

RC 床版における水平ひび割れの発生・進展過程および 鋼板補強効果の解析的検討

阪神高速道路(株)技術部技術推進室	田中 将登
阪神高速道路(株)建設事業本部大阪建設部設計第一課	新名 勉
阪神高速道路(株)建設事業本部大阪建設部設計第二課	青木 康素
阪神高速道路(株)管理本部大阪保全部保全事業課	伊佐 政晃

要 旨

鋼板接着 RC 床版の輪荷重走行試験結果の再現解析により構築した数値解析モデルを用いて、無補強の RC 床版を対象に輪荷重走行試験を模擬した非線形有限要素解析を実施し、水平ひび割れの発生および進展過程の分析を行った。下段鉄筋高さにおいて、面内せん断変形により主鉄筋とコンクリートの付着切れが発生し、その付着切れを起点に、ひび割れ開閉変形により水平にひび割れが発生・進展する傾向がみられた。また、鋼板接着補強の効果を接着樹脂の付着または剥離に着目し、解析的に評価した。補強後に鋼板が剥離した場合においても、主鉄筋高さ位置の鉛直ひずみが補強前より低減されたことから、水平ひび割れの発生および進展を遅らせることができることが分かった。

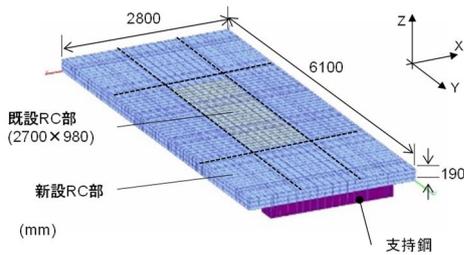
キーワード:RC 床版, 水平ひび割れ, FEM, 鋼板接着補強, 疲労耐久性

はじめに

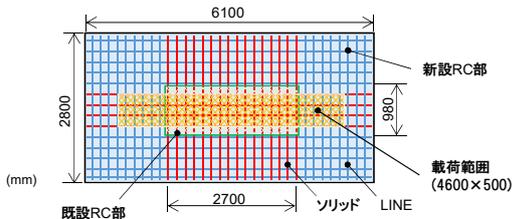
RC 床版の水平ひび割れは、鉄筋位置において発生することが報告されており¹⁾、ひび割れによりコンクリートのせん断伝達が十分に生じず、耐荷性能が低下することが懸念されている。当社では、RC 床版の補強工法の一つとして、約 40 年以上前より鋼板接着を実施しており、耐荷性能の向上や、疲労耐久性の改善などの補強効果を確認している²⁾。現在、鋼板の浮き等の再劣化が報告されており、浮きを有する状態での疲労耐久性を確認する研究³⁾などが行われている。また、鋼板接着 RC 床版においても輪荷重走行試験により新たに水平ひび割れが発生することが確認されている。

鋼板接着 RC 床版の水平ひび割れの発生および進展メカニズムに関して未解明な点が多いが、近年、ひび割れ進展に関して解析的な検討により評価が試みられている⁴⁾。

本検討は、既往検討⁴⁾の継続検討として、無補強状態の RC 床版における水平ひび割れの発生・進展のメカニズムの解明を目的とし、輪荷重走行試験を模擬した非線形有限要素解析により、ひび割れ発生とその進展に寄与するひずみ挙動などを分析した。併せて、供用中に鋼板接着にて補強した場合の補強効果について確認した。



(a) 解析モデル外観



(b) 鉄筋要素のモデル化範囲

図-1 解析モデル概要

表-1 解析モデルにおける材料特性値

部材	材料	弾性係数 N/mm ²	降伏強度 N/mm ²	圧縮強度 N/mm ²	引張強度 N/mm ²	ポアソン比	単位体積重量 kN/m ³
R	SD295	200,000	295	-	440	0.3	77.0
C	コンクリート	28,600	-	32.0	2.67	0.2	23.0

R:鉄筋、C:コンクリート

1. 解析モデル

解析は、コンクリート構造物の高サイクル疲労損傷を再現できる構成則を有する3次元非線形有限要素解析を用いた。解析モデルの概要を図-1に、各部材の材料特性値および接合要素を表-1、2に示す。既往検討⁴⁾では、阪神高速3号神戸線姫島入路より切り出したRC床版を対象に、補強鋼板の接着が剥離した状態をモデル化している。また、切り出しパネルを既設RC部とし、その周囲に打設した新設RC部までモデル化している。本検討の解析モデルは、既往検討で用いた鋼板接着RC床版モデルから、鋼板補強を取り除いた無補強RC床版モデルとした。コンクリート物性値については、既設RC部および新設RC部ともに同様の設計基準強度を用いた。コンクリートと鉄筋の界面には接合要素を設置し、初期付着強度や摩擦係数を与えることにより部材同士の付着や摩擦性状をモデル化⁵⁾した。鉄筋とコンクリート間の初期付着強度はコンクリート標準示方書⁶⁾に基

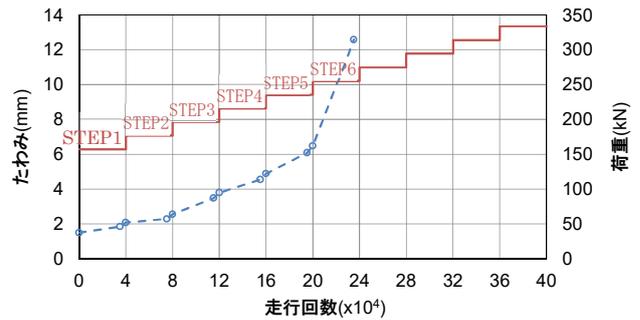
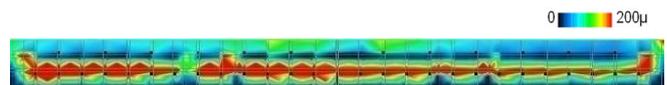
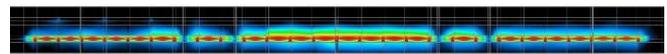


図-2 解析による走行回数-たわみ関係



(a) Z方向ひずみカウンター



(b) X方向ひずみカウンター

図-3 橋軸方向断面のひずみカウンター(20万回走行時)

表-2 接合要素の特性値

設置箇所	モデル化対象	初期付着強度 N/mm ²	摩擦係数
R-C	付着性状	28.0	0.6
R-R	摩擦	-	0.5

づいて算出した。既設RC部の鉄筋はソリッド要素、新設RC部については総要素数削減のため、鉄筋は1次元線形要素(LINE要素)とした(図-1(b))。

載荷条件は実際の試験での載荷方法に準拠して、初期荷重を157kNとし、走行回数4万回毎に19.6kN(2tf)ずつ荷重を増加させた(図-2)。

2. 水平ひび割れ発生メカニズムの分析

2-1 たわみとひずみの推移

図-2に解析結果での走行回数-たわみ関係を示す。たわみは床版下面中央部にて算出し、活荷重たわみ、残留たわみを含めた総たわみを示す。走行回数8万回(STEP2)からたわみの増加量が大きくなり、走行回数20万回(STEP5)まではたわみの増加率は一定であったが、それ以降に急激にたわみが増加し破壊に至ったと考えられる。

以降のひずみ分析において、主鉄筋方向、配力鉄筋方向、床版厚さ方向のひずみをそれぞれ、X、

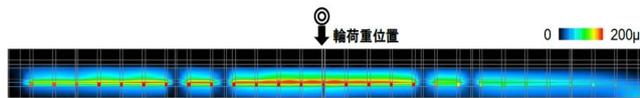


図-4 初期荷重 157kN 荷重 1 回目における主鉄筋方向 (X 方向) ひずみコンター

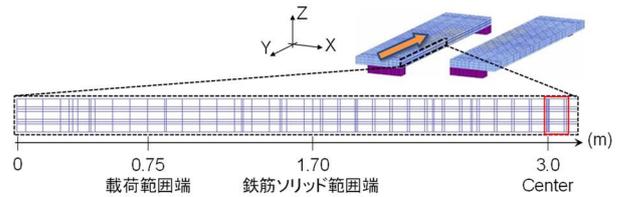


図-5 輪荷重位置と着目要素位置 (赤囲)

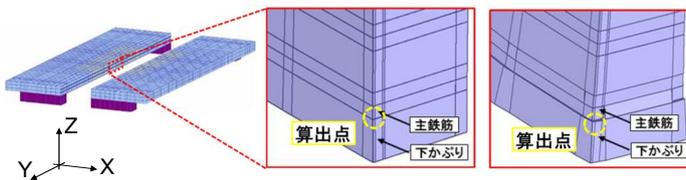


図-6 荷重位置 1.7m(左)と 3.0m(右)における主鉄筋とコンクリートの変形図

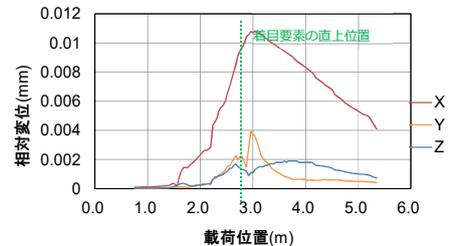


図-7 X, Y, Z 方向の主鉄筋とコンクリートの相対変位

Y, Z 方向ひずみとする. 図-3(a), (b)に, 20 万回走行時における橋軸方向断面の X 方向ひずみ, Z 方向ひずみコンターを示す. 着目断面は鉄筋をソリッド要素でモデル化した既設 RC 部の範囲である. ここで, コンクリートの応力ひずみ関係より, ひずみが引張側で 200μ を超えるとひび割れが発生すると考えられ, 本検討では 200μ を超える Z 方向ひずみの発生は, 水平ひび割れの発生に相当すると考えた. Z 方向ひずみコンターにおいて, 着目位置のほぼ全域における下側鉄筋高さに水平ひび割れ発生相当のひずみがみられた. X 方向ひずみにおいても下側鉄筋高さに集中する傾向がみられた.

2-2 水平ひび割れ発生メカニズムの分析

(1) 主鉄筋方向 (X 方向) ひずみ分布の発生時期

既往文献⁴⁾において, 鋼板接着 RC 床版の移動荷重作用時の X, Y, Z 方向ひずみを荷重ステップごとに算出した結果, X 方向ひずみがはじめに卓越することが確認されている. 本検討では, X 方向ひずみの発生時期を特定すべく, 初期荷重 157kN での荷重 1 回目 (荷重領域片端部から中央まで) における橋軸方向断面の X 方向ひずみコンターを算出した (図-4). ここで, 輪荷重位置は図-5 に示す 1.7m~3.0m まで移動させた. 図-4 より, X 方向ひずみは, 荷重 1 回目より下側鉄筋高

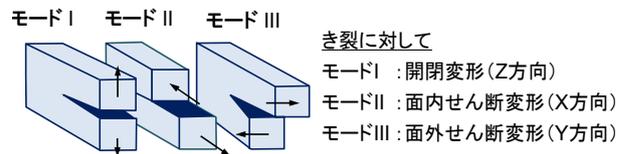


図-8 破壊モードの概念

さにおける輪荷重が通過した範囲にみられ, 157kN の輪荷重荷重 1 回目からコンクリートのひび割れの発生が考えられる 200μ に達することが分かった.

既設 RC 部の端位置 (図-5 の 1.7m 位置) および中央荷重時 (図-5 の 3.0m 位置) における主鉄筋とコンクリートの変形図を図-6 に示す. ここで着目した要素は図-5 赤囲みで示す床版中央に位置する要素である. 下側の主鉄筋要素とその下のかぶりコンクリート要素に着目すると, 荷重位置 1.7m では一体となって変形したが, 荷重位置 3.0m では大きな変形差がみられた. このときの X, Y, Z 方向の相対変位を図-7 に示す. ここで, 相対変位の算出点は下側主鉄筋高さのコンクリート要素の下側位置である (図-6). X 方向は荷重位置が要素位置直上である 3.0m で最大となり, 他方向よりも卓越した. このとき, 破壊力学における破壊モードの概念 (図-8) に照らすと, き裂方向は破壊モード II に相当する.

図-9 に荷重 1 回目における着目要素位置の X

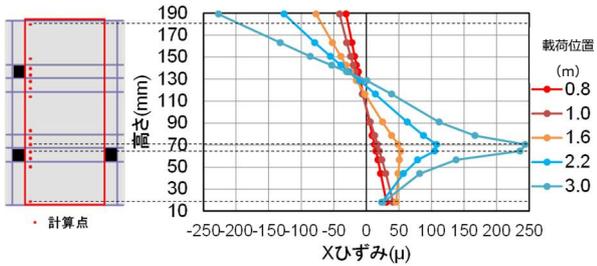


図-9 X方向ひずみの床版厚さ方向分布（荷重1回目）

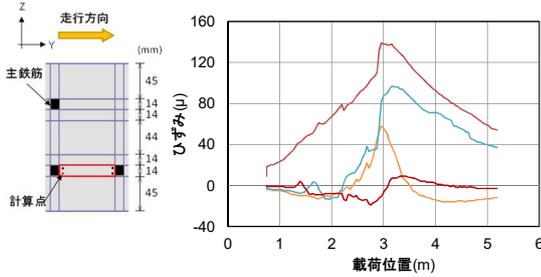
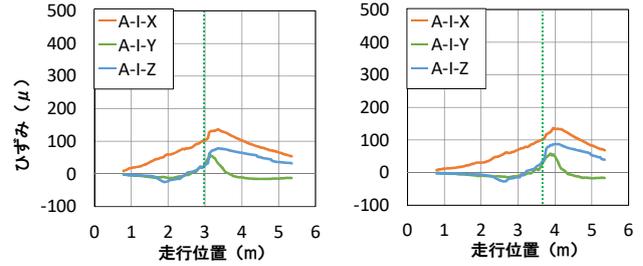


図-10 X, Y, Z方向ひずみの影響線（荷重1回目）

方向ひずみの床版厚さ方向分布を示す。凡例の数値は輪荷重の荷重位置 (m) を示す。X 方向ひずみ分布は荷重位置 0.8m や 1.0m では直線となり平面保持を示したが、1.6m 以降では直線ではなく下側鉄筋高さにおいてひずみが増加する傾向がみられた。平面保持が崩れ始めたときの主鉄筋高さにおける X 方向ひずみが 50μ 程度であり、鉄筋位置でコンクリートと鉄筋が付着切れし、この後、ひび割れが生じたことで下側の層が断面抵抗しなくなっていったと考えられる。

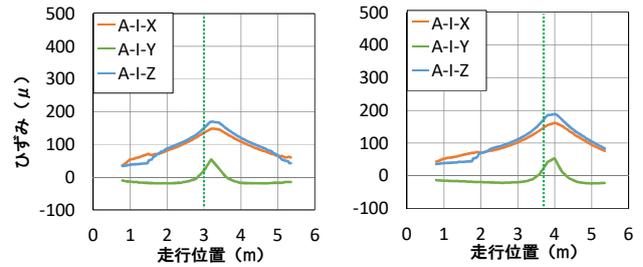
(2) 各方向のひずみ分布

荷重1回目の着目要素位置の各方向のひずみを図-10 に示す。ひずみは主鉄筋高さのコンクリート要素の下側の計算点で算出した。荷重位置が要素直上の 3.0m に至るまでは、X 方向ひずみ成分が支配的であり、3.0m 以降の荷重位置では Z 方向ひずみ成分の増加がみられた。これは破壊力学におけるモード II の面内せん断変形の挙動により主鉄筋方向に鉄筋-コンクリート間の付着切れが生じて部分的に床版が 2 層化し、その後、移動荷重に伴ってモード I の開閉変形により Z 方向ひずみが増大したものと考えられる。このように、Z 方向ひずみがひび割れ発生相当に達したときに水平ひび割れが発生すると考えられる。



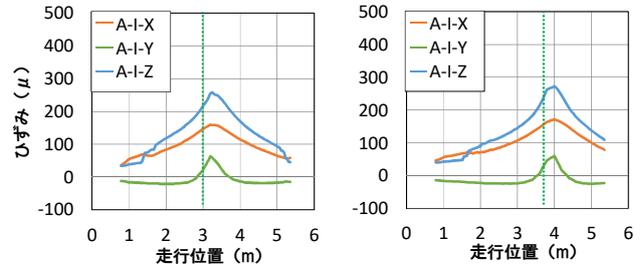
(a) A-I-STEP1 初め

(b) B-I-STEP1 初め



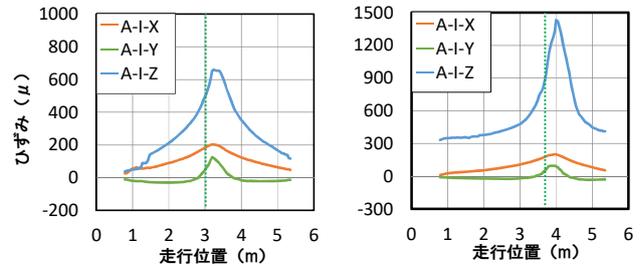
(c) A-I-STEP1 後

(d) B-I-STEP1 後



(e) A-I-STEP2 後

(f) B-I-STEP2 後



(g) A-I-STEP5 後

(h) B-I-STEP5 後

図-11 ひずみ成分の影響線（橋軸方向）

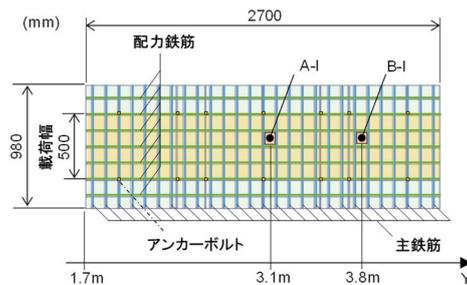


図-12 算出要素位置（鉄筋ソリッドモデル化範囲）

2-3 水平ひび割れ進展メカニズムの分析

(1) 各方向のひずみ成分分析

水平ひび割れに相当するひずみがみられた下段鉄筋位置において、水平ひび割れの進展メカニズムを分析する。図-11 に下段鉄筋位置における要素を対象に、ひずみ成分の輪荷重位置による影響線と、荷重時期との関係を算出した。着目要素位置を図-12 に示す。要素は下段配力筋高さに位置し、それぞれ A-I, B-I, とし、ひずみは、X, Y, Z 方向ひずみを算出した。A-I は新設 RC 部端から 3.1m, B-I は 3.8m に位置する。着目した荷重時期は、前述の 157kN での荷重 1 回目に相当する STEP1 開始時および STEP1, STEP2, STEP5 終了時である (図-2 参照)。

STEP1 開始時(図-11(a, b))において、A-I, B-I では、X 方向ひずみが占める割合が高かったが、STEP1 終了時(図-11(c, d))においては、Z 方向ひずみが 150~200 μ 弱に増加し、X 方向ひずみをやや上回った。これは 2.2-2. (2) に示したように、要素付近の鉄筋とコンクリートにおいて、移動荷重に伴うモード II のせん断変形によって付着切れが発生し、その後繰返し荷重に伴うモード I の開閉変形によって Z 方向ひずみが増加したためと考えられる。

STEP2 終了時(図-11(e, f))において、A-I, B-I の Z 方向ひずみは、ひび割れ発生相当の 200 μ を上回った。ひずみの増加は荷重 STEP の増加に伴う荷重の増加、あるいは繰返し荷重による疲労効果が要因として考えられる。また Z 方向ひずみが最大値を示す輪荷重の走行位置は要素直上を通過した直後にみられる。Z 方向ひずみは移動荷重の通過に伴うモード I の開閉変形によって増加することが確認された。

STEP5 終了時(図-11(g, h))は、破壊直前であると考えられ、両着目要素において 200 μ を超えるひずみが見られた。

(2) 床版厚さ方向 (z 方向) ひずみの進展分析

図-13 に、主鉄筋高さ断面における荷重回数 4 万回毎の Z 方向ひずみのコンターを示す。STEP1 終了時において、200 μ を超えるひずみが一部み

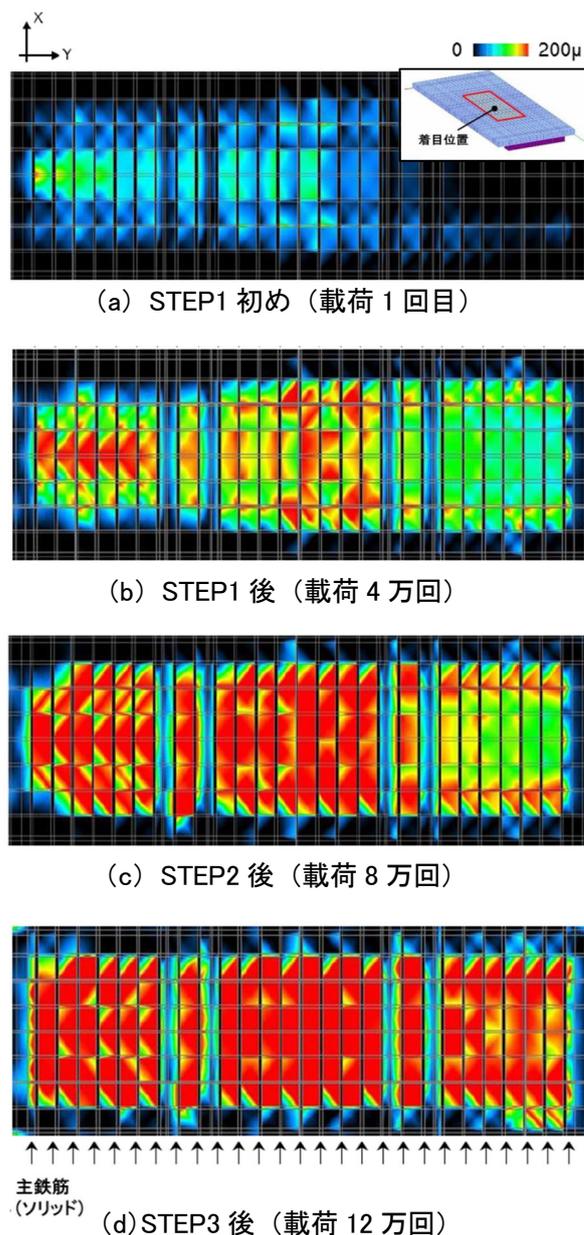


図-13 主鉄筋高さ断面における Z 方向ひずみコンター

られた。STEP1, 2 終了時のコンターより、200 μ を超えるひずみは、主に荷重幅内要素において進展しやすく、STEP3 終了時はさらに 200 μ に達するひずみ範囲が増加し、荷重幅外側の要素には遅れて発生する傾向が見られた。

3. 鋼板接着による補強効果

本章では RC 床版への鋼板接着補強実施によって得られる効果を解析的に評価するために、輪荷重走行試験に基づく疲労荷重シミュレーションを

表-3 解析モデルにおける材料特性値

部材	材料	無補強時				鋼板補強時			
		弾性係数 N/mm ²	降伏強度 (圧縮強度) N/mm ²	引張強度 N/mm ²	単体体積 重量 kN/m ³	弾性係数 N/mm ²	降伏強度 (圧縮強度) N/mm ²	引張強度 N/mm ²	単体体積 重量 kN/m ³
R	SD295	200,000	295	440	77.0	200,000	295	440	77.0
C	コンクリート	28,600	(32.0)	2.67	23.0	28,600	(32.0)	2.67	23.0
S	SS400	10	999,999	999,999	0.1	200,000	295	440	77.0
A	M12 (コンクリート内)	28,600	(32.0)	2.67	23.0	200,000	295	440	77.0
	M12 (鋼板、樹脂位置)	10	999,999	999,999	0.1	200,000	295	440	77.0
E	弾性要素	10	-	-	0.1	2,250	-	-	25.0

(R: 鉄筋, C: コンクリート, S: 鋼板, A: アンカーボルト, E: エポキシ樹脂)

表-4 接合要素の特性値

設置箇所	モデル化対象	初期付着強度 N/mm ²	摩擦係数
R-C	付着性状	28	0.6
R-R	摩擦	-	0.5
A-C	ボルト耐力	388.2	0.6
A-S	ボルト耐力	388.2	0.5
F-S	接合状態	157.5	0.3
F-C	付着 / 剥離	13 / -	0.3

実施し、補強前後のたわみおよび内部損傷の変化に着目する。ここでは、鋼板接着の実施時期を載荷 STEP1, 4, 6 開始時の 3 ケースとし、さらに補強鋼板とコンクリート間の樹脂の付着を考慮した場合と剥離を考慮した場合で、その効果の違いを確認する。

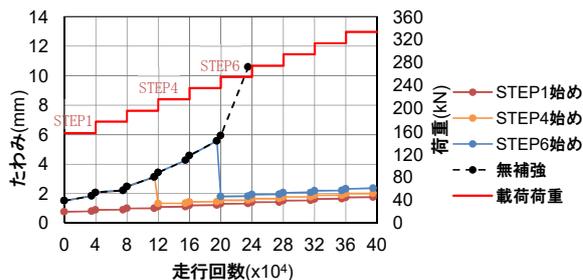
3-1 鋼板補強のモデル化

解析モデルは 2. に示した構造をベースとするが、計算処理の途中で新しく要素を付け足すことができないため、あらかじめ鋼板補強部材（鋼板、アンカーおよび樹脂）の要素をモデル化し設置した⁵⁾。ここで、鋼板補強実施前においては、十分に軽量で剛性も小さく、降伏に至らないという特性値を鋼板補強部材に与えることにより、RC 床版の挙動に影響を与えないモデルとした。鋼板補強実施後においては、材料特性値を鋼板接着部材の材料特性値に変更することで再現した（表-3, 4）。また、補強時の樹脂による接着効果を評価するため、鋼板の付着を考慮するケースには床版コンクリートと樹脂間に設置した接合要素に初期付着強度としてせん断方向および軸方向ともに 13N/mm²の付着を与えたモデルを用いた。

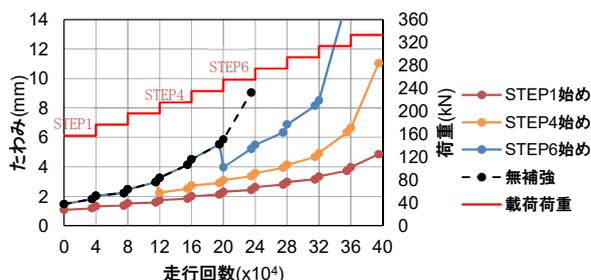
3-2 たわみに対する補強効果の分析

(1) 樹脂の付着を考慮したケース

図-14(a)に載荷 STEP1, 4, 6 開始時に樹脂の付着を考慮した鋼板接着を実施したときのたわみ推移図を示す。STEP4は水平ひび割れが十分に進展した時期である。樹脂の付着を考慮したケースにおいては、補強実施後のたわみの低減効果が大き



(a) 鋼板の付着を考慮したケース



(b) 鋼板の剥離を考慮したケース

図-14 鋼板補強前後におけるたわみ推移

きく、さらに補強後のたわみ増分は補強時期を問わず概ね一定であった。よって樹脂付着を考慮した鋼板接着においては、補強時期が遅れていたとしても、床版全体の剛性の回復効果は認められる。補強により、STEP10 以内においては破壊を示すような急激なたわみ増加はみられず、どの補強時期においてもSTEP10 終了時のたわみは約2mmであった。

(2) 樹脂の剥離を考慮したケース

図-14(b)に STEP1, 4, 6 開始時に鋼板全面において樹脂の剥離を想定した鋼板接着を実施したときのたわみ推移図を示す。補強実施直後においてたわみは低減されるものの、STEP1 開始時に補強した場合は STEP10 までに破壊しないが、STEP4, 6 開始時に補強した場合は急激なたわみ増加が見られ、破壊したと考えられる。以上より、

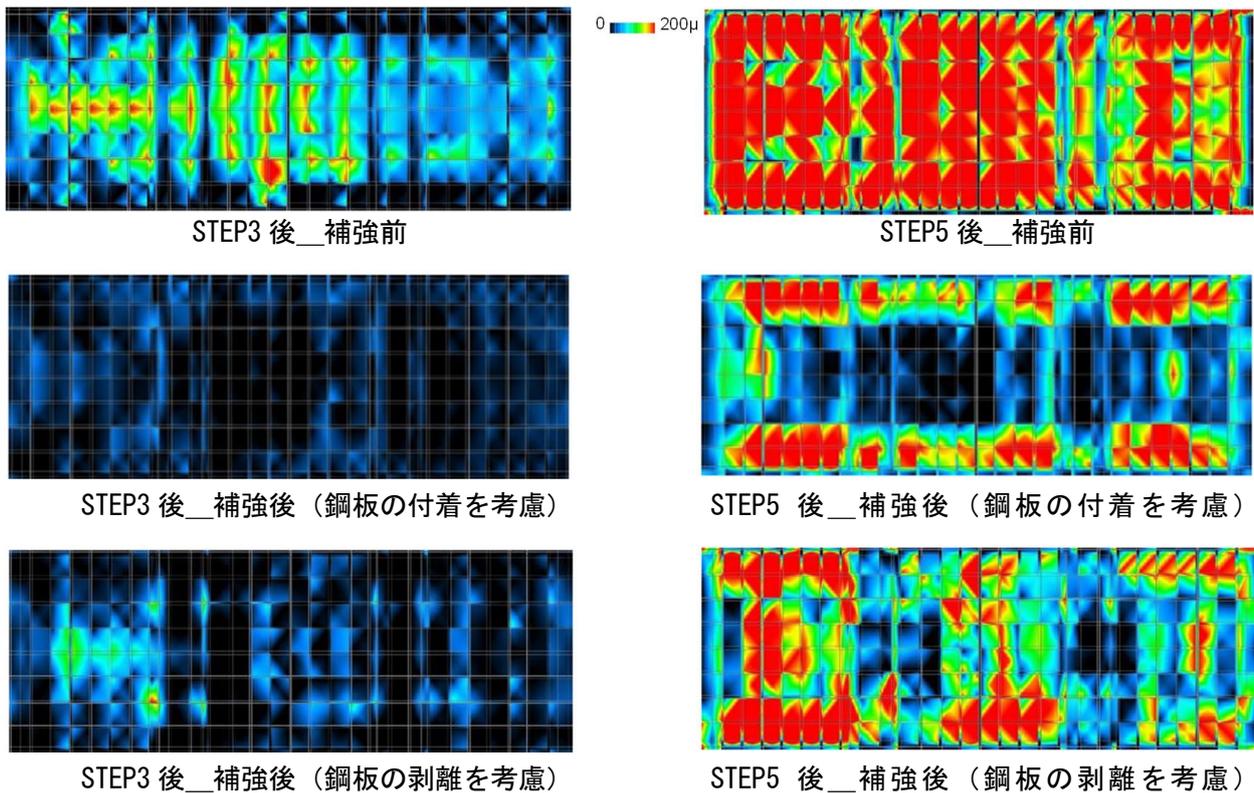


図-15 荷重 STEP3, 5 終了時における鋼板接着補強実施前後の Z 方向ひずみコンター

樹脂が剥離した状態の鋼板接着は、付着している場合より補強効果が小さく、補強時期が遅れるほど床版の疲労耐久性の回復効果が低下すると言える。

3-3 水平ひび割れに対する補強効果の分析

(1) 樹脂の付着を考慮したケース

無補強状態で進展した水平ひび割れに対する鋼板接着の補強効果を分析するため、図-15 に荷重 STEP3, 5 終了時における鋼板接着補強実施前後の主鉄筋高さ断面の Z 方向ひずみコンターを示す。STEP3, 5 の補強前においては、ひび割れ発生相当の 200μ を超える Z 方向ひずみがみられたことから水平ひび割れが発生、進展していることが確認できる。付着を考慮した場合は STEP3 後の補強後では、Z 方向ひずみは着目範囲の広域で大幅に低減された状況が確認された。樹脂の付着を考慮した鋼板接着の実施により、水平ひび割れの発生および進展を遅らせることができると考えられる。

(2) 樹脂の剥離を考慮したケース

STEP3 後における補強後では、補強の実施によって Z 方向ひずみは低減された様子がみられたが、 100μ を超える要素が点在し、また 200μ 程度のひずみが見られる要素もみられた。STEP5 後における補強後では輪荷重載荷直下の範囲における Z 方向ひずみは樹脂の付着を考慮したケースよりひずみの低減範囲は小さいが、一定の補強の効果がみられ、水平ひび割れの発生および進展を遅らせることができると考えられる。

4. おわりに

本検討では無補強 RC 床版を対象に輪荷重試験を模擬した解析を行い、水平ひび割れの発生・進展過程を分析した。また、鋼板接着補強による効果を確認した。得られた知見は以下のとおり。

- 1) 下側鉄筋高さにおける主鉄筋とコンクリートの付着切れは、破壊力学のモード II の面内せん断変形により発生し、その付着切れを起点にモード I の開閉変形により床版厚さ方

向のひずみが増加する傾向がみられた。このひずみがひび割れ発生相当に達した時に水平ひび割れが発生すると考えられる。

- 2) 鋼板接着補強を実施することにより、床版のたわみおよび床版厚さ方向のひずみが低減され、水平ひび割れの発生および進展を遅らせることができると考えられる。

本解析では、補強後に鋼板と床版下面が剥離した場合であっても一定の補強の効果が見られることを示したが、完全に付着した場合より疲労耐久性は低下することから、施工時の確実な樹脂注入と点検時においては鋼板の浮きや腐食に留意する必要がある。また、下段鉄筋位置での水平ひび割れについて再現できたが、今後は上段鉄筋位置の水平ひび割れについても分析を進めたい。

謝辞：本検討は、法政大学と実施した共同研究「鋼板接着 RC 床版の解析的評価に関する共同研究」の一部成果の報告である。本共同研究の遂行

に対し、ご指導頂いた藤山教授（現：横浜国立大学准教授）および南波氏（現：JFE エンジニアリング株式会社）に深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 一色智彦, 鈴木真, 藤原理絵, 鎌田敏郎: 供用中の鋼板接着補強 RC 床版における弾性波による内部損傷の非破壊調査, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.2, pp1309-1314, 2018.
- 2) 堀川都志雄, 加藤暢彦, 吉川紀, 山口良弘, 園田恵一郎: 鋼板接着工法で補強されたひび割れ損傷 RC 床版の耐久性について, 構造工学論文集, Vol.44A, pp1038-1094, 1998.
- 3) 佐野正, 山下幸生, 松井繁之, 堀川都志雄, 久利良夫, 新名勉: 浮きを有する鋼板接着補強 RC 床版の疲労耐久性および樹脂再注入の評価, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.67, No.1, pp27-38, 2011.
- 4) 南波謙太, 藤山知加子, 新名勉, 青木康素: 鋼板接着 RC 床版における水平ひび割れ進展過程の分析, 第十回道路橋床版シンポジウム論文報告集, pp313-318, 2018.
- 5) 南波謙太, 藤山知加子, 新名勉: 接合要素を用いた異形鉄筋とコンクリート間の付着特性再現性の検討, 土木学会第 73 回年次学術講演会概要集 V, 2018.
- 6) 土木学会: 2017 年制定コンクリート標準示方書 [設計編], 2018.

ANALYTICAL STUDY OF THE PROCESS OF HORIZONTAL CRACK INITIATION AND GROWTH IN REINFORCED CONCRETE DECK SLABS AND THE STRENGTHENING EFFECT OF STEEL PLATE BONDING

Masato TANAKA, Tsutomu NIINA, Yasumoto AOKI and Masaaki ISA

A numerical analysis model was developed through a reproduction analysis of wheel load running test results on reinforced concrete (RC) deck slabs strengthened by the steel plate bonding method, and a non-linear finite element analysis simulating a wheel load running test on non-strengthened RC deck slabs was performed by using the model. The horizontal cracks thus caused were analyzed for their initiation and growth process. It was found that the bond between the main reinforcing bars and concrete was broken at the height of the lower reinforcing bars due to in-plane shear deformation, with the crack horizontally developing and propagating through its open-close movement and deformation. In addition, the strengthening effect of the bonded steel plates was evaluated analytically by focusing on the bond and debonding at the adhesive interface. The results showed that the vertical strain at the height of the main reinforcing bars was reduced compared to that before the strengthening, even when the steel plates were debonded after the strengthening. This indicated that the steel plates after debonding would be still effective in slowing the initiation and growth of horizontal cracks.

田中 将登



阪神高速道路株式会社
技術部
技術推進室
Masato TANAKA

新名 勉



阪神高速道路株式会社
建設事業本部
大阪建設部 設計第一課
Tsutomu NIINA

青木 康素



阪神高速道路株式会社
建設事業本部
大阪建設部 設計第二課
Yasumoto AOKI

伊佐 政晃



阪神高速道路株式会社
管理本部
大阪保全部保全事業課
Masaaki ISA