

部分的にコンクリートを充填した鋼管橋脚模型の耐荷性状 に関する数値解析的研究

Analytical Study on Load-Carrying Capacity of Partially Concrete-Filled Steel-Pipe Pier Models

小室 雅人*, 岸 徳光**, 張 広鋒***

Masato KOMURO, Norimitsu KISHI and Guangfeng ZHANG

*正会員 博(工) 室蘭工業大学助手 工学部建設システム工学科 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

**フェロー会員 工博 室蘭工業大学教授 工学部建設システム工学科 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

***学生員 修(工) 室蘭工業大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

To establish a numerical analysis method for appropriately evaluating load-carrying capacity of the partially concrete-filled steel-pipe pier models, four partially concrete-filled steel-pipe piers taking height of filled concrete as variable, were analyzed by means of three-dimensional elasto-plastic finite element method. Coulomb friction model was used in the analysis to take into account sliding effects between steel-pipe and filled concrete. An applicability of this analysis method for this type steel-pipe piers was discussed comparing with the experimental results in detail. From this study, it can be concluded that applying the proposed analysis method, load-carrying capacity of partially concrete-filled steel-pipe piers can be estimated rationally in spite of the height of filled concrete.

Key Words : steel-pipe, concrete-filled, nonlinear analysis, Coulomb friction model

1. はじめに

コンクリート充填鋼管柱(以後, CFT)は, 優れた変形性能と高い耐荷力を有することから, 耐震性能に優れた構造部材の1つとして注目されている。従来より, CFTの耐荷性状に関する研究は, 数多く実施されている^{1)~19)}。数値解析的な検討としては, 簡易に最大耐力を評価する手法として, ファイバーモデルを用いた解析手法が提案され, それらの解析結果が実験結果と概ね一致することが確認されている^{10)~15)}。しかしながら, これらの手法では簡便性を図るために, 1) 鋼管とコンクリートを完全付着と仮定していること, 2) 鋼材の局部座屈や拘束効果の影響を, 鋼材とコンクリート間の付着やすべりを考慮せずにそれぞれの応力-ひずみ関係で考慮していること, 3) 鋼管による局所的なコンクリートの拘束効果が必ずしも適切に評価されていないと判断されること等より, 汎用性の高い解析手法として確立されるまでには至っていない。

一方, CFTの最大耐荷力以降の軟化挙動を含めた耐荷性状を3次元有限要素法等によって精度よく解析するためには, 鋼管の局部座屈, 充填コンクリートの拘束効果やひび割れ分布および鋼材とコンクリート間の付着特性について適切に評価することが必要となる。特に, CFTの耐荷性状を支配する1つの要因と考えられる鋼材とコンクリートとの接着界面の付着特性に関しては未

だ不明な点が多い。

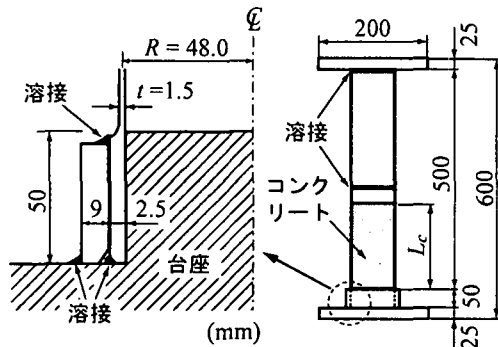
CFTにおける鋼材とコンクリート間の付着特性に関しては, Johansson と Gylltoft¹⁶⁾や Omar ら¹⁷⁾が付着強度と摩擦係数から構成される Coulomb Friction モデルを用いてその評価を試みている。しかしながら, これらの研究は, CFTの軸圧縮挙動あるいは純曲げ挙動に対して行われたものであり, 軸力と曲げが作用する場合については検討されていない。また, 松村と水野¹⁸⁾および藤井ら¹⁹⁾は, 軸力と曲げを受けるCFTを対象に3次元有限要素解析を試み, 変形挙動と内部コンクリートの損傷状況や鋼材によるコンクリートの拘束効果を明らかにしている。しかしながら, これらの研究でも, 鋼材とコンクリートとの接着界面における接触・剥離挙動は考慮されているものの, すべりに対する付着力の影響が考慮されていないため, 実挙動を正確に再現するまでには至っていない。特に, 我が国の鋼製橋脚で多く採用されているような部分的にコンクリートを充填する場合には, 完全に充填する場合に比較して, 耐荷性状に及ぼす鋼材とコンクリート間の付着特性の影響は大きいことが予想される。

このような観点より, 本研究では, 部分的にコンクリートを充填した円形断面鋼製橋脚の単調載荷時の耐荷性状を適切に評価可能な解析手法の確立を目的として, 小型円形鋼管橋脚模型に関する3次元弾塑性有限要素解析を試みた。本数値解析では, コンクリート充填高さ

表－1 試験体寸法および各パラメータの一覧

試験体名	載荷点高さ L (mm)	鋼管高さ L' (mm)	充填コンクリート		板厚 中心半径 R (mm)	板厚 t (mm)	細長比 パラメータ* ¹ $\bar{\lambda}$	径厚比 パラメータ* ² R_t
			充填高さ L_c (mm)	充填率 L_c/L'				
C-0	631.5	500	0	0.00	48.0	1.5	0.479	0.086
C-125			125	0.25				
C-285			285	0.57				
C-500			500	1.00				

$$*^1 \bar{\lambda} = \frac{2L}{\pi r} \sqrt{\frac{f_y}{E_s}}, \quad *^2 R_t = \frac{R f_y}{t E_s} \sqrt{3(1 - \nu_s^2)}$$

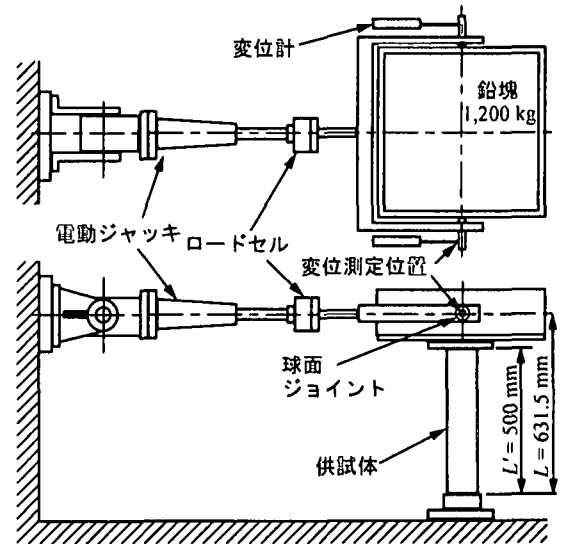


図－1 試験体の形状および寸法

の異なる4種類の試験体を対象に、耐荷性状に及ぼす鋼材とコンクリート間の付着特性の影響を詳細に検討するために、Coulomb Friction モデルを適用してその付着強度および摩擦係数を変化させて数値解析を実施した。また、得られた解析結果を別途実施した静的単調載荷実験結果⁴⁾と比較することにより、これらの最適値の同定を試みた。さらに、同定した各値を用いて得られた数値解析結果の充填コンクリートの軸ひずみ分布や鋼管の軸ひずみ－変位関係について実験結果と比較検討を行っている。なお、前述のように、本研究では鋼管とコンクリート間の付着特性の耐荷性状への影響に関する検討に主眼を置いていることより、コンクリートおよび鋼材の材料構成則は、既往の研究成果に基づくこととした。また、本数値解析には、構造解析用汎用プログラムである DIANA²⁰⁾を使用した。

2. 実験概要

本解析で対象とした試験体は、著者ら⁴⁾が過去に実施したコンクリート充填高さの異なる全4体の小型円形断面鋼製橋脚（以後、鋼管橋脚）模型である。図－1には試験体の形状寸法を示している。試験体の鋼管部は素材鋼管を所定の長さに切断後、旋盤加工により内外面を切削して製作している。なお、板厚および径の加工公差は±0.05 mmである。鋼管の基部は、剛体変形をできるだけ小さくするために、図－1に示すように凸状の台座に差し込み、さらに外側に板厚9 mmの鋼製リングを



図－2 実験装置の概要

表－2 鋼管の力学的特性値

降伏 応力 f_y (MPa)	引張 強さ f_u (MPa)	弾性 係数 E_s (GPa)	硬化 開始歪 ϵ_{st}	伸び (%)	ポアソン 比 ν_s
336	452	206	0.0285	44.0	0.3

表－3 コンクリートの力学的特性値

材令 (days)	圧縮強度 f'_c (MPa)	引張強度 f_t (MPa)	弾性係数 E_c (GPa)	ポアソン比 ν_c
93～94	19.2	1.51	16.7	0.21

はめ込んで溶接固定している。また、コンクリートは、試験体の上板の中央に開けられた穴から所定の長さまで中詰めした。コンクリートの充填高さ L_c は、鋼管高さ L' に対する比で $L_c/L' = 0.0, 0.25, 0.57, 1.0$ の4種類とした。ただし、 $L_c/L' = 0.0$ はコンクリートを充填しない場合である。表－1には、試験体名、試験体寸法および各パラメータを示している。なお、試験体名の第2項目の数字は、コンクリート充填高さ L_c (mm) を意味している。また、C-125 および C-285 試験体において、充填コンクリート上面にはダイヤフラムを設置していない。

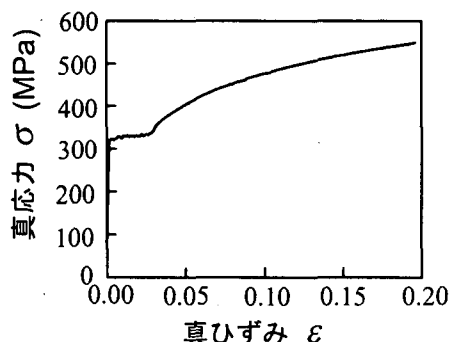


図-3 鋼材の真応力-真ひずみ関係

実験では、上部工重量を軸力入力によりモデル化することとし、軸力としての鉛直荷重と曲げ荷重としての水平荷重を同時に受ける鋼管橋脚を対象に、図-2に示すような実験装置を製作した。鉛直荷重は、質量 1,200 kg の鉛塊を上載することにより載荷している。また、水平荷重は、ストローク 200 mm の電動式ジャッキを用い、鉛塊の重心高さ線上の 2 箇所載荷している。実験における計測項目は、載荷点での水平変位と水平荷重および試験体各位置でのひずみである。

試験体の鋼管部には、全て厚さ 5.7 mm の圧力配管用炭素鋼鋼管 (JIS G 3454 STPG370 90A 熱間仕上継目無鋼管) を用いている。使用鋼管の機械的性質を調べるために、鋼管から JIS 6 号試験片を製作し引張試験を行った。一方、充填コンクリートに関しては、「道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編」²¹⁾ に則して低強度とすることとし、設計基準強度を $f'_{ck} = 17.7$ MPa に設定して配合設計を行った。表-2, 3 には、それぞれ実験時における鋼管およびコンクリートの力学的特性値を示している。また、図-3 には、鋼材の真応力-真ひずみ関係を示している。なお、コンクリートの引張強度 f_t は、後述する CEB-FIP Model Code²²⁾ に基づいて算出したものである。

3. 解析概要

3.1 解析モデルおよび解析方法

数値解析は、試験体から上下鋼板および基部溶接部を除いた部分を対象とし、対称性を考慮して試験体の 1/2 をモデル化して実施している。要素分割は、周方向に 16 分割とし、高さ方向には 5 mm ピッチに分割している。使用した要素は、鋼管部に対しては 4 節点曲面シェル要素、コンクリートおよび載荷治具に対しては 8 節点固体要素である。図-4 には、要素分割状況の一例として C-285 試験体の場合について示している。境界条件は、底部を完全固定とし、切断面においては連続性を満足するように設定している。なお、前述のように C-125 および C-285 試験体の充填コンクリート上面にはダイヤフラムが設置されていないことより、自由境

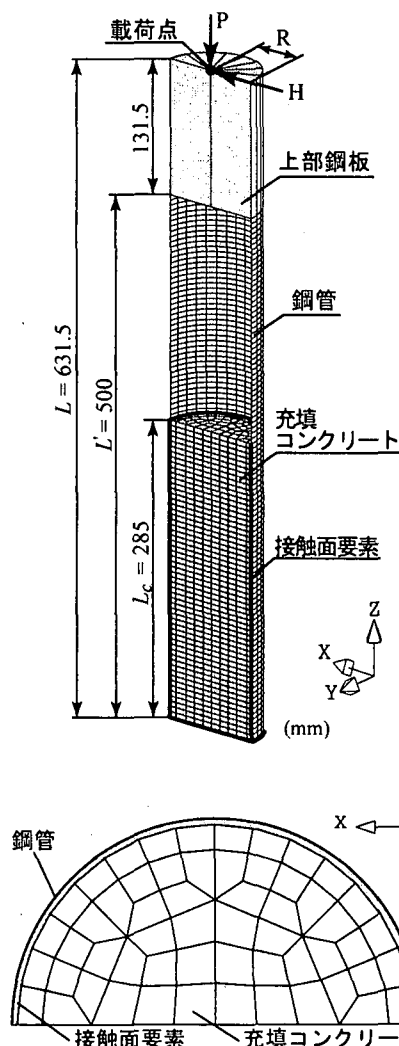


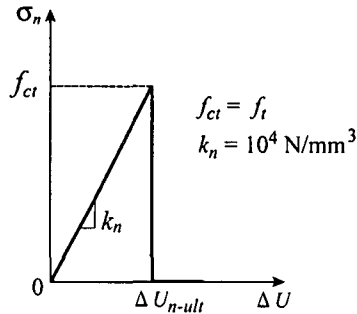
図-4 要素分割状況 (C-285 試験体)

界面となっている。

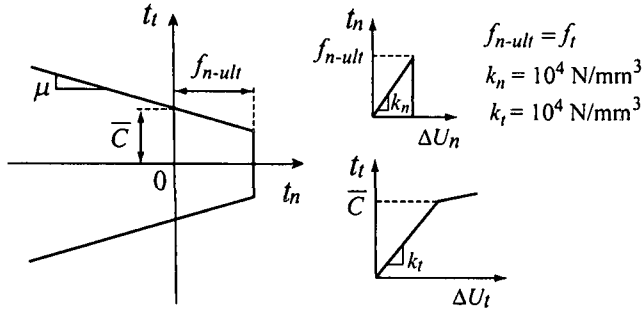
解析方法は、実験条件と同様に頂部に軸力として $P = 11.8$ kN の鉛直荷重を載荷した後、水平荷重を変位制御により作用させることとした。また、解析には初期不整および残留応力は考慮していない。これは、1) 図-3 に示すように、鋼材の真応力-真ひずみ曲線に明確な降伏棚があることより、塑性加工の影響による残留応力は小さいものと推察されること、2) 試験体製作時の加工公差を ± 0.05 mm としていることより、初期不整は小さいものと考えられること、3) 以下に示す解析結果と実験結果が比較的一致しており、これらの影響は小さいものと考えられること、等から総合的に判断している。なお、収束計算には一般的に広く用いられている Newton-Raphson 法を採用している。

3.2 接触面要素および応力-相対変位関係

はじめにも述べているように、軸力と曲げを受ける部分的にコンクリートを充填した鋼管橋脚の耐荷性状は、鋼管とコンクリート間の付着特性や鋼管の局部座屈に大きく影響されるものと考えられる。そのため、



(a) Discrete Cracking モデル



(b) Coulomb Friction モデル

図-5 接触面要素に適用したモデル

本数値解析では、図-4に示すように予め鋼管-コンクリート間に接触面要素を配置して鋼管とコンクリート間のすべりをモデル化することとした。また、コンクリート底面と基部鋼板間の分離現象も接触面要素を用いてモデル化している。なお、接触面要素は、相対する2面で構成され、二重節点を有する厚さ0の要素として定義される。不連続面の力学的挙動は接触面要素を構成する両面間の応力と各方向の相対変位との関係を用いて規定されている。本数値解析では、2種類の応力-相対変位関係を設定した。すなわち、1) 接線方向のずれを伴わずに接触面の法線方向のみに開口する Discrete Cracking モデル、2) 接触面要素の法線方向の開口および法線方向と接線方向応力の相互作用によってすべりが生ずる Coulomb Friction モデル、である。前者はコンクリート底面と基部鋼板間に、後者は鋼管とコンクリート間に配置した接触面要素に適用している。以下にこれら2つのモデルについて詳述する。

(1) Discrete Cracking モデル

図-5(a)には、Discrete Cracking モデルの引張応力-相対変位関係を示している。ここで、 ΔU は接触面の引張側法線方向の相対変位、 f_{ct} は限界引張応力、 k_n はその剛性である。このモデルは、引張応力 σ_n が限界引張応力値 f_{ct} に達すると伝達されている引張応力が解放され、ひび割れが完全に開口すると仮定するものである。また、この時の引張側法線方向の相対変位は ΔU_{n-ult} である。本論文では、限界引張応力値 f_{ct} がコンクリート

の引張強度 f_t と等価であるものと設定した。なお、 f_t は CEB-FIP Model Code²²⁾を参考にして、以下のように定義している。

$$f_t = 1.4 \cdot (f'_{ck}/10)^{2/3} \quad (1)$$

$$f'_{ck} = f'_c - \Delta f \quad (2)$$

ここで、 f'_{ck} : コンクリートの設計圧縮強度、 f'_c : コンクリートの圧縮強度、 $\Delta f = 8 \text{ MPa}$ である。剛性 k_n は、コンクリート底面の引張破壊のみならず圧縮部分の連続性を保つため、便宜的に $k_n = 10^4 \text{ N/mm}^3$ と仮定している。また、定義したクラック面における接線方向応力と対応する変位関係も、その剛性（本文ではこれをせん断剛性と呼ぶ） k_t を $k_t = k_n$ と仮定し、法線方向応力によってひび割れが開口するまで線形関係が保たれるものと仮定した。また、法線方向の引張応力 σ_n が限界引張応力 f_{ct} に達した後は、ひび割れ開口後の咬み合わせ効果等を無視してせん断剛性 k_t も消失するものと仮定している。

(2) Coulomb Friction モデル

鋼管とコンクリート間の引張破壊やせん断すべりは、図-5(b)に示している Coulomb Friction モデルを用いて再現している。このモデルでは、1) 引張応力が限界引張応力 f_{n-ult} に達すると引張破壊するものと見なし、鋼材とコンクリート間に剥離が生じるとともにその剛性（以後、法線方向の剛性） k_n も消失する、2) せん断応力が付着強度 $\bar{C}$ に達するとせん断すべりが発生する、および3) 摩擦係数 μ を導入することにより、せん断方向応力 t_t が限界せん断応力 $t_{ct} (= \bar{C} + \mu \cdot t_n)$ に達するとすべりが生じるものと仮定している。

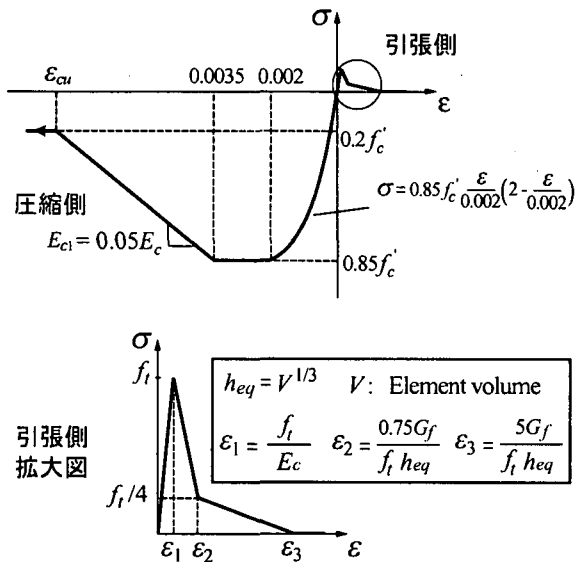
本解析では、鋼管とコンクリート間の引張破壊は簡易的にコンクリートの引張破壊によるものと仮定した。このため、限界引張応力 f_{n-ult} はコンクリートの引張強度 f_t と等価であるものと設定する。法線方向の剛性 k_n は、Discrete Cracking モデルと同様に $k_n = 10^4 \text{ N/mm}^3$ と仮定している。また、せん断剛性 k_t は、Hajjar ら²³⁾の研究成果を参考に $k_t = 10^4 \text{ N/mm}^3$ と仮定している。なお、コンクリートの引張強度 f_t は式(1)、(2)により評価するものとする。一方、付着強度 $\bar{C}$ および摩擦係数 μ の値に関しては、それらの値による鋼管橋脚の挙動特性の把握も含め4章で検討するものとする。

3.3 材料構成則

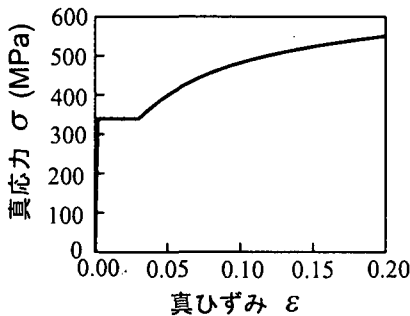
はじめにも述べているように、本研究では、部分的にコンクリートを充填した鋼管橋脚に関して鋼管とコンクリート間の付着特性がその耐荷性状に及ぼす影響を検討することに主眼を置いていることより、コンクリートおよび鋼材の材料構成則に関しては、既往の研究成果に基づくこととした。以下に、これらの材料構成則について述べる。

(1) コンクリート

図-6(a)には、コンクリート要素に適用した応力-



(a) コンクリート



(b) 鋼管

図-6 材料構成則

ひずみ関係を示している。圧縮側に関しては材料試験から得られた圧縮強度 f'_c (表-3 参照) を用い、圧縮ひずみ $3,500 \mu$ までは土木学会コンクリート標準示方書²⁴⁾に基づいて定式化し、 $3,500 \mu$ 以降は初期弾性係数の 0.05 ($E_{c1} = 0.05E_c$) 倍で $0.2 f'_c$ まで線形軟化するモデルを設定した^{25), 26)}。また、降伏の判定には Drucker-Prager の降伏条件を適用し、内部摩擦角は 30° と仮定して関連流れ則を用いている。

一方、引張側の構成則に関しては、図に示しているような trilinear モデル²⁷⁾を用いることとした。図中の V , h_{eq} , f_t および G_f は、それぞれ要素の体積、要素の等価長さ、コンクリートの引張強度および引張破壊エネルギーである。 G_f は、CEB-FIP Model Code²²⁾に基づいて、次のように定義した。

$$G_f = G_{f0} (f'_c / f_{cm0})^{0.7} \quad (3)$$

ここで、 $f_{cm0} = 10 \text{ MPa}$, G_{f0} は粗骨材の大きさに基づいて決定される定数であり、本研究では、粗骨材の最大径が 15 mm であることより、 $G_{f0} = 0.029 \text{ kN}\cdot\text{mm}$ と仮定している。

コンクリート要素に発生するひび割れは、分布ひび割れモデルを適用することによりモデル化することとした。分布ひび割れの発生は、コンクリートの引張強度を用い、Fixed Orthogonal Crack モデル^{20), 28)}によって判定することとした。すなわち、主応力がコンクリートの引張強度に達すると、この主応力方向に直交する方向に分布ひび割れが発生すると定義している。

(2) 鋼材

鋼材の材料定数は、前述の力学的特性 (表-2) および真応力-真ひずみ関係 (図-3) を参考に決定した。図-6(b) には、解析で使用した真応力-真ひずみ関係を示している。なお、図からも明らかなように、解析時には降伏棚の応力を一定値と仮定している。また、硬化則には等方硬化則を採用し、降伏の判定には von Mises の降伏条件を用いている。

4. 各パラメータに関する解析的検討

はじめにも述べているように、軸力と曲げを受ける部分的にコンクリートを充填した鋼管橋脚の耐荷性状は、鋼材とコンクリート間の付着特性によって大きく影響を受けるものと考えられる。それより、ここでは鋼材とコンクリート間の付着特性が耐荷性状に及ぼす影響を詳細に検討するために、Coulomb Friction モデルにおける付着強度 $\bar{c}$ および摩擦係数 μ を変化させた数値解析を実施することとした。また、得られた解析結果を実験結果と比較することにより、これらの最適値を同定している。数値解析は、コンクリート充填率の異なる 3 種類の試験体 (C-125/285/500 試験体) を対象として行った。

4.1 摩擦係数 μ の影響

Coulomb Friction モデルにおける摩擦係数 μ のコンクリート充填鋼管橋脚に関する耐荷性状への影響を検討するために、付着強度 $\bar{c}$ を最終的に決定した値 ($\bar{c} = f_t/3$, $\approx 0.5 \text{ MPa}$) に固定し、 μ のみを変化させて数値解析を行った。摩擦係数 μ の値は、既往の研究成果²⁹⁾より、 $\mu = 0.2 \sim 0.6$ と報告されている。しかしながら、ここでは、 μ の影響を詳細に検討するため、 $\mu = 0.0 \sim 0.6$ まで 0.1 刻みに変化させて数値解析を行っている。図-7 には、解析結果から得られる載荷点の水平荷重-水平変位関係 (以後、荷重-変位関係) を実験結果と比較して示している。

図-7(a) には、C-125 試験体に関する比較図を示している。図より、 $\mu = 0.0$ の場合には、実験結果よりも低い荷重レベルで最大値を示し、その後鋼管基部近傍に発生する局部座屈によって荷重が減少し終局に至っている。 $\mu = 0.1$ の場合には、最大荷重値に到達後荷重がほぼ一定の勾配で緩やかに低下し、最終的には $\mu = 0.0$ の場合と同様、鋼管基部に局部座屈が発生し終局に至った。

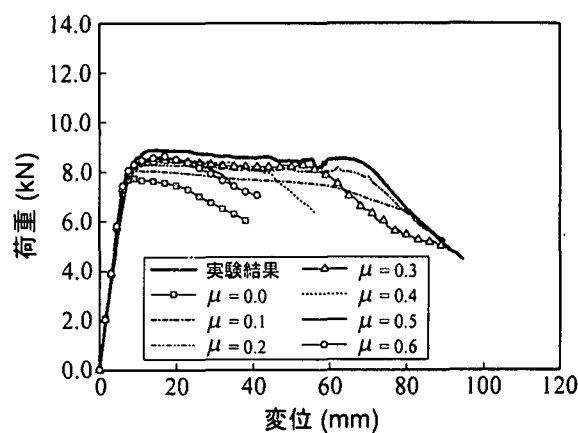
一方、 $\mu = 0.2 \sim 0.4$ の場合における結果を見ると、い

ずれの場合においても、最大荷重値に到達後、小さな軟化勾配を保持しながら変位が増大しており、実験結果と類似の分布性状を示していることが分かる。また、最終的には実験結果と同様にコンクリート頂部の鋼管部に局部座屈が発生し、荷重の急激な低下によって終局に至っている。なお、これらの解析結果を詳細に比較すると、 $\mu = 0.2$ の場合には、他の結果と比較して、著しく軟化する時点の変位は実験結果とほぼ一致しているものの、最大荷重値が若干小さく示されていることが分かる。また、 $\mu \geq 0.5$ の場合には、最大荷重値が $\mu < 0.5$ とする場合の解析結果よりも若干大きな値を示しているものの、 $\mu = 0.2 \sim 0.4$ の場合と比較して、小さな変位レベルでコンクリート頂部近傍に局部座屈が発生し終局に至っている。これは、摩擦係数 μ が小さい場合には、鋼管とコンクリート間にすべりが生じやすく、鋼管とコンクリートが互いに独立したような挙動を示すためと推察される。これに対して、摩擦係数 μ が大きい場合には、鋼管とコンクリート間のすべり抵抗が大きいことにより、両者が一体となって挙動する傾向を示し、その結果コンクリート充填部の剛性も大きく評価されることとなり、コンクリート充填部に発生する局部座屈も抑制され、結果としてコンクリート頂部近傍に局部座屈が発生し終局に至るものと考えられる。

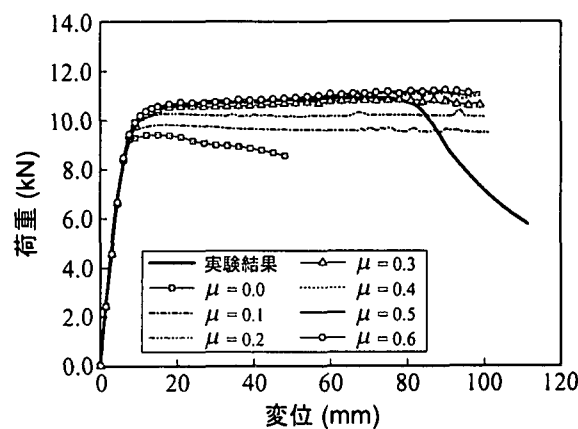
次に、図-7(b) に示す C-285 試験体に着目すると、 $\mu = 0.0$ の場合には、C-125 試験体と同様に実験結果と比較して小さい荷重レベルで鋼管基部近傍に局部座屈が発生し終局に至っている。また、 $\mu \geq 0.1$ の場合には、最大荷重値到達後、その荷重レベルを保持した状態で変形が進行しており、実験結果に類似した分布性状を示していることが分かる。しかしながら、 $\mu = 0.1, 0.2$ の場合には最大荷重値が実験結果よりも小さく、また $\mu \geq 0.5$ の場合には若干大きく示されている。これより、 $\mu = 0.3, 0.4$ の場合が実験結果をよく再現可能であることが分かる。

また、図-7(c) より、完全充填された C-500 試験体の場合には、いずれの解析結果においても、実験結果とほぼ等しい分布性状を示していることが分かる。これより、完全充填の場合には摩擦係数 μ の大きさが耐荷性状に及ぼす影響の小さいことが分かる。

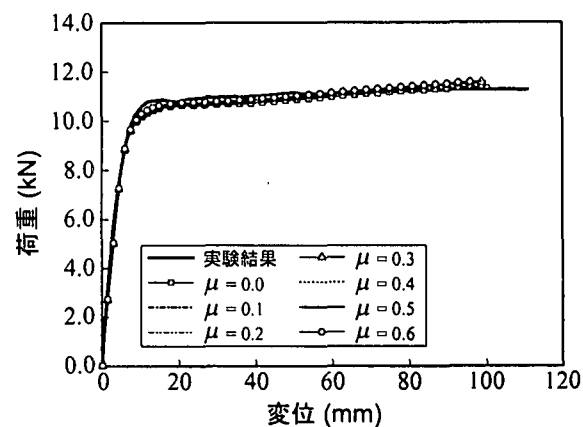
以上より、Coulomb Friction モデルを用いる場合の CFT の耐荷性状に及ぼす鋼管とコンクリート間の摩擦係数 μ の影響は、充填高さによって異なることが明らかになった。すなわち、完全充填の場合には、その影響は小さい。一方、部分充填の場合には、 μ が大きいほど、1) 最大荷重値が増大し、かつ最大荷重値到達後の軟化勾配が小さくなる傾向にあること、また 2) 鋼管とコンクリート間のすべりが抑制されることにより、コンクリート充填部の剛性が大きく評価されるため、コンクリート充填部に発生する局部座屈が抑制され、結果としてコンクリート頂部近傍に局部座屈が発生し終局に至る傾向に



(a) C-125 試験体



(b) C-285 試験体



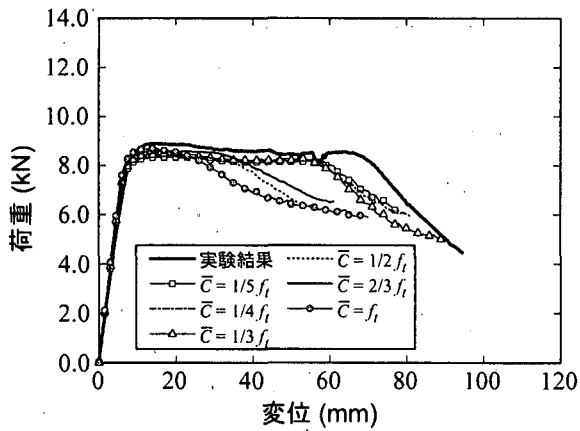
(c) C-500 試験体

図-7 荷重-変位関係に及ぼす摩擦係数の影響
($\mu = \text{var.}, \bar{C} = f_t/3$)

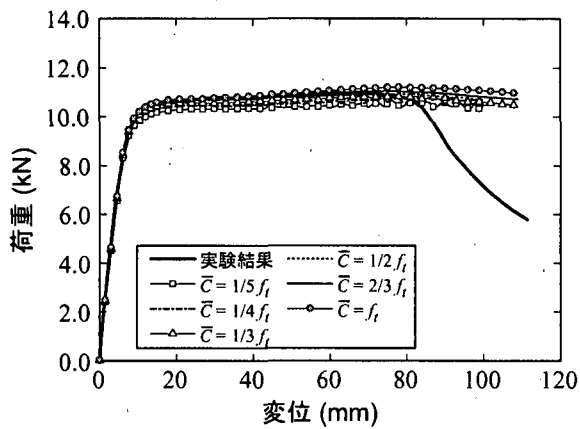
あること、が解析的に明らかになった。なお、本解析の範囲内では、充填高さにかかわらず、 $\mu = 0.3$ を用いる場合が実験結果を最もよく再現していることが分かる。

4.2 付着強度 $\bar{C}$ の影響

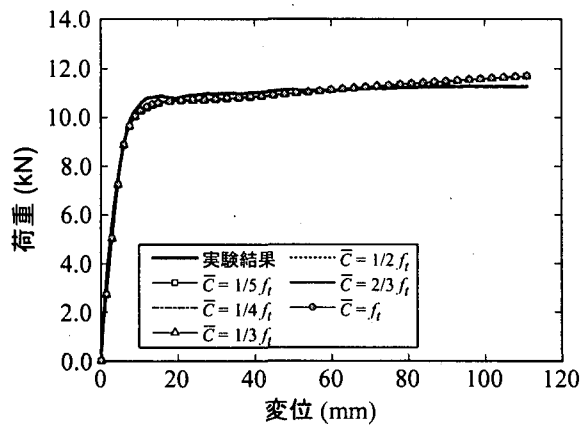
本節では、Coulomb Friction モデルを用いる場合の CFT の耐荷性能に及ぼす付着強度 $\bar{C}$ の影響を検討するために、摩擦係数を前述のようにして決定した $\mu = 0.3$ に固定し、 $\bar{C}$ の値を変化させて数値解析を行った。ここ



(a) C-125 試験体



(b) C-285 試験体



(c) C-500 試験体

図-8 荷重-変位関係に及ぼす付着強度の影響
($\bar{C} = \text{var.}, \mu = 0.3$)

では、 $\bar{C}$ の値をコンクリートの引張強度 f_t を基準として、 $1/5 f_t$ 、 $1/4 f_t$ 、 $1/3 f_t$ 、 $1/2 f_t$ 、 $2/3 f_t$ 、および f_t とする場合の鋼管橋脚に関する耐荷性状について検討を行っている。図-8 には、解析結果から得られる荷重-変位関係を実験結果と比較して示している。

図-8(a) の C-125 試験体に着目すると、 $\bar{C} = 1/5 f_t \sim 1/3 f_t$ の場合には、いずれの場合も実験結果とほぼ同様な分布性状を示していることが分かる。しかしながら、 $\bar{C} \geq 1/2 f_t$ の場合には、他の解析結果と比較して、最大

荷重値が若干大きく評価されるものの、小さい変位レベルでコンクリート頂部近傍に発生した局部座屈によって終局に至っている。これは、 $\bar{C} \geq 1/2 f_t$ の場合には、付着強度が大きいために、前述の摩擦係数 μ の検討の場合と同様、コンクリート充填部のすべりが抑制されることとなり、コンクリート充填部の剛性が大きく評価され、結果として中空鋼管部が他の解析結果に比較して早期に降伏するためと考えられる。

次に、図-8(b) の C-285 試験体に着目すると、 $\bar{C}$ が大きいほど、最大荷重値は大きくなる傾向を示している。また、解析結果を実験結果と比較すると、 $\bar{C} = 1/5 f_t$ の場合に若干小さな値を示しているものの、 $\bar{C} > 1/5 f_t$ の場合の解析結果は実験結果を大略再現していることが分かる。これより、C-285 試験体の場合に関しては、 $\bar{C}$ の大きさが耐荷性状に及ぼす影響は小さいものと考えられる。

図-8(c) の C-500 試験体に着目すると、いずれの解析結果も実験結果と大略一致しており、 $\bar{C}$ の大きさによる差異は見られない。

以上より、1) 充填高さが高いほど荷重-変位関係に及ぼす付着強度 $\bar{C}$ の影響は小さくなること、また 2) $1/4$ 充填の場合には、 $\bar{C}$ が大きいほどコンクリート頂部近傍の鋼管が早期に降伏し、小さな変位レベルで終局に至る傾向にあること、等が明らかになった。なお、本解析範囲内では、充填高さにかかわらず付着強度 $\bar{C}$ を $1/4 f_t \sim 1/3 f_t$ とすることにより、解析結果は実験結果を大略再現可能であることが分かる。

5. 数値解析結果と実験結果の比較

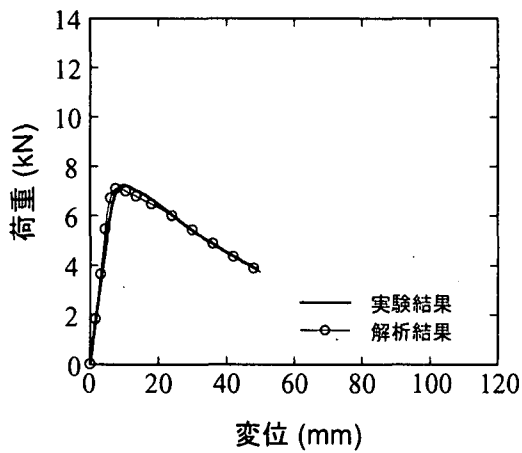
ここでは、前章で同定した鋼管とコンクリート間の摩擦係数 μ および付着強度 $\bar{C}$ を用いた場合における解析結果と実験結果の比較を行うこととする。以下、各項目ごとに検討を行う。

5.1 荷重-変位関係

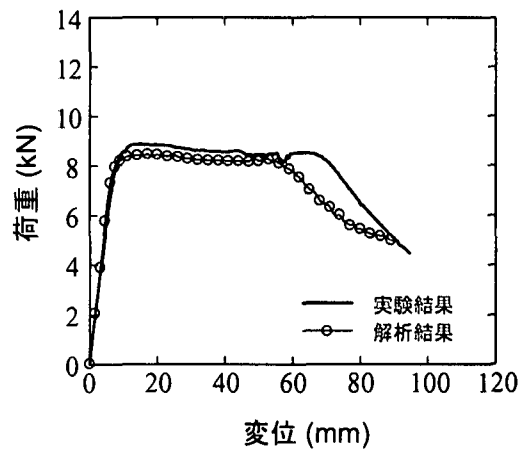
図-9 には、各試験体における荷重-変位関係に関する解析結果を実験結果と比較して示している。なお、Coulomb Friction モデルの摩擦係数 μ および付着強度 $\bar{C}$ は、前述の検討結果に基づき、 $\mu = 0.3$ および $\bar{C} = 1/3 f_t$ と設定している。

図-9(a) より、中空試験体である C-0 試験体に着目すると、実験結果は最大荷重値に到達後、鋼管基部近傍に発生する局部座屈によって軟化状態となり終局に至っている。一方、解析結果は最大荷重値が実験結果を僅かに下回っているものの、終局まで実験結果とほぼ同様な分布性状を示していることが分かる。

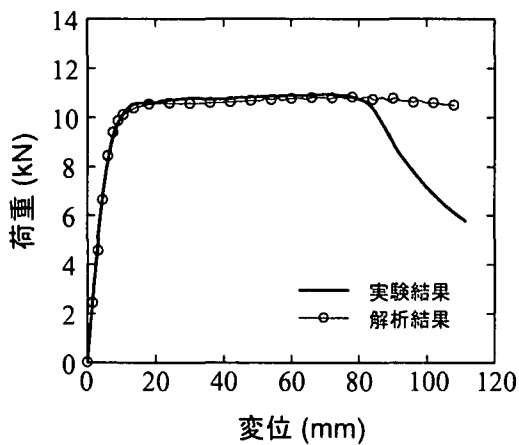
次に、図-9(b) の C-125 試験体について検討を行う。実験結果は水平変位の増加とともに荷重がほぼ線形に増大し、最大荷重値に到達後緩やかに低下している。最終



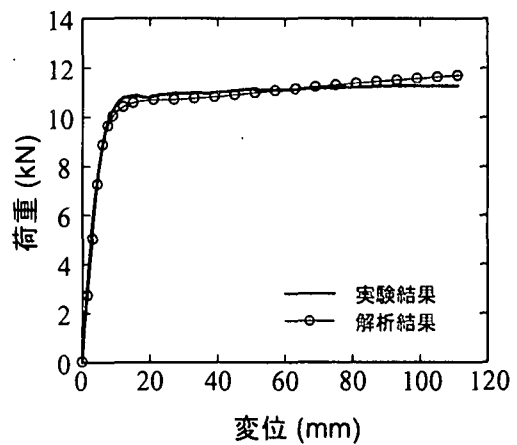
(a) C-0 試験体



(b) C-125 試験体



(c) C-285 試験体



(d) C-500 試験体

図-9 荷重-変位関係 ($\mu = 0.3$, $\bar{C} = f_i/3$)

的には、水平変位 70 mm 程度において充填コンクリート頂部近傍の鋼管部に局部座屈が発生し、荷重の急激な低下によって終局に至っている。一方、解析結果は、実験結果と比較して最大荷重値が若干小さいものの、その後の軟化勾配は大略一致している。また、解析結果の軟化開始時点の変位は実験結果よりも若干小さいものの、実験結果と同様に充填コンクリート頂部近傍に局部座屈が発生している。これより、解析結果は実験結果の荷重-変位関係を大略再現しているものと考えられる。

図-9(c) に示す C-285 試験体の場合、解析結果は変位 80 mm 付近までは実験結果と精度よく対応していることが分かる。しかしながら、その後、実験結果が充填コンクリート頂部近傍に局部座屈が発生し終局に至っているのに対し、解析結果は明瞭な局部座屈が現れず、著しい軟化現象を再現するまでには至っていない。

図-9(d) より、完全充填の C-500 試験体に関する比較図を見ると、解析結果は実験結果と比較して、若干小さな変位で剛性が急減している。また、その後の剛性勾配においても、解析結果は実験結果よりも若干大きいこ

とが分かる。しかしながら、解析結果は、載荷初期から終局に至るまで実験結果を大略再現しているものと考えられる。

以上より、提案の解析手法を用いることにより、充填高さにかかわらず荷重-変位関係を大略再現可能であることが明らかとなった。また、コンクリートを充填することによって鋼管橋脚の最大耐荷力および変形性能が向上することを解析的に確認することができた。しかしながら、C-285 試験体における解析結果には明瞭な局部座屈が発生しないことより、実験結果の軟化挙動(耐荷力低下)を正確に再現するまでには至っていない。

5.2 変形図およびコンクリートの軸方向ひずみ分布

図-10 には、解析結果から得られる各試験体の変形図および鋼管・コンクリートの軸方向ひずみ分布の等色図を、実験終了時の変形状態および充填コンクリートのひび割れ状況と比較して示している。なお、図中のひずみレベルは、引張側がそれぞれ図-6(a) に示す ε_1 、 ε_2 および ε_3 の値に、圧縮側が鋼材の降伏ひずみおよび

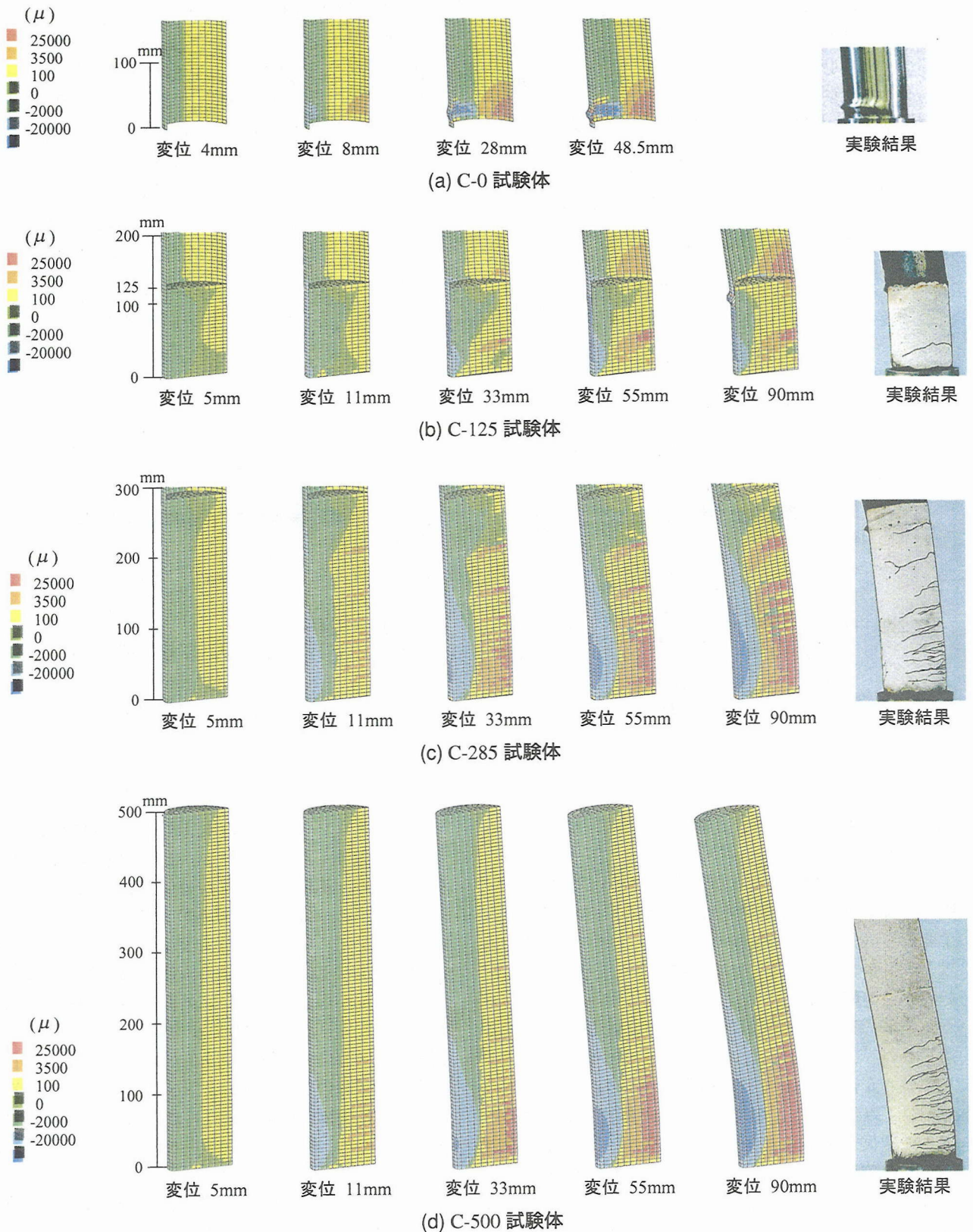


図-10 変形図およびコンクリートの軸方向ひずみ分布

その 10 倍のひずみに概ね相当している。

図-10(a) より、無充填である C-0 試験体の場合には、最大荷重値近傍の変位 8 mm において、圧縮側の基部から高さ約 20 mm 付近の軸ひずみが 2,000 μ を超えてお

り、降伏域に達していることが分かる。また、外側に凸状の局部座屈が発生する兆候がみられる。その後、変位の増大とともに明瞭な局部座屈が発生し終局に至っている。なお、解析結果における局部座屈は、基部より 20

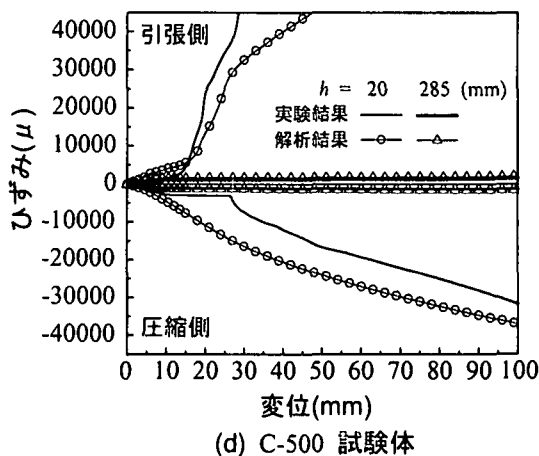
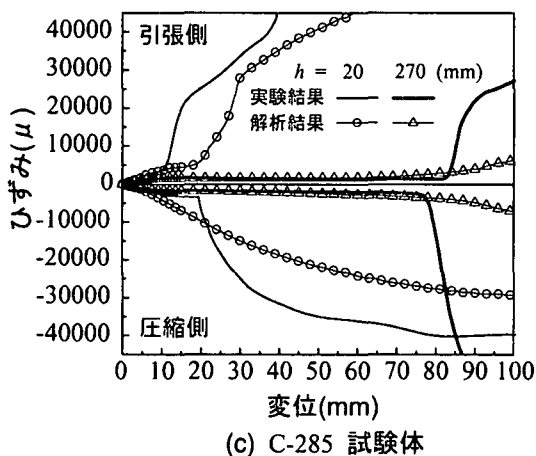
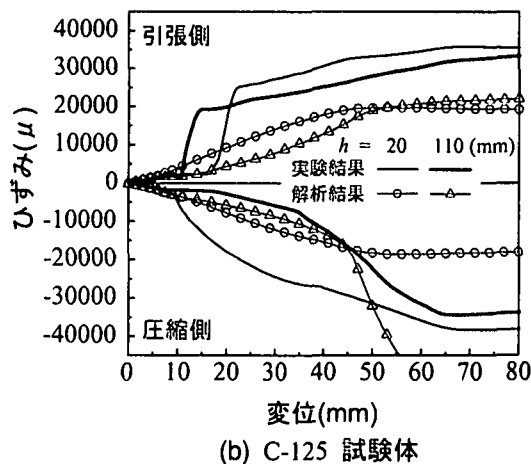
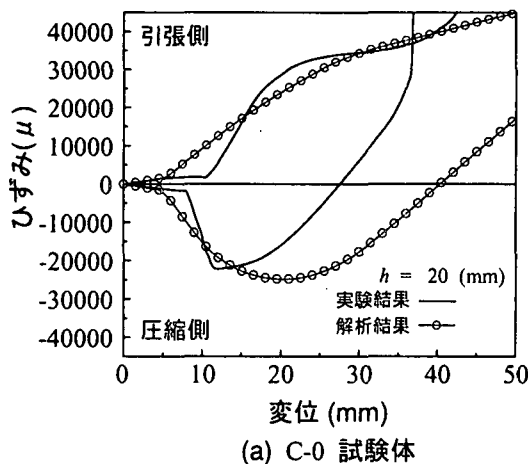


図-11 鋼管の軸ひずみ-変位関係の比較

mm 付近に発生しており、実験結果とほぼ一致していることを確認している。

次に、図-10(b)のC-125試験体について検討する。図-9(b)の荷重-変位関係において線形的な挙動を示す変位5mmでは、引張側の充填コンクリートに100 μ 以上の引張ひずみが発生している。荷重-変位関係において剛性勾配が変化する変位11mmでは、コンクリート充填部の鋼管の軸ひずみが-2,000 μ を超え降伏域に達していることが分かる。その後、荷重が緩やかに低下している変位33mmでは、引張側コンクリートにおいて軸ひずみが3,500 μ を超える領域が鋼管の断面中心付近まで進展している。また、コンクリート底部の浮き上がりも確認できる。さらに、変位が増加した55mmでは、コンクリートの軸ひずみが3,500 μ を超える領域が拡大し、かつ充填コンクリート頂部近傍の鋼管に局部座屈が発生する兆候がみられる。最終的にはその局部座屈が成長し終局に至っている。なお、解析結果の変形状態および軸ひずみ分布を実験結果と比較すると、局部座屈の発生位置が若干異なるものの、ひび割れの発生箇所は大略一致していることが分かる。

図-10(c)より、C-285試験体の場合には、変位11

mmで充填コンクリートの軸ひずみが3,500 μ を超える領域が数多く発生している。また、鋼管の軸ひずみ分布を見ると、基部からの高さ130mm以下および200~250mmの2つの領域で-2,000 μ を超えており降伏域に達していることが分かる。変位33mmでは、曲げひび割れが発生し、かつ鋼管の降伏領域が拡大している。さらに変位が増加するとコンクリート部に曲げひび割れが多数発生し、かつ-20,000 μ を超える軸圧縮ひずみが鋼管に発生していく様子がうかがえる。なお、解析結果と実験終了時の変形状況およびひび割れ状況を比較すると、解析結果は実験結果に見られる局部座屈の再現はできないものの、充填コンクリートのひび割れ分布は大略一致していることが分かる。

最後に、図-10(d)の完全充填であるC-500試験体に着目すると、変位11mmでは基部からの高さ135mm付近までの領域で鋼管が降伏し、かつ局所的に充填コンクリートの軸ひずみが大きくなっている。その後、変位の増大とともに、C-285試験体と同様に曲げひび割れが多数発生し、かつ鋼管の降伏領域も拡大している。なお、同一変位時におけるC-500とC-285試験体の軸ひずみ分布を比較すると、後者が前者よりも広範囲に引張

ひずみが分布していることが分かる。すなわち、塑性化が進行する領域は充填高さが高いほど、下側に集中する傾向にあることが推察される。

以上より、本解析手法を用いることによって、実験終了後の充填コンクリートに関するひび割れ状況を概ね再現可能であることが明らかになった。

5.3 鋼管の軸方向ひずみ－変位関係

図－11には、解析結果から得られる各試験体の鋼管の軸方向ひずみ－変位関係を実験結果と比較して示している。なお、図中の圧縮側および引張側は、処女載荷時に曲げ圧縮あるいは曲げ引張となる側面の結果を示している。また、 h は、ひずみゲージの基部からの高さである。

図－11(a)より、C-0試験体に着目すると、弾性的な挙動を示す変位5mm程度までは、解析結果が実験結果とほぼ一致している。一方、その後の弾塑性領域では、解析結果が実験結果よりも早い時点からひずみが緩やかに増加しているのに対し、実験結果はひずみが急激に増加している。また、実験結果は変位が10mm程度で圧縮側の軸ひずみが極小値を示し、その後引張方向へと推移している。一方、解析結果は、実験結果よりも大きな変位レベルで極小値を示していることが分かる。しかしながら、全体的に見ると、解析結果は実験結果の定性的な性状をほぼ再現しているものと判断される。なお、軸ひずみが極小値を示し、その後引張方向へ推移する現象は、ひずみゲージ貼付位置近傍に外側に凸状のモードを示す局部座屈が発生し、その振幅が成長していることを意味している。

図－11(b)に示すC-125試験体の場合には、C-0試験体と同様、弾塑性領域において、解析結果が実験結果に見られるような引張側軸ひずみの急激な増加現象を再現することは困難であることが分かる。また、全体的に解析結果の圧縮側および引張側の軸ひずみレベルは実験結果よりも小さく示されている。これは、コンクリート充填高さが低い場合には、実験結果における鋼管の軸ひずみが鋼管とコンクリート間の付着特性や充填コンクリートのひび割れ状況に大きく影響を受けるため、数値解析によってそれらを精度よく再現することが難しいことを暗示している。なお、 $h=110$ mmの解析結果において、圧縮側ひずみが変位50mm程度で急激に減少しているのに対し、実験結果ではこのような現象は生じていない。これは、図－10(b)からも明らかのように、局部座屈の発生位置が解析結果と実験結果で異なることによるものと推察される。

図－11(c)に示すC-285試験体を見ると、解析結果は、他の場合と同様に基部近傍 $h=20$ mmにおける圧縮側軸ひずみの急激な減少は再現できていない。しかしながら、 $h=270$ mmにおける軸ひずみ分布は、局部座屈が発生する変位80mm付近までほぼ一致しており、定性

的には実験結果を再現しているものと考えられる。また、完全充填である図－11(d)のC-500試験体に関しても、C-285試験体と同様にほぼ実験結果を再現していることが分かる。

以上より、本数値解析により得られる鋼管の軸ひずみ－変位関係は、実験結果に見られる急激な軸ひずみの増加現象等を定量的に再現できないものの、定性的には大略再現可能であることが明らかになった。

6. まとめ

本研究では、部分的にコンクリートを充填した円形断面鋼製橋脚の耐荷性状を適切に評価可能な解析手法の確立を目的として、小型鋼管橋脚模型に関する3次元弾塑性有限要素解析を試みた。ここでは、コンクリート充填高さの異なる4種類の試験体を対象に、鋼材とコンクリート間の付着特性が耐荷性状に及ぼす影響を検討するために、Coulomb Frictionモデルを適用してその付着強度 $\bar{c}$ および摩擦係数 μ を変化させて数値解析を実施した。また、得られた解析結果を実験結果と比較することにより、これらの最適値の同定を行った。さらに、同定した値を基に数値解析を行い、充填コンクリートの軸ひずみ分布や鋼管の軸ひずみ－変位関係について実験結果との比較検討を試みた。本研究で得られた知見を整理すると、

- 1) 荷重－変位曲線に及ぼす摩擦係数 μ の影響は、コンクリートの充填高さによって大きく異なる。すなわち、完全充填の場合にはその影響が小さく、部分充填の場合には、 μ が大きいほど最大荷重値が増大し、かつ最大荷重値到達後の軟化勾配も小さくなる傾向にあることが明らかになった。
- 2) 荷重－変位関係に及ぼす付着強度 $\bar{c}$ の影響は、充填高さが高いほど、その影響は小さくなること、また1/4充填の場合には、 $\bar{c}$ が大きいほどコンクリート頂部近傍の鋼管が早期に降伏し、小さな変位レベルで終局に至る傾向にあること、等が明らかになった。
- 3) 本解析範囲内では、コンクリート充填高さにかかわらず摩擦係数 μ を0.3、付着強度 $\bar{c}$ を $1/3 f_t$ とすることによって、解析結果は実験結果を大略再現可能である。
- 4) 本解析手法を用いることにより、部分コンクリート充填鋼製橋脚の耐荷性状や実験終了後の充填コンクリートに関するひび割れ状況を概ね再現可能であることを明らかにした。また、コンクリート充填高さが高いほど、耐荷力および変形性能が向上することを解析的に明らかにした。
- 5) しかしながら、C-285試験体における解析結果には明瞭な局部座屈が発生しないことより、実験結果の軟化挙動を正確に再現することは困難であった。

なお、本研究で対象とした試験体は、充填コンクリート上面にダイヤフラムが設置されていないものである。一方、実際の橋脚では通常ダイヤフラムが設置されていることから、ダイヤフラムの影響について検討する必要がある。また、鋼製橋脚の耐震性を検討するためには、単調載荷のみならず繰返し載荷に対する検討も必要と考えられる。特に、繰返し載荷時には、鋼材とコンクリート間が早期に剥離するとの報告もあることより、今後はこれら点も含めてさらなる検討を行いたいと考えている。

参考文献

- 中井 博, 北田俊行, 中西克佳: 漸増繰返し荷重を受ける鋼製・合成橋脚柱の耐荷性状に関する実験的研究, 土木学会論文集, No. 513/I-31, pp. 89-100, 1995.
- 宇佐美勉, 鈴木俊光, 伊藤義人: 実橋脚をモデル化した基部を有するコンクリート充填鋼柱のハイブリッド地震応答実験, 土木学会論文集, No. 525/I-33, pp. 55-67, 1995.
- 才塚邦宏, 宇佐美勉, 木曾英滋, 伊藤義人: コンクリートを部分的に充填した鋼製橋脚のハイブリッド地震応答実験, 構造工学論文集, Vol. 41A, pp. 277-288, 1995.
- 小枝日出夫, 岸 徳光, 佐藤昌志, 小室雅人, 小野信市: 部分的にコンクリートを充填した鋼管橋脚モデルの繰返し載荷実験, 鋼構造年次論文報告集, Vol. 6, pp. 77-84, 1998.
- 天野麻衣, 葛西 昭, 宇佐美勉, 葛 漢彬, 岡本真悟, 前野裕文: コンクリート部分充填鋼製橋脚の弾塑性挙動に関する実験的及び解析的研究, 構造工学論文集, Vol. 44, pp. 179-188, 1998.
- 村田清満, 安原真人, 渡邊聡明, 木下雅敬: コンクリート充填円形鋼管柱の耐力と変形性能の評価, 構造工学論文集, Vol. 44A, pp. 1558-1564, 1998.
- Kilpartick, A.E. and Rangan, B.V.: Tests on high-strength concrete-filled steel tubular columns, *ACI Structural Journal*, Vol. 96, No. 2, pp. 268-274, 1999.
- 折野明宏, 井浦雅史: 部分的にコンクリートを充填した円形鋼製橋脚の挙動, 第3回鋼構造物の非線形数値解析と耐震設計への応用に関する論文集, 土木学会, pp. 83-88, 2000.
- 池田憲二, 岸 徳光, 小枝日出夫, 小室雅人: 基部加振を受けるコンクリート充填鋼管橋脚モデルの弾塑性応答性状, 日本鋼構造協会, 鋼構造年次論文報告集, Vol. 9, pp. 505-512, 2001.
- 宇佐美勉, 鈴木森晶, Iraj H.P. Mamaghani, 葛 漢彬: コンクリートを部分的に充填した鋼製橋脚の地震時保有水平耐力照査法の提案, 土木学会論文集, No. 525/I-33, pp. 69-85, 1995.
- 唐 嘉琳, 日野伸一, 黒田一郎, 太田俊昭: コンクリート充填円形鋼管柱を対象とした鋼管とコンクリートの応力-ひずみ関係のモデル化, 鋼構造論文集, Vol. 3, No. 11, pp. 35-46, 1996.
- 渡辺 浩, 崎元達郎, 千場幸輝, 大西俊一: コンクリート充填鋼管構造の終局挙動の簡易解析法, 土木学会, 構造工学論文集, Vol. 43A, pp. 217-224, 1997.
- Susantha, K.A.S., Ge, H. and Usami, T.: Uniaxial stress-strain relationship of concrete confined by various shaped steel tubes, *Engineering Structures*, Vol. 23, No. 10, pp. 1331-1347, 2001.
- 葛 漢彬, 浅田秀史, K.A.S. Susantha, 宇佐美勉: 薄肉及び厚肉断面を有するコンクリート部分充填鋼製橋脚の統一的耐震照査法, 構造工学論文集, Vol. 47A, pp. 783-792, 2001.
- Varma, A.H., Ricles, J.M., Sause, R., and Lu, L.W.: Seismic behavior and modeling of high-strength composite concrete-filled steel tube (CFT) beam-columns, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 58, Nos. 5-8, pp. 725-758, 2002.
- Johansson, M. and Gylltoft, K.: Structural behavior of slender circular steel-concrete composite columns under various means of load application, *Steel and Composite Structures*, Vol. 1, No. 4, pp. 393-410, 2001.
- Omar, T.S., Butterworth, J.W., and Lowe, P.G.: Development of finite element model for concrete-filled steel tube members in flexure, *Proc. 7th New Zealand Postgraduate Conference on Engineering and Technology*, Palmerston North, November 2000.
- 松村寿男, 水野英二: コンクリート充填鋼管柱の三次元有限要素解析, 日本鋼構造協会, 鋼構造年次論文報告集, Vol. 10, pp. 535-542, 2002.
- 藤井 堅, 藤井崇文, 臺 博幸: 繰返し水平力を受けるコンクリート充填円形鋼管柱の有限要素解析, 構造工学論文集, Vol. 49A, pp. 1041-1050, 2003.
- Nonlinear Analysis User's Manual (7.2), TNO Building and Construction Research.
- 日本道路協会: 「道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編」, 2002.
- CEB-FIP Model Code 1990, Thomas Telford.
- Hajjar, J.F., Schiller, P.H., and Molodan, A.: A distributed plasticity model for concrete-filled steel tube beam-columns with interlayer slip, *Engineering Structures*, Vol. 20, No. 8, pp. 663-676, 1998.
- 土木学会: コンクリート標準示方書 (平成8年制定) 設計編, 1996.
- Balakrishnan, S. and Murray, D.W.: Concrete Constitutive Model for NLFE Analysis of Structures, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 114, pp. 1449-1466, 1988.
- 岸 徳光, 三上 浩, 張 広鋒: FRP シート曲げ補強 RC 梁に関するシートの剥離挙動解析, 土木学会論文集, No. 725/V-58, pp. 255-272, 2003.
- 三木朋広, Manakan, L., 二羽淳一郎, 濱田 譲: コンクリート構造物の局所的圧縮破壊に関する解析的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 22, No. 3, pp. 151-156, 2000.
- Rots, J.G.: *Computational Modeling of Concrete Fracture*, Ph.D thesis, Delft University of Technology, 1988.
- Baltay, P. and Gjelsvik, A.: Coefficient of Friction for steel on concrete at high normal stress, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 2, No. 1, pp. 46-49, 1990.

(2003年4月18日受付)