

論文 床版増厚補強工法の効果の検討と境界面付着強度が及ぼす影響

藤山 知加子*1・池野 誠司*2・小林 薫*3・前川 宏一*4

要旨：繰返し荷重によって損傷を与えた RC 床版に上面増厚増厚を行い，増厚効果を実験と数値解析の両面から検討した。既設 RC 床版上面をチップングした後に普通コンクリートを打設した簡易な増厚増厚では，高サイクル疲労荷重に対する損傷を抑制する効果が確認された。数値解析において新旧コンクリート境界面に接合境界モデルを設定することで，実験結果の再現が可能となった。さらに付着強度を変化させた感度解析を実施し，境界面付着強度が増厚増厚工法の増厚効果と破壊形態の両者に影響を及ぼすことを示唆した。

キーワード：増厚増厚，押拔せん断破壊，境界面，付着強度，非線形有限要素解析，疲労

1. はじめに

交通荷重の高サイクル繰返しや凍害などによって劣化したコンクリートを健全な材料に置換する補修工事のみならず，有効高を増して部材自体のせん断耐力の上昇を見込んだ RC スラブの上面増厚工法が広く実施されてきた。一方，上面増厚の実施には既存橋梁の道路交通を遮断する必要があることや，施工後は計画路面高の変更や橋梁上部工自重の増加をもたらすこと，さらに，新旧コンクリート境界面の付着喪失による増厚効果の減少¹⁾など，他の増厚工法と比較して上面増厚工法が必ずしも優位でない面も指摘されている。

本研究では，あらかじめ繰返し荷重により疲労損傷を与えた RC 床版に上面増厚増厚を施し，再載荷を実施した後に同様の載荷を再度行うことで，疲労性能に対する増厚効果を実験・解析の両面から検証することを目的としている。実験では制御が困難な新旧コンクリート境界面での付着強度²⁾をパラメータとした感度解析を実施し，境界面の付着低下が部材の増厚効果に及ぼす影響を，定量的に分析するものである。

数値解析では，コンクリートの疲労損傷を構成則のレベルから考慮することが可能な，直接経路積分型非線形疲労解析が近年開発されている³⁾。この手法の特長は，荷重と応力-ひずみの履歴に応じたひび割れの発生と発生後の挙動とを連続して3次元で再現できる点である⁴⁾。増厚前のシミュレーションで算出されたコンクリートの損傷に関する情報（ひび割れの有無やその方向，塑性ひずみの大きさ）を，そのまま増厚後のシミュレーションの初期データとして取り込んで，以後の挙動を連続して解析を実施することが可能である。本研究ではこの数値解析システムを採用することとした。

2. RC 床版の上面増厚実験

2.1 実験条件

(1) 試験体諸元

実験に用いたスラブ供試体の諸元を図-1 に示す。供試体は，荷重進行方向 2.2m 支間方向 1.2m(支間長 1.0m)，版厚 140mm の 2 辺単純支持版とした。材料試験結果を表-1 に示す。増厚は 30mm とし，鉄筋は配置しない。本体も増厚部も，骨材の最大寸法は 20mm である。

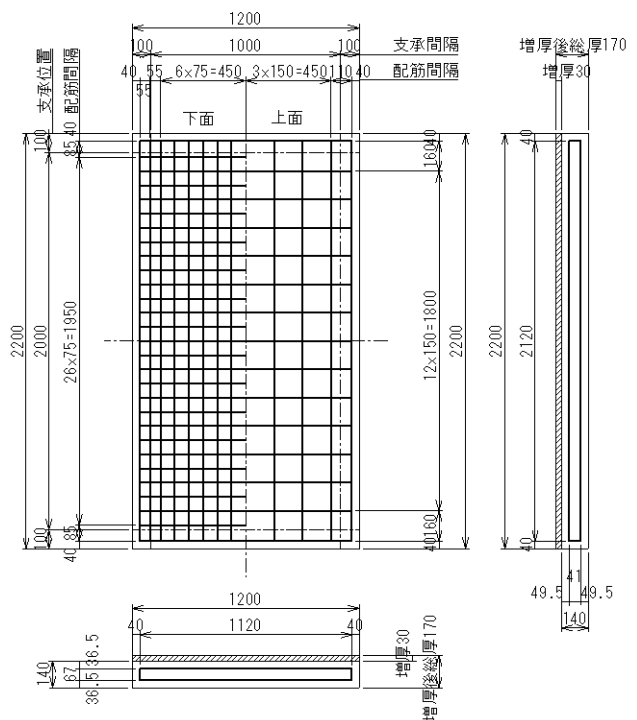


図-1 供試体諸元

表-1 材料特性

材料強度	本体	増厚部
コンクリート	$f'_c = 27.5 \text{ N/mm}^2$	$f'_c = 33.4 \text{ N/mm}^2$
鉄筋	$f_y = 295 \text{ N/mm}^2$ 以上	---

*1 東京大学大学院工学系研究科 社会基盤学専攻 (正会員)

*2 東日本旅客鉄道(株) 東北工事事務所 東北・北課 主席 (正会員)

*3 東日本旅客鉄道(株) JR 東日本研究開発センター フロンティアサービス研究所 課長 博(工) (正会員)

*4 東京大学大学院工学系研究科 教授 工博 (正会員)

(2) 載荷方法

載荷面積を版中央の 200mm×100mm とした。増厚以前の本体床版の押拔せん断耐力は、土木学会コンクリート標準示方書⁵⁾に拠れば 318kN である。はじめに、想定される押拔せん断耐力の 63%にあたる 200kN まで静的に載荷—除荷を 3 回繰返し、次に最大荷重を 200kN、最小荷重を 30kN とし、試験機能力に応じて 10,000 回の連続繰返し載荷を行った。載荷速度は 0.03～0.04Hz である。

増厚後は増厚前と同様に、200kN までの静的な載荷—除荷を 3 回実施した後、振幅 200kN～30kN の 10,000 回の繰返し載荷を行った。さらにその後、最大荷重を 300kN まで増加し、300kN～30kN の 10,000 回の繰返し載荷を行った。載荷ステップを表-2 にまとめて示す。

(3) 境界面の処理および増厚

本体に 10,000 回載荷後、架台から取り外した試験体の上面をブレーカーでチップングした。チップングは粗骨材が見える程度まで（図-2）とした結果、チップング深さは概ね 5mm 程度であった。

チップング後は水で表面の粉塵を洗浄除去し、表面を湿潤状態に保ったままで新規増厚コンクリートを打設した。増厚は、旧コンクリート上面チップングによる減少分も含めて、全高がもとの試験体厚よりも 30mm 高くなるように製作の管理を行った。

2.2 実験結果

(1) ステップ 2 まで（増厚以前）

ステップ 1 および 2 について、版中央のたわみと載荷荷重との関係を図-3 に示す。ステップ 2 の 10,000 回の載荷の間にたわみが徐々に増加したことがわかる。図-4 に、ステップ 2 の版中央たわみと載荷回数の関係を示す。載荷回数が 200 回から 300 回の間にたわみが急増していることから、この間にひび割れが複数発生して、版の剛性が低下したと推察される。目視観察によれば、載荷 1 回から 200 回程度まではステップ 1 で生じたひび割れが徐々に伸長し、200 回から 300 回の間に新たなひび割れが発生して剛性が低下したものの、300 回以降 10,000 回までの 9700 回では新たなひび割れの発生は見られず、既存のひび割れが伸長する過程にあった。また、ステップ 2 の 1 回から 200 回程度までのたわみの増加量と、急増以後の 300 回から 10,000 回までの 9700 回の間のたわみの増加量はほぼ等しい。コンクリートの損傷は載荷初期に大きく、載荷回数が増えるにつれて載荷一回あたりの損傷は相対的に小さくなるが、既存の研究でも指摘されている⁶⁾。

(2) ステップ 3～6（増厚増厚後）

ステップ 3 から 6 について、版中央のたわみと載荷荷重との関係を図-5 に示す。ステップ 2 終了後の残留たわみをステップ 3 開始時のたわみとした。増厚後、最大

荷重を 300kN に増加したステップ 6 において 1451 回目の載荷で、押拔せん断破壊に至った。破壊後に試験体を詳細観察したところ、版の端部で増厚コンクリートと旧コンクリートとの間に 1mm 程度のずれを確認した。

表-2 載荷ステップ

STEP	最大荷重(kN)	最小荷重(kN)	回数
1	200	0	3
2	200	30	10,000
3	200	0	3
4	200	30	10,000
5	300	0	3
6	300	30	1,451



図-2 チップング後のコンクリート表面

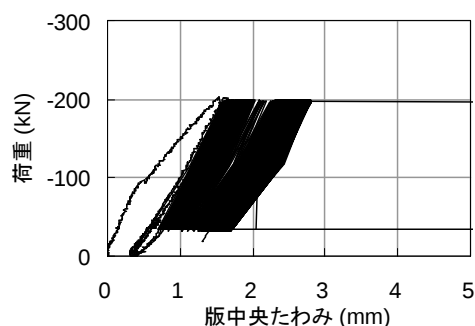


図-3 荷重—版中央たわみ（増厚前）

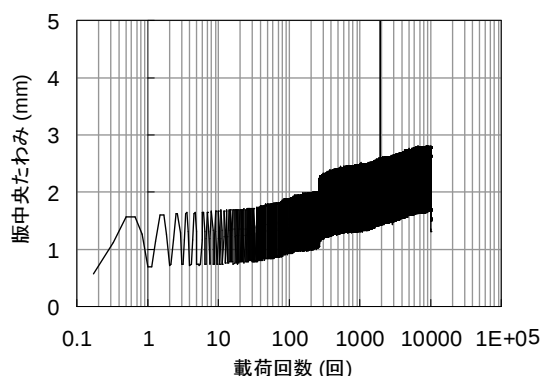


図-4 版中央たわみ—載荷回数（増厚前）

ステップ4および6の版中央のたわみと載荷回数との関係を、増厚以前のステップ2の結果とあわせて図-6に示す。増厚後のステップ4では、たわみ振幅とたわみの増加率（図中破線の傾き）が増厚前のステップ2に比べて小さかった。増厚によって損傷の進行を抑えることができている。最大荷重を300kNとしたステップ6では、最大荷重200kNのステップ4に比べて損傷の進行が加速され、1451回目の載荷で押拔せん断破壊に至った。

3. 数値解析による検討

3.1 解析モデル

(1) 解析モデル概要

解析モデルの概要を図-7に示す。8節点アイソパラメトリック要素を用いた。鉄筋は46mm厚のRC要素層として解析に取り入れた。それ以外は無筋コンクリート領域と規定され、コンクリートの引張破壊エネルギーに対応した引張軟化特性⁴⁾を設定した。コンクリートの引張強度および弾性係数は、圧縮強度試験の試験値から推定⁵⁾した。各要素の諸元を表-3に示す。

表-3 解析に用いたコンクリートの材料特性

材料強度	本体	増厚部
圧縮強度	$f'_c = 27.5 \text{ N/mm}^2$	$f'_c = 33.4 \text{ N/mm}^2$
引張強度	$f_t = 2.1 \text{ N/mm}^2$	$f_t = 2.4 \text{ N/mm}^2$
弾性係数	$E = 26.8 \text{ kN/mm}^2$	$E = 29.0 \text{ kN/mm}^2$

(2) 増厚コンクリート境界面の接合境界モデル

チッピングによる母材コンクリートの体積変化は十分に小さいものとし、母材コンクリートと増厚コンクリートとの界面に図-8に示す特性を持つ接合要素を配置した。界面でのせん断力あるいは剥離方向の引張力が初期付着力を越えた場合は、それ以後の応力伝達は Mohr-Coulomb 摩擦則に従うとした。初期剛性はコンクリートの30分の1、初期付着は既往の研究¹⁷⁾を参考に開口方向で 1.05 N/mm^2 (増厚コンクリート引張強度の50%)、せん断方向は 2.75 N/mm^2 (圧縮強度の10%相当)を仮定した。付着切れ後の摩擦係数は0.6を仮定した⁸⁾。

(3) 増厚前後の損傷履歴再現

増厚前後で同じ要素分割を用い、増厚部に相当する部分の要素の特性を施工過程に応じて変化させることで増厚増厚工法を模擬した。増厚以前の疲労解析では、マトリックス演算での桁落ちが顕著にならない範囲で剛性を小さく抑えた仮想弾性要素を将来の増厚部に設定した。増厚後はコンクリート要素モデルを増厚部の要素に与えた。増厚直後は塑性も損傷も無い健全なコンクリート（初期化）が設定され、以後の変形に従って、材料非線形性が導入されていく。

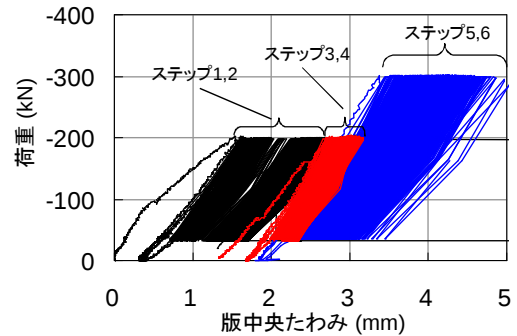


図-5 荷重-版中央たわみ

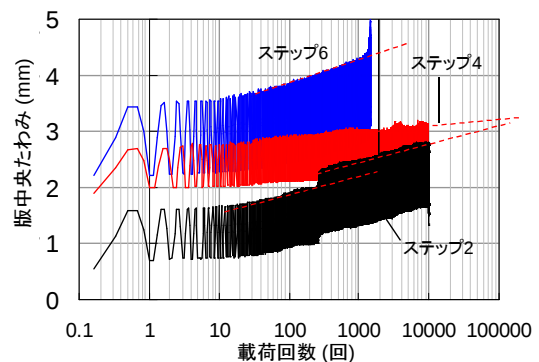


図-6 版中央たわみ-載荷回数

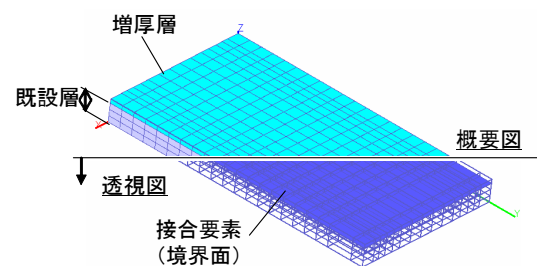


図-7 解析モデル

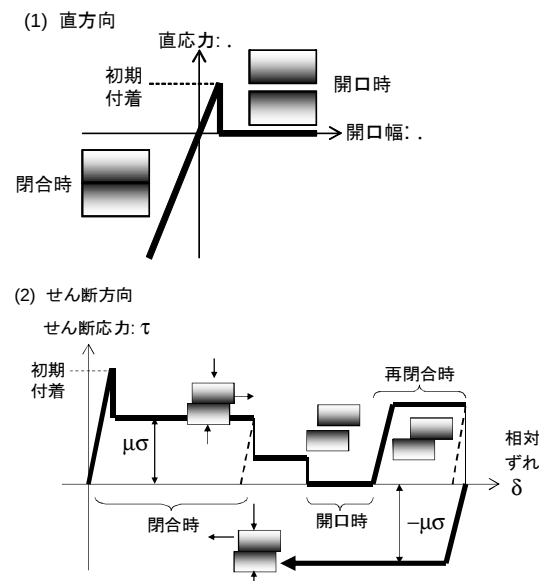


図-8 接合境界の開口・せん断モデル化

3.2 解析結果

(1) 仮想弾性要素の検証

初期段階で仮想弾性要素を配置したモデルと、全厚140mmの要素のみのモデルの解析は、理論上、一致しなければならないが、前者では剛性差の大きな要素群を使用することになり、全体行列演算で桁落ちの危険と丸め誤差が生じ得る。ここでステップ1での版中央のたわみと荷重との関係(図-9)を見る限り、仮想弾性要素(増厚時に実体化される)は既存構造の応答に影響を与えていないことが確認できた。

(2) 解析結果

全ステップの荷重-版中央のたわみ関係を図-10に示す。最大たわみ解析値は増厚前のステップ1で1.4mm、ステップ2で1.9mmであり、10,000回載荷によってたわみが0.5mm増加したことになる。実験ではステップ2の間に1.58mmから2.78mmまで1.2mmの増加がみられたことから、仮定した初期付着強度(4章参照)に対する疲労解析では、高サイクル疲労損傷は過小側に算出された。

増厚後のステップ3以降の解析では、増厚前の残留変位のデータを継続して計算が続けられていることと、仮想要素に実際の増厚材料の特性値を入力することにより、剛性が増厚前よりも僅かながら高くなっていることが確認された。増厚後のステップ3から4にかけての解析でのたわみの増加は0.15mmで、増厚以前と同様、実験で観察された増加量0.5mmより小さい。最大荷重を300kNとしたステップ5以降の解析ではたわみが急激に増加し、ステップ6の載荷回数3000回程度で破壊に至る結果を得た。ステップ5以前は解析でのたわみ増加率は実験より小さい傾向にあったが、最終的な破壊回数については、実験の1451回と大差ない結果を得た。

ステップ2, 4, 6について、解析で得られた版中央のたわみと載荷回数との関係を図-11に示す。増厚以前のステップ2に比べ、増厚後のステップ4では、たわみの振幅と絶対値の増加率が共に小さいことが確認できる。以上より、実験同様に増厚することで損傷の進行が抑制されることが、解析での定性的に示された。

3.3 解析結果の考察

図-12に、ステップ6で版中央のたわみが5mmに達したときの全体変形図を示す。版中央部が窪んだ変形形状となっているが、端部では、新旧コンクリートの開口0.23mm、水平ずれ0.18mmが確認された。実験供試体では、試験後に版の端部で新旧コンクリート層に1mm程度の水平ずれが観察されている。

図-13に、同じくたわみが5mmに達したときの、版中央断面の支間方向(X方向)応力分布を示す。増厚部と旧コンクリートとの間で不連続面がみられ、両者の間のせん断ずれ応力は最大で2.7 N/mm²であった。

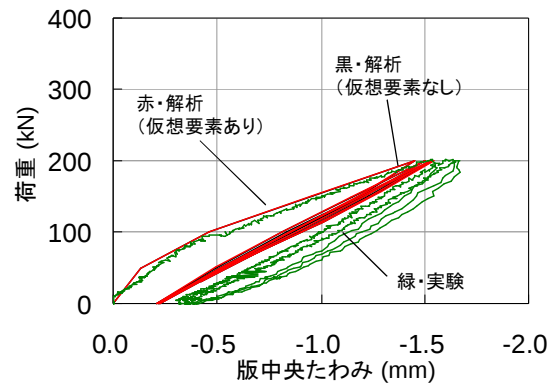


図-9 荷重-版中央たわみ(モデル検証)

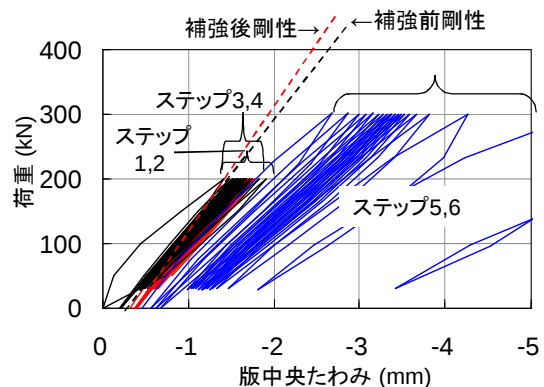


図-10 荷重-版中央たわみ(解析・全ステップ)

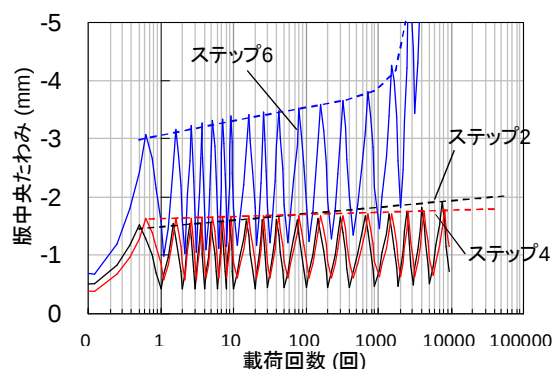


図-11 版中央たわみ-載荷回数(解析・全ステップ)

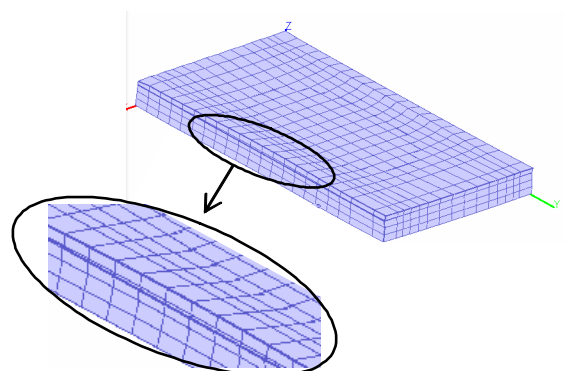


図-12 たわみ5mm時の全体変形図(変位×100)

4. 付着強度の変動が増厚効果におよぼす影響

4.1 付着強度の変動

前章までの解析では、新旧コンクリート境界面に、過去の実験的研究¹⁷⁾から初期付着強度（開口方向 1.05N/mm^2 ，せん断方向 2.75N/mm^2 ）を仮定したものである。しかし、実施工では旧コンクリートのチッピング状況や増厚コンクリートの材料、養生条件、温度変化等によって、初期付着強度は室内試験値より低下することもあると推測される。そこで、前章までの解析結果を、境界面初期付着がなく摩擦のみ（摩擦係数 0.6）のケース、新旧コンクリートが完全に一体化するケース（境界要素無）、さらに全く増厚を行わなかったケースと比較し、新旧コンクリート境界面付着強度の変動が増厚増厚工法の増厚効果に及ぼす影響を検討することとした。検討ケースを表-4にまとめる。

4.2 付着強度と増厚効果の感度解析

ケース 2, 3, 4 の荷重-版中央のたわみ解析値の関係を図-14に示す。図中の破線は、ステップ 2（増厚前）および 4（増厚後）の初回載荷時剛性を示している。

新旧コンクリート境界面の付着強度を一切期待せず、摩擦のみを考慮したケース 2 では、増厚後剛性は増厚前剛性とほぼ同程度であり、ステップ 2 で低下した剛性を増厚によって回復するには至っていない。最大たわみは、ステップ 3 開始時で約 0.5mm ，ステップ 5 開始時には約 1.3mm ，基準ケース 1 に比べて大きい。また、版中央たわみ解析値が 5mm に達するのはステップ 6 の載荷回数 10 回のときであり、基準ケースの 3000 回程度に比べて著しく短い。増厚増厚を行っても、境界面の初期付着が不十分であれば、新旧コンクリートが重ね版として挙動する結果、期待した増厚効果が得られない。

新旧コンクリートの境界面に接合要素を配置せず、一体と仮定したケース 3 では、増厚後の剛性回復とともに、ステップ 3 および 4 によるたわみ増加量が基準ケース 1 に比べて小さいことから、増厚後の疲労損傷抑制効果も確認できる。最大たわみは、ステップ 3 開始時で 0.5mm ，ステップ 5 開始時には 0.9mm ，基準ケース 1 に比べて小さく抑えられている。しかし、ステップ 6 の載荷回数 1000 回程度以降にたわみが急激に増加し、版中央たわみ 5mm に達したのは、基準ケース 1 と同様ステップ 6 の 3000 回程度であった。参考として、増厚増厚を実施せず全厚 140mm のまま他と同じ載荷を行ったケース 4 では、ステップ 3 から 4 の間のたわみ増加量をもっとも大きく、ステップ 5 の 300kN 静的載荷で押抜せん断破壊によって版中央たわみが破壊基準の 5mm に達した。

以上より、スラブ試験体での初期付着強度は仮定した試験値より小さかったと推定される。また初期付着が部材増厚効果に有意な影響を与え得ることが示された。

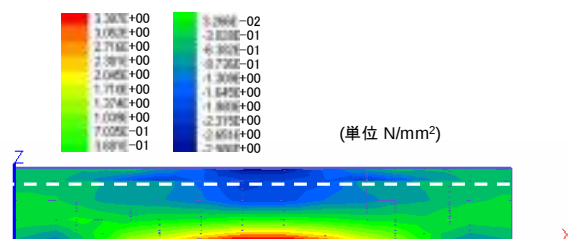
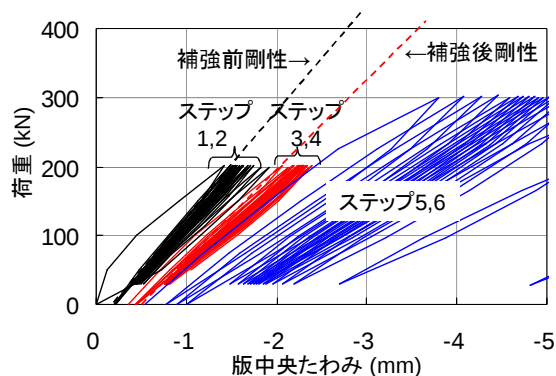


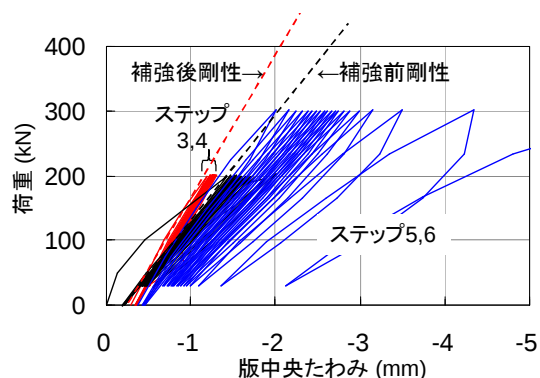
図-13 たわみ 5mm 時の支間方向応力分布

表-4 付着強度と増厚効果の検討ケース

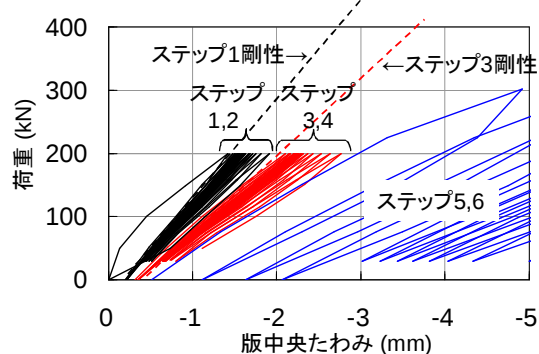
ケース名	初期付着	摩擦係数
ケース 1:基準	1.05(N), 2.75(S)	0.6
ケース 2:低減	0, 0	0.6
ケース 3:剛結	∞ (剛結)	∞ (剛結)
ケース 4:無補強	---	---



(a) ケース 2:低減



(b) ケース 3:剛結



(c) ケース 4:無補強

4.3 付着強度と破壊形態の検討

版中央たわみが 5mm に達したときの、断面における主ひずみ分布を図-15 に示す。コンタースケールは全て(a)と同じである。破線は新旧コンクリートの境界面を示す。基準ケース 1 では、境界面より上の増厚コンクリートにひずみが集中し、境界面に沿って高ひずみ領域が水平に展開している。

一方、付着を除いたケース 2 では、境界面に沿った水平方向の高ひずみ領域が現れ、その周辺で一様な損傷がみられる。付着強度が小さいため新旧コンクリートが別々に挙動するため、押拔せん断破壊は明確には見えない。

増厚部と本体部のコンクリートが一体化したケース 3 では、境界面を超えて連続的な高ひずみ領域が発生している。上述の 2 つのケース比べ、押拔せん断破壊に至る損傷領域が明確に確認できる。増厚を行わないケース 4 でも、押拔せん断破壊に至る損傷領域が確認された。

5. 結論

本研究は、繰返し荷重によって既に損傷を受けた RC 床版に上面増厚増厚を行う場合の増厚効果を、実験と数値解析の両面から検討した。以下に、本研究で得た知見を列挙する。

- 1) 既設 RC 床版上面をチップングした後に普通コンクリートを打設した簡易な増厚増厚を行ったが、疲労荷重に対する損傷を抑制する効果が確認された。
- 2) 増厚部を仮要素でモデル化するとともに、新旧コンクリート境界面に接合要素モデルを用いて、増厚増厚前後の疲労解析を連続して実施することができた。数値解析結果は実験を概ね良好に再現することができた。
- 3) 境界面付着強度が増厚の増厚効果に大きな影響を及ぼすことを、付着強度をパラメータとした解析を実施して、定量的に示した。
- 4) 境界面付着強度が増厚後の床版破壊形態に影響を及ぼす可能性を、解析を用いて示唆した。

謝辞

本研究は、平成 19 年度科学研究費補助金（基盤研究 A・課題番号 80157122）および平成 20 年度科学研究費補助金（特別研究員奨励費・課題番号 20-56191）の助成を受けた。増厚部の施工には羽田コンクリート工業株式会社河合氏にご尽力いただいた。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 株式会社高速道路総合技術研究所・社団法人日本建設機械化協会：増厚床版のはく離対策効果検証実験報告書，2009.12

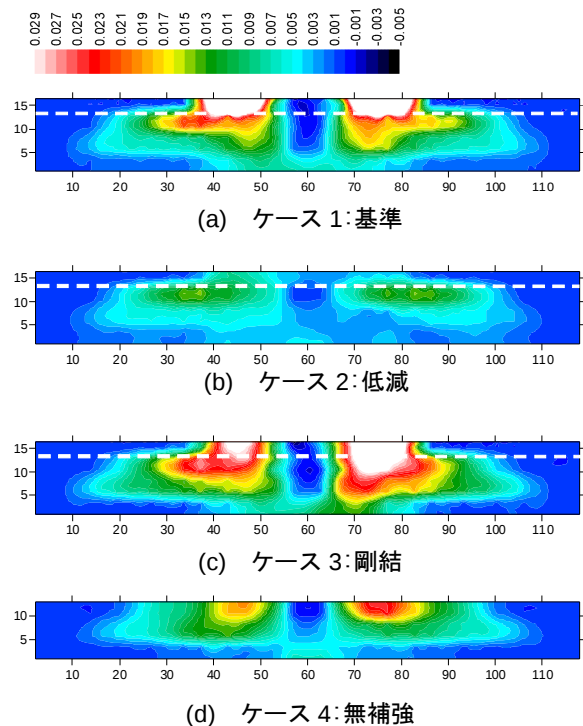


図-15 たわみ 5mm 時の版中央断面主ひずみ分布

- 2) Maekawa, K., Fukuura, N. and Soltani, M. : Path-Dependent High Cycle Fatigue Modeling of Joint Interfaces in Structural Concrete, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.6, No.1, pp.227-242, Feb. 2008
- 3) Maekawa, K., Gebreyouhannes, E., Mishima, T. and An, X. : Three-Dimensional Fatigue Simulation of RC Slabs under Traveling Wheel-Type Loads, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.4, No.3, pp.445-457, Oct. 2006
- 4) Maekawa, K., Pimanmas, A. and Okamura, H. : Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete, Spon Press, 2003
- 5) 土木学会，2007 年制定コンクリート標準示方書 [設計編]，土木学会，2008
- 6) 尾上幸造，松下博通：液体浸漬によるコンクリートの圧縮疲労強度低下に関するエネルギー的考察，土木学会論文集 E, Vol.66, No.2, pp.166-178, 2010.4
- 7) 中島章典，猪股勇希，斉川幾美，大江浩一：付着，機械的作用を有する鋼・コンクリート接触面の静的・疲労性状に関する実験的検討，土木学会論文集 A, Vol.63, No.4, pp.758-767, 2007.11
- 8) Rabbat, B., G. and Russell, H., G. : Friction coefficient of steel on concrete or grout, Journal of Structural Engineering, Vol.111, No.3, pp.505-514, Mar. 1985