

施工及び環境条件を考慮した断面修復部の数値解析モデルとそれによる

剥落可能性の検討

玉井宏樹¹, 古賀智史²

¹九州大学大学院 工学研究院 社会基盤部門 助教

²九州大学大学院 工学府 建設システム工学専攻 修士課程学生

概要：断面修復工法は施工条件や環境条件により、補修部の剥離や再劣化を生じさせる場合があり、構造物の強度低下や早期剥落による第三者被害が懸念される。それらの原因は多岐に渡るが、力学的観点でみると、断面修復材と既設部コンクリートの相対湿度や付着性状の問題に帰着する。本研究では、相対湿度と付着性能を考慮した断面修復部の数値解析モデルを有限要素法により構築し、動的加振下の断面修復部の剥落可能性に及ぼす影響について検討する。

1. はじめに

逼迫した財政状況下で社会基盤施設に対して適切に補修や補強といった措置を施さなければならぬ中、補修の不具合や再劣化は重要視すべき問題である。特に、コンクリート構造物の代表的な補修工法である断面修復工法は劣化・損傷部を除去し、新たに健全な補修材料（PCM など）に交換することで容易に耐久性を向上させる方法である反面、施工条件や環境条件によっては写真-1 に示すように補修部の剥離といった不具合や補修材の収縮ひび割れに伴う再劣化¹⁾が早期に確認される場合があり、構造物の強度低下や早期剥落による第三者被害が懸念されている。それらの要因は、はつりや修復部表面など事前処理の精度、断面修復材の配合、施工時における既設部の含水状態、また、施工時の交通振動など多岐に渡るが、力学的観点では、断面修復材と母材の既設部コンクリートの相対湿度や付着性状の問題として捉えることができる。よって、様々な施工条件や環境条件によって施工された断面修復部が硬化後にどのような状態になり、その後の交通振動などの動的加振下において剥落するか否かの可能性を事前に明らかにすることは、断面修復材の材料選定・設計・施工の留意点を力学的観点により整理し直すためには重要である。断面修復部を想定した乾燥収縮ひび割れに関する既往の研究^{2)~5)}があるが、ひび割れ発生後の断面修復部の剥落可能性に言及したものはない。

そこで、本研究では、施工条件として事前処理の精度（既設部表面の凹凸による付着性能）、環境条件として相対湿度が付着性能に与える影響を検討すると同時に、3次元 FEM による湿度

移動・応力解析を実施することでそれらが応力状態や収縮ひび割れに及ぼす影響を定量的に把握し、さらに、動的加振下の過渡応答解析により断面修復部の表面加速度応答から剥落危険性について検討する。

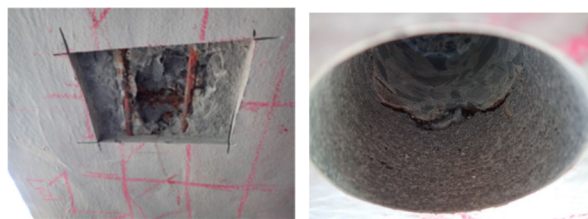


写真-1 断面修復工（左官工法）の付着不足¹⁾

2. FEM による湿度移動・応力解析の概要

本研究では、断面修復部の状態及び、その後の剥落可能性を数値解析で解くため、図-1 に示すように、まず湿度移動解析による相対湿度を求め、その後、相対湿度に伴いひび割れの発生、さらにはひび割れの発生を解き、ひび割れが生じた状態下で動的加振による過渡応答解析を実施することとした。なお、空間の離散化手法としては有限要素法（FEM）を用い、過渡応答解析に関する時間の離散化手法としては陰解法による直接積分法を採用した。



図-1 解析の流れ

2.1 乾燥収縮に関する理論的背景

本研究では、コンクリート中の湿度移動に関する支配方程式は、Bazant ら⁶⁾によって示されている式を用いる。その理論的背景について以下に記す。まず、セメントペーストまたはコンクリートの固有の含水率 w は、フィックの法則を用いて、式(1)のように表される。

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \text{div}(C \text{ grad } w) \quad (1)$$

ここで、 t : 時間、 C : 拡散係数 (w の関数) である。式(1)は、既設コンクリートや相対湿度 H が小さい場合といった水和による材料特性の変化が無視できる場合にのみ適用される。このとき、水和の程度はコンクリート全体で均一かつ温度 T は一定としている。

コンクリートの乾燥は、等温および一定の水和度において、 $dh = k \, dw$ であるため、相対湿度 H で表すことができる。 $\partial w / \partial t = k^{-1} \partial H / \partial t$ と $\text{grad } w = k^{-1} \text{grad } H$ より、式(1)は式(2)のように表せる。

$$\frac{\partial w}{\partial t} = k \text{ div}(c \text{ grad } w) \quad (2)$$

ここで、 $c = C/k$: 透水性を表し、 H の単位勾配による質量流束に等しいことが示される。高密度セメントペーストおよびコンクリートの場合、 k は $H = 0.95$ から $H = 0.2$ に至るまでほぼ一定であることから、式(3)のように単純化できる。

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \text{div}(C \text{ grad } H) \quad (3)$$

ここで、 C は w ではなく、 H の関数であるとみなす。等温条件下では、 $C = D(H)$ とすると、式(4)のように表せる。

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \text{div}[D(H) \text{ grad}(H)] \quad (4)$$

ここで H は相対湿度、 $D(H)$ は相対湿度に依存する水分拡散係数を表す。また、水分拡散係数は指数関数を用いて式(5)のように表される。

$$D(H) = a \cdot \exp(b \cdot H) \quad (5)$$

ここで a および b は、実験によって求められた部材の相対湿度 H と水分拡散係数 $D(H)$ に関す

るグラフから、逆解析によって求められる値である。さらに、相対湿度変化に伴う乾燥収縮ひずみの変化量は以下の式(6)で表現される。

$$\Delta \varepsilon_{sh} = \alpha_{sh}(H) \Delta H \quad (6)$$

ここで、 ε_{sh} は乾燥収縮ひずみ、 ΔH は相対湿度勾配、 $\alpha_{sh}(H)$ は乾燥収縮ひずみに関するハイグラル係数を表す。部材と周囲環境との境界面において、以下の式(7)で表される対流境界条件が与えられる。

$$q_s = C_F(H_s - H_a) \quad (7)$$

q_s は、部材表面における水分流速を表す。また、 H_s 、 H_a はそれぞれ対流境界および周囲環境の相対湿度であり、 C_F は水分伝達係数を表す。

以上を踏まえ、本研究では FEM により支配方程式を離散化して解くこととした。

2.2 ひび割れのモデル化

ここでは、乾燥収縮によるひび割れの評価について述べる。コンクリートおよび断面修復材である PCM は同様の構成則とした。構成則としては非線形 Drucker-Prager 則に従うものとし、圧縮破壊は考慮していないが、引張強度に達した以降は線形軟化することとした。ひび割れのモデルとしては、分散ひび割れモデル (固定ひび割れモデル) を採用し、図-2 に示すように引張強度に達したら、最大主応力面に直交方向にひび割れが生じ、せん断剛性が 12.5% にまで低減するものとした。また、ひび割れ (不連続面) を視覚的に明確にするため、各要素における積分点の最大主ひずみの平均値が閾値である引張終局ひずみ (ε_c) に達した場合、要素を無効化し応力を解放する手法を採用した。引張終局ひずみ (ε_c) は材料毎に引張強度と軟化勾配によって計算される。

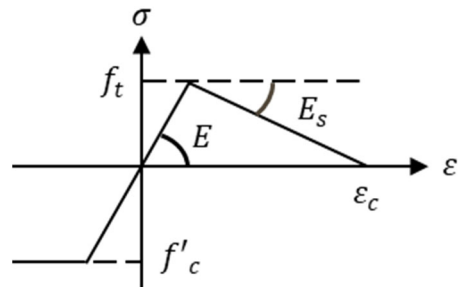


図-2 コンクリートおよび PCM の構成則 (単軸換算)

ここで、 E : 静弾性係数、 E_s : 軟化係数、 f_t : 引張強度、 f'_c : 圧縮強度を表す。

2.3 妥当性確認

(1) 解析概要

湿度移動解析を行うにあたり、その妥当性を確認するために Bolander ら²⁾が行った2次元モデルの解析結果と本研究で用いる3次元モデルでの解析結果を比較した。モデル寸法、材料定数などは同様の条件とし、3次元化するにあたりモデルの厚みは150mmとした。

(2) 解析モデルおよび解析ケース

図-3に対象としたコンクリートブロックの解析モデルを表-1に解析ケースを示す。本研究では、汎用有限要素法解析ソフト MSC.Marc を用い、3次元有限要素法によるモデル化を行った。要素はすべて8節点六面体要素とし、要素数は27,000、節点数は30,192である。また、幾何学的対称性を考慮した2分の1モデルとした。モデル寸法は、鉛直方向240mm(モルタル40mm、付着界面5mm、既設コンクリート195mm)、水平方向500mm、奥行き方向150mmとした。

部材底面における節点は全て鉛直方向に拘束し、部材底面の右端の節点は全て奥行き方向に拘束した。表面流束 q_s を断面修復部上面のみに鉛直上向きに作用させた。水分伝達係数は、参照する既往の研究と同様に $C_F = 0.7 \text{ mm/day}$ とした。

初期条件として部材の節点に以下に示す2ケースの初期相対湿度を与えた。①既設コンクリート部が乾いていることを想定し、モデル底面から鉛直上向きに180mmの既設コンクリート部の初期相対湿度を50%、それ以外の初期相対湿度を100%とする。②既設コンクリート部が濡れていることを想定し、モデル底面から鉛直上向きに180mmの既設コンクリート部の初期相対湿度を90%、それ以外の初期相対湿度を100%とする。

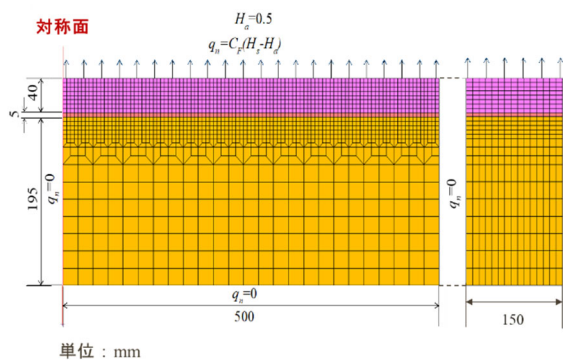


図-3 解析モデル図

解析ケースは、付着界面の強度、コンクリートの初期相対湿度を変えた4ケースとした。

表-1 解析ケース

| 解析ケース | 付着強度 | コンクリート初期相対湿度 |
|-----------|--------|--------------|
| weak-50 | weak | 50(%) |
| weak-90 | weak | 90(%) |
| strong-50 | strong | 50(%) |
| strong-90 | strong | 90(%) |

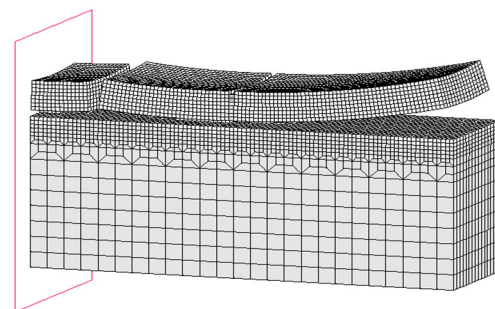
材料特性を表-2に示す。付着界面は、引張強度、圧縮強度がstrongの1/4ものをweakとしている。

表-2 材料特性

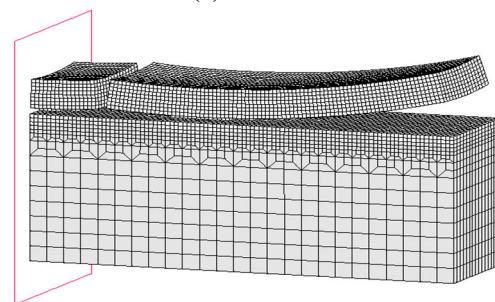
| 材料 | 弾性係数 (MPa) | f_t (MPa) | f'_c (MPa) |
|---------------|------------|-------------|--------------|
| モルタル | 26,000 | 4.5 | 45 |
| 付着界面 (weak) | 28,000 | 1.0 | 10 |
| 付着界面 (strong) | 28,000 | 4.0 | 40 |
| コンクリート | 33,000 | 4.0 | 40 |

(3) 解析結果および考察

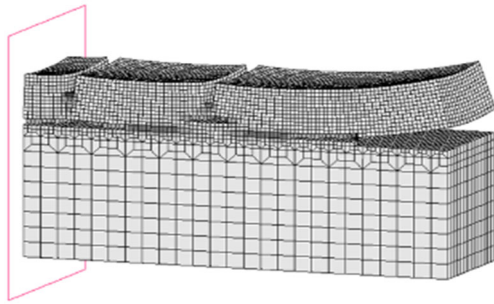
図-4に湿度移動を110日経過した後の変形状態図(変形倍率:50倍)、図-5に既往の研究と本研究との変形図の比較(strong-90のケース)を示す。



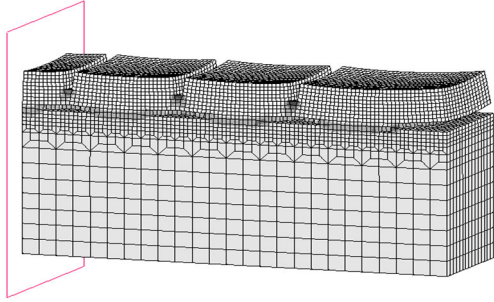
(a) weak-50



(b) weak-90

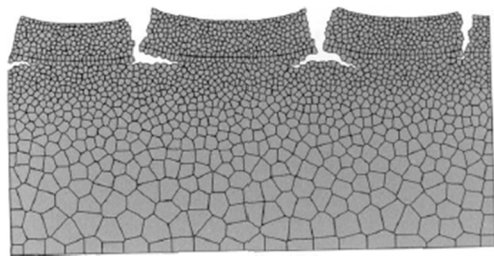


(c) strong-50

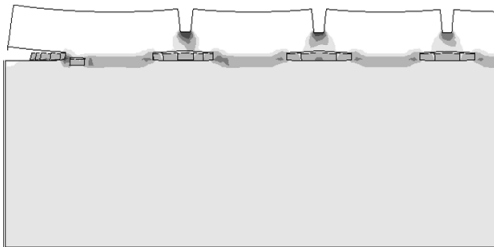


(d) strong-90

図-4 変形状図



(a)既往の研究結果²⁾



(b)本研究の結果

図-5 変形状図の比較 (strong-90)

まず、図-4より、コンクリートの初期相対湿度が小さいと付着界面でのひび割れが卓越し、初期相対湿度が大きいとモルタルでのひび割れが卓越することが明らかとなった。図-5に示す変形状の比較からもモルタル部は垂直方向のひび割れが卓越し、付着界面は水平方向にひび割れが分布しているといった特徴が一致していることが確認できる。詳細なひび割れの分布が異なるのは、解析手法の違い（既往研究：剛体ばねモデル、本研究：有限要素法）と要素サイズの違いの影響だと考えられるが、基本的に本研究の手法・モデル化においても乾燥収縮におけ

るひび割れの傾向を再現可能であるといえる。

次に、図-6に既往の研究と比較した部材深さ方向の相対湿度分布(weak-90のケース)を示す。時間が経過するに従い、黄色のラインで示した付着界面より上部のモルタル部で相対湿度が顕著に小さくなっていることが分かる。また、相対湿度分布は既往の研究と本研究で顕著な違いは見られず、本研究の手法・モデル化においても湿度移動の時間経過を精度よく再現できているといえる。

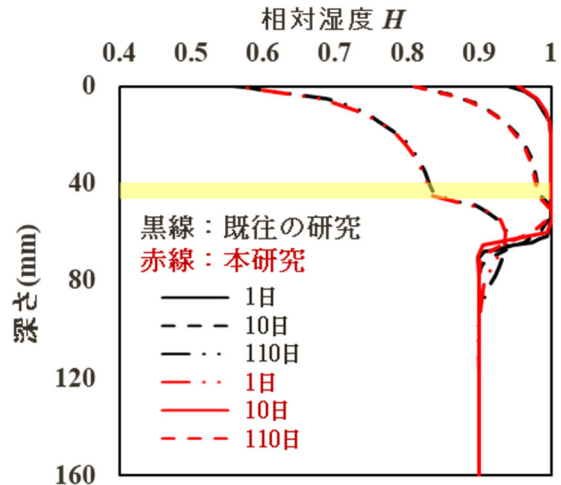


図-6 相対湿度分布

以上のように、変形状図（ひび割れ分布）と相対湿度分布において本研究でも既往の研究と同様の結果が得られ、解析手法の妥当性について確認できた。

3. 動的加振下の断面修復部の過渡応答解析

3.1 解析概要

部材下端の一部に断面修復が施されたコンクリート梁を対象とし、動的加振下の剥落可能性に断面修復部の状況が如何に影響するかについて基礎的な検討を行った。具体的には、相対湿度、付着界面の強度、エッジ部の施工状態に着目し、それらの影響を検討した。解析仮定としては、56日間の湿度移動を想定した。本来なら、この期間はパラメータになり得るが、それは今後の課題である。

3.2 解析対象およびモデル

図-7に解析モデルを示す。解析モデルは、コンクリート梁中央部に断面修復部を有しており、幾何学的対称性から2分の1モデルとした。材料定数は、妥当性確認で用いた値と同じとした。平面図において、部材底面の右端から20mmの位置の節点を全て水平方向、奥行き方向に拘束し、表面流束 q_s を断面修復部下面のみ

に鉛直下向きに作用させた。水分伝達係数は $C_F = 0.7 \text{ mm/day}$ とし、初期相対湿度は周囲を 50%，モルタルと付着界面を 100% とした。

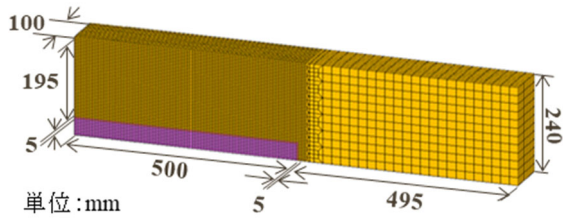


図-7 解析モデル図

エッジ部の施工状態として、コンクリートと断面修復部が十分に接着されていない接着不良状態を想定して、図-8 に示すように一部の付着面要素をモデル化しないものも作成した。過渡応答解析では、湿度移動によってひび割れが分布しているモデルに対し、図-9 で示すようなパルス荷重を載荷した。

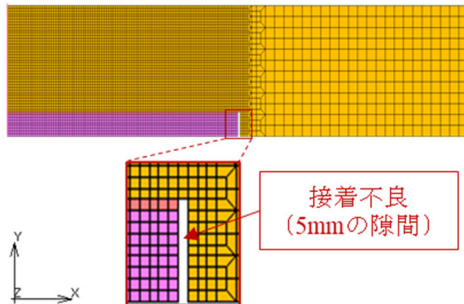
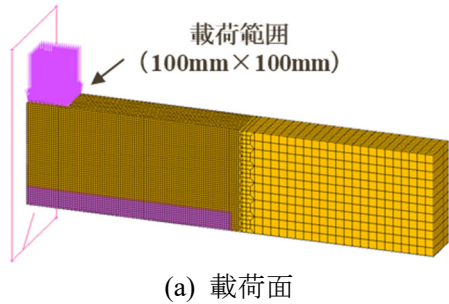
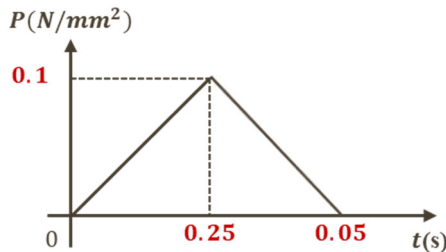


図-8 接着不良詳細図



(a) 載荷面



(b) 荷重-時間関係

図-9 荷重条件

3.3 解析ケース

解析ケースを表-3 に示す。相対湿度，付着界面の強度，エッジ部の施工状態を組み合わせた全 6 ケースとした。

表-3 解析ケース

| 解析ケース | 付着強度 | コンクリート初期相対湿度 | 状態 |
|-------|--------|--------------|------|
| w50 | weak | 50(%) | 健全 |
| w90 | weak | 90(%) | 健全 |
| w50-e | weak | 50(%) | 接着不良 |
| s50 | strong | 50(%) | 健全 |
| s90 | strong | 90(%) | 健全 |
| s50-e | strong | 50(%) | 接着不良 |

3.4 結果および考察

(1) 乾燥収縮によるひび割れ

湿度移動後での断面修復部近傍のひび割れ分布を図-10 に示す。変形倍率は 50 倍としている。付着強度が weak の場合と strong の場合を比較すると、weak の場合は付着界面とモルタルの両方にひび割れが顕著に表れているのに対し、strong の場合はモルタルでのひび割れのみが顕著であることが明らかとなった。また、モルタルのひび割れも strong の場合は weak の場合より小さい範囲であることが明らかとなった。コンクリート部の初期相対湿度で比較すると、weak, strong いずれの場合においても初期相対湿度が小さい方がひび割れの分布が大きいことが明らかとなった。また、weak, strong いずれの場合でも接着不良によって付着界面のひび割れが大きくなることが明らかとなった。

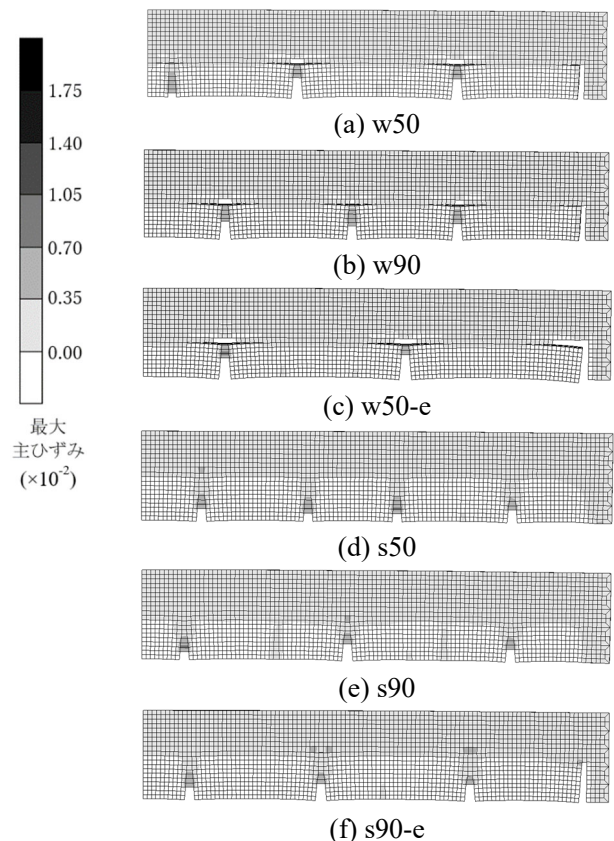
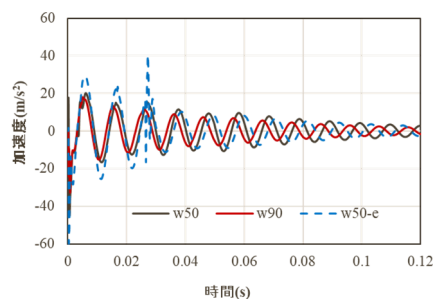


図-10 ひび割れ分布 (最大主ひずみ)

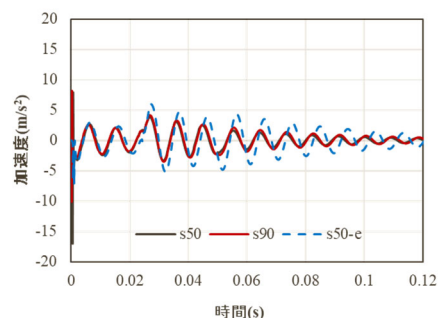
(2) 加速度応答

断面修復部底面部の中心の節点における部材鉛直方向の加速度応答の結果を図-11に示す。

既設コンクリート部の初期相対湿度によらず、付着性能の弱いほうが付着性能の強い場合より加速度の振幅が大きく剥落危険性が高いことが明らかとなった。既設コンクリートとモルタルの間に接着不良がある場合は、付着性能の弱いほうが付着性能の高い場合より加速度の振幅が大きく剥落危険性が高いことが明らかとなった。また、付着性能が弱い場合は、既設コンクリート部の初期相対湿度が小さいと加速度の振幅が大きく、剥落の危険性が高いことが明らかとなった。付着性能が高い場合は、既設コンクリートとモルタルの間に接着不良があると加速度の振幅が大きく、剥落の危険性が高くなることが明らかとなった。s50とs90の加速度の波形がほとんど同じであることから、剥落の危険性に関しては初期相対湿度より接着不良による影響が大きいといえる。



(a) 加速度応答 (weak の場合)



(b) 加速度応答 (strong の場合)

図-11 加速度応答

4. まとめ

本研究では、断面修復部を有するコンクリート部材を想定したモデルを対象として、有限要素法による3次元のモデル化を行い、既設コンクリートの初期相対湿度と断面修復材の付着性能が、ひび割れ分布や剥落危険性に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。以下に、本研究で得られた成果を示す。

- (1)有限要素法による湿度移動・応力解析手法によって、付着性能が弱い場合は付着界面から剥離が進み、付着界面が強い場合には断面修復材自体からひび割れが生じるといった、乾燥収縮によるひび割れ性状を再現できた。
- (2)既設部の初期相対湿度の違いから、初期相対湿度が低い場合にひび割れの分布が大きくなることが明らかとなった。
- (3)過渡応答解析による加速度応答から、付着性能が弱い場合は既設部の初期相対湿度が低く、付着性能が強い場合はエッジに接着不良がある場合に振幅が大きくなり、早期剥落の危険性が高まることが明らかとなった。

本研究で得られた結果は限定的であるため、今後、本研究で妥当性が示された手法・モデル化を用いて更なる検討が必要となる。

5. 謝辞

本研究は、一般社団法人九州建設技術管理協

会による令和2年度「建設技術研究助成」による助成金交付により遂行したものである。ここに、謝意を表します。

6. 参考文献

- 1) 福岡市道路下水道局管理部道路維持課：福岡市道路橋補修教本一実践編一，pp.51-55，2007
- 2) John E. Bolander Jr., Stefano Berton, Simulation of shrinkage induced cracking in cement composite overlays, Cement & Concrete Composite 26, pp.861-871, 2004
- 3) Martinola G, Wittmann, F.H., Application of fracture mechanics to optimize repair mortar systems, Proc. Of FRAMCOS-3, AEDIFICATIO Publishers, pp.1481-1492, 1995
- 4) 籠橋忍, 秦泳, 小澤満津雄, 森本博昭, 温度との連成を考慮したコンクリートの湿気移動解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No2, pp.685-690, 2001
- 5) H.Sadouki, J.G.M. Van Mier, Simulation of hygral crack growth in concrete repair systems, Materials and Structures/Materiaux et Constructions, Vol. 30, pp.518-526, 1997
- 6) Bazant,Z.P., Najjar,L.J., Drying of concrete as a nonlinear diffusion problem, Cement and Concrete Reserch, Vol.1, pp.461-473, 1971