

道路橋用アルミニウム床版の ECC 台座の ひび割れ抵抗試験および疲労試験

ALST 研究レポート 20

2010 年 12 月

日本軽金属(株)グループ技術センター

萩澤亘保，長尾隆史

大阪大学大学院工学研究科

大倉一郎

概要

本研究では、道路橋用アルミニウム床版の台座に用いられる ECC の耐久性を明らかにするために、二種類の試験、すなわち、ECC 台座のひび割れ抵抗試験および ECC 台座の疲労試験を実施する。

道路橋用アルミニウム床版を有する鋼桁橋においては、ECC の施工時に生じる乾燥収縮、および線膨張係数が異なるアルミニウム床版と鋼桁が温度変化を受ける場合、ならびに連続桁においては負曲げモーメントが作用する中間支点上の ECC 台座に引張ひずみが生じる。ECC 台座のひび割れ抵抗試験では、ECC 台座に生じる引張ひずみとひび割れの関係を明らかにし、ECC 台座のひび割れを抑制するために必要とされる降伏ひずみ、すなわち必要降伏ひずみを提案する。

トラックの通過による、橋軸直角方向のアルミニウム床版の繰返し変形によって、アルミニウム床版から繰返しの支圧力が ECC 台座に作用する。この繰返しの支圧力に対して ECC 台座は安全でなければならない。ECC 台座の疲労試験では、ECC 台座およびアルミニウム床版型材中空部の充填モルタルが十分な疲労耐久性を有していることを確認する。

謝辞

本研究は、日本科学技術振興機構の平成 19 年度第二回委託開発事業のもとで行われた。ECC の施工および ECC のひび割れ抵抗試験は鹿島建設株式会社 技術研究所、ECC 台座の疲労試験は日本建設機械化協会 施工技術総合研究所で実施された。鹿島建設株式会社 技術研究所の林大介氏、橋本学氏、内田雄士氏、日本建設機械化協会 施工技術総合研究所の小野秀一氏、大城剛氏には実験にご協力をいただくとともに、有用な助言をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

目次

| | | |
|-------|------------------------|----|
| 第1章 | 序論 | 1 |
| 第2章 | ECC の材料特性 | 2 |
| 2.1 | フレッシュ性状試験 | 2 |
| 2.2 | 圧縮試験 | 2 |
| 2.3 | 一軸直接引張試験 | 3 |
| 第3章 | ECC 台座のひび割れ抵抗試験 | 7 |
| 3.1 | 試験体 | 7 |
| 3.2 | 載荷試験 | 7 |
| 3.3 | 試験結果 | 10 |
| 3.3.1 | ECC 台座のひび割れ | 10 |
| 3.3.2 | ひずみ | 13 |
| 3.4 | 材齢 28 日必要降伏ひずみ | 15 |
| 第4章 | ECC 台座の疲労試験 | 16 |
| 4.1 | 試験体 | 16 |
| 4.2 | 疲労試験 | 17 |
| 4.3 | 試験結果 | 19 |
| 4.3.1 | 中央載荷 | 19 |
| 4.3.2 | 端載荷 | 21 |
| 第5章 | 結論 | 23 |
| | 参考文献 | 24 |
| 付録 A | ECC の施工 | 25 |
| A.1 | ECC の配合，練混ぜ方法および品質管理項目 | 25 |
| A.2 | ECC の試験体への施工 | 26 |

第1章 序論

道路橋用アルミニウム床版の移動トラックタイヤ載荷疲労試験において、アルミニウム床版には疲労亀裂が発生しなかったが、アルミニウム床版下フランジと鋼桁上フランジとの間に設けられたモルタル台座の内側と外側の表面に、図-1.1 に示すようなひび割れが発生した¹⁾。モルタル台座のひび割れは、アルミニウム床版の疲労耐久性に影響を与えるレベルのものではなかったが、ひび割れは、モルタル台座自身の耐久性を損ね、引いてはモルタル台座の中にある頭付きスタッドを腐食させる可能性がある。したがって、道路橋用アルミニウム床版の実用化のためには、このモルタル台座のひび割れを抑制しなければならない。

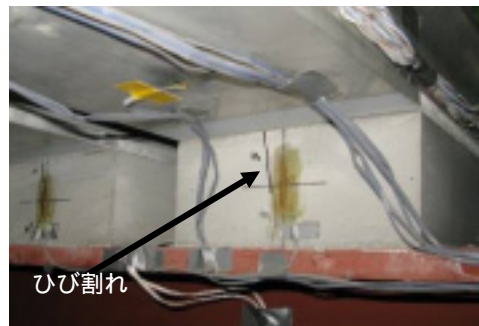


図-1.1 モルタル台座のひび割れ

モルタル台座のひび割れを抑制する材料として、ECC(Engineered Cementitious Composite) が挙げられる。ECC は、ビニロン樹脂繊維をモルタルに混入することにより、引張ひずみに対して抵抗できる高靱性のセメント複合材料である^{2),3)}。

本研究では、道路橋用アルミニウム床版の台座に用いられる ECC の耐久性を明らかにするために、二種類の試験、すなわち、ECC 台座のひび割れ抵抗試験および ECC 台座の疲労試験を実施する。

道路橋用アルミニウム床版を有する鋼桁橋においては、ECC の施工時に生じる乾燥収縮、および線膨張係数が異なるアルミニウム床版と鋼桁が温度変化を受ける場合、ならびに連続桁においては負曲げモーメントが作用する中間支点上の ECC 台座に引張ひずみが生じる。ECC 台座のひび割れ抵抗試験では、ECC 台座に生じる引張ひずみとひび割れの関係を明らかにし、ECC 台座のひび割れを抑制するために必要とされる降伏ひずみ、すなわち必要降伏ひずみを提案する。

トラックの通過による、橋軸直角方向のアルミニウム床版の繰返し変形によって、アルミニウム床版から繰返しの支圧力が ECC 台座に作用する。この繰返しの支圧力に対して ECC 台座は安全でなければならない。ECC 台座の疲労試験ではこれを確認する。

第2章 ECCの材料特性

2.1 フレッシュ性状試験

フレッシュ性状試験結果を表-2.1に示す。ECCの配合，練混ぜ方法，および事前に設けられた品質管理項目と品質管理値を付録A.1に示す。全てのバッチにおいて，練り上げられたECCは，スランプフローおよび空気量に関する品質管理値を満足している。ここで，スランプフローは，上部開口径100mm，下部開口径200mm，高さ300mmの円錐状の筒に，上部開口からECCを満たし，その筒を上方に取去った後のECCの広がりに対する計測値である。

表-2.1 フレッシュ性状試験結果

| 試験項目 | スランプフロー (mm) | 空気量 (%) | 単位容積質量 (kg/m ³) | 練上り温度 () |
|-------|-----------------|------------|--------------------------------|--------------|
| 1バッチ目 | 520×515 | 18.0 | 1658 | 19.6 |
| 2バッチ目 | 495×490 | 17.0 | 1669 | 19.7 |
| 3バッチ目 | 510×510 | 16.5 | 1656 | 19.4 |
| 4バッチ目 | 520×515 | 18.0 | 1658 | 19.6 |
| 品質管理値 | 550±100 | 15±5 | - | - |

2.2 圧縮試験

3本の円柱試験片(100×200mm)の圧縮試験結果を表-2.2に示す。同表のヤング係数は割線静弾性係数であり，終局ひずみは，圧縮強度に対応するひずみである。材齢28日および91日における応力-ひずみ関係を図-2.1に示す。

表-2.2と図-2.1から分かるように，材齢28と91日とで，終局ひずみは同じであるが，ヤング率と圧縮強度に関しては，材齢28日の値に対して材齢91日の値が大きくなっている。

表-2.2 圧縮試験結果

| 試験片 | 材齢28日 | | | 材齢91日 | | |
|------|----------------|---------------|--------------|----------------|---------------|--------------|
| | ヤング係数 (GPa) | 圧縮強度 (MPa) | 終局ひずみ (%) | ヤング係数 (GPa) | 圧縮強度 (MPa) | 終局ひずみ (%) |
| No.1 | 13.75 | 26.7 | 0.332 | 15.64 | 34.3 | 0.326 |
| No.2 | 13.54 | 27.3 | 0.351 | 14.94 | 32.7 | 0.330 |
| No.3 | 13.71 | 26.4 | 0.337 | 15.60 | 35.5 | 0.339 |
| 平均値 | 13.67 | 26.8 | 0.340 | 15.39 | 34.2 | 0.332 |

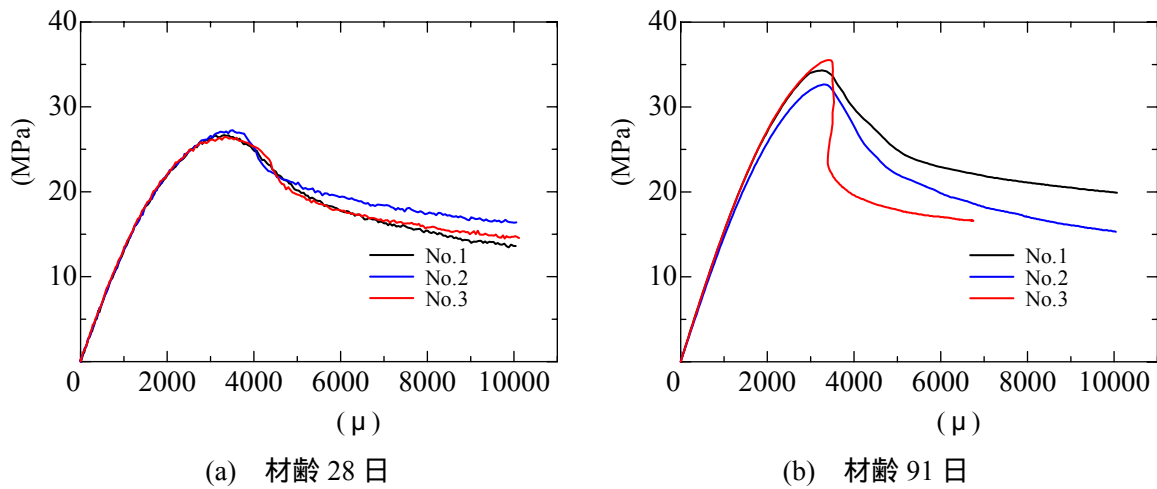


図-2.1 圧縮試験による応力 - ひずみ関係

2.3 一軸直接引張試験

図-2.2 に示すダンベル型の試験片[測定区間長(ゲージ長)80mm,幅30mm,厚さ13mm]による一軸直接引張試験結果を表-2.3 に示す. 試験は材齢 28 日および 91 日で行われ, 各 5 本の試験片に対して試験が実施された. 同表に示す平均値は, 試験片 5 本の測定結果の最大と最小を除く, 下線が付された 3 本の平均である.

ヤング係数は, 応力 - ひずみ関係の原点における接線係数, 降伏強度は, 応力 - ひずみ関係において最初に現れる応力のピーク値, 降伏ひずみは降伏強度に対応するひずみ, 引張強度は最大の引張応力, 終局ひずみは引張強度に対応するひずみである. 材齢 28 日と 91 日における応力 - ひずみ関係をそれぞれ図-2.3, 2.4 に示す.

表-2.3 および図-2.3 と 2.4 から分かるように, ヤング係数, 降伏強度, 引張強度に関しては, 材齢 28 日と 91 日とで, 試験片のバラツキによる違いが見られる程度で, 両者の値はそれぞれ同じであるとみなせる. しかし, 降伏ひずみと終局ひずみに関しては, 材齢 91 日の平均値は, 材齢 28 日の平均値に対して, 前者が 0.62 倍まで, 後者が 0.61 倍まで低下している.

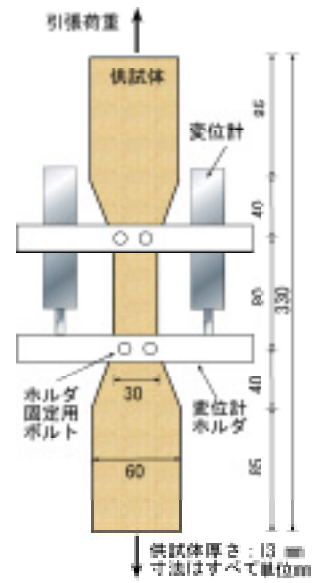
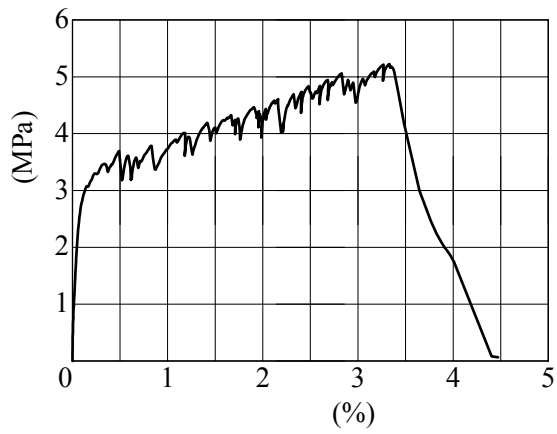


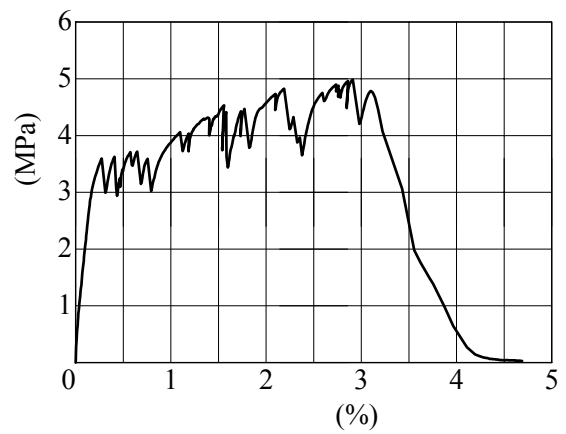
図-2.2 一軸直接引張試験

表-2.3 一軸直接引張試験結果

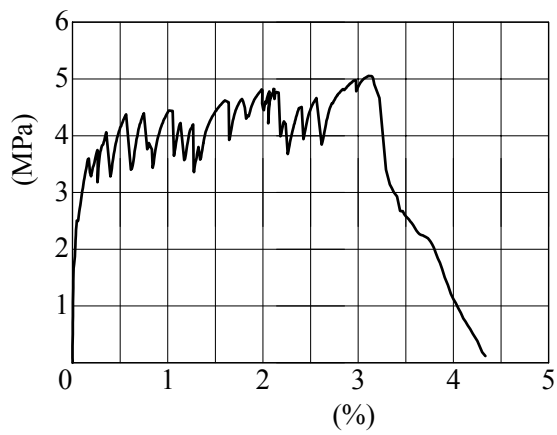
| 材齢 28 日 | | | | | |
|---------|----------------|---------------|--------------|---------------|--------------|
| 試験片 | ヤング係数 (GPa) | 降伏強度 (MPa) | 降伏ひずみ (%) | 引張強度 (MPa) | 終局ひずみ (%) |
| No.1 | <u>5.67</u> | <u>3.70</u> | 0.490 | 5.22 | 3.33 |
| No.2 | 3.07 | <u>3.63</u> | <u>0.408</u> | 4.99 | <u>3.10</u> |
| No.3 | <u>13.81</u> | <u>3.60</u> | <u>0.171</u> | <u>5.05</u> | <u>3.11</u> |
| No.4 | 18.25 | 3.37 | 0.133 | <u>5.14</u> | 2.20 |
| No.5 | <u>16.83</u> | 4.22 | <u>0.240</u> | <u>5.18</u> | <u>2.40</u> |
| 平均値 | 12.10 | 3.69 | 0.304 | 5.12 | 2.87 |
| 材齢 91 日 | | | | | |
| 試験片 | ヤング係数 (GPa) | 降伏強度 (MPa) | 降伏ひずみ (%) | 引張強度 (MPa) | 終局ひずみ (%) |
| No.1 | <u>7.45</u> | <u>3.90</u> | 0.296 | 4.43 | <u>1.93</u> |
| No.2 | 19.35 | <u>4.16</u> | <u>0.175</u> | 5.67 | 3.06 |
| No.3 | <u>14.51</u> | <u>3.52</u> | <u>0.141</u> | <u>5.20</u> | <u>2.00</u> |
| No.4 | 5.79 | 3.05 | 0.083 | <u>4.46</u> | <u>1.32</u> |
| No.5 | <u>17.11</u> | 4.46 | <u>0.250</u> | <u>4.67</u> | 0.61 |
| 平均値 | 13.02 | 3.86 | 0.189 | 4.78 | 1.75 |



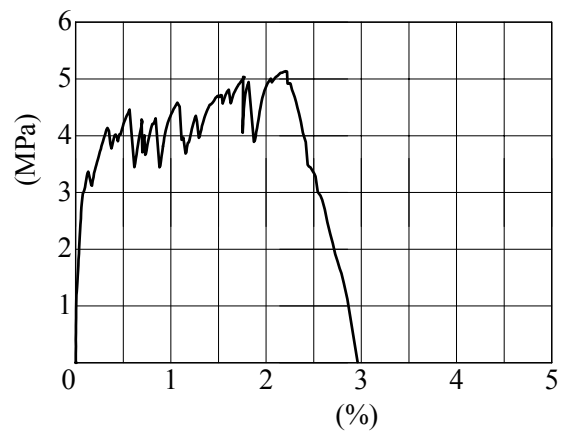
(a) No.1



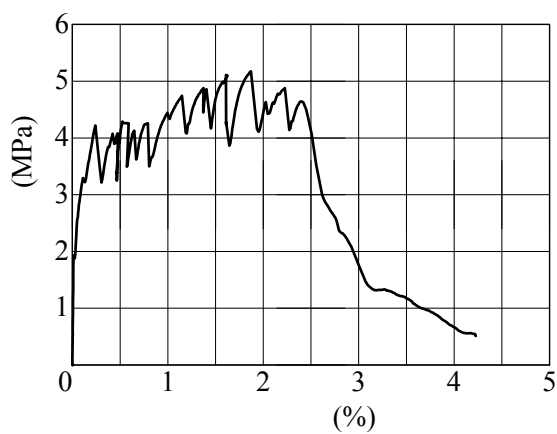
(b) No.2



(c) No.3

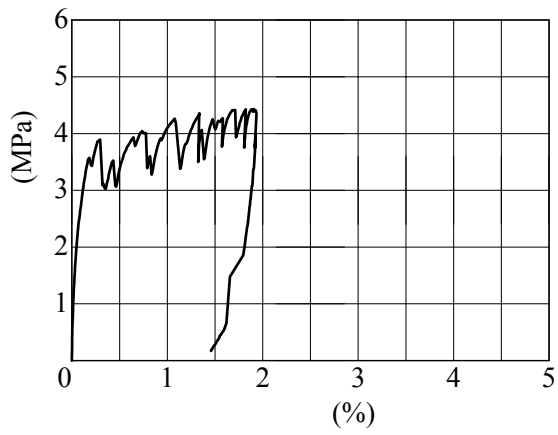


(d) No.4

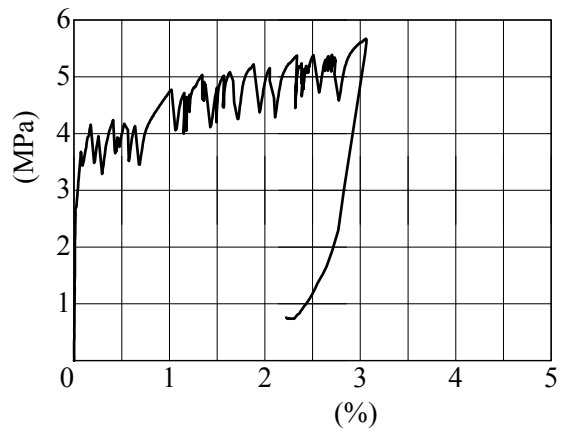


(e) No.5

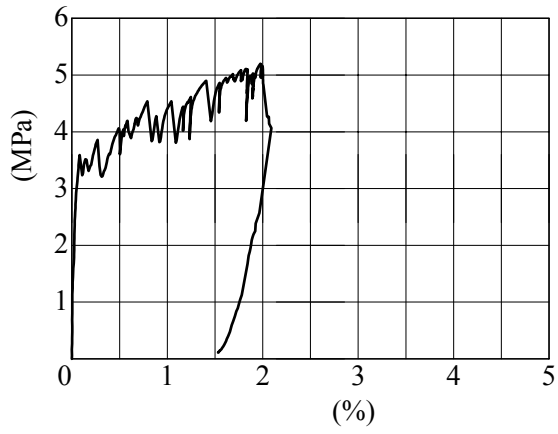
図-2.3 一軸直接引張試験による応力-ひずみ関係 (材齢 28 日)



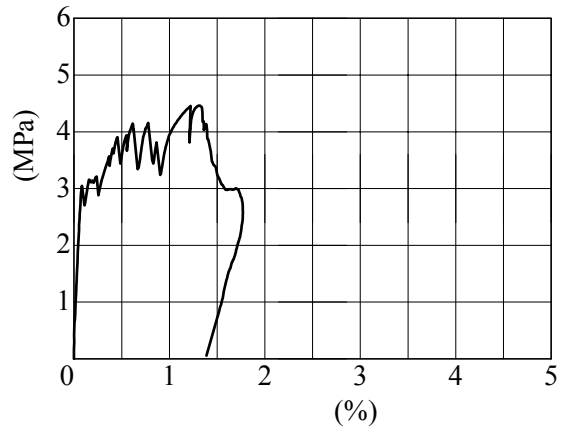
(a) No.1



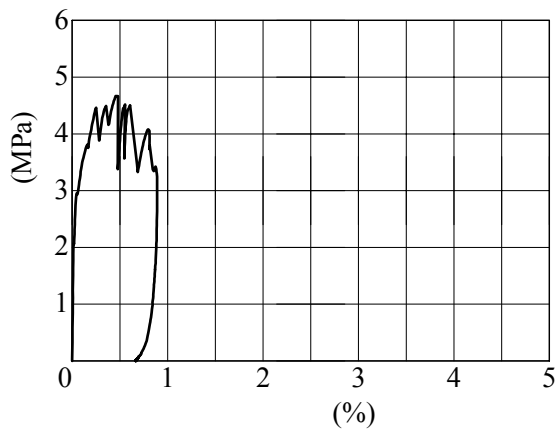
(b) No.2



(c) No.3



(d) No.4



(e) No.5

図-2.4 一軸直接引張試験による応力-ひずみ関係 (材齢 91 日)

第3章 ECC台座のひび割れ抵抗試験

3.1 試験体

ECC台座のひび割れ抵抗を調べる試験体を図-3.1に示す。試験体は、 $400 \times 200 \times 8/13$ のH形鋼(SS400)の上フランジに22の頭付きスタッドが溶接され、H形鋼の中央から各側1280mmの範囲の上フランジ上面に30mm厚のECCが施工されている。ECCは、H形鋼の上フランジ上面にミルスケールが残された状態で施工された。ECCの施工状況を付録A.2に示す。H形鋼の機械的特性を表-3.1に示す。ECCの材料特性は第2章に示してある。

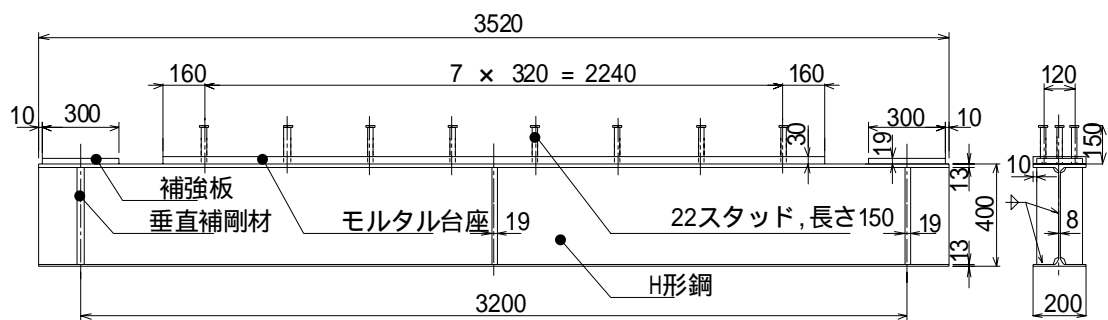


図-3.1 試験体

表-3.1 H形鋼(SS400)の機械的特性(ミルシート記載値)

| 引張強さ (MPa) | 降伏応力 (MPa) | 伸び (%) |
|------------|------------|--------|
| 446 | 323 | 32 |

3.2 荷重試験

図-3.2に示すように、試験体を上下逆に設置し、試験体の中央に集中荷重を荷重することにより、ECC台座のひび割れ抵抗試験を実施した。



図-3.2 試験状況

載荷荷重を表-3.2 に示す。荷重の載荷速度は 30kN/分である。100kN, 200kN, 300kN および 400kN の各荷重で除荷を行った。荷重の各載荷ケースにおいて, 50kN の荷重増分ごとに載荷を止め, 変位とひずみを測定した。さらに, が付された荷重で ECC 台座のひび割れを観察した。

表-3.2 載荷荷重

| 載荷ケース | 荷重 (kN) | | | | | | | | | |
|-------|---------|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|
| 1 | 0 | 50 | 100 | 除荷 | | | | | | |
| 2 | 0 | 50 | 100 | 150 | 200 | 除荷 | | | | |
| 3 | 0 | 50 | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 | 除荷 | | |
| 4 | 0 | 50 | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 | 350 | 400 | 除荷 |

変位計とひずみゲージの測定位置を図-3.3 に示す。変位計は, 試験体の中央の ECC 台座の下面, および試験体の支点上に設置した。変位計の容量は, 前者が 50mm, 後者が 10mm である。ECC 台座と形鋼に生じるひずみの計測には, それぞれゲージ長 30mm, 5mm のひずみゲージを使用した。

ひずみと変位の測定は, 載荷ケース 1 の開始時に初期化してゼロとし, 各載荷ケースの開始時に初期化は行っていない。

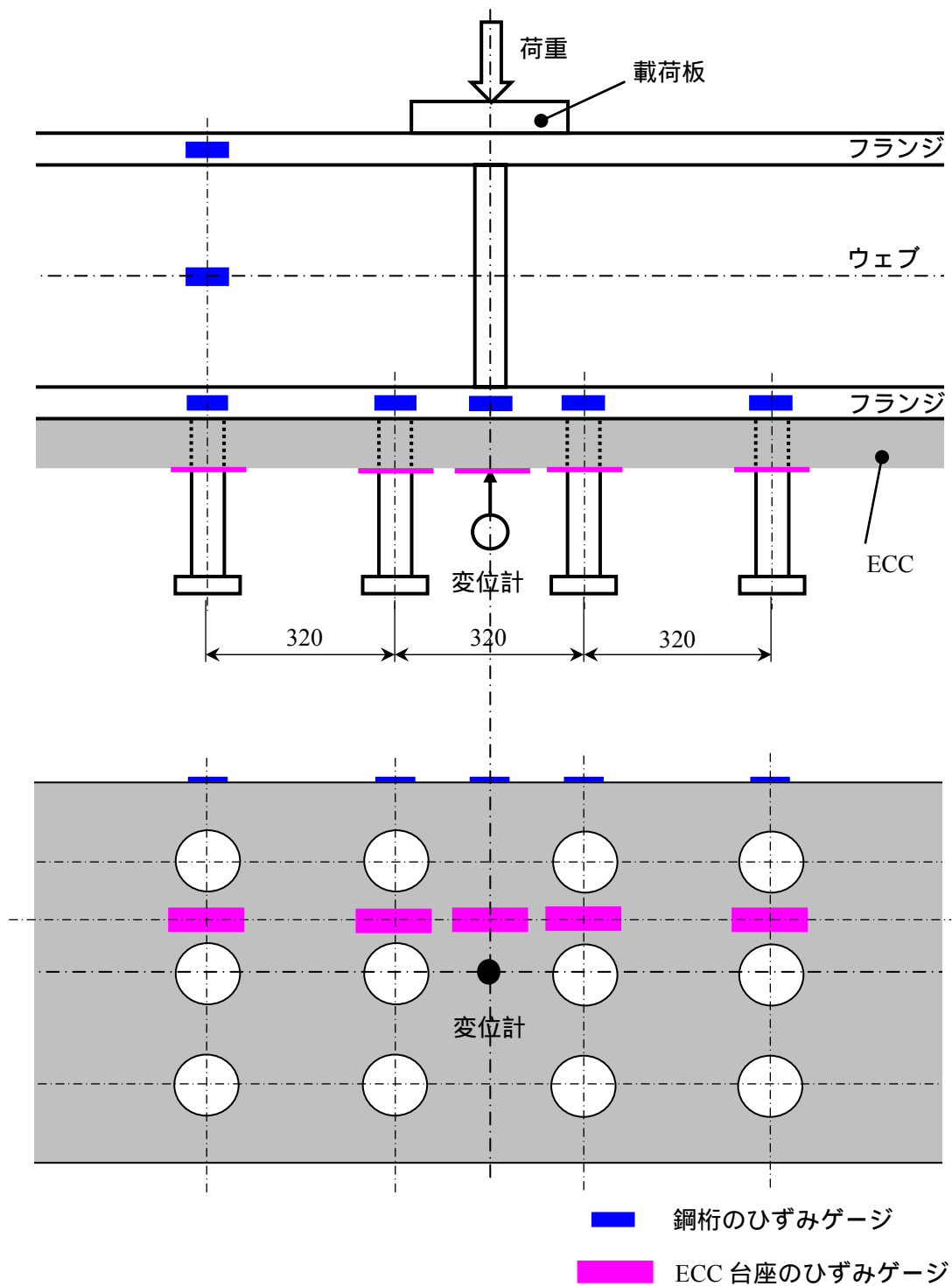


図-3.3 変位とひずみの測定位置

3.3 試験結果

3.3.1 ECC 台座のひび割れ

載荷試験は、ECC 台座施工後 35 日目に実施された。載荷荷重に対する ECC 台座のひび割れ幅の測定結果を表-3.3 に示す。表-3.3 のひび割れ番号に対応する、ひび割れの発生位置を図-3.4 に示す。

乾燥収縮による幅 0.04mm のひび割れが、桁の長手方向全体にわたって 9 本観察された。これらのうち 6 本は頭付きスタッド間のほぼ中央、3 本は頭付きスタッドの位置に発生した。荷重載荷によるひび割れは、荷重が小さいとき、桁の長手方向全体にわたって発生し、荷重が大きくなるに従って桁の中央付近に発生した。荷重載荷によるひび割れの多くは、頭付きスタッドの位置に発生した。ECC の最大ひび割れ幅は、100kN、200kN、300kN、400kN の載荷時に、それぞれ 0.04mm、0.06mm、0.06mm、0.08mm であった。ECC 台座は、H 形鋼のフランジから剥離・剥落することなく、H 形鋼のフランジと一体となって挙動した。

日本コンクリート工学協会において、コンクリートの乾燥収縮ひび割れによる鋼材腐食に対する耐久性評価基準が表-3.4 に示すように与えられている⁴⁾。同表から分かるように、鋼材腐食に対して、幅が 0.2mm 以下のひび割れであれば、ひび割れは問題とならない。本試験の ECC 台座のひび割れ幅は最大で 0.08mm であり、基準値 0.2mm よりさらに小さい値である。

表-3.3 ECC 台座のひび割れ幅の測定結果

| 載荷ケース | 0 | 1 | | 2 | | 3 | | 4 | | 除荷 |
|-------------|------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 荷重 (kN) | 0 | 50 | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 | 350 | 400 | 0 |
| ひび割れ番号 | ひび割れ幅 (mm) | | | | | | | | | |
| 1 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 |
| 2 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.06 | 0.08 | 0.08 | 0.04 |
| 3 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.06 | 0.06 | 0.04 |
| 4 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 |
| 5 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.06 | 0.06 | 0.08 | 0.08 | 0.04 |
| 6 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 |
| 7 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.04 |
| 8 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.04 |
| 9 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.04 |
| 10 | - | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 |
| 11 | - | - | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 |
| 12 | - | - | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 |
| 13 | - | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.06 | 0.04 | 0.04 | 0.04 |
| 14 | - | - | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 |
| 15 | - | - | - | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 |
| 16 | - | - | - | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 |
| 17 | - | - | - | - | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 |
| 18 | - | - | - | - | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 |
| 19 | - | - | - | - | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 |
| 20 | - | - | - | - | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | - |
| 21 | - | - | - | - | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 |
| 22 | - | - | - | - | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | - |
| 23 | - | - | - | - | - | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | - |
| 24 | - | - | - | - | - | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 |
| 25 | - | - | - | - | - | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 |
| 26 | - | - | - | - | - | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 |
| 27 | - | - | - | - | - | - | - | 0.04 | 0.04 | - |
| 28 | - | - | - | - | - | - | - | - | 0.04 | - |
| 29 | - | - | - | - | - | - | - | - | 0.04 | - |
| 最大ひび割れ幅(mm) | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.08 | 0.08 | 0.04 |

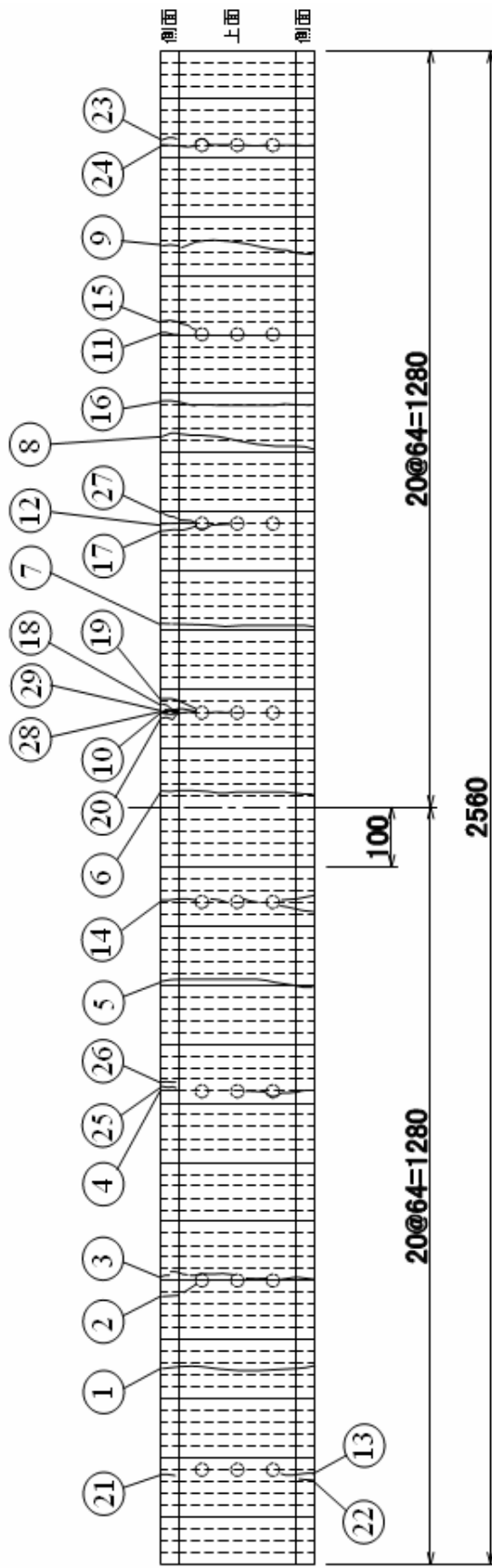


図-3.4 ひび割れの発生位置

表-3.4 鋼材腐食の観点からのひび割れの部材性能への影響

| 環境条件 | | 塩害・腐食環境下 | 一般屋外環境下 | 土中・屋内環境下 |
|-------------------|--------------------|------------|------------|------------|
| ひび割れ幅 w (mm) | $0.5 < w$ | 大 (20年耐久性) | 大 (20年耐久性) | 大 (20年耐久性) |
| | $0.4 < w \leq 0.5$ | 大 (20年耐久性) | 大 (20年耐久性) | 中 (20年耐久性) |
| | $0.3 < w \leq 0.4$ | 大 (20年耐久性) | 中 (20年耐久性) | 小 (20年耐久性) |
| | $0.2 < w \leq 0.3$ | 中 (20年耐久性) | 小 (20年耐久性) | 小 (20年耐久性) |
| | $w \leq 0.2$ | 小 (20年耐久性) | 小 (20年耐久性) | 小 (20年耐久性) |

評価結果「小」、「中」、「大」の意味は下記のとおり。

小：ひび割れが性能低下の原因となっておらず，部材が要求性能を満足する。

中：ひび割れが性能低下の原因となるが，軽微（簡易）な対策により対処が可能。

大：ひび割れによる性能低下が顕著であり，部材が要求性能を満足していない。

カッコ内の数値は耐久性評価結果を保証できる期間の目安としての年数を示しており，(20年耐久性)はひび割れの評価時点から15～25年後程度の耐久性評価結果を保証できる期間の目安として設定したものであり，15～25年の平均をとって示したものである。

3.3.2 ひずみ

H形鋼のフランジ側面およびECC台座の下面のひずみ測定結果をそれぞれ図-3.5，3.6に示す。両図において，縦軸はひずみであり，横軸は桁の中央を原点とする座標である。

図-3.5に示すように，H形鋼のフランジ側面のひずみは，400kNの荷重に対して，0.125～0.179%のひずみが発生している。図-3.6に示すように，ECC台座の下面のひずみは，400kNの荷重に対して，0～1.93%のひずみが発生し，ひずみが大きく変動している。これは，ECC台座の局所的な挙動によって生じるひずみをひずみゲージが計測しているからと考えられる。

3.3.1項で述べたように，ECC台座はH形鋼のフランジから剥離することなく，フランジと一体となって挙動していたので，ECC台座に生じる巨視的ひずみはH形鋼のフランジ側面に生じるひずみで評価されると考えられる。したがって，ECC台座には0.125～0.179%の巨視的ひずみが発生していたと考えられる。

本載荷試験は，ECC台座施工後35日目に実施されたので，ECC台座の材料特性は，表-2.3の材齢28日の材料特性が近いと考えられる。同表から分かるように，降伏ひずみは0.304%である。したがって降伏ひずみの0.41～0.59倍のひずみがECC台座に発生していたと考えられる。

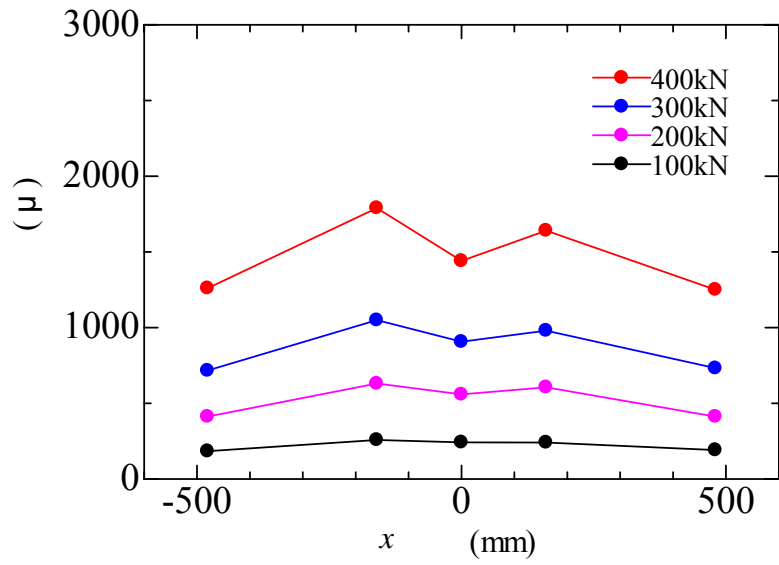


図 3.5 H形鋼のフランジ側面のひずみ測定結果

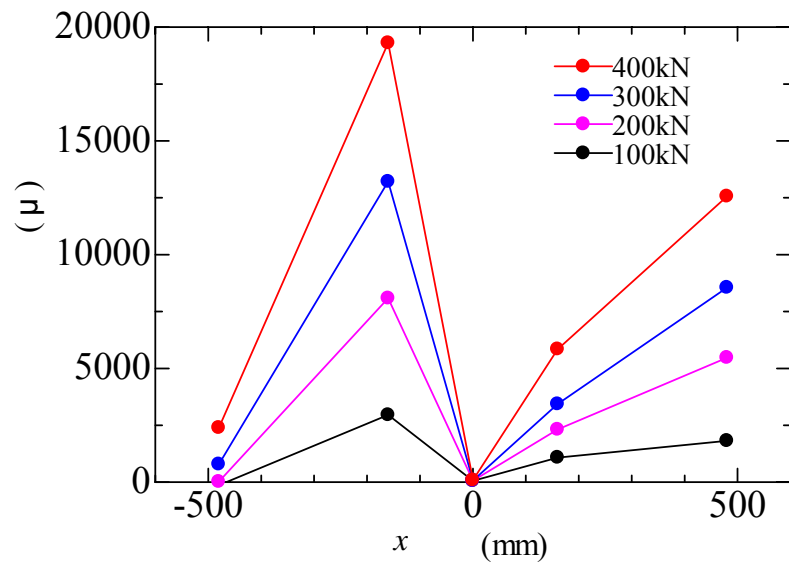


図 3.6 ECC 台座の下面のひずみ測定結果

3.4 材齢 28 日必要降伏ひずみ

3.3 節で述べたように、0.125～0.179%の巨視的ひずみに対して、ECC 台座に発生したひび割れの最大幅は 0.08mm であり、この値は、鋼材腐食に対する耐久性評価基準値 0.2mm より格段に小さい。したがって、ECC 台座のひび割れ幅は、ECC 台座に生じるひずみが降伏ひずみ以下であれば 0.2mm を超すことはないと考えられる。

橋の設計において、鋼桁に生じるひずみが降伏ひずみを超えるような設計はされないの
で、ECC 台座に必要とされる降伏ひずみを鋼桁の降伏ひずみと同じに設定すれば、ECC 台座に生じるひずみも降伏ひずみを超すことはない。

2.3 節で述べたように、材齢 91 日の降伏ひずみは材齢 28 日の降伏ひずみの 0.62 倍であった。材齢 91 日の降伏ひずみがこれ以降同じであると仮定すると、材齢 28 日の降伏ひずみに対しては、材齢 91 日の降伏ひずみの 1.61 倍 (=1/0.62) の値が必要とされる。

以上より、鋼桁の鋼種に対して、ECC 台座に必要とされる材齢 28 日の降伏ひずみ、すなわち材齢 28 日必要降伏ひずみが次式で計算される。

$$\varepsilon_{28} = 1.61 \frac{\sigma_{sY}}{E_s} \quad (3.1)$$

ここに、 ε_{28} : ECC 台座の材齢 28 日必要降伏ひずみ

σ_{sY} : 鋼桁の降伏応力

E_s : 鋼のヤング係数(200GPa)

鋼材に対して道路橋示方書で採用されている降伏応力に対して、ECC 台座の材齢 28 日必要降伏ひずみが式(3.1)から表-3.5 のように与えられる。

表-3.5 ECC 台座の材齢 28 日必要降伏ひずみ

| 鋼種 | SS400 SM400 SMA400W | SM490 | SM490Y SM520 SMA490W | SM570 SMA570W |
|---|---------------------------|-------|----------------------------|------------------|
| 鋼材の降伏応力 σ_{sY} (MPa) | 235 | 315 | 355 | 450 |
| ECC 台座の材齢 28 日 必要降伏ひずみ ε_{28} (%) | 0.189 | 0.254 | 0.286 | 0.362 |

第4章 ECC台座の疲労試験

4.1 試験体

ECC台座の疲労試験体を図-4.1に示す。試験体は、 $400 \times 400 \times 13/21 - 500$ のH形鋼(SS400)2体の中心間を2500mm離し、その上に長さ3000mmのアルミニウム床版形材を渡したものである。各H形鋼の上フランジには、3本の 22×220 mmの頭付きスタッドが溶接されている。頭付きスタッドの間隔は100mmである。H形鋼の上フランジ上面にミルスケールが残された状態で100mmの厚さにECCが施工された。ECC台座には乾燥収縮によるひび割れは観察されなかった。ECCの施工を付録A.2に示す。ECC台座の上面とアルミニウム床版形材の下フランジ下面との間に生じた隙間を二液常温硬化型エポキシ樹脂系接着剤で充填した。

アルミニウム床版形材の中空部には、3本の頭付きスタッドを挟んで、2枚の仕切り板が400mmの間隔で設置されている。アルミニウム床版形材の上フランジに設けられた、図-4.2に示す開孔を通して無収縮モルタルが充填された。仕切り板に対して、内部の充填モルタルの状態が観察できるようにアクリル板を使用した。

H形鋼(SS400)の機械的特性、アルミニウム床版形材(A6061S-T6)の機械的特性、充填モルタルの圧縮強度(標準水中養生)をそれぞれ表-4.1、4.2、4.3に示す。ECCの材料特性は第2章に示してある。

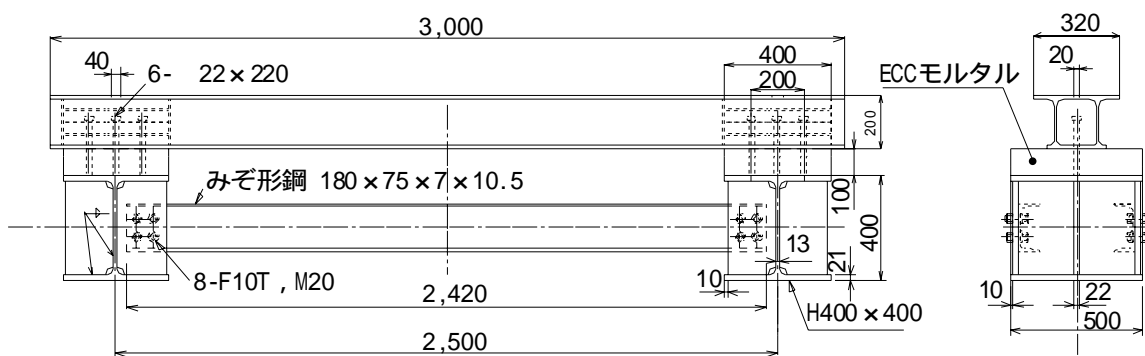


図-4.1 試験体

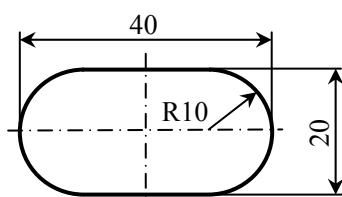


図-4.2 モルタル注入孔

表-4.1 H形鋼(SS400)の機械的特性(ミルシート記載値)

| 引張強さ (MPa) | 0.2%耐力 (MPa) | 伸び (%) |
|------------|--------------|--------|
| 438 | 360 | 31 |

表-4.2 アルミニウム床版形材(A6061S-T6)の機械的特性(ミルシート記載値)

| 引張強さ (MPa) | 0.2%耐力 (MPa) | 伸び (%) |
|------------|--------------|--------|
| 312 | 280 | 21 |

表-4.3 充填モルタルの圧縮強度(標準水中養生)

| 材齢 (日) | 圧縮強度 (MPa) |
|--------|------------|
| 3 | 45.8 |

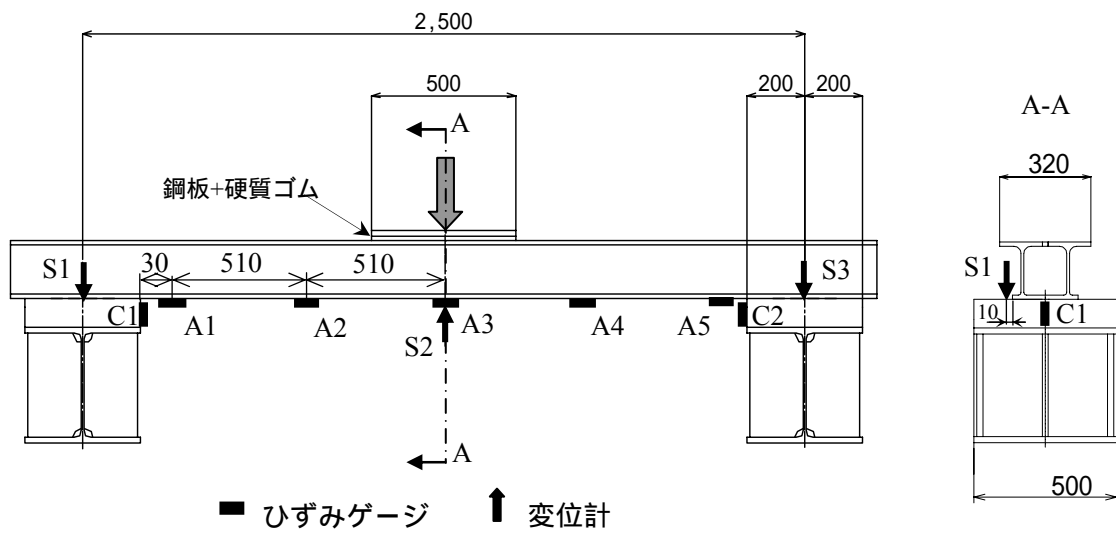
4.2 疲労試験

ECC 台座に対して、曲げモーメントの影響およびせん断力の影響を調べるために、図-4.3に示すように、試験体の中央載荷疲労試験と端載荷疲労試験を実施した。疲労試験の状況を図-4.4に示す。

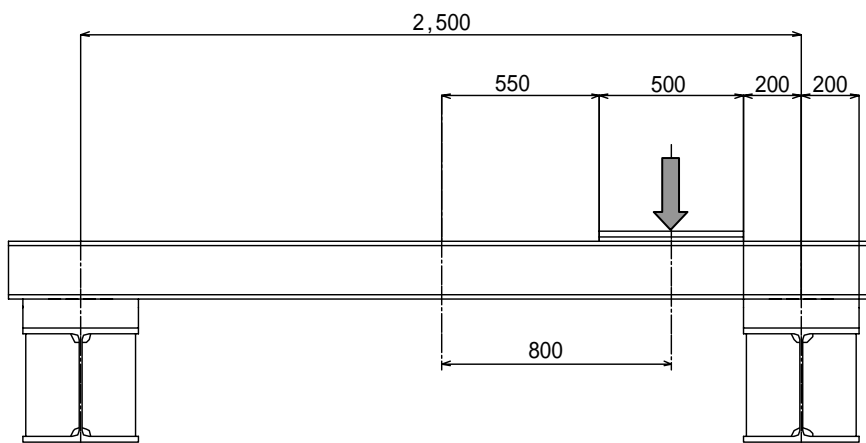
荷重の大きさは、中央載荷と端載荷の両者とも下限荷重を 7 kN、上限荷重を 70 kN とした。上限荷重 70kN は、輪荷重 50kN に衝撃係数 0.4 を考慮して 1.4 倍した荷重である。荷重の繰返し回数は、中央載荷が 319 万回、端載荷が 209 万回である。

疲労試験の開始前後と所定の繰返し回数で、静的載荷を行い、たわみとひずみを測定した。静的載荷では、ECC 台座のひび割れおよびアルミニウム床版形材の中空部の無収縮モルタルの状態を観察した。

ひずみゲージおよび変位計の設置位置を図-4.3(a)に示す。ECC 台座の上面に変位計 S1 と S2 が設置されている。アルミニウム床版形材の下フランジに貼付されたひずみゲージ A1 ~ A5 のゲージ長は 5mm である。ECC 台座の高さの中央にゲージ長 30mm のひずみゲージ C1 と C2 が貼付されている。



(a) 中央載荷



(b) 端載荷

図-4.3 載荷位置



(a) 中央載荷



(b) 端載荷

図-4.4 疲労試験の状況

4.3 試験結果

4.3.1 中央載荷

繰返し回数 319 万回で中央載荷疲労試験を終了した後の、ECC 台座およびアルミニウム床版中空部の充填モルタルの状態をそれぞれ図-4.5(a), (b)に示す。ECC 台座および充填モルタルにひび割れは観察されなかった。

荷重に対する、アルミニウム床版形材中央のたわみ S2, アルミニウム床版形材の下フランジのひずみ A3, および ECC 台座のひずみ C1 と C2 の関係をそれぞれ図-4.6(a), (b), (c)に示す。各図には、0 万回（疲労試験開始前）、182 万回および 319 万回の繰返し回数に対する結果が記載されている。

繰返し回数 182 万回と 319 万回に対するアルミニウム床版形材のたわみとひずみは、各々ほぼ同じであるが、疲労試験開始前の値より大きくなっている。これは、繰返し荷重の作用に対して試験体が馴染んできたことによる結果である。

図-4.6(c)において、ECC 台座のひずみゲージ C2 は圧縮ひずみを示すが、ひずみゲージ C1 は引張ひずみを示す。ECC 台座はアルミニウム床板形材から支圧を受けるので、ひずみゲージ C1 と C2 は、両者とも圧縮ひずみになるはずである。ひずみゲージ C1 が引張りひずみになる理由は不明である。

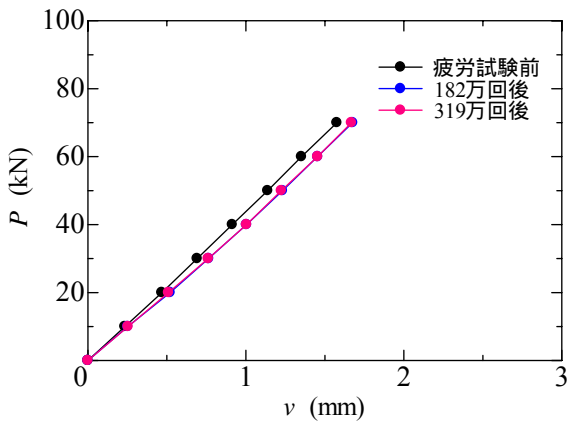


(a) ECC 台座

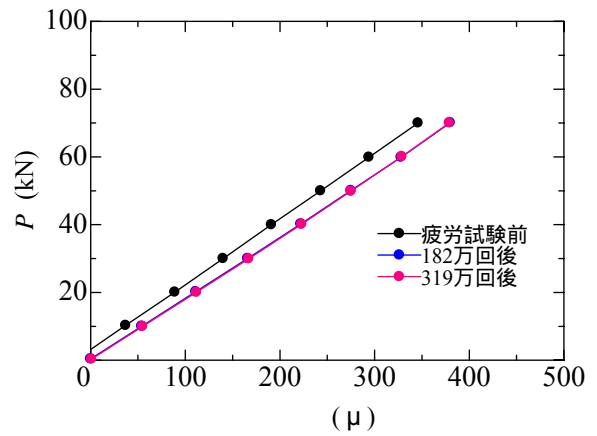


(b) 充填モルタル

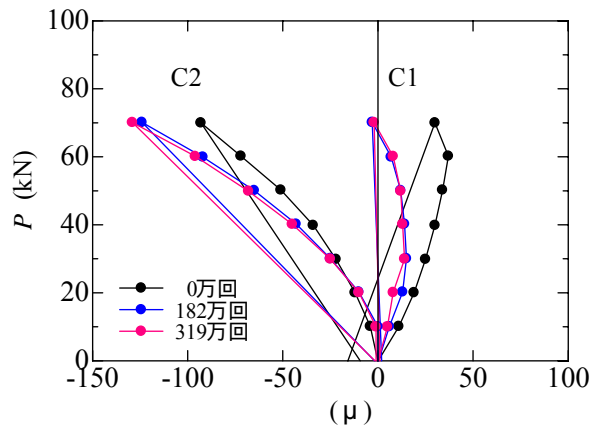
図-4.5 中央載荷疲労試験終了後の ECC 台座と充填モルタルの状況



(a) 荷重とたわみ S2 の関係



(b) 荷重とひずみ A3 の関係



(c) 荷重とひずみ C1 および C2 の関係

図-4.6 中央載荷疲労試験における荷重とたわみ、および、ひずみの関係

4.3.2 端載荷

中央載荷疲労試験が実施された試験体に対して端載荷疲労試験を実施した。繰返し回数 209 万回で端載荷疲労試験を終了した後の、ECC 台座およびアルミニウム床版中空部の無収縮モルタルの状態をそれぞれ図-4.7(a), (b)に示す。ECC 台座および充填モルタルにひび割れは観察されなかった。



(a) ECC 台座

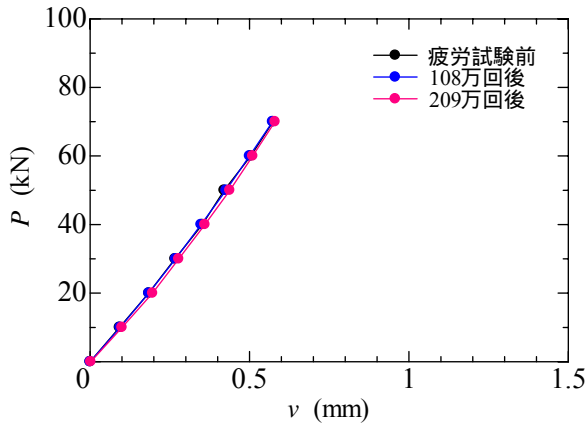


(b) 充填モルタル

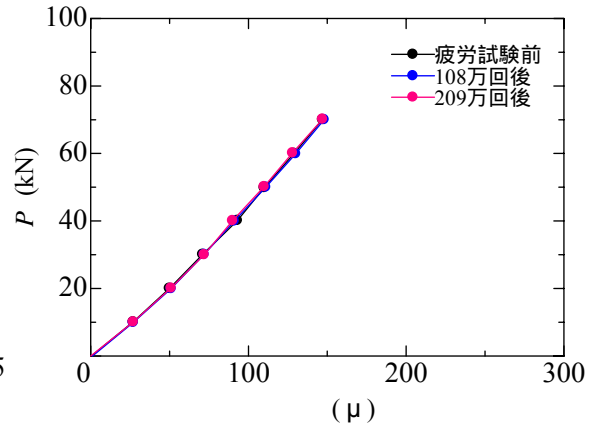
図-4.7 端載荷疲労試験終了後の ECC 台座と充填モルタルの状況

荷重に対する、アルミニウム床版型材中央のたわみ S2、アルミニウム床版型材の下フランジのひずみ A4、および ECC 台座のひずみ C1 と C2 の関係をそれぞれ図-4.8(a), (b), (c) に示す。各図には、0 万回（端載荷疲労試験開始前）、108 万回および 209 万回の繰返し回数に対する結果が記載されている。

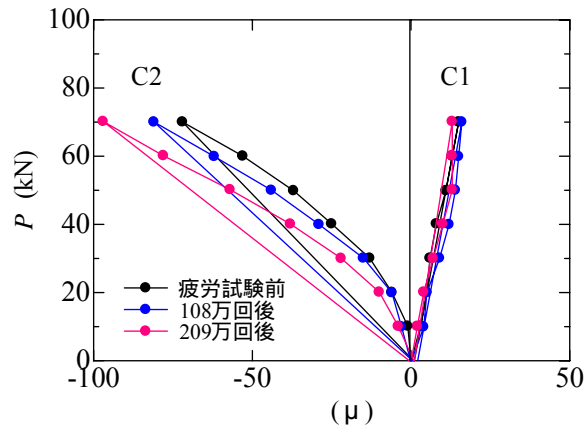
アルミニウム床版型材のたわみとひずみ、および ECC 台座のひずみ C1 は、0 万回、108 万回、209 万回の繰返し回数に対して変化が見られない。しかし、ECC 台座の C2 のひずみは、繰返し回数が多くなるに従って増加しており、209 万回の繰返し回数で 97μ の圧縮ひずみになっている。図-2.1 に示す圧縮試験による応力 - ひずみ関係において、 97μ の圧縮ひずみは 1.5 MPa の圧縮応力になる。この値は、材齢 28 日の圧縮強度に対して 0.056 倍であり、圧縮強度より十分低いので問題になることはないと考えられる。



(a) 荷重とたわみ S2 の関係



(b) 荷重とひずみ A4 の関係



(c) 荷重とひずみ C1 および C2 の関係

図-4.8 端載荷疲労試験における荷重とたわみ，および，ひずみの関係

第5章 結論

本研究では、道路橋用アルミニウム床版の台座に用いられる ECC の耐久性を明らかにするために、二種類の試験、すなわち、ECC 台座のひび割れ抵抗試験および ECC 台座の疲労試験を実施した。主な結論は次の通りである。

- (1) 圧縮試験による ECC の圧縮特性として、材齢 28 日と 91 日とで、終局ひずみは同じであるが、ヤング率と圧縮強度に関しては、材齢 28 日の値に対して材齢 91 日の値が大きくなる。一軸直接引張試験による ECC の引張特性として、ヤング係数、降伏強度、引張強度に関しては、材齢 28 日と 91 日とで同じであるが、降伏ひずみと終局ひずみに関しては、材齢 91 日の値は、材齢 28 日の値に対して約 0.6 倍まで低下する。
- (2) ECC 台座のひび割れ抵抗試験の結果に基づいて、ECC 台座のひび割れを抑制するために、材齢 28 日に必要とされる降伏ひずみ、すなわち材齢 28 日必要降伏ひずみを提案した（表-3.5 参照）。
- (3) ECC 台座の疲労試験により、ECC 台座およびアルミニウム床板形材中空部の充填モルタルは、十分な疲労耐久性を有していることが確認された。

参考文献

- 1) 大倉一郎，長尾隆史，萩澤亘保：アルミニウム床版の移動トラックタイヤ載荷試験による疲労耐久性評価，構造工学論文集，Vol.56A，pp.1217-1226，2010．
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書 施工編，2007．
- 3) 土木学会：複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料設計・施工指針(案)，2007．
- 4) 日本コンクリート工学協会：コンクリートのひび割れ調査，補修・補強指針，2009．

付録 A ECC の施工

A.1 ECC の配合，練混ぜ方法および品質管理項目

ECC の練混ぜにはモルタルミキサー（容量約 120ℓ）を使用し，1 回（1 バッチ）の練混ぜ量を 64ℓ とした．図-A.1 に示す ECC 材料の配合を表-A.1，ECC の練混ぜ方法およびモルタルミキサーを図-A.2 に示す．



図-A.1 ECC の材料

表-A.1 64ℓ 当たりの ECC の配合

| プレミックス材 | 水 | 液体混和剤 A | 液体混和剤 B |
|----------------|--------|----------------|---------------|
| 100kg (4 袋) | 22.4kg | 1080g (2 袋) | 980g (2 袋) |

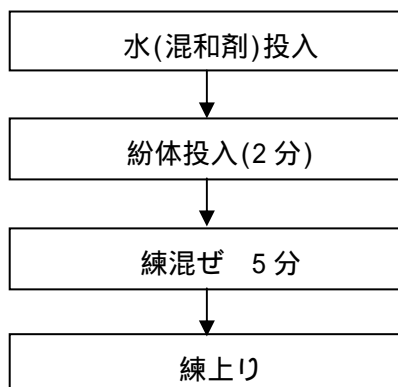


図-A.2 練混ぜおよびモルタルミキサー

試験体の製作に対する，事前に設けられた ECC の品質管理項目，品質管理値および試験方法を表-A.2 に示す．

表-A.2 ECC の品質管理項目，品質管理値および試験方法

| 品質管理項目 | | 品質管理値 | 試験方法 |
|--------------|---------|--------------|---|
| フレッシュ性 シユ | スランプフロー | 550 ± 100 mm | JIS A 1101 に準拠 |
| | 空気量 | 15 ± 5 % | JIS A 1128 に準拠（モルタル用エアメーター） |
| 硬化性 状 | 圧縮強度 | 24.0 MPa | JIS A 1171 に準拠 |
| | 引張降伏強度 | 2.0 MPa | 複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料設計・施工指針(案) ³⁾ 試験方法 1～4「一軸直接引張試験方法」に準拠 |
| | 引張強度 | 3.0 MPa | |
| | 引張終局ひずみ | 0.8 % | |

注：硬化性状に関する管理値は材齢 28 日に対する値である。

A.2 ECC の試験体への施工

ひび割れ抵抗試験体では ECC の施工厚さが 30mm，モルタル台座試験体では ECC の施工厚さが 100mm となるように型枠を設置した。型枠には，木製の化粧版を使用した。型枠設置状況を図-A.3 に示す。

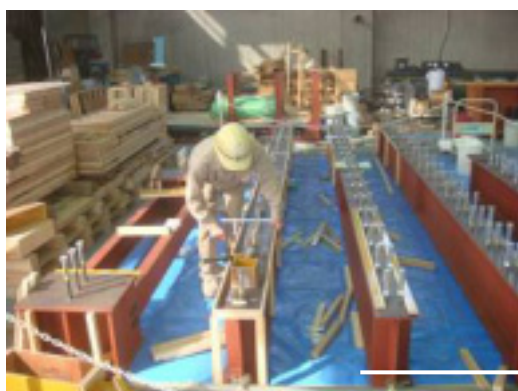


図-A.3 型枠設置状況

ECC の打込み状況を図-A.4 に示す .



図-A.4 ECC の打込み状況

ECC を型枠内に打ち込んだ後 , 金ゴテを用いて表面仕上げを行った . ECC の表面仕上げ状況を図-A.5 に示す .



図-A.5 ECC の表面仕上げ状況

ECC の表面仕上げが終わった後 , ブルーシートによる湿潤養生を行った . 養生状況を図-A.6 に示す . ECC 打設からひび割れ抵抗試験開始までの気温の履歴を表-A.3 に示す . この期間では , 最高気温が 24.0 , 最低気温が 13.0 , 平均気温が 18.0 であった .



図-A.6 養生状況

表-A.3 養生期間の気温

| 日付 | | 材齡 (日) | 気温 () | | 備考 | |
|----|----|-----------|--------|------|--------|--|
| 月 | 日 | | AM | PM | | |
| 11 | 4 | 0 | - | - | 試験体打込み | |
| | 5 | 1 | 19.5 | 19.0 | | |
| | 6 | 2 | 19.8 | 19.3 | | |
| | 7 | 3 | - | - | | |
| | 8 | 4 | - | - | | |
| | 9 | 5 | 20.5 | 20.0 | | |
| | 10 | 6 | 20.4 | 20.3 | | |
| | 11 | 7 | 20.6 | 20.5 | | |
| | 12 | 8 | 19.8 | 19.2 | | |
| | 13 | 9 | 18.3 | 18.9 | | |
| | 14 | 10 | - | - | | |
| | 15 | 11 | - | - | | |
| | 16 | 12 | 18.2 | 18.8 | | |
| | 17 | 13 | 17.4 | 18.6 | | |
| | 18 | 14 | 17.0 | 17.4 | | |
| | 19 | 15 | 13.0 | 16.4 | 脱型 | |
| | 20 | 16 | 15.8 | 16.0 | | |
| | 21 | 17 | - | - | | |
| | 22 | 18 | - | - | | |
| | 23 | 19 | - | - | | |
| | 24 | 20 | - | - | | |
| | 25 | 21 | 16.3 | 18.0 | | |
| | 26 | 22 | 18.2 | 19.0 | | |
| | 27 | 23 | 18.0 | 19.2 | | |
| | 28 | 24 | - | - | | |
| | 29 | 25 | - | - | | |
| | 30 | 26 | 15.1 | 15.2 | | |
| | 12 | 1 | 27 | 15.1 | 16.8 | |
| | | 2 | 28 | 15.6 | 20.6 | |
| | | 3 | 29 | 24.0 | 20.1 | |
| 4 | | 30 | 20.4 | 20.5 | | |
| 5 | | 31 | - | - | | |
| 6 | | 32 | - | - | | |
| 7 | | 33 | - | - | | |
| 8 | | 34 | 20.3 | 20.4 | | |
| 9 | | 35 | 21.5 | 21.5 | 載荷試験 | |

2週間の湿潤養生後，脱型を行った．脱型完了後の試験体を図-A.7 に示す．



注：左側が ECC 台座の疲労試験体，右側がひび割れ抵抗試験体
（中央の 3 体の試験体は除く）

図-A.7 脱型完了後の試験体