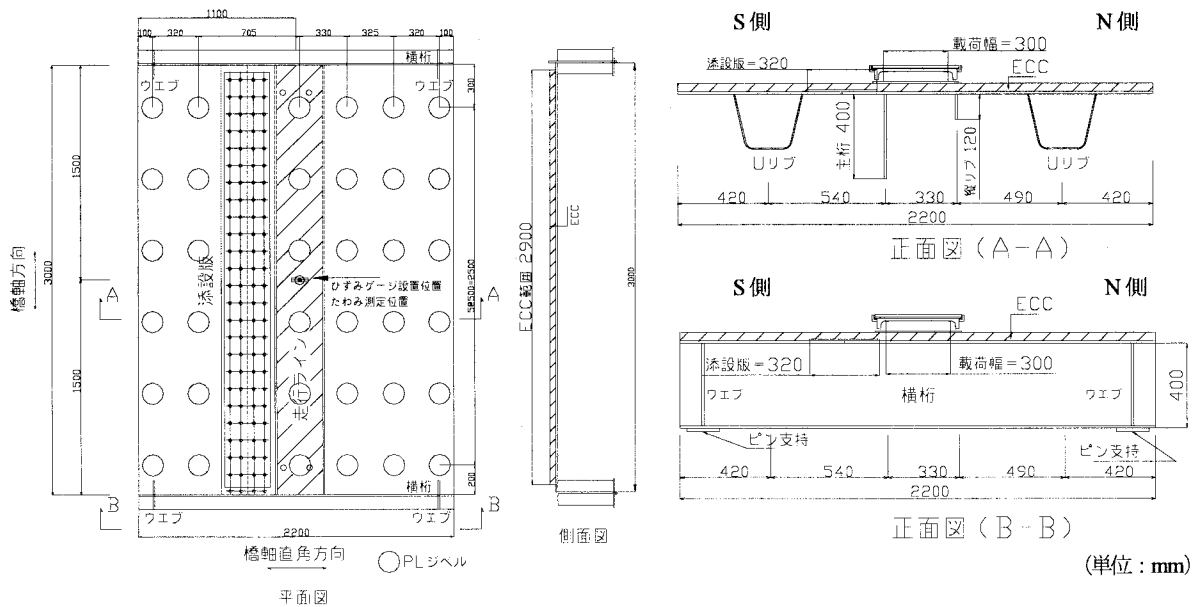


図-2 試験体形状・寸法および荷荷条件

PL ジベルまでの ECC は、試験開始前の時点で鋼板から剥離しており、端部での鋼板と ECC 間には、大きいところで 2mm 程度の隙間が生じていた。試験体は、主桁支間 3m、橋軸直角方向 2.2m、鋼床板厚さ 12mm、U リブの板厚 9mm、U リブと鋼床版の溶接等級は F 等級である。ECC 厚さ 40mm、防水層の膜厚は 2mm である。試験体の周囲は、実験の途中段階から側面に水を溜めるために山形鋼を溶接した。ECC は、長さ 12mm、直径 0.04mm のポリビニルアルコール (PVA) 繊維を体積率で 2% 混入したものである。試験体作製時の ECC のフレッシュ性状を表-1 に、ECC 硬化後の強度試験結果を表-2 に示す。ECC の引張降伏強度および引張終局ひずみは、既往の方法⁹⁾に基づき、ダンベル型供試体を用いた一軸直接引張試験により求めた。一軸直接引張試験の測定例を図-3 に示す。鋼床版の材質は SM490A である。鋼床版の機械的性質を表-3 に示す。鋼床版の引張試験片は、金属材料の引張クリープ試験 (JIS Z 2271) に用いられるつば付き円形断面試験片として鋼板の余長部分から採取した。防水層には吹付け硬化型のポリウレタ樹脂を用いており、ECC と防水層間の付着力は 0.1N/mm² 以下であり、鋼床版と ECC は PL ジベルによりせん断伝達する。PL ジベルと鋼床版の接合には、2 液混合型のアクリル樹脂を用いており、接合部を対象にした疲労試験では、せん断疲労に関する基礎データを取得している⁷⁾。

2.2 荷荷要領

荷荷重走行試験の実施要領を表-4 に、実施状況を写真-1 に示す。荷荷の支持条件は、図-2 に示すように横桁下の 4 隅で長さ 150mm の丸鋼を用いた 4 点単純支持とした。走行ラインは橋軸直角方向中央とし、直径 500mm、幅 300mm の鉄輪が試験体の中央から前後 1m を毎分 28 往復する。走行部には、120mm × 300mm、厚さ 50mm の鋼製ブロックを 125mm の間隔で並べ、その上下をベニヤ板で挟み、その上に厚さ 9mm の鋼板を敷いた。さらに、走行ラインの両端部で鋼床版に穴をあけて、ボルトによ

表-1 ECC のフレッシュ性状

項目	試験値
スランプフロー (cm)	43.0 × 39.0
空気量 (%)	8.5
単位容積質量 (kg/m ³)	1,884

表-2 ECC の強度試験結果

項目	試験値
圧縮強度 (N/mm ²)	31.8
ヤング係数 (kN/mm ²)	16.4
引張降伏強度 (N/mm ²)	2.9
引張終局ひずみ (%)	1.6

(注) 20°C 水中養生 材齢 28 日

表-3 鋼床版の機械的性質 (JIS Z 2271)

項目	試験片	
	圧延	圧延直角
降伏点 (N/mm ²)	376	373
引張強さ (N/mm ²)	544	545
伸び (%)	30.6	29.6
絞り (%)	76.7	67.6

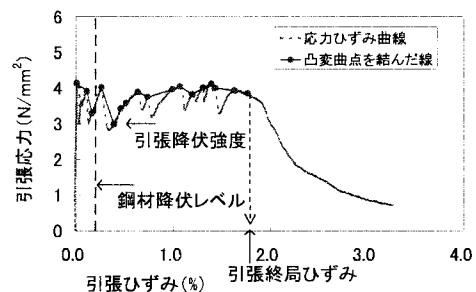


図-3 ECC の一軸直接引張試験の測定例

表一 試験要領

実験段階	荷重 (kN)	回数 (回)	水張り方法	
			上面	側面
STEP1	70	20万	1mm	—
STEP2	84	20万	10mm	ECC 下面
STEP3	98	10万		から 20mm
STEP4	98	10万	10mm	全面

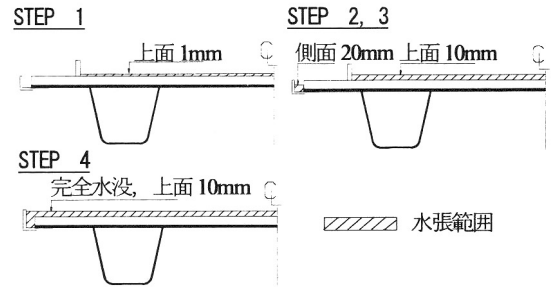


図-4 水張り方法

り鋼床版と前述の鋼板を固定した。走行ラインの ECC 表面は、不陸調整のために STEP2 以降においてエポキシ樹脂で被覆した。樹脂は透明度の高いものを使用し、実験の各段階で ECC の表面を観察できるようにした。

荷重の大きさは以下の理由で設定した。鋼床版のような薄板集成部材では、設計活荷重の対象となる大型トラックの後タンデム 2 輪が個別に作用することが、実橋の載荷試験においても確認されている⁹⁾。そこで、実自動車荷重を想定し、法定 1 軸重 50kN に衝撃を考慮して 1.4 を掛けた 70kN を基本として、段階的に 84kN、98kN に引き上げた。輪荷重走行試験の各段階で静的載荷試験をスパン中央およびスパンの 1/4 点で実施した。

水張りの方法を図-4 に示す。水の影響を詳細に確認するため、段階的に水の影響を大きくした。すなわち、STEP1 は ECC 上面が常に湿潤している状態、STEP2 および 3 は ECC 上面が既往の RC 床版における水張り輪荷重走行試験⁹⁾と同レベルで、さらに側面の山形鋼の内部に ECC の下面から 20mm の高さまで水を滯水させた状態、STEP4 は対象区間が完全に水没した状態であり、輪荷重載荷により、ECC と鋼床版 (防水層) 間に浸水した水に圧力が生じる状態を想定して設定した。

3. 実験結果

図-5 および図-6 に、静的載荷における主桁支間中央での鋼床版たわみおよび鋼床版ひずみ (二軸ゲージのうち橋軸直角方向) の経時変化を示す。橋軸直角方向の計測位置は、図中に併記した。図中の凡例は、それぞれ「載荷時」が荷重載荷時、「除荷時」が残留たわみおよび残留ひずみ、「活荷重」が「載荷時」から「除荷時」を引いた値である。図-7 に STEP1 および STEP4 終了後の ECC のひび割れ状況を示す。

STEP1 では、水張りを行う前の初期載荷によって、図-7 に示す位置でひび割れが発生した。ひび割れ幅は 0.04mm 程度であり、ECC のひび割れ幅と繊維の架橋応力の関係⁹⁾から、ひび割れ部における ECC は引張力を負担していたと思われる。その後、ECC 表面に水を滯水させて試験を行ったが、ひび割れから水が浸透する様子が伺えた。試験中は、ECC 内部に水が浸透することや、ECC 表面からの揮発などによって水量が減少したため、適宜水を追加して、常に ECC 表面に 1mm 程度滯水する状態にした。STEP1 終了時点では、ひび割れ幅を含めて、大きな変化は見られなかった。ただし、STEP1 では走行ライン下面の ECC 表面の不陸によって試験機に過大な負荷がかかったため、STEP2 に移行する際に、ECC 表面を乾燥させた後、エポキシ樹脂にて ECC 表面の不陸調整を行った。

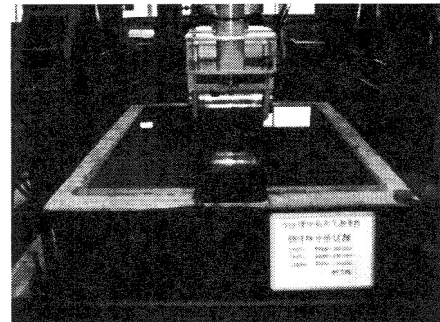


写真-1 輪荷重走行試験実施状況

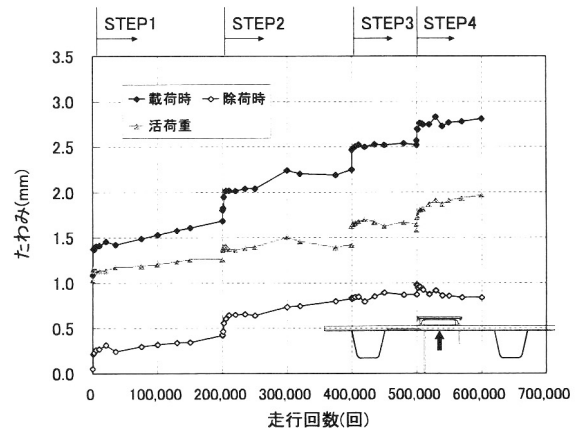


図-5 たわみの経時変化

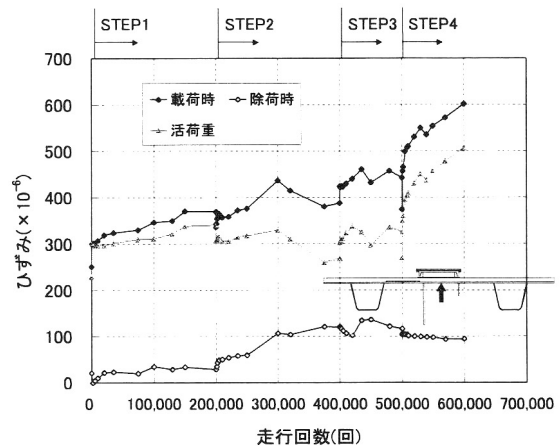


図-6 ひずみの経時変化

STEP2では、端部に20mm程度の高さで水を滞水させた状態とし、荷重を84kNまで引き上げて20万回の載荷を行った。累計30万回の前後で、鋼製ブロック下のベニヤが抜けるなどして荷重が偏載した可能性が高く、載荷点直下のひずみが一時的に安定しなかったが、たわみやひび割れに大きな変化は認められなかった。

STEP3では、STEP2と同じ水張りの状態で荷重を98kNまで引き上げた。たわみおよびひずみには大きな変化が認められなかったが、STEP3終了間際には、走行部付近からECCの成分が流出したと思われる白濁水が観察された。また、終了後に行った水抜きでは、走行部付近に乾燥しない箇所が確認された。STEP3までの最大ひび割れ幅は、いずれも0.06mmだった。

STEP4では、STEP1~3までと異なり、鋼床版たわみおよび鋼床版ひずみのいずれも急速に増加した。開始直後に側面部から気泡が発生し(100回程度で消失)、9千回(累計50.9万回)にはN側走行部近傍から水の噴出しが観察された(写真-3)。また、5万回(累計55万回)からSTEP4終了までS側でも水の噴出しが観測された。写真-2に水の噴出し状況を示す。

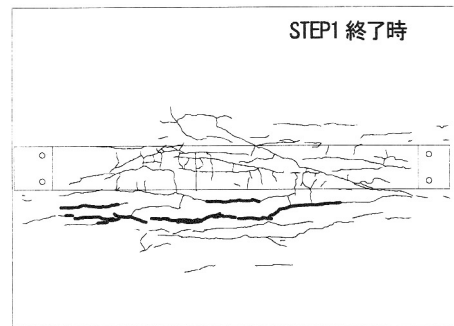
実験終了後に走行ライン下の樹脂を剥がしてECC表面を観察したところ、既往の実験結果²⁹⁾とは大きく異なり、主桁支間中央付近のECCが割れている状態が確認された(写真-3)。割れは、走行方向と平行に生じていた。また、割れている部分近傍のECCの表面は、樹脂に付着した状態で2~3mmの厚さで剥離していた。

4. 考察

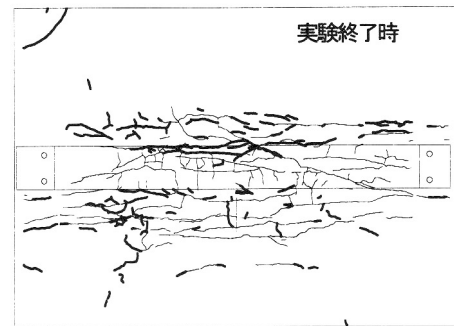
図-8および図-9に、STEP1およびSTEP4における主桁支間中央における橋軸直角方向のたわみ分布およびひずみ分布を示す。なお、縦軸は、載荷荷重の違いを正規化するため、計測値に最大載荷荷重98kNを載荷荷重で除した値を乗じた値(換算活荷重たわみおよび換算活荷重ひずみと定義)として示した。表-5にすべてのSTEPにおける換算活荷重たわみおよび換算活荷重ひずみの推移を示す。

表-5から、STEP3までは、たわみ、ひずみのいずれも概ね安定していることがわかる。また、図-7から、既往の実験²⁹⁾と同様に、ECC表面のひび割れは載荷荷重の上昇により増加するが、ひび割れ幅は最大で0.06mmと既往の実験²⁹⁾と同レベルであり、前述の理由によりECCの引張性能が確保されていたと思われる。これは、ECCが粗骨材を使用せず、細骨材の粒径も小さいために、一般的なRC床版の水張り疲労試験で生じる摺磨きの影響が小さいことも一因であると思われる。また、別途実施したECC単体を対象にした水中での曲げ疲労試験においても、ECCの疲労破壊までの回数は気中環境と比べて低下するが、その低下の程度は著しいものではないことが確認されており、ECCの材料疲労耐久性は、水の影響による低下度合いは普通コンクリートと同等かまたは小さいものと推測される。また、これらのことから、ECC表面および下面に流水がある状態でも、本工法のシステムとしての疲労耐久性も、既往のRC床版等と比較して大きく低下しない可能性が高いと思われる。

これに対し、STEP4では、図-8、図-9からわかるように、



(注) 太線は初期載荷で生じたひび割れ



(注) 太線はSTEP2以降で生じたひび割れ

図-7 ひび割れ状況



写真-2 水の噴出し状況

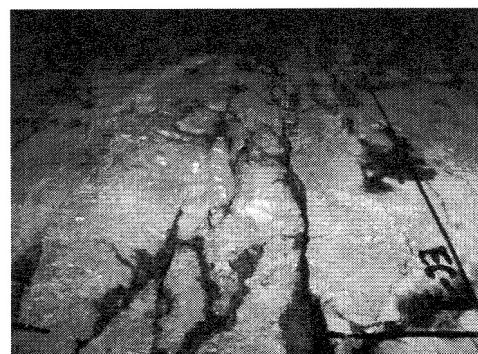


写真-3 載荷版直下の最終状況

表-5 換算活荷重たわみ
および換算活荷重ひずみの変化

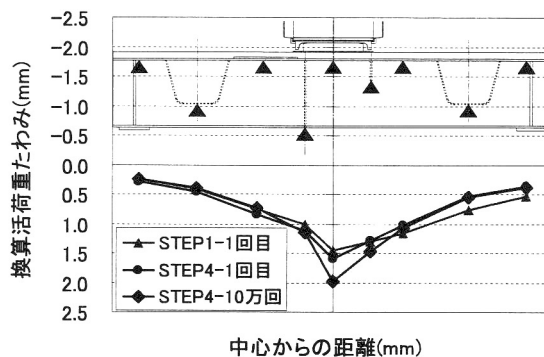
STEP	回数	たわみ		ひずみ	
		計測値 (mm)	比率	計測値 ($\times 10^{-6}$)	比率
1	1	1.45	1.00	322	1.00
	20万回	1.77	1.22	477	1.48
2	1	1.60	1.11	359	1.11
	20万回	1.66	1.15	314	0.97
3	1	1.63	1.13	303	0.94
	10万回	1.65	1.14	326	1.01
4	1	1.59	1.10	271	0.84
	10万回	1.97	1.36	508	1.58

(注) 比率はいずれもSTEP1の1回目に対するもの

載荷点直下のたわみおよび鋼床版のひずみが大きくなり、分布の勾配が急になっている。既往の実験において、鋼床版単体の場合はECC合成後と比較して勾配が急なことが確認されており⁹⁾、このことから、合成効果が小さくなり、鋼床版単体の挙動に近い状態になっていることが伺える。STEP3までは、このようなことが確認されなかったことから、ECC表面および側面を水で覆い、かつ支圧応力の大きい荷重ラインのECC上面を樹脂で被覆したため、輪荷重載荷の際にECCと鋼床版間に滞水した水の圧力が上昇した可能性があると思われる。

そこで、輪荷重走行の際に、ECCと鋼床版(防水層)間に生じる水圧の測定を目的とした実験を実施した。実験は、STEP4まで終了した試験体を利用して、できるだけ水圧が上昇するように、走行ラインおよび支持条件を変更して試験を実施した。図-10に試験方法を示す(平面図は図-2を参照)。図-10に示す3箇所(P1, P2, P3)で、鋼床版の下面からECC下面まで貫通する孔を設けて圧力計により水圧を測定した。圧力計の設置状況を写真-4に示す。荷重を84kN、水張り方法をSTEP4と同じ方法で行い、10万回の輪荷重走行を実施した。

圧力計の変化の模式図を図-11に示す。圧力計は、荷重初期は値が安定しないが、輪荷重走行を行うことで安定した。これは、荷重初期は、水が圧力計周辺に十分に浸透していないが、走行の繰り返しにより浸透するためと思われる。安定した後は、荷重が作用しない状態では静水圧にほぼ等しい値(約1.5kPa)となり、静的荷重の際も荷重が頂点に達した際は圧力が上昇するが(約7kPa)、そのまま荷重を保持した状態では、静水圧と等しい値まで徐々に低下した。これに対し、輪荷重走行の際には、図-11に示すように最終的に0.6MPaまで上昇した。特に、徐行走行と通常走行でも圧力の値が異なり、速度の影響を受けることが確認された。また、荷重の走行位置と圧力計の値の関係を図-12に示す。このように圧力は、輪荷重が近づくにつれて上昇し、離れるとゼロになる挙動を示すことが図-12からも明らかである。3箇所の圧力が異なるのは、周囲の水の滞水状況や空隙の分布状況



中心からの距離(mm)

図-8 たわみ分布

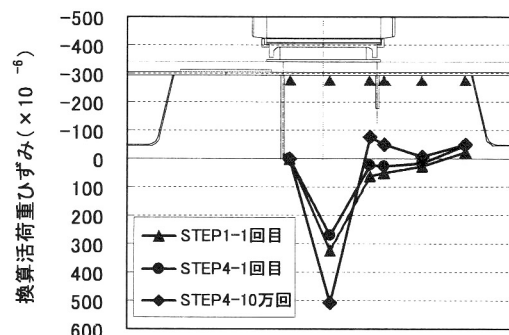


図-9 ひずみ分布

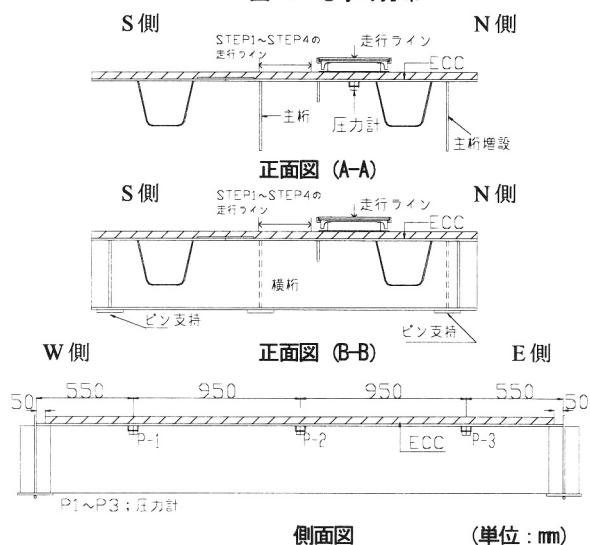


図-10 圧力測定の試験方法

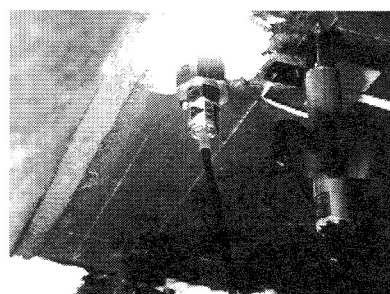


写真-4 圧力計の設置状況

が若干異なっていたためと思われる。

本実験終了後も ECC 表面を観察したが、STEP4 のような ECC 表面での橋軸方向の害れは認められなかった。ただし、上面からハンマーで叩いて観察したところ、健全部と比べて反発が小さく、内部で損傷が進んでいるものと考えられた。

本実験で得られた結果から、例えば図-13 に示すような ECC の破壊メカニズムが考えられる。鋼板と ECC 間に水が介在して、ECC の上面まで水が満たされた状態で荷重が作用した場合、載荷部分の近傍の水には、載荷荷重を設置面積で除した圧力が発生すると思われる。ECC の水圧が Pascal の原理により載荷部近傍に等圧で作用して、橋軸直角方向で PL ジベルを支点とした固定梁に等分布荷重で作用すると仮定すると、発生する水圧による曲げモーメントが、ECC の破壊抵抗曲げモーメントを上回るときに破壊することが想定される。また、ひび割れ内部に浸透した水に生じる間隙水圧の繰返しも上記に複合して、損傷が進行すると思われる。実際の境界条件は複雑であり、ECC と防水層間の摩擦やわずかな空隙等により水圧は載荷部から離れるに従い低下すると思われるが、概ねこのような状態が発生して、ECC の破壊に至ったものと推測される。また、本実験は、鉄製の載荷版を使用しているため、拘束効果が高いと考えられるが、大型車のダブルタイヤを想定した載荷方法で試験した場合には、タイヤ間での拘束がないため、破壊がさらに進行し易くなる可能性がある。

本実験は、屋外環境で暴露された切り出し供試体を使用していること、水圧測定では近傍が破壊した試験体を用いていること、速度の影響を定量的に評価できていないこと、水の移動の実態がつかめていないことなどから、今後は新規の試験体等を用いた実験によりデータの妥当性を確認していく必要があるが、今後の同種の工法を展開していく上での重要なデータの 1 つであると考えられる。

5. まとめ

本実験より、ECC を上面増厚した本工法は、設計活荷重レベルにおいては、上面および下面に流水がある状態でも、大きな疲労耐久性の低下は生じないことが確認された。これに対し、鋼床版上面から ECC 上面までを完全に水浸させて、荷重の作用範囲近傍を水で密閉させた状態では、比較的早期に損傷を生じること、ECC と鋼床版（防水層）間に滞水した水の圧力が静的載荷と比較して大きく上昇することが確認された。今後は、実験方法の確立を図りつつ、損傷のメカニズムをより明らかにしていきたい。

【参考文献】

- 1) 構造委員会鋼床版の疲労小委員会：鋼床版の疲労，土木学会論文集，第 410/I-12, pp.25-35, 1989.
- 2) 三田村 浩，須田 久美子，福田 一郎，今野 久志，松井 繁之；“高韌性繊維補強セメント複合材料による鋼床版上面増厚補強に関する研究”，土木学会論文集 E，Vol. 62, No. 2, pp.356-375, 2006.
- 3) 坂田昇，須田久美子，関田徹志，福田一郎，平石剛紀，巴史郎；高韌性繊維補強セメント複合材料の利用拡大，鹿島技術研究所年報，Vol.52, pp.233-238, 2004.

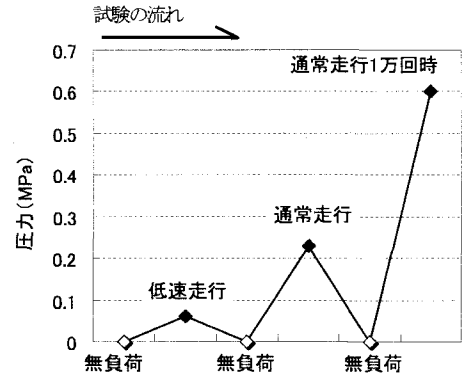


図-11 圧力の推移の模式図

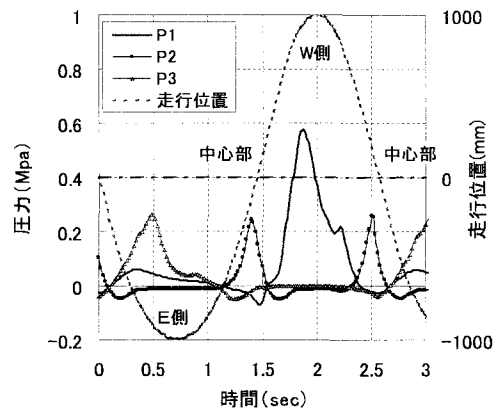


図-12 走行位置と圧力の関係

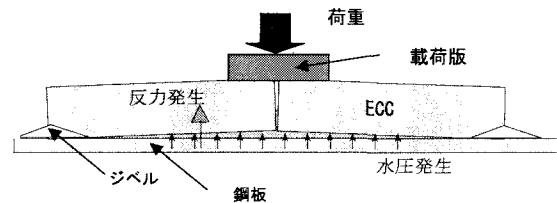


図-13 破壊メカニズムの例

- 4) 関田徹志，永井覚，丸田誠；高韌性繊維補強セメント複合材料の施工性および耐久性に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.25, No.1, pp.1859-1864, 2003.
- 5) 松井繁之；移動荷重を受ける道路橋 RC 床版の疲労強度と水の影響について，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.9, No.2, pp.627-632, 1987.
- 6) コンクリート技術シリーズ64 複数微細ひび割れ型繊維補強モルタルの評価と利用，土木学会，2005.
- 7) 湯室貴章，平城弘一，三田村浩，松井繁之，須田久美子，福田一郎；FRP ジベルのせん断伝達耐荷性能に関する基礎的検討，土木学会年次学術講演会，Vol.60, CS2, pp.159-160, 2005.
- 8) Li, V. C. et al: Tensile Strain-Hardening Behavior of Polyvinyl Alcohol Engineered Cementitious Composite, ACI materials Journal, Vol.98, No.6, pp.483-492, 2001