

下面増厚補強した RC 床版の押抜きせん断挙動に関する 3次元非線形有限要素解析

3D Nonlinear FEM Analysis on Punching Shear Behavior of RC Slabs Strengthened by Bottom Thickness Increasing Method

東山浩士*・小田憲司**

Hiroshi HIGASHIYAMA and Kenji ODA

*博(工) 近畿大学講師 理工学部社会環境工学科(〒577-8502 東大阪市小若江3-4-1)

**近畿大学大学院 総合理工学研究科環境系工学専攻(〒577-8502 東大阪市小若江3-4-1)

Bottom thickness increasing method using a polymer cement mortar with additional reinforcements is one of the strengthening methods for deteriorated reinforced concrete (RC) slabs. The strengthening effect significantly depends on the post fatigue life of the slab. In this study, the punching shear behavior of reinforced concrete slabs strengthened by the bottom thickness increasing method was analyzed by using 3D finite element program to compare the experimental results with the analytical results. Analytical results of the punching shear behavior agree well with the experimental results. Although the experimental results of load-carrying capacities had some dispersion, which might be considered due to a defect of bonding condition, those could be estimated with a certain error by the analysis. Furthermore, parameter analysis with regard to material properties of the polymer cement mortar was conducted to know a trend of the strengthening effect.

Key words: bottom thickness increasing method, polymer cement mortar, RC slab, punching shear capacity, 3D FEM analysis

1. はじめに

輪荷重走行試験機による道路橋鉄筋コンクリート(以下、RCと呼ぶ)床版の疲労耐久性試験が多くの機関で行われるようになり、疲労寿命の評価・予測手法が提案されている¹⁾²⁾。このように疲労寿命の評価・予測手法に関する研究が行われている一方で、既設道路橋 RC 床版の維持管理面では、種々の補強工法(鋼板接着工法、縦桁増設工法、炭素繊維シート接着工法、下面増厚工法など)が実施され、これらの補強工法による既設道路橋 RC 床版の補強効果、疲労耐久性に関する研究が行われている。例えば、炭素繊維シート接着工法実施後の既設 RC 床版の損傷蓄積度に応じた疲労寿命の予測が試みられている³⁾。このような補強後の余寿命予測は既設道路橋 RC 床版を維持管理する上で今後ますます重要になると考えられる。

道路橋 RC 床版の疲労寿命は載荷荷重を押抜きせん断耐荷力、あるいははり状化した主鉄筋断面のせん断耐荷力で無次元化した S-N 曲線で表現されるのが一般的であることから、補強された既設道路橋 RC 床版の余寿命を評価するためには、補強後の劣化損傷がどの程度の速度で進行していくのか、あるいは最終的にどのような破壊モードとなるのかを評価するとともに、押抜きせん断耐荷力を把握しておく必要がある。

著者らによるこれまでの研究では、ポリマーセメントモルタル(以下、PCMと呼ぶ)により下面増厚補強した RC 床版の押抜きせん断耐荷力に関する実験⁴⁾⁵⁾から、図-1に示す補強鉄筋量(単位幅あたりの断面積)に比例して押抜きせん断耐荷力が増大するという結果が得られた。また、実験後の床版部と増厚

部との界面における剥離状態から、RC 床版が押抜かれると同時に、増厚部との界面には、補強鉄筋のダウエル作用による引張応力が作用し、剥離が生じると仮定した押抜きせん断耐荷力算定モデルを提案した。

本研究では、PCM と補強鉄筋により下面増厚補強した RC 床版の押抜きせん断挙動および押抜きせん断耐荷力について 3次元非線形有限要素解析による評価を試み、実験結果との比較によってその精度を検討した。さらに、下面増厚補強材料である PCM の材料特性をパラメータとした解析を行い、その補強効果に与える影響を調べることにした。

2. 押抜きせん断解析

2.1 解析対象床版

解析対象床版は図-2に示す RC 床版(母床版)を PCM とメッシュ状の補強鉄筋により下面増厚補強した試験体である。試験体の種類は表-1に示す 3 種類(各 2 体)とし、補強鉄筋量と PCM の厚さをパラメータとした。試験体は支間長 1000mm の 4 辺単純支持の状態で床版中央に 100×100mm の鋼板を介して載荷した。実験床版に用いたコンクリートと PCM の材料試験結果を表-2に示す。

2.2 解析モデル

本解析では、3次元非線形有限要素解析プログラム ATENA⁶⁾を用いた。解析対象床版は図-3に示すように要素分割(対称 1/4 モデル)し、床版厚さ方向に RC 床版は 5 層、PCM は 1 層

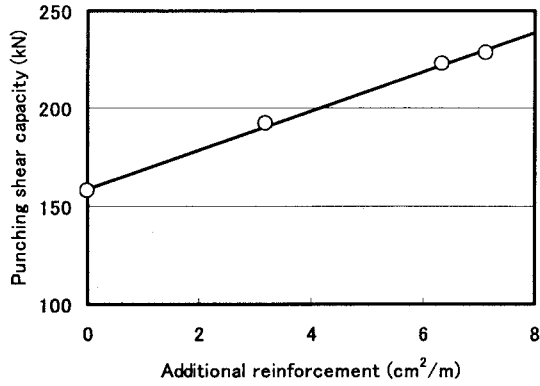


図-1 押抜きせん断耐力

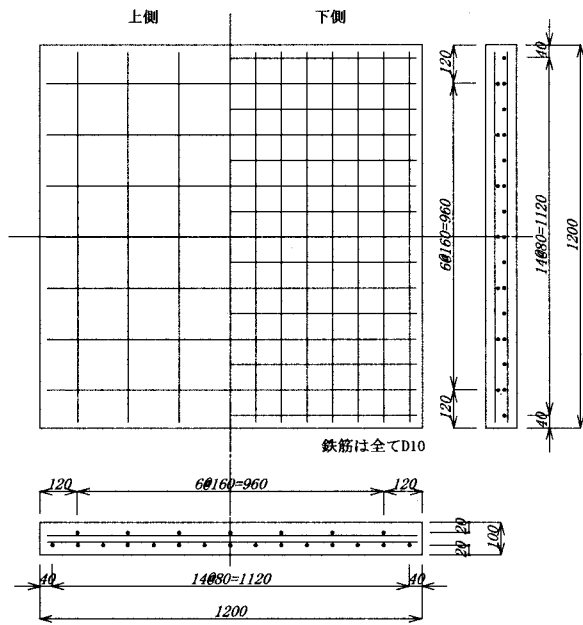


図-2 RC床版(母床版)

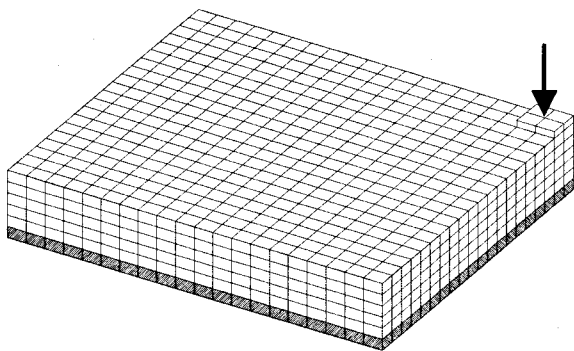


図-3 要素分割(1/4モデル)

に分割した。コンクリートおよびPCMには20節点アイソパラメトリック要素を使用した。ひび割れモデルとしては回転分散ひび割れモデルを採用した。これはひび割れ方向と主ひずみ軸方向を一致させるモデルであり、ひび割れ面での複雑なせん断伝達特性の評価を避けることができる。なお、コンクリートと

表-1 試験体

試験体	補強筋	メッシュ間隔	PCM厚さ
BT1	D6	50mm	20mm
BT2	D6	100mm	20mm
BT3	D10	100mm	28mm

表-2 (a) コンクリートの材料試験結果

コンクリート	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
	28.6	2.50	25.9

表-2 (b) PCMの材料試験結果

PCM	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
	16.2	1.70	22.5

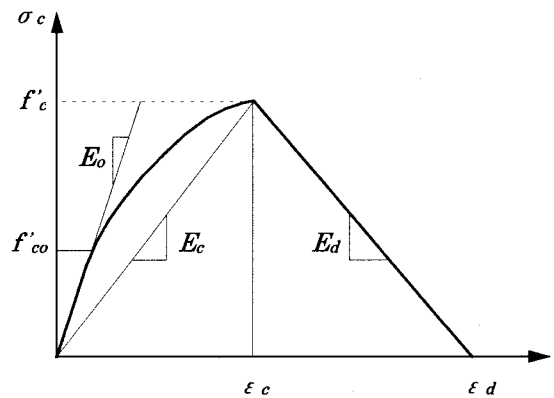


図-4 圧縮域における1軸応力-ひずみ関係

PCMとは完全付着と仮定した。鉄筋にはすべりが発生しない完全付着と仮定したトラス要素を用い、完全弾塑性モデルとした。コンクリートに関するモデル化は以下に述べる通りとした。

(1) 圧縮域のコンクリート

圧縮域での1軸応力-ひずみ関係は図-4に示すように、 f'_{co} (圧縮強度の2/3点)までは応力とひずみとが線形関係を有し、それ以降、最大応力までは次式 η のような非線形関係とした。また、最大応力以降は応力がゼロになるまで直線的に低下するモデルを用いた。

$$\sigma_c = f'_{co} + (f'_c - f'_{co}) \sqrt{1 - \left(\frac{\epsilon_p^{co} - \epsilon_p}{\epsilon_p^{co}} \right)^2} \quad (1)$$

$$\epsilon_p^{co} = \frac{f'_c}{E_c} \quad (2)$$

ここで、 ϵ_p : 塑性ひずみ

(2) 引張域のコンクリート

引張応力下でのコンクリートの挙動は引張強度までは直線的に増加し、引張軟化域については図-5および次式に示すモデ

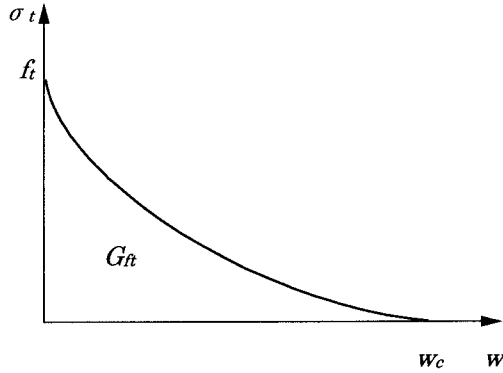


図-5 引張軟化曲線

表-3 最大荷重の比較

試験体	実験値(kN)	解析値(kN)	比
BT1	242.7	239.4	0.928
	201.7		
BT2	207.0	209.3	0.918
	177.1		
BT3	229.2	242.7	0.942
	228.2		

ル⁸⁾を用いた。

$$\frac{\sigma_t}{f_t} = \left\{ 1 + \left(c_1 \frac{w}{w_c} \right)^3 \right\} \exp \left(-c_2 \frac{w}{w_c} \right) - \frac{w}{w_c} (1 + c_1^3) \exp(-c_2) \quad (3)$$

$$w_c = 5.14 \frac{G_{ft}}{f_t} \quad (4)$$

ここで、 $c_1=3.0$ 、 $c_2=6.93$ 、 w ：ひび割れ開口幅、 w_c ：限界ひび割れ幅、 f_t ：コンクリートの引張強度、 G_{ft} ：引張破壊エネルギー
引張破壊エネルギーは次式⁹⁾に示す圧縮破壊エネルギーとの関係から求めた。

$$G_{ft} = G_{fc} / 250 \quad (5)$$

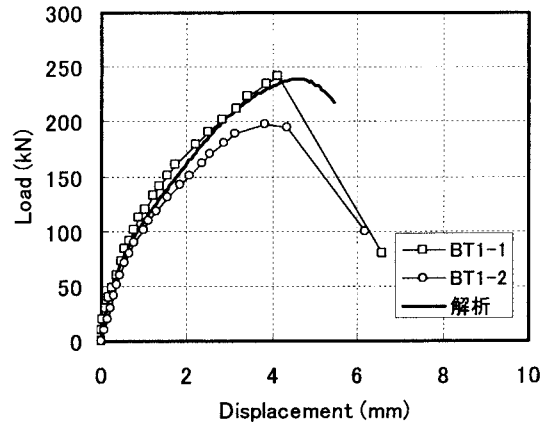
$$G_{fc} = 8.8 \sqrt{f'_c} \quad (6)$$

ここで、 G_{fc} ：圧縮破壊エネルギー、 f'_c ：コンクリートの圧縮強度

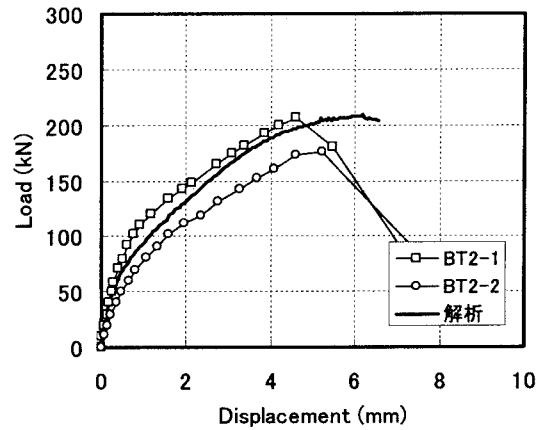
また、PCMの引張破壊エネルギーは別途試験により求めた値($G_{ft}=0.040\text{N/mm}$)を用いた。

(3) 破壊基準

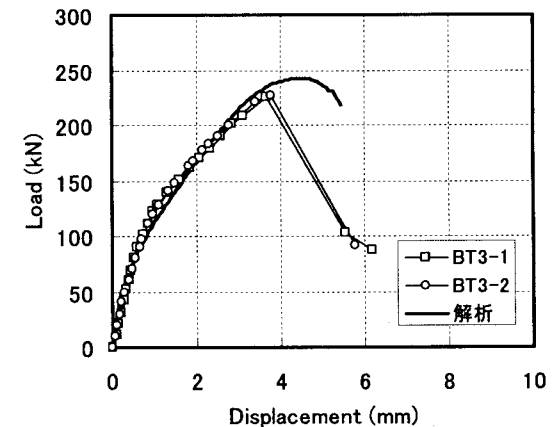
ATENAで使用可能なコンクリートの破壊基準として、ひずみを弾性ひずみ、塑性ひずみ、破壊ひずみに分け、破壊-塑性モデルでは、塑性ひずみ成分をMenetrey-Willamの塑性基準¹⁰⁾、破壊ひずみ成分をRankineの破壊基準¹¹⁾で評価している。詳細は文献6)を参照されたい。



(a) 試験体BT1シリーズ



(b) 試験体BT2シリーズ



(c) 試験体BT3シリーズ

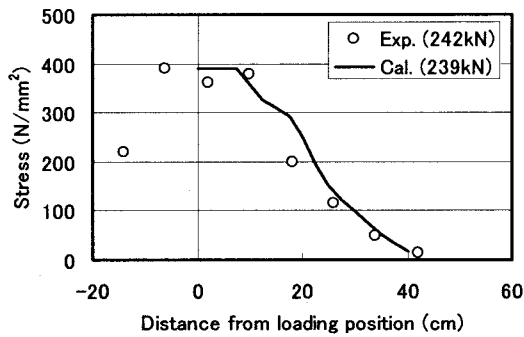
図-6 荷重-変位関係

載荷は載荷板(100×100mm)に強制変位(変位増分法)を与え、収束計算にはNewton-Raphson法を用いた。

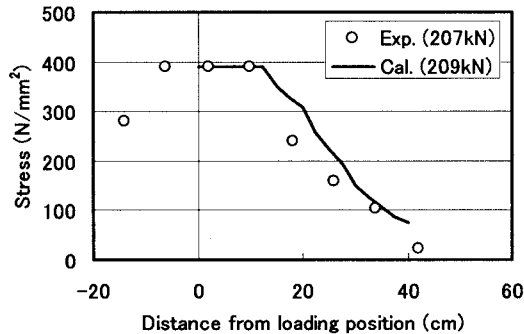
2.3 解析結果

(1) 荷重-変位関係

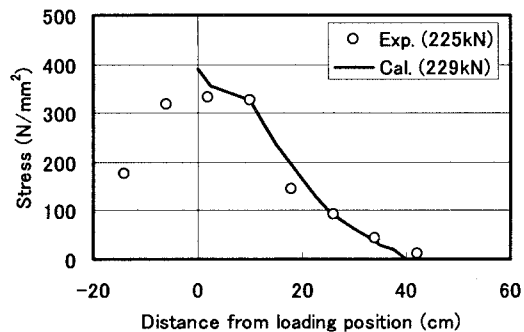
各試験体の荷重-変位関係について実験結果と解析結果との比較を図-6に示す。また、実験および解析における最大荷重



(a) 試験体 BT1-1

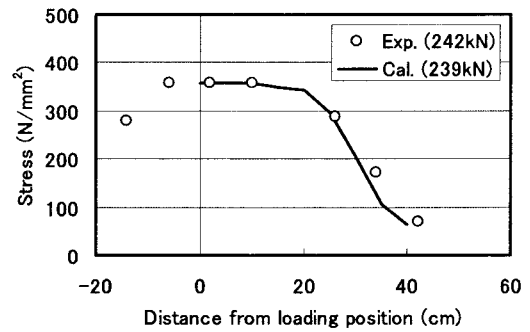


(b) 試験体 BT2-1

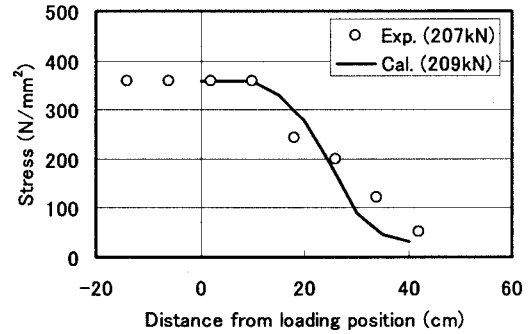


(c) 試験体 BT3-1

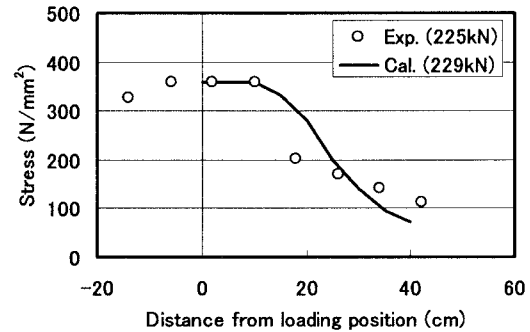
図-7 主鉄筋の応力分布



(a) 試験体 BT1-1



(b) 試験体 BT2-1



(c) 試験体 BT3-1

図-8 補強鉄筋の応力分布 (主鉄筋方向)

の比較を表-3に示す。

表-3より、試験体 BT1 シリーズおよび試験体 BT2 シリーズにおいては実験値にばらつきが生じているが、解析値は実験値の大きい方によく一致した値となっている。試験体 BT3 シリーズでは、実験値にばらつきはなく、実験値は解析値と比較すると6%程度小さい値であった。すべての実験値の平均値と解析値とを比較すると、解析値の方が7%程度大きな値となった。本解析では、コンクリートとPCMとを完全付着として解析していることから、最大荷重が小さかった方の試験体では、コンクリートやPCMに発生した曲げひび割れやせん断ひび割れの進展により、付着界面における局所的な剥離、補強鉄筋とPCMの付着性などの影響があったためと推察される。

図-6より、試験体 BT1 シリーズでは、100kN 付近から各試験体の挙動に差異が生じ始め、最大荷重は20%程度の差異が生じた。最大荷重が大きかった試験体 BT1-1 の変形挙動と解析結果を比較すると、よく一致している。

試験体 BT2 シリーズでは、荷重初期から各試験体の挙動に差異が生じ始め、最大荷重は17%程度の差異が生じた。解析結果は最大荷重が大きかった方の試験体 BT2-1 の変形挙動とはほぼ一致している。

試験体 BT3 シリーズでは、各試験体の変形挙動に差異はなく、解析結果はよく一致している。

全体として、コンクリートとPCMとの付着が良好であったと推察される試験体の変形挙動は本解析により追跡できた。最大荷重に関しては解析の方が大きくなる傾向を示していることから、さらなる実験値の蓄積、コンクリートとPCMとの付着特性を考慮した詳細な検討が今後必要になると考えられる。

(2) 鉄筋ひずみ

主鉄筋の応力分布および補強鉄筋の応力分布 (主鉄筋方向) について、最大荷重時付近における実験値と解析値との比較をそれぞれ図-7および図-8に示す。ただし、試験体 BT1 および試験体 BT2 については最大荷重にばらつきがあったため、最

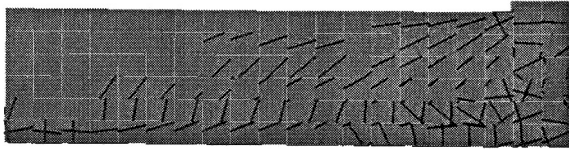


図-9 ひび割れ状態 (BT2-1)

大荷重が大きかった方の試験体を用いている。主鉄筋の降伏点は 391N/mm^2 、補強鉄筋の降伏点は 357N/mm^2 である。

主鉄筋の応力分布および補強鉄筋の応力分布とも実験値と解析値は概ね一致している。全ての試験体において、実験値および解析値ともに荷点付近の補強鉄筋は最大荷重に達するまでに降伏しており、また、試験体 BT1-1 および試験体 BT2-1 の主鉄筋も最大荷重に達するまでに降伏していた。試験体 BT3-1 については主鉄筋応力の実験値は降伏に至っていなかった。

(3) ひび割れ状態

図-9 に試験体 BT2-1 の最大荷重時におけるひび割れ状態の解析結果を示す。荷板板端からほぼ 45° の斜めひび割れが母床版に発生しており、床版中央付近のPCMには曲げひび割れが発生しているが、コンクリートとPCMとの界面近傍にはコンクリートのせん断変形に伴い発生したと思われる水平方向に近いひび割れがPCMに発生している。

3. パラメータ解析

3.1 パラメータ

下面増厚補強材料であるPCMが既設RC床版の補強効果にどのような影響を及ぼすのかを把握するために、PCMの引張強度、ヤング係数および増厚さをパラメータとした解析を行った。引張強度はPCMの圧縮強度に対して、 $f_c'/5 \sim f_c'/15$ の範囲、ヤング係数は $10 \sim 30\text{kN/mm}^2$ の範囲、増厚さ(t)は補強鉄筋径(D)に対して3~5倍の範囲とした。基本としたモデルは試験体BT1とし、補強鉄筋量は一定(鉄筋:D6, メッシュ間隔:50mm)とした。本解析においてもコンクリートとPCMとは完全付着を仮定した。

3.2 押抜きせん断耐荷力に与える補強効果

最大荷重比とPCMの引張強度との関係を図-10に示す。最大荷重比はPCMの引張強度が圧縮強度の1/10のときの結果を基準として表している。増厚さが補強鉄筋径の3倍の場合(図-10(a))、引張強度の違いによる補強効果がほとんど見られない。また、増厚さが補強鉄筋径の5倍の場合(図-10(b))、最大荷重比は引張強度が大きくなるに伴って大きくなる傾向を示しているが、その増加率は非常に小さい。また、ヤング係数が異なっても最大荷重比の違いは小さい。

次に、PCMの引張強度が圧縮強度の1/10の場合の最大荷重比とPCMの増厚さとの関係を図-11に示す。最大荷重比はPCMの増厚さが補強鉄筋径の4倍の場合の結果を基準として表している。増厚さが補強鉄筋径の3倍の場合に比べて、最大荷重比

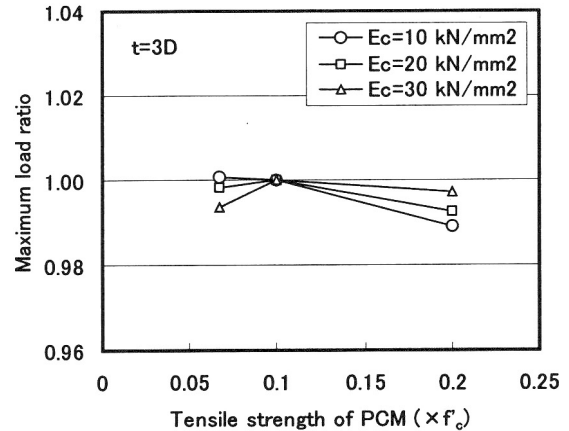


図-10(a) 最大荷重比とPCMの引張強度との関係

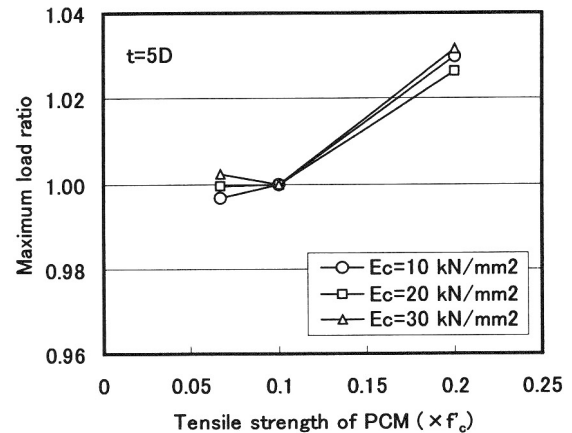


図-10(b) 最大荷重比とPCMの引張強度との関係

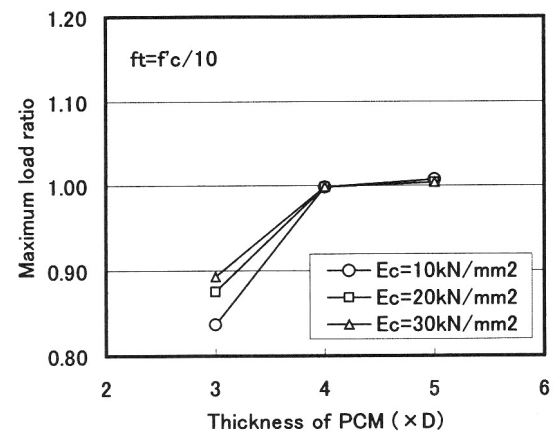


図-11 最大荷重比と増厚さとの関係

は補強鉄筋径の4倍とすることによって増大する傾向を示している。しかし、補強鉄筋径の4倍と5倍とでは最大荷重比の違いは非常に小さい。これらの傾向はPCMの引張強度が圧縮強度の1/5および1/15の場合においても同様であった。

文献 12)には、打ち継ぎ面剥離と補強鉄筋の降伏に着目した場合、最適な下面増厚構造は増厚さ、モルタルの弾性係数および補強鉄筋量の組合せであると述べられている。また、既設鉄筋応力を低下させるためには、ヤング係数の小さなモルタルに対しては増厚さの増加よりも補強鉄筋量の増加、ヤング係数の大きなモルタルに対しては増厚さの増加が補強効果をもたらすと述べられているが、押抜きせん断耐荷力に着目した本解析パラメータの範囲内では、ヤング係数および引張強度の補強効果に及ぼす影響は小さく、増厚さを補強鉄筋量の 4 倍程度とすることによって補強効果の増大が見られる結果となった。また、図 1-1 にも示したが、補強鉄筋量の増加は大きな補強効果をもたらすことが分かった。本解析では、コンクリートと PCM とは完全付着の状態を仮定して解析しているため、PCM の剥離による破壊状態を考慮していない。今後は、界面の付着特性を考慮した補強効果の確認が必要である。また、下面増厚補強を行うにあたって、その補強効果を検討するためには使用する材料特性、環境条件、経済性を考慮に入れる必要がある。

4. まとめ

本研究で行った 3 次元非線形有限要素解析による下面増厚補強した RC 床版の押抜きせん断挙動に関する結果をまとめると以下の通りである。

- (1) 本研究は、コンクリートと PCM とを完全付着と仮定した解析結果であるが、下面増厚補強した RC 床版の押抜きせん断挙動を最大荷重付近まで追跡できることが分かった。また、押抜きせん断耐荷力の実験値にはばらつきが生じていたが、それらの平均値と解析値とを比較すると、解析値の方が 7%程度大きな値を示した。
- (2) 最大荷重時付近における主鉄筋応力および補強鉄筋応力の分布を比較した結果、解析値は概ね実験値と一致することが分かった。載荷点付近の補強鉄筋は最大荷重に達するまでに降伏しており、主鉄筋についても試験体 BT3 を除く試験体は降伏していた。
- (3) 押抜きせん断耐荷力に着目したパラメータ解析結果の範囲から、補強材料である PCM のヤング係数および引張強度が及ぼす補強効果は小さく、増厚さが及ぼす補強効果は補強鉄筋径の 4 倍まで増大する傾向にあった。ただし、本解析では、コンクリートと PCM とは完全付着の状態を仮定して解析しているため、PCM の剥離による破壊状態を考慮していないモデルによる結果である。

参考文献

- 1) 松井繁之：橋梁の寿命予測 一道路橋 RC 床版疲労寿命予測一，安全工学，Vol.30，No.6，pp.432-440，1991.
- 2) 中谷・内田・西川・神田・宮崎・川間・松尾：道路橋床版の疲労耐久性に関する試験，国土技術政策総合研究所資料，No.28，2002.3.
- 3) 大西・本間・嶽下・佐藤・松本：床版の補修を考慮した寿命推定に関する検討，第 3 回道路橋床版シンポジウム講演論文集，pp.55-60，2003.6.
- 4) 東山・松井・伊藤・松本：ポリマーセメントモルタルにより下面増厚補強した RC 床版の押抜きせん断耐荷力，第 3 回道路橋床版シンポジウム講演論文集，pp.163-168，2003.6.
- 5) Higashiyama, H., Matsui, S., and Matsumoto, H.: Punching Shear Capacity of Reinforced Concrete Slabs Strengthened by Bottom Thickness Increasing Method, Fourth International Conference on CONCRETE UNDER SEVERE CONDITIONS, Seoul, pp.1745-1752, 2004.6.
- 6) Cervenka Consulting: ATENA Computer Program for Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures, Program Documentation, 2002.5.
- 7) van Mier, J. G. M.: Multiaxial Strain-softening of Concrete, Part I: fracture, Materials and Structures, RILEM, Vol.19, No.111, 1986.
- 8) Hordj, D. A.: Local Approach to Fatigue of Concrete, Doctoral Dissertation, Delft University of Technology, The Netherlands, 1991.
- 9) Nakamura, H. and Higai, T.: Compressive Fracture Energy and Fracture Zone Length of Concrete, Seminar on Post-peak Behavior of RC Structures Subjected to Seismic Load, pp.259-272, 1999.
- 10) Menetrey, p. and Willam, K. J.: Triaxial Failure Criteria for Concrete and its Generalization, ACI Structural Journal, 92(3), pp.311-318, 1995.
- 11) Chen, W. F. and Saleeb, A. F.: Constitutive Equations for Engineering Materials, John Wiley & Sons, 1982.
- 12) 横山・菅野・佐藤・Mohan：下面増厚した道路橋床版の増厚構造の最適解，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.1，pp.1111-1116，2001.7.