

論文 半連続プレキャスト床版の継手部交番載荷実験

北 慎一郎*1・中山 逸人*2・櫻井 信彰*1・松井 繁之*3

要旨：筆者らはプレキャスト PC 床版を充填材のみで接合する構造を研究している。継手部の安全性・耐久性の検証実験として、輪荷重の通過に伴い発生する橋軸曲げモーメントと交番するせん断力を、継手部近傍に与える交番載荷実験を行った。荷重を漸増させながら繰返し載荷した結果、法定輪荷重レベル(70kN(衝撃を含む))の繰返し載荷に対しては、版としての機能を失わないことを確認した。さらに床版本体継手下端部を面取りした形状の場合は、法定輪荷重の 2.8 倍(196kN)程度までは版としての機能を保持できる。

キーワード：プレキャスト PC 床版、継手構造、充填材、疲労試験

1. はじめに

筆者らはプレキャスト PC 床版の本体コンクリートより、ヤング係数が低い充填材のみで継手部を構成することで、工期短縮・省力化だけでなく、橋軸方向の断面力を緩和し、かつ輪荷重に対する橋軸方向有効幅を増加することで、疲労耐久性を向上させる床版構造を提案している。これまで報告している要素実験^{1),2)}を通じて、充填材として期待できる材料を見出したため、本研究では床版モデルの実験的検証に着手した。

連続化した床版全体の安全性・耐久性を検証する手段としては、押抜きせん断試験や輪荷重走行試験などが一般的である。しかし本提案構造ではこれらの検証実験に先立ち、継手構造がその性能を失わないかを直接検証する必要があると考えた。そこで、輪荷重の通過に伴って発生する大きな橋軸曲げモーメントと交番する橋軸方

向のせん断力を、2本のアクチュエータを用いて継手部近傍に与えることで、継手の疲労耐久性を検証した。本稿では充填材候補の1つであるポリマーセメントモルタルを用いて、継手形状を変えた実験的検証を報告する。

2. 実験概要

2.1 供試体

試験体図と継手詳細図を図-1、各物性値を表-1から表-5に示す。試験体は3枚のプレキャスト PC 床版を充填材で接合したものであり、架台に2辺単純支持で設置した。Case1は平行な界面に凝結遅延剤処理を施した継手(平行界面タイプ)である。Case2は剥離角における力学的理論³⁾と施工性に考慮して、界面下端部を45度で面取りすることで曲げとせん断に対する剥離強さの向上を図った継手(下端部拡張タイプ)である。

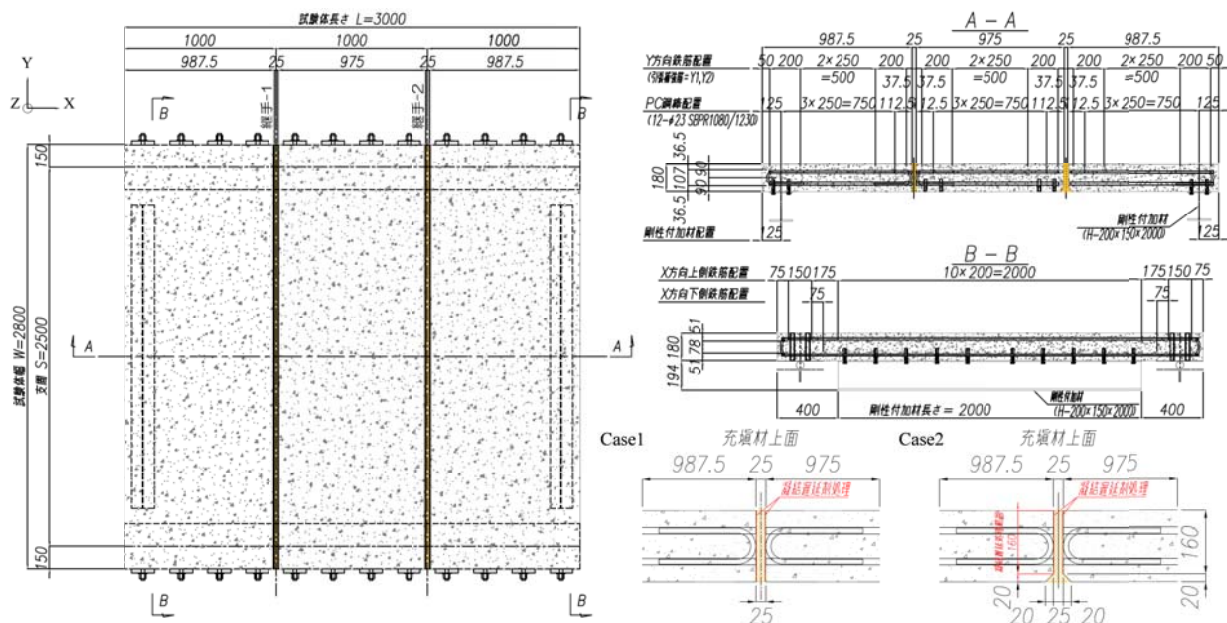


図-1 試験体図と継手部詳細図

*1 新日鉄住金エンジニアリング(株) 事業創出センター 事業開発企画部 (正会員)

*2 新日鉄住金エンジニアリング(株) 事業創出センター 事業開発企画部

*3 大阪工業大学 構造実験センター 工博 (正会員)

表-1 コンクリートの配合

呼び強度 (N/mm ²)	粗骨材最大寸法 (mm)	水セメント比 (%)
50	20	31.7

表-2 硬化コンクリートの性状

材齢 (日)	静弾性係数 (kN/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	割裂引張強度 (N/mm ²)
28	35.4	72.80	3.47

表-3 充填材試験結果

材料名	材齢 (日)	静弾性 係数 (kN/mm ²)	圧縮 強度 (N/mm ²)	引張 強度 (N/mm ²)
ポリマーセメント モルタル	28	17.6	49.7	5.00

表-4 鉄筋の機械的性質

記号	降伏点 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
JIS G 3112 /SD345	370	538

表-5 PC 鋼棒の機械的性質

記号	降伏点 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
SBPR 1080/1230	1203	1273

2.2 試験設備および載荷方法

実験は愛知工業大学・耐震実験センターにて行った。試験体設置概要を図-2、載荷位置を図-3に示す。隣接する載荷板に2本のアクチュエータでそれぞれ載荷する点と、載荷位置が試験体の中で非対称である点を考慮して、梁を用いて荷重を与える機構とした。2本のアクチュエータは門型載荷フレームから鉛直に吊り下げ、それぞれ載荷梁 A・B に連結し、載荷梁は支持台と試験体上に設置したロードセルで単純支持した。また、一方の継手における載荷プログラムを終了した際は、載荷梁を入れ替えて他方の継手における載荷を実施した。

2.3 載荷荷重と載荷プログラム

道路橋示方書⁴⁾の設計軸重は、隣接する法定軸重100kN軸(最少間隔1.3m)2軸による同時載荷によって発生する最大曲げモーメントに等価な値を発生させる1軸荷重200kNと規定されている。これに対し本構造の継手部は各法定軸重毎に挙動することから、法定軸重の片側の輪荷重50kN(衝撃係数を考慮して70kN)を最小荷重として、以降は漸増載荷するものとして計画した。

上記のことを確認するため、版解析にて、載荷プログラムと継手部に作用する断面力を求めた。100kN軸が1軸のみ通過した場合と、隣接する100kN軸2軸が通過す

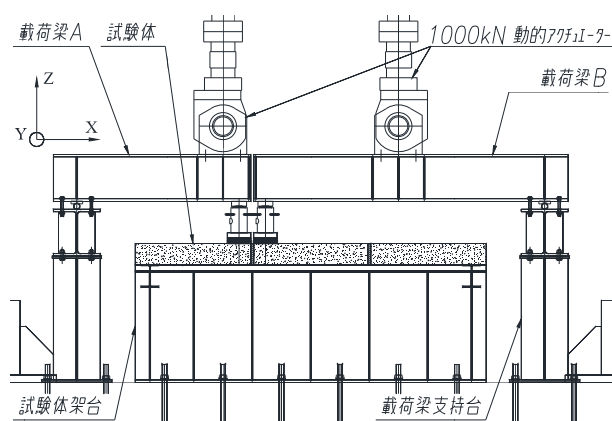


図-2 試験体設置概要

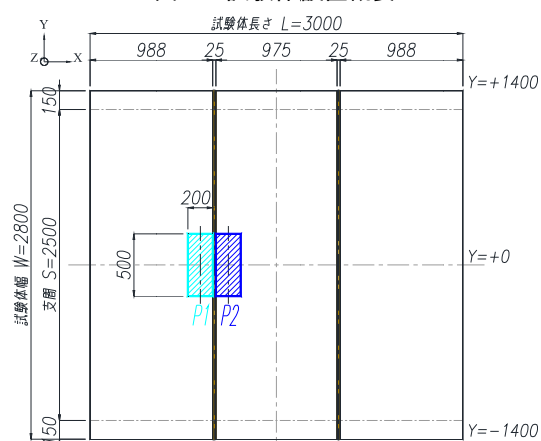


図-3 載荷位置

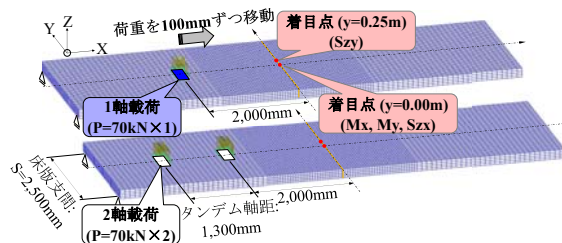


図-4 解析モデル

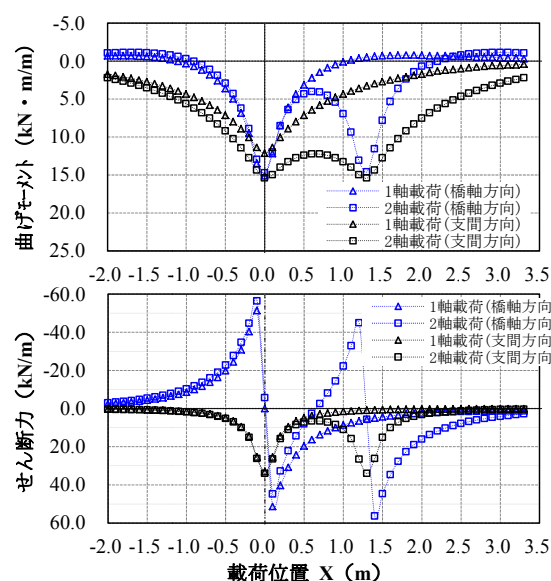


図-5 着目点における輪荷重通過時の断面力比較

る場合を比較するために図-4 に示す解析モデル(着目点位置に充填材継手部を設けた 2 辺単純支持無限連続版)を作成した。継手部に発生する断面力の比較結果は図-5 に示す通りであり、橋軸方向のせん断力は 1 軸載荷と 2 軸載荷で違いはなく、2 軸の通過はそれぞれ独立であるに考えて良いことを確認できた。

載荷サイクルを図-6 に示す。継手部における輪荷重の通過を 2 台のアクチュエータにより再現するため、P1 と P2 の載荷周期は $1/3$ 周期ずらし、さらにそれぞれ $1/3$ 周期の無載荷期間を設けた。この載荷サイクルが継手部に与える断面力を、試験体と同型の弾性解析モデルで確認した。結果は図-7 に示す通りであり、充填部支間中央において曲げモーメントが作用している間に橋軸方向せん断力が交番していることから、輪荷重の通過を擬似的に再現できると判断した。

載荷回数についてはまず式(1)を用い、 $ADTT_{SL}$ を 2000 台/日、 Y を 50 年と想定して、実験で考慮すべき載荷回数 N_{req} を約 7300 万回と算出した。次に式(2)を用いることで、表-6 に示す通り STEP-4 終了時点で供用年数 50 年相当となるように荷重・載荷回数を設定した。 m には RC 床版の S-N 曲線が適用できるものと仮定し、12.76 とした⁵⁾。なお Case1 では STEP-4 で終了したが、Case2 では STEP-4 以降も継続し、破壊に至るまで荷重を漸増させながら、表-6 に示す回数の繰返し載荷を行った。

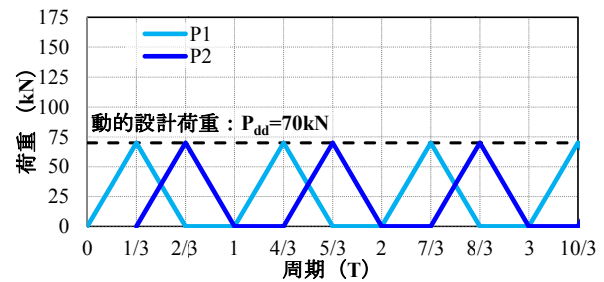


図-6 載荷サイクル

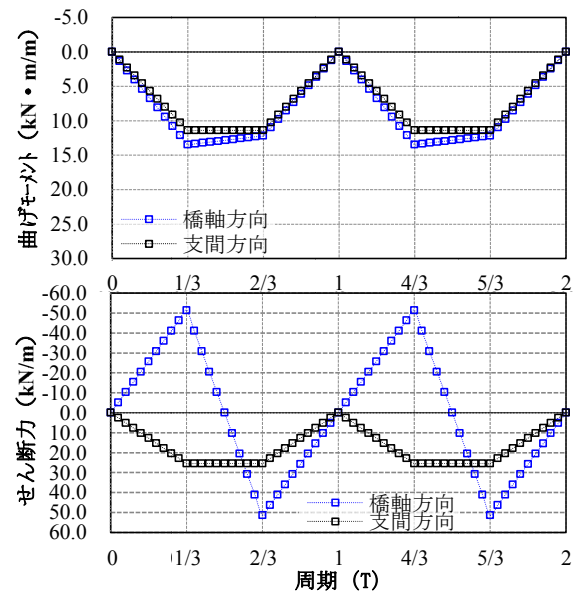


図-7 着目点における載荷サイクル適用時の断面力

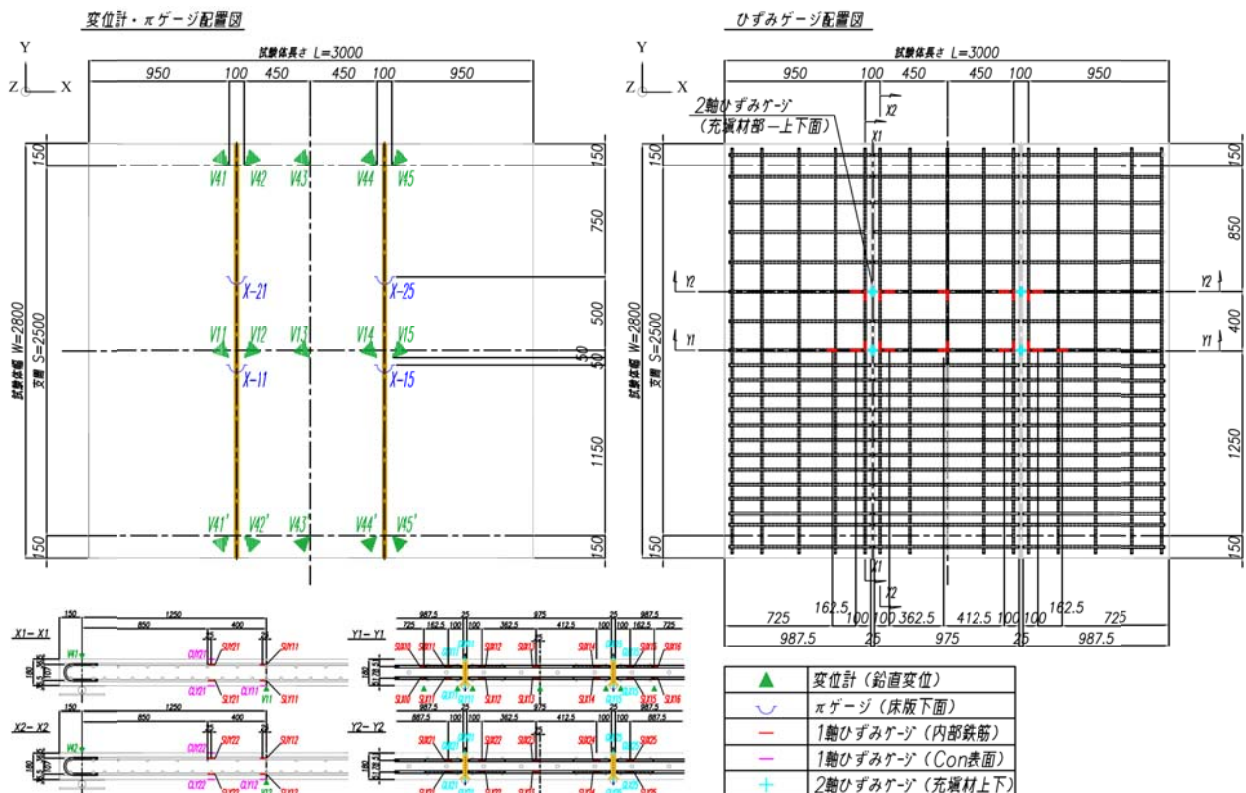


図-8 計測機器配置図

$$N_{req} = 2 \times (ADTT_{SL} \times 365 \times Y) \quad (1)$$

N_{req} : 実験で考慮すべき載荷回数

$ADTT_{SL}$: 1車線1日あたりの大型車交通量

Y : 供用期間

$$N_i = \sum \{N \times (P/P_d)^m\} \quad (2)$$

N_i : 合計換算回数

N : 載荷回数

P : 載荷荷重

P_d : 設計荷重

m : RC床版におけるS-N曲線の傾きの逆数

2.4 計測項目

所定の載荷回数を終了した時点で、載荷位置 P1 において静的載荷を適宜行い、各部の変位・ひずみを計測した。計測機器の設置位置を図-8に示す。また、P1において 138kN の荷重を載荷した際の計測値(活荷重変位・ひずみ)を図-9 から図-12 に示し、これらの考察については次章で述べる。

3. 実験結果

3.1 荷重-載荷回数-鉄筋ひずみ関係

荷重載荷点中央付近にある橋軸方向・橋軸直角方向の鉄筋ひずみ SUX11, SLX11, SUY11, SLY11, および充填材を挟んで反対側の鉄筋ひずみ SUX12, SLX12, SUY12, SLY12 における荷重-載荷回数-鉄筋ひずみ関係を図-9 に示す。

橋軸方向鉄筋(配力筋)ひずみについて、SUX11・SLX11は単調に変化し、Case1 では 122.5kN(35 万回)、Case2 では 294kN(45 万回)で SUX11 が 0 となり、遅れて SLX11 も 0 へと近づく。SLX12 は、載荷開始直後では Case1・Case2 とともに引張ひずみが発生している。その後、Case1 では 87.5kN(20 万回)で、Case2 では 157kN(40 万回)で圧縮に転じた。これらから、配力筋が連続していない本構造においても、充填材における引張付着力により橋軸方向の曲げモーメントが伝達されていると考えられる。また充填材引張縁の面取りにより、継手部界面における引張付着力の低下が遅れたことで、Case2 は Case1 より優れた曲げ伝達機能を維持できたと考えられる。

橋軸直角方向鉄筋(主筋)ひずみは、Case1・Case2 とともに載荷開始以降単調に漸増するものの 122.5kN(40 万回)までは大きな変化はなかった。その後、Case2 では 245kN(44 万回)でプレストレスがキャンセルされるとともに、継手部界面下端において剥離破壊が発生し始め、橋軸直角方向の荷重分担が増加するので引張鉄筋ひずみ SLY11・SLY12 が急増した。以降、主筋ひずみが圧縮・引張ともに単調に増加して、継手部界面におけるせん断伝達機能が失われる。ただし、SUY12・SLY12 において、

表-6 載荷荷重と回数

STEP	載荷荷重 P (kN)	載荷回数 N ($\times 10^4$ 回)	累計載荷回数 ΣN ($\times 10^4$ 回)	換算回数 N_i ($\times 10^4$ 回)	累計換算回数 ΣN_i ($\times 10^4$ 回)	供用年数 (年)
STEP-1	70.0	20.0	20.0	20	20	0
STEP-2	87.5	10.0	30.0	172	192	1
STEP-3	105.0	5.0	35.0	882	1,074	7
STEP-4	122.5	5.0	40.0	6,311	7,385	51
STEP-5	157.0	2.0	42.0	59,876	67,261	461
STEP-6	196.0	2.0	44.0	1,015,702	1,082,963	7,418
STEP-7	245.0	1.0	45.0	8,756,050	9,839,013	67,391
STEP-8	294.0	1.0	46.0	89,672,844	99,511,857	681,588
STEP-9	343.0	1.0	47.0	641,064,874	740,576,731	5,072,443
STEP-10	392.0	1.0	48.0	3,522,728,918	4,263,305,649	29,200,724

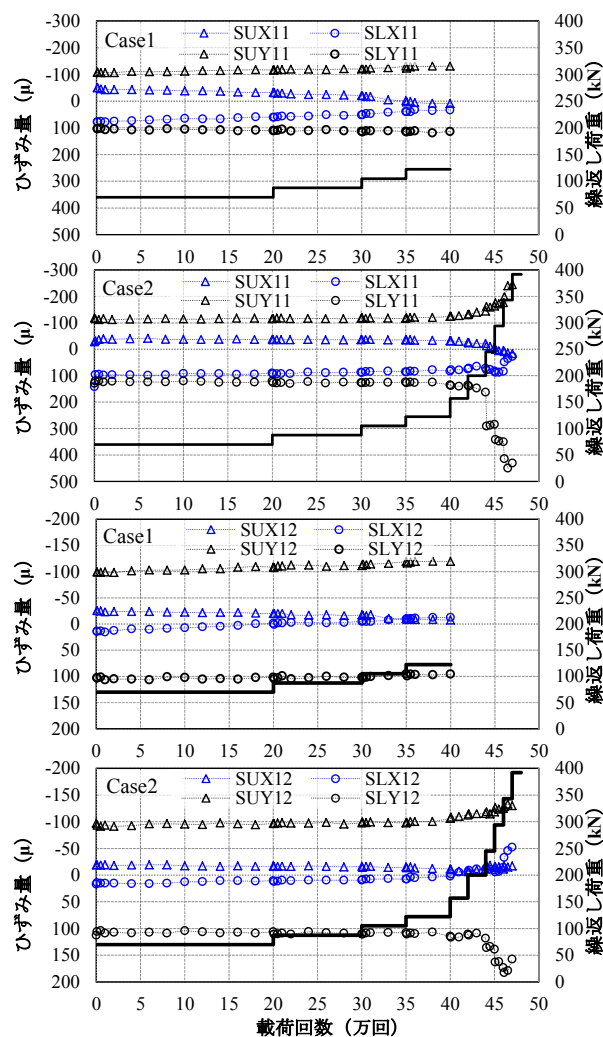


図-9 荷重-載荷回数-鉄筋ひずみの関係

破壊直前の 392kN(47 万回)時点でもひずみが発生していることから、せん断伝達機能は完全には失われておらず、まだ摩擦によるせん断力の伝達機能が残っている。

3.2 荷重-載荷回数-充填材ひずみ関係

荷重載荷点中央付近における充填材の上下面でのひずみ GUX11, GLX11, GUY11, GLY11, および橋軸直角方向に 400mm 離れた位置でのひずみ GUX21, GLX21, GUY21, GLY21 を図-10 に示す。計測位置が充填部の上下端面であるため、継手部界面における局所的な剥離の影響を受

けやすいが、特徴的な推移を示している。

橋軸方向ひずみについて、Case1 では荷重初期から GLX11, GLX21 が漸減し、70kN(20 万回)までにほぼ 0 となり、圧縮ひずみ GUX11, GUX21 が増加した。Case2 では荷重初期から荷重載荷点中央付近の GLX11 は 0 であった。これは面取り部分に凝結遅延材を塗布しなかったこともあり、局所的な剥離の影響によるものと考えられる。以降は橋軸直角方向の曲げ引張に伴うポアソン効果もあり、圧縮ひずみのまま推移した。一方で、GLX21 は 122.5kN(40 万回)まで変化せず、157kN(42 万回)でほぼ 0 となった。上面の GUX11, GUX21 は 122.5kN(40 万回)まで急激な値の変化はなかった。その後 196kN(44 万回)までは圧縮ひずみが増加し、以降は 0 へと近づいていった。

橋軸直角方向ひずみは、Case1 では上下端面ともにほとんど変化しなかった。Case2 においても同様に、157kN(42 万回)までほとんど変化しないが、その後圧縮・引張ともに漸増し、245kN(44 万回)以降は 400mm 離れた位置でのひずみを含めいずれの値も大きく乱れる。

これらの推移から Case1 では 70kN(20 万回)まで、Case2 では 157kN(40 万回)までは継手部界面における付着力により曲げモーメントとせん断力を伝達していたが、徐々にその機能を失って、せん断力のみを伝達していたと考えられる。以降は、Case1 では変化がなかったが、Case2 では 245kN(44 万回)程度から下面の剥離破壊が始まり、その進展とともに橋軸方向の有効断面力が減少して、上面の圧縮ひずみが増加した。さらに剥離領域が拡大していくと橋軸方向ひずみは減少に転じて破壊に至ったと考えられる。

3.3 荷重-載荷回数-変位関係

荷重載荷側における床版下面の鉛直変位 V11 と継手を挟んで反対側の鉛直変位 V12 における荷重-載荷回数-変位関係を図-11 に示す。

Case1 では、87.5kN(30 万回)までは微増であったが、105kN 載荷から漸増し、122.5kN 載荷の際には変位の増加はなくなっていた。これに対し Case2 では 122.5kN(40 万回)から変位の増加が始まり、196kN(44 万回)までに Case1 終了時と同程度の変位となった。その後、荷重・載荷回数の増加に伴って V11 は急増していくが、V12 では 245kN(45 万回)以降で変位量が伸びなくなった。

これらの推移から、Case2 では 157kN(40 万回)程度から引張付着力の喪失に伴う曲げ伝達機能の低下が始まり、その領域が広がるにつれて変位が大きくなる。さらに 196kN(44 万回)以降は継手部界面の剥離破壊が始まり、392kN の繰返し載荷直後から、充填材の剥離が床版全厚に及び、さらに剥離破壊領域が支間方向で広がって継手部崩壊に至ると考えられる。

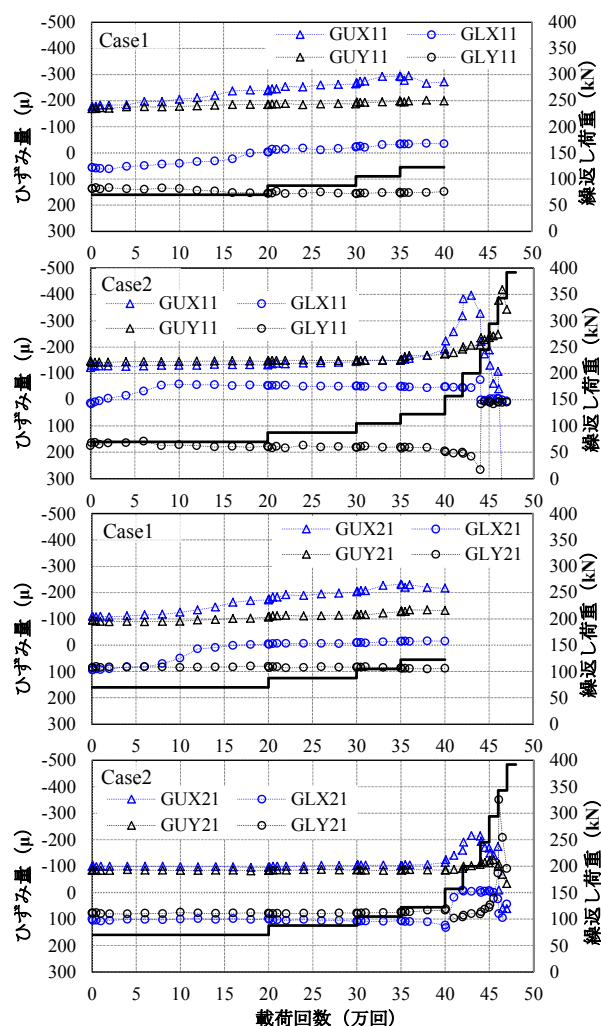


図-10 荷重-載荷回数-充填部ひずみの関係

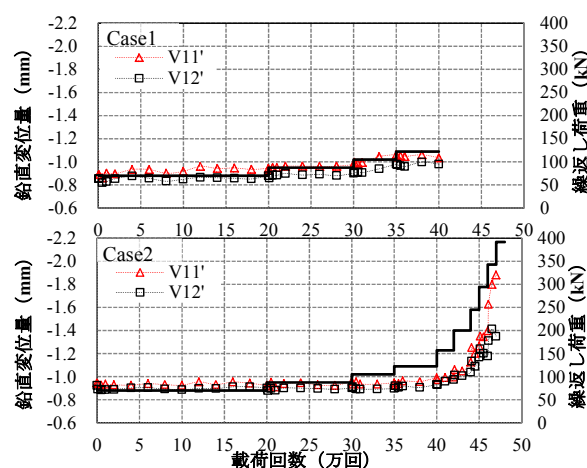


図-11 荷重-載荷回数-鉛直変位量の関係

3.4 荷重-載荷回数-目開き関係

載荷直下における下面の水平目開き X-11, および支間中央から橋軸直角方向に 400mm 離れた位置での水平目開き X-21 の荷重-載荷回数-目開き関係を図-12 に示す。

目開きは変位の推移より敏感に反応し、Case1 の X-11 では荷重初期から目開きが発生しており、X-21 でも繰返し

し数 10 万回程度から目開きが発生し、荷重・載荷回数の増加とともに大きくなる。Case2 では 122.5kN (40 万回) まではほとんど発生しなかった。157kN 載荷以降で目開きは発生し 245kN (45 万回) で Case1 と同程度になり、343kN 載荷では目視できる剥離領域が確認できた

3.5 ひび割れ・破壊形態

Case1 では目立ったひび割れ・剥離はなかったため、Case2 のみ記述する。図-13 に継手部下面の状況を示す。343kN (47 万回) 時点で支間中央における充填材と床版本体との剥離が顕著になっており、図-11 に示したように、V11、V12 の差も大きくなっていることから、荷重載荷点中央付近では充填材の剥離破壊が床版全厚に及んでいると思われる。

その後 392kN (47.05 万回) で、支間中央から橋軸直角方向に 400mm 離れた位置において、充填材の一部が剥落した。これは繰返し載荷中に充填材の剥離領域が交番載荷に伴って開閉するようになり、ある時剥離破壊面が閉じる際に、床版本体の目荒らしの影響もあって界面が噛み合わず、局所的な圧縮応力による破壊が発生して剥離に至ったと推定される。

4. まとめ

本研究で得られた知見は、以下の通りである。

- (1) 平行界面タイプでは、荷重および繰返し数の増加に伴い、まず継手部界面の引張付着力が徐々に減少して、充填材によるコンクリート床版間における橋軸方向の曲げモーメントの伝達機能が低下する。しかし、設計荷重の 1.75 倍 (122.5kN) までは圧縮部分の充填材により、せん断力の伝達機能が維持されることで床版としての機能を維持して、橋軸直角方向の曲げひずみは微増にとどまる。
- (2) 下端拡張タイプでは、設計荷重の 2.2 倍 (157kN) までは継手部界面下端における引張付着力の低下を遅延させることができる。これにより、道路橋示方書の設計荷重レベルの繰返し載荷においては、充填材は橋軸方向の曲げモーメントの伝達機能を維持する。また、設計荷重の 2.8 倍 (196kN) までは曲げモーメントの伝達機能は低下するものの、せん断力の伝達により床版として機能する。しかし荷重が 4.2 倍になると充填材の剥離破壊範囲が繰返し荷重により拡大して、破壊面が交番載荷の際に閉じなくなり、充填材の剥落を伴って接合部は脆性的に破壊され、継手としての機能が低下する。

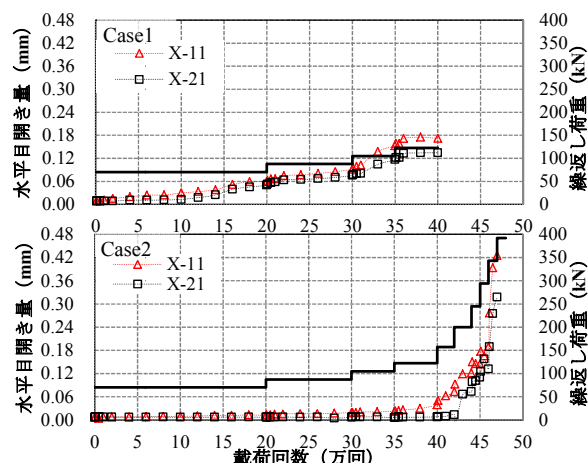


図-12 荷重-載荷回数-水平目開き量の関係

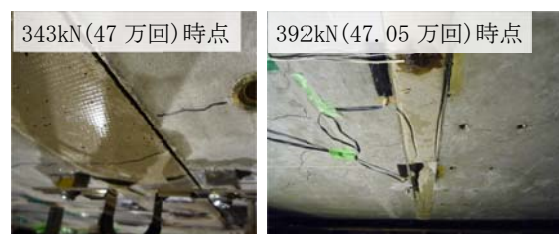


図-13 継手部下面付近の状況

本研究では、載荷荷重に対する繰返し数の設定において式(2)を用いたが、押抜きせん断による破壊形態が不明なため、その適用の是非は不明である。また、本実験では輪荷重の通行に伴うねじりせん断の影響などが再現されていない。今後はこれらの検証のため、継手部付近、あるいは継手間の押抜きせん断耐力、輪荷重走行に伴う疲労耐久性などを検証する予定である。

参考文献

- 1) 北慎一郎、櫻井信彰、前川宏一、松井繁之：床版取替に向けた半連続プレキャスト床版構造の検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.2，pp.67-72，2016。
- 2) 北慎一郎ほか：半連続プレキャスト床版に用いる充填材に関する実験的検討，土木学会第 71 回年次学術講演会講演概要集，I-346，2016。
- 3) スリーボンド社：スリーボンド・テクニカルニュース「接着科学序説《その 2》」，1983。
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，2012。
- 5) 松井繁之：道路橋床版の長寿命化技術，森北出版，2016。