

PC 圧着接合面の力学的挙動に関する研究

木村 建斗^{*1} 小野 裕貴^{*1} 丸山 貴吉^{*2} 中野 友裕^{*3}

A Study on Strain Distribution of Concrete Adjacent to Prestressed Joints

by

Kento KIMURA^{*1}, Hiroki ONO^{*1}, Takayoshi MARUYAMA^{*2} and Tomohiro NAKANO^{*3}

(Received on Mar. 31, 2014 and accepted on May 15, 2014)

Abstract

When we assemble precast RC members, in general, we put a rubber plate between the different members. In the design, the PC tension is usually treated as the distributed load. However, there exist many unclear phenomena to be clarified in the interaction between rubber and concrete. In this study, we conduct an experiment to observe this interaction, and simulate the interaction phenomena analytically. From the experiments and analytical results, it was found that the degree of nonuniformity of the stress and/or strain distribution in the sandwiched rubber becomes large when the PC tension is applied to be the concentrated load.

Keywords: Prestressed joint, PC tension, Strain and stress distribution, Cylinder element

1. はじめに

プレキャスト部材を組み立てて構造物を作る場合、コンクリート部材間にはゴムを挟むことが多い。これは、止水性や部材間の緩衝を目的になされるものである。このようなコンクリートとゴムを組み合わせる場合、コンクリートとゴムという性質を異にする材料の相互作用を考慮した設計、解析が本来必要である。プレキャスト部材を接合して一体化する場合2つの方法が採用できる。1つは接着剤を用いて接合する方法。もう1つは、PC緊張力を導入して、接合面を押しつける方法である。

この際に導入される緊張力の扱いは、設計上、等分布荷重として、断面全体に均一に作用する分布荷重として扱われている。しかし、既往の研究¹⁾では、PC緊張力が局所的なものであることから、接合面付近のコンクリートの様な応力分布の仮定が成立しないことが示されている。更に、ゴムの存在が、その違いに顕著に影響することも示されている。

一方でゴムという物質は圧縮に対しても引張に対しても非常に強い物質であり、実用的に非常に優れている。ゴムは、500%から1000%にも伸びる一方で、徐荷した場合、瞬時に元の長さに戻る。また圧縮作用下で長期間変形していても、変形を取り去ると元に戻るという稀有な性質を有している。このような性質を有する物質は、超弾性体と呼ばれ、変形による体積変化がほとんど生じないという特徴を有する²⁾。従って、全く異なる性質のコ

ンクリートとゴムが、力学的にどのような相互作用を生じさせるかについて明らかにすることが、安全・合理的な接合面の設計に不可欠である。

しかし、プレキャスト構造物を構築する際の、コンクリートとゴムの界面での相互作用については不明な点が多い。そこで本研究ではゴムとコンクリート界面での力学的挙動を実験的に再現した上で、ひずみゲージを用い計測したデータをもとに、ゴムとコンクリートの相互作用について解析的に明らかにすることを目的とした。また、現在用いられている設計法の仮定との関連についても、解析的に検討し、その問題点を明らかにした。

2. 実験の概要

2.1 試験の概要

本試験の概略図を Fig.1 に示す。試験体は、寸法が $\phi 150 \times 300 \text{mm}$ の無筋コンクリートの円柱ブロックで、中央にシース孔 $\phi 18 \text{mm}$ を設けている。使用したコンクリートは一般のプレキャストコンクリート部材と同程度の性質になるように、常圧蒸気養生（最高温度 65°C 、3 時間

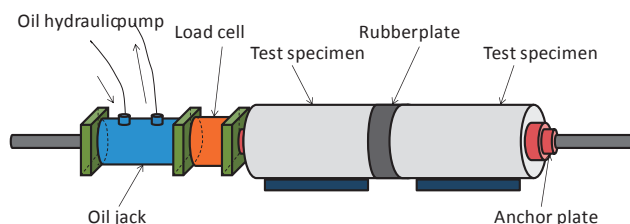


Fig.1 Schematic figure of the test

*1 工学部土木工学科

*2 鶴見コンクリート株式会社

*3 工学部土木工学科准教授

Table 1 Mixture proportion of concrete specimen

Gmax [mm]	S.Flow [cm]	W/P [%]	s/a [%]	Unit weight [kg/m ³]						
				W	C	BFS	Ex	S	G	Ad
20	65	29.4	45.2	168	261	261	50	736	890	6.41

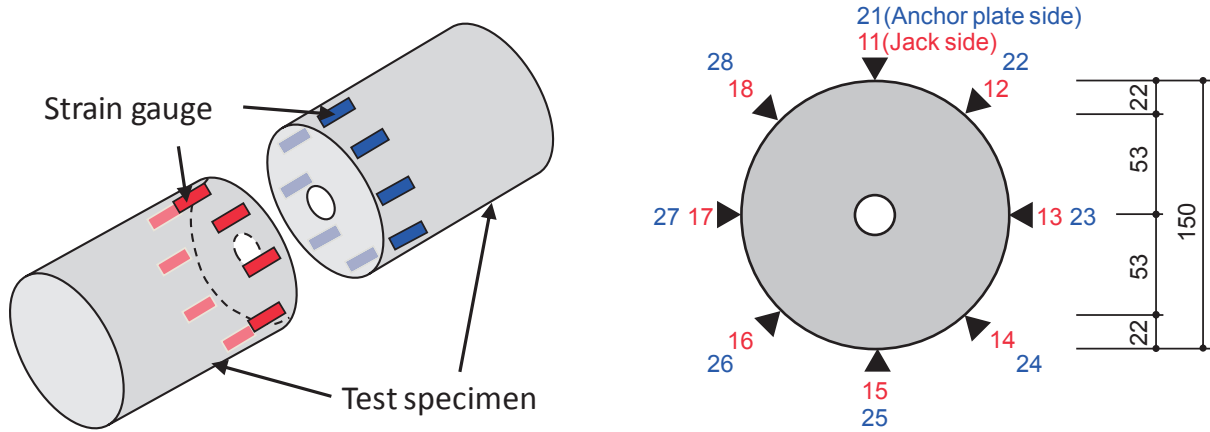


Fig.2 Measurement location

保持) の条件下で養生した。

なお、試験時は材令 115 日で圧縮強度は $f'_c = 83.31$ MPa, 材令 116 日で圧縮強度は $f'_c = 84.10$ MPa であった。

配合表を Table 1 に示す。圧着接合面は研磨機により圧縮供試体と同程度の平面度とした。PC 鋼材は $\phi 13$ mm の鋼棒(C 種 1 号)を使用し、繰り返し試験を行うことから PC グラウトは行っていない。圧着接合面に挟むゴム板の材質は天然ゴム (NR) を使用し、硬度は 60 とした。

これらを Fig.1 のように組み立てることで、試験を行った。具体的には、ゴム板を挟んだ 2 本のコンクリート供試体、センターホール型のロードセルおよび油圧ジャッキを PC 鋼棒で貫通し両端で固定し、油圧ジャッキのストロークを伸ばすことで圧縮力を接合面に作用させた。試験体の両端にあるアンカープレートは、試験体断面より小さい直径 50mm とした。

载荷は、ロードセルで緊張力管理を行いながら手動油圧ポンプで徐々に導入した。

3.2 測定項目

PC 緊張力・ゴム圧を変化させた場合に生じる接合面付近の外周コンクリートひずみの変化を測定した。

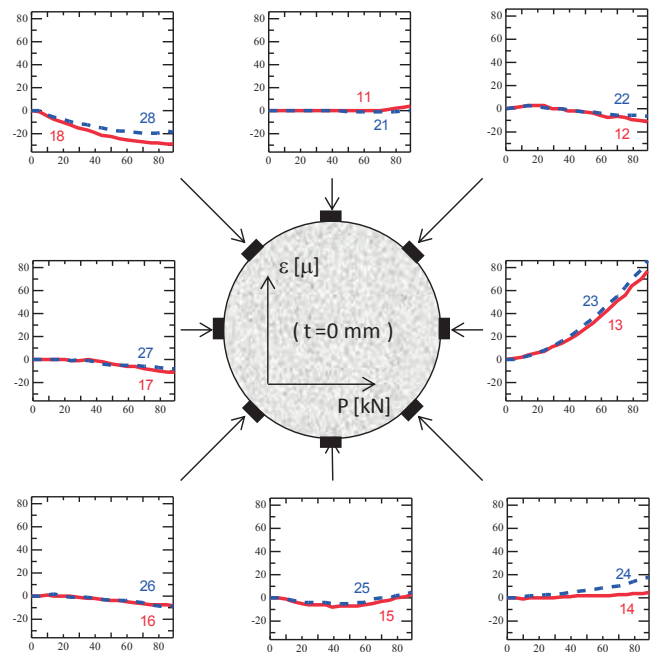
PC 緊張力は最大 90kN とし、ゴム圧 t [mm] は 1,3,5,10,15,20 およびゴムなし($t=0$)の 7 ケースとした。接合面外周コンクリートのひずみ測定位置を Fig.2 に示す。

3.3 試験結果³⁾

(1) ゴム板なし (試験体直接接触)

Fig.3 にゴム板なしの時の緊張開始から 90kN までの外周コンクリート各位置におけるひずみの測定結果を示す。

2 本の供試体の外周コンクリートでそれぞれ同じ位置となるひずみを同じグラフに表している。1 箇所を除

Fig.3 Relation between PC tension and surface concrete strains ($t=0$)

ば各位置で大きな差は見られない、増加傾向は全体的にみると右下がりかほぼ水平になっており、若干の引張ひずみが多く発生しているのが分かる。

No.13, 23 は他に比べひずみが非常に大きくなっている。これは、シース孔の直径 18mm が PC 鋼棒径 13mm よりも大きいことから生じる隙間の影響によって、緊張力が供試体中心から偏心し、その結果、No.13,23 の間のみ応力の伝達する箇所が形成された影響と考えられる。それを確認するために、複数回実験を行ったが、いずれ

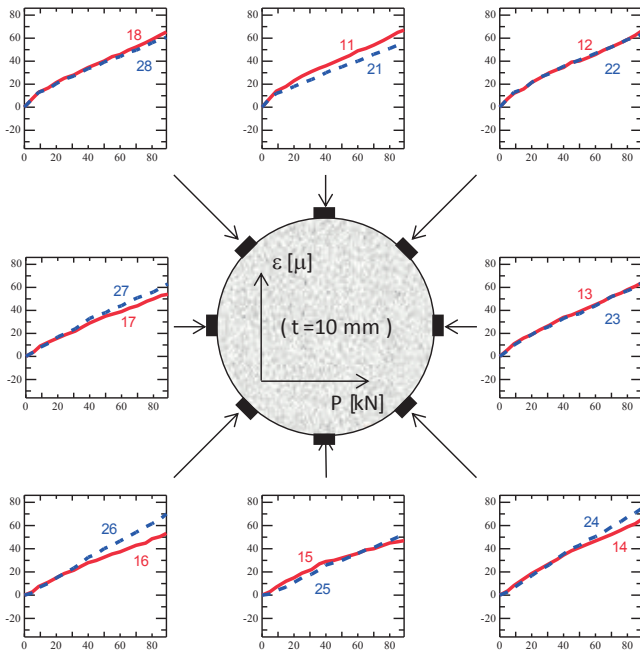


Fig.4 Relation between PC tension and surface concrete strains (t=10mm)

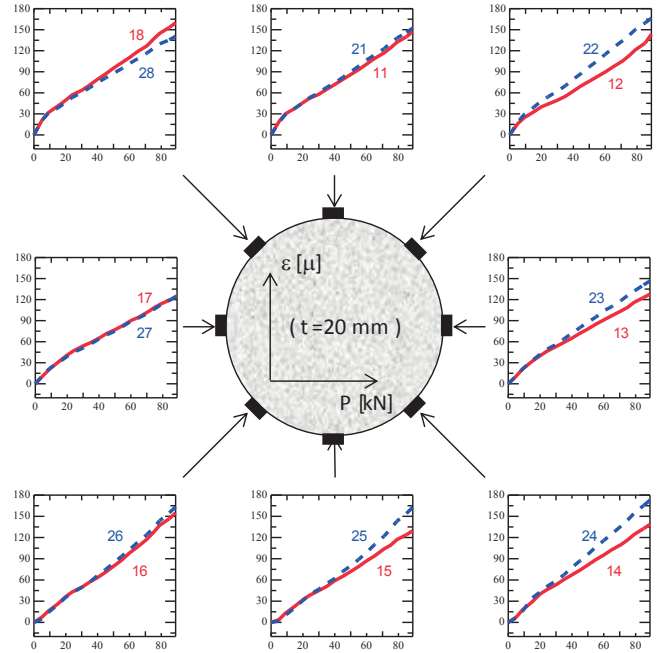


Fig.5 Relation between PC tension and surface concrete strains (t=20mm)

Table 2 Relation between rubber thickness and mean surface concrete strains (P=30kN)

Rubber tickness [mm]	0	10	20
Mean surface concrete strain*	-1.0μ	+26.3μ	+56.4μ

* Positive in compression

の場合も測定点の 1 ヶ所において、ひずみの増大する箇所が存在した。

(2) ゴム板 t=10mm

Fig.4 にゴム厚 10mm での緊張開始から 90kN までの外周コンクリート各位置におけるひずみの測定結果を示す。ジャッキ側の試験体の方が上面でのひずみ量は大きく、下面では反対側の試験体の方が大きく出ている。傾きを見ると、比例関係で増加している。ゴム板なしと比較すると、引張ひずみは発生せず圧縮応力のみ発生している。

(3) ゴム板 t=20mm

Fig.5 にゴム厚 20mm での緊張開始から 90kN までの外周コンクリート各位置におけるひずみの測定結果を示す。ジャッキ側の試験体のひずみ量が反対側の試験体のひずみ量を下回っているところが多く見られる。傾きはこちらもほぼ同じ勾配で増加し比例関係である。

(4) 外周コンクリートひずみ

PC 緊張力 P=30kN を導入したときの外周コンクリートの平均ひずみを Table 2 に示す。この平均ひずみは、Fig.4,5,6 それぞれについて、ひずみ測定位置 16 箇所の P=30kN 時のひずみの平均である。

圧縮ひずみを正として表した場合、ゴムなしの時は -1.0μ、ゴム厚 10mm の時は+26.3μ、ゴム厚 20mm の時は

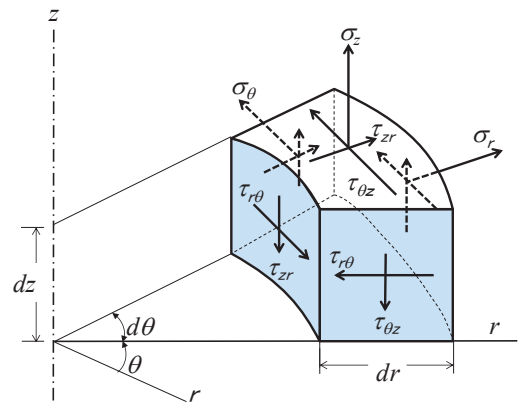


Fig.6 Cylindrical coordinates and cylinder element

+56.4μであり、ゴム厚が大きくなるにつれて、平均ひずみは大きくなる傾向を示している。

3. 軸対称要素を用いた数値解析

3.1 円柱要素の概要

円柱要素（軸対称要素）の定式化では、Fig.6 に示すような 3 次元の円筒座標系(r,θ,z)を用いる。(r,θ,z)方向の荷重および変位をそれぞれ、 $f_r, f_θ, f_z$ および u, v, w とし、θ方向にそれぞれフーリエ級数展開できるものと仮定して、変位によって生じるひずみおよび応力式、つり合い方程式等を、θに対して変数分離する。

円柱要素のつり合い方程式は、仮想仕事の原理から求められる。すなわち、任意の調和成分nに対して次式が

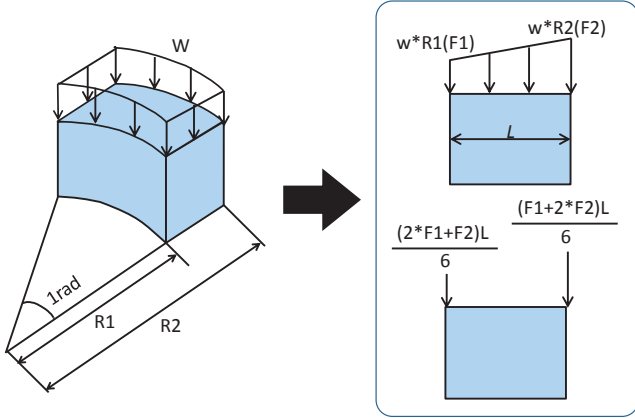


Fig.7 Equivalent nodal forces of distributed load on cylinder element

成立する．

$$\{P_n\} \equiv \begin{Bmatrix} f_{n1} \\ f_{n2} \\ \vdots \\ f_{n3} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{n11} & k_{n12} & \cdots & k_{n1N} \\ k_{n21} & k_{n22} & \cdots & k_{n2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{nN1} & k_{nN2} & \cdots & k_{nNN} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_{n1} \\ d_{n2} \\ \vdots \\ d_{nN} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

$$\equiv [k_n]\{\delta_n\}$$

ここに k_{nij} は調和成分 n に対する要素の剛性マトリックスで、その各成分マトリックスは次式で与えられる．

$$k_{nij} = \iint_A [B_{ni}]^T [D] [B_{nj}] r dr dz \quad (2)$$

$$= \iint_A [[\bar{B}_{ni}]^T [D] [\bar{B}_{nj}] + [\bar{B}_{ni}]^T [D] [B'_{nj}] + [B'_{ni}]^T [D] [\bar{B}_{nj}] + [B'_{ni}]^T [D] [B'_{nj}]] r dr dz$$

ここに、 $[D]$ は三次元直方体異性体に対する弾性マトリックス、 $[B_{ni}]$ は要素 i のひずみ変位マトリックスであり、要素の形状関数 N_i を用いて以下のように得られる．

$$[B_{ni}] = [\bar{B}_{ni}] + [B'_{ni}] \quad (3)$$

ここに

$$[\bar{B}_{ni}] = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial r} & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial N_i}{\partial z} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\partial N_i}{\partial z} & 0 & \frac{\partial N_i}{\partial r} \\ 0 & 0 & \frac{\partial N_i}{\partial z} & 0 & \frac{\partial N_i}{\partial r} & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$[B'_{ni}] = \frac{N_i}{r} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -n \\ 0 & n & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & -n & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (5)$$

円柱要素に分布荷重を載荷する場合、面分布荷重から節点荷重に変換する際に、円柱要素の節点は1ラジアン分の円周長さを背負っている．そのため分布荷重から線分布荷重に変換するとき、内外側の各節点では半径の違いが出てくる．その影響を考慮すると、Fig.7のような節点力を設定する必要がある．なお、上記定式化の詳細については、文献^{4),5)}を参照されたい．

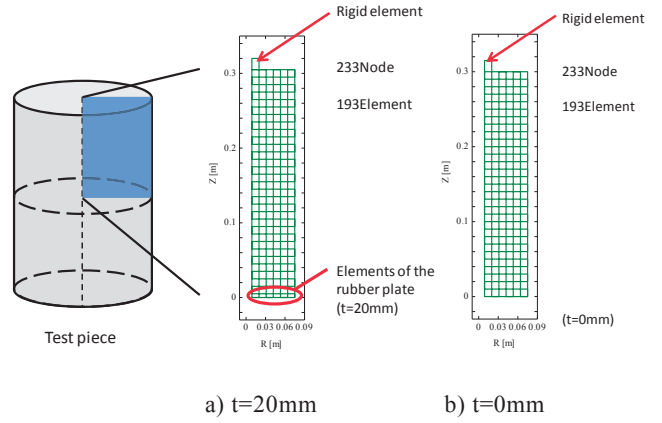


Fig.8 Analytical models

Table 3 Material constants

	concrete	rubber
Elastic modulus E	36 GPa	2 MPa
Poisson's ratio v	0.2	0.49999

Table 4 Analytical cases

Loading Condition	t=00	t=10	t=20
Concentrated Load	C00	C10	C20
Distributed Load	D00	D10	D20

3.2 モデル化

圧着接合面周辺の挙動を評価する為に、供試体の軸対称性を考慮して、1/4の領域を円柱要素でモデル化し、有限要素解析を実施した．Fig.8a)にゴム板ありの場合のモデルを、Fig.8b)にゴム板なしの場合をそれぞれ示す．

Table 3 に解析に用いた材料定数を示す．コンクリートについては、一軸圧縮試験の結果より得られた値である．ゴムについては、硬度 60 における小ひずみでの弾性係数を用いることにした．ただしゴムは超弾性体であり、体積不変の条件を付与した場合、ポアソン比 $\nu=0.5$ となるため解析できないことから、 $\nu=0.49999$ を採用した．またゴムのヤング係数はごく小さなひずみ領域から強い非線形を生じるため、小さいひずみ領域を想定している点に注意されたい．

3.3 解析ケース

ゴム圧が 0mm, 10mm, 20mm それぞれについて解析を行った．解析ケースは

- ①緊張力 ($P=30\text{kN}$) を集中荷重としてあたえた場合、
- ②断面全体に均等に与えた場合

について行った．解析ケースを Table 4 に示す．集中荷重として与える場合、アンカーボルト部材 (Fig.8 の剛体要素) の上部節点 2 箇所に 3.1 節の分布荷重の変換を施して作用させている．

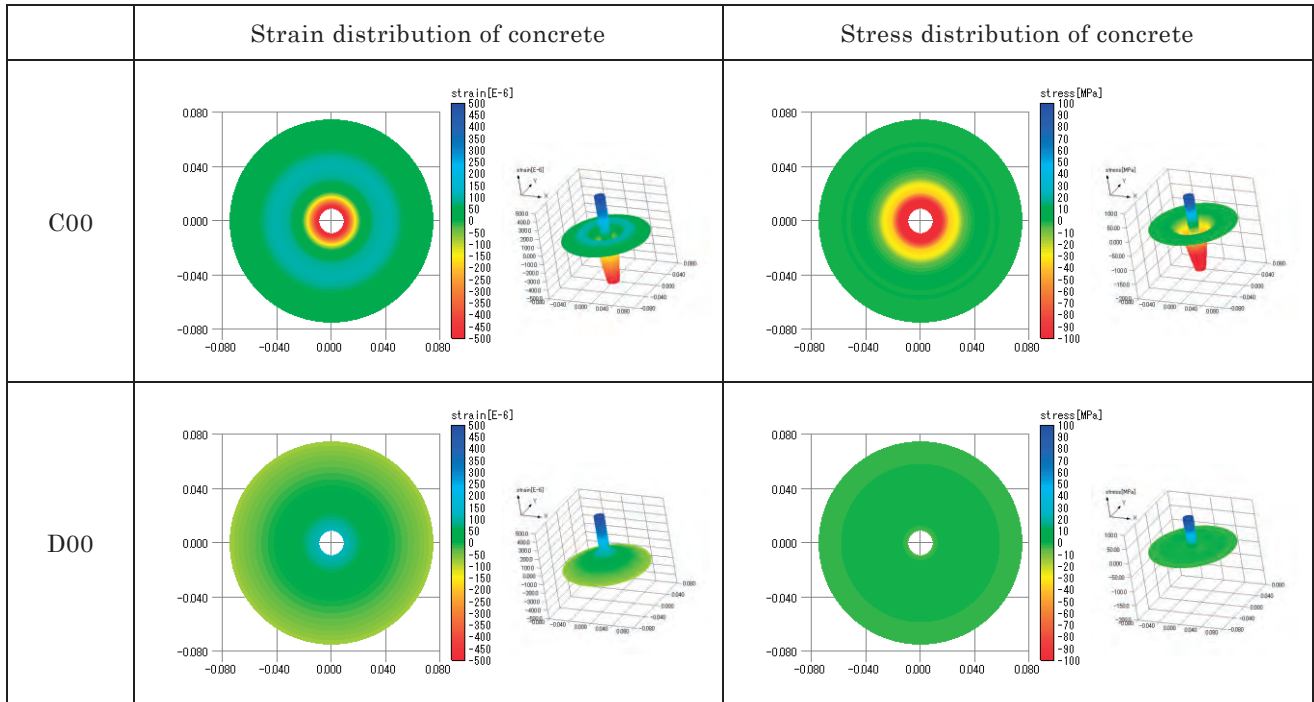


Fig.9 Analytical results (C00 and D00) (positive in tension : the same hereinafter)

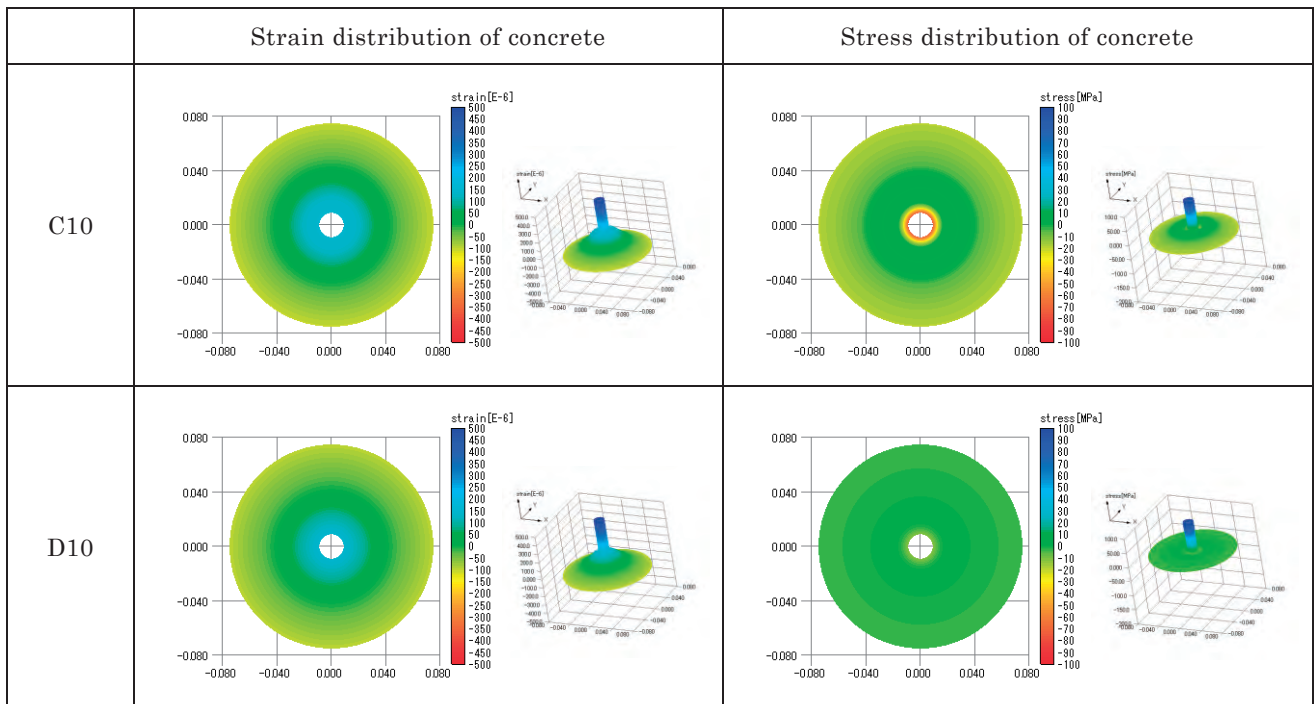


Fig.10 Analytical results (concrete : C10 and D10)

3.4 解析結果の考察

(1) ゴム板なしの場合 (Fig. 9)

P=30kN を集中荷重として作用させた場合 (Fig. 9:C00), 供試体中心部に大きな圧縮応力が発生している。

一方、P=30kN が断面全体に均一に作用していると仮定し、荷重を分布荷重として与えた場合 (Fig.9:D00) は、接合面位置でのコンクリート応力分布図を見る限り、応力はほぼ均一である事が分かる。ひずみは中心部に若干

の引張ひずみが発生している。

(2) ゴム板 10mm の場合 (Fig.10,11)

集中荷重として作用させた場合 (Fig.10:C10), コンクリート面では、供試体中心部に大きな圧縮応力が見られるが、その範囲はゴム板なしの時と比べ大きく減少している。一方、ひずみ分布はゴム板なしの時の分布荷重の時 (Fig.9:D00) と酷似している。

次にゴム内の応力 (Fig.11:C10) を見ると、中心部に

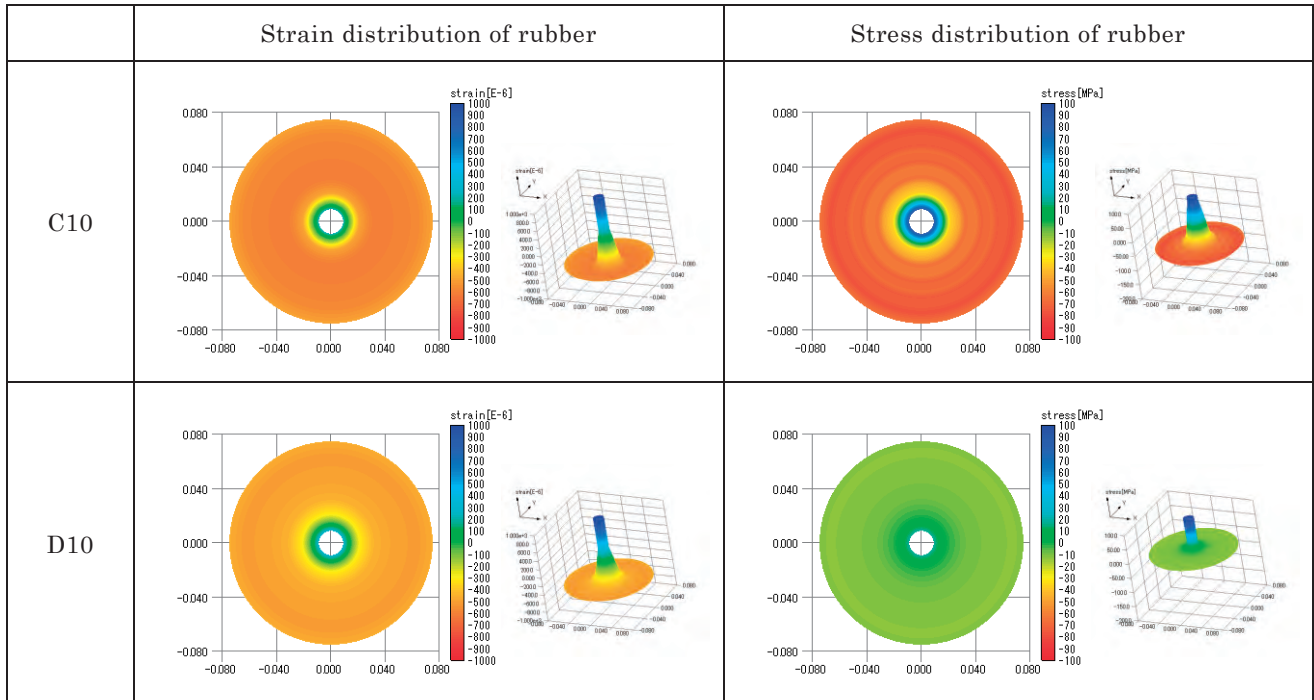


Fig.11 Analytical results (rubber : C10 and D10)

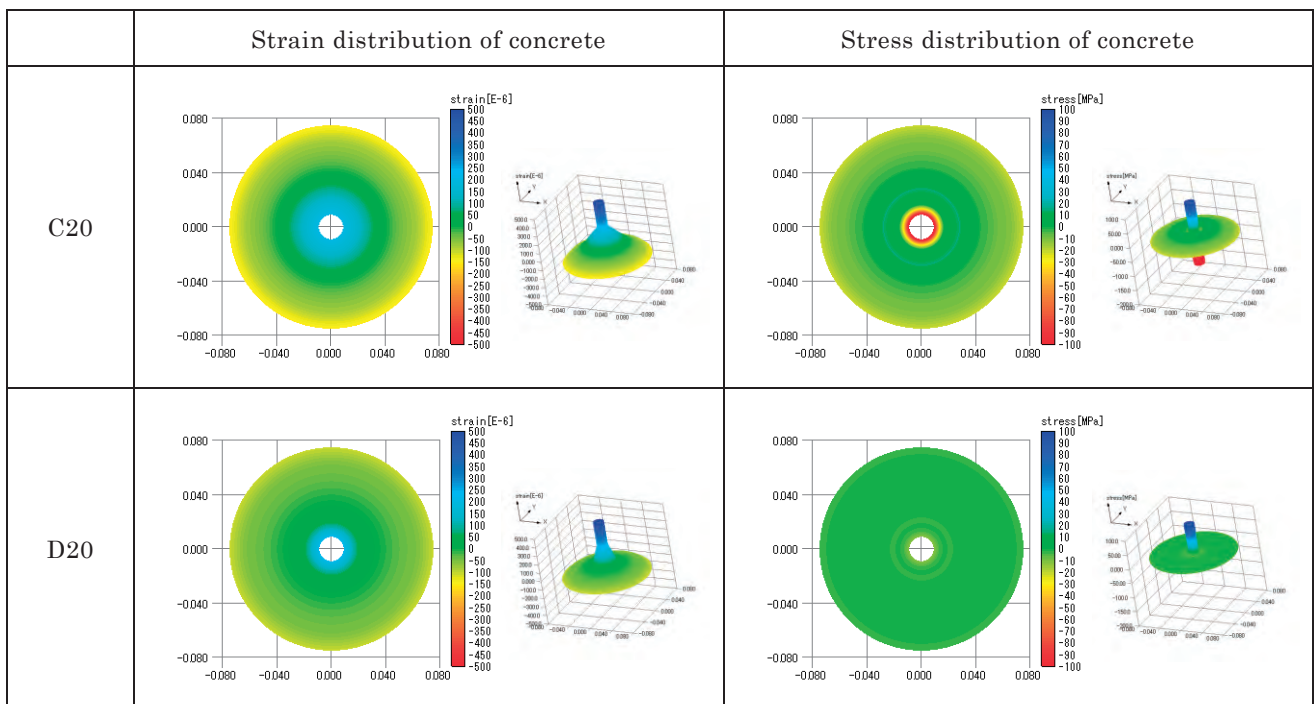


Fig.12 Analytical results (concrete : C20 and D20)

大きな引張応力が発生し、外側に向けて徐々に圧縮応力が大きくなっている。ひずみも同様な傾向が見られる。

分布荷重として計算した場合 (Fig.10,11:D10)、コンクリート面ではほぼ均一な応力分布となる。ひずみ分布をみると、中心部に多少の引張ひずみが発生し、外側に圧縮ひずみが発生していることがわかる。

ゴム板内の状態は、ひずみは集中荷重 (C10) と分布荷重 (D10) で大きな差は見られないが、応力は集中荷

重の場合、全体的に大きな圧縮応力が発生している。

(3) ゴム板 20mm の場合 (Fig.12,13)

供試体断面の分布図はひずみ・応力共にゴム板 10mm の場合と大差はない。ゴム板内は、集中荷重の場合全体的に圧縮方向に大きく偏っている。分布荷重の場合は、ひずみが集中荷重と比べ変化の仕方は緩やかだが、それでも他と比べると激しい変化が見られる。

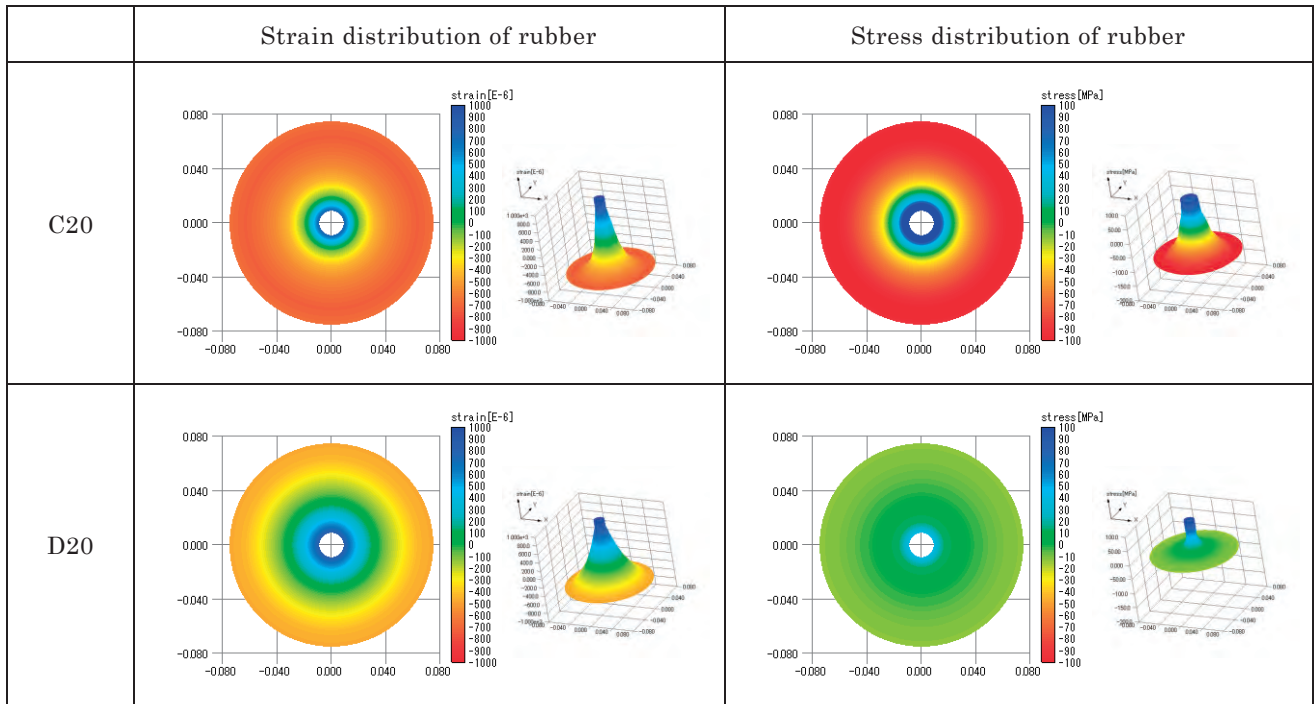


Fig.13 Analytical results (rubber : C20 and D20)

Table 5 Comparison of experimental results with analytical ones (mean surface concrete strains : P=30kN)

Rubber tickness [mm]	0	10	20
Experiment*	-1.0 μ	+26.3 μ	+56.4 μ
Analysis*	-30.0 μ	+103.0 μ	+153.5 μ

* Positive in compression

以上の解析結果から、集中荷重で考えた場合と分布荷重で考えた場合では断面に生じるひずみ・応力は異なっていることが分かる。

それらの傾向としては、

- 1) 緊張力を集中荷重として扱う場合、接合面コンクリートの応力分布は中心部が圧縮され、周辺ではほとんど発生しない。
- 2) 緊張力を分布荷重として扱う場合、接合面コンクリートの応力分布は、全体に均一となる。
- 3) ゴム内の応力分布は PC 緊張力を集中荷重として扱った場合に不均一の程度が非常に大きくなる。

以上の事から、設計では PC の局所的な緊張力を等分布荷重として扱っているが、実際のひずみ、応力分布とは異なった仮定を用いて設計が行われている可能性が高いと考えられる。

(4) 実験結果との比較

Table 5 に、集中荷重 30kN 時におけるコンクリート外周ひずみの実験ならびに解析値を示す。t=0mm においては、実験・解析ともに引張ひずみが生じており、接合面

付近のコンクリート外周ひずみにおいて圧縮力の伝達がなされていないことが示されている。また、実験・解析双方において、ゴム厚が厚くなるにつれて外周ひずみが大きくなる傾向も一致している。

ただし、実験値と解析値の間には隔たりがある。これは前述したように、ゴムは非常に強い非線形性を示す超弾性体であり、解析で得られたようなゴム内ひずみの不均一性が大きい場合には、ゴム内の応力と均一な弾性係数を仮定して計算される応力との間に相当の差が生じることになるためである。

以上から、本解析は定性的な傾向をとらえることはできていると考えられるが、定量的な再現には至っていない。超弾性体はエネルギー密度関数によって応力の不変量が支配されることから、そのような特殊な構成則を解析に組み込む手法を成立させて再現性を担保する必要がある。

4. 結論

本研究では、ゴムとコンクリートの相互作用について、解析的に明らかにすることを目的に、ゴムとコンクリート界面での力学的挙動を実験的・解析的に再現した。その結果、以下の結論が得られた。

- 1) 集中荷重によって発生する接合面コンクリートの応力・ひずみは一樣には分布せず、緊張力導入位置付近で大きくなる傾向にある。その結果、端部において、応力伝達が行われない可能性がある。
- 2) 分布荷重としてモデル化した場合、接合面コンクリートの応力・ひずみは、全体に均一に生じる。

- 3) ゴム板の応力は、分布荷重だと均一に、集中荷重だと値の変化は激しくなる。
 - 4) ひずみに関してはゴム板の厚みが大きくなるにつれて値の不均一性が顕著に現れることが示された。
- これらのことから、設計において PC 緊張力を分布荷重としてモデル化して算出された応力は、実際の PC 緊張力により生じる局所的な応力を大幅に下回って見積もっている可能性がある。また、今回は軸圧縮力のみに絞って検討したが、曲げの作用がある場合には、さらにこの影響が顕著になる可能性も否定できない。したがって、接合面周辺の安全性の確保のためには、PC 緊張力のモデル化について、一層の検討が必要であると考えられる。

謝辞

コンクリート供試体の圧縮強度試験ならびに弾性係数の測定に際して、大同大学・木全博聖博士のご協力をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 丸山貴吉・福室順也・笠井哲郎・中野友裕：PC 緊張力による圧着接合面周辺のひずみ状態に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，pp.481-486，2013.7
- 2) 深堀美英：設計のための高分子の力学，pp.1-46，技報堂出版，2000
- 3) S.Yamaguchi, Y.Sonoda, T.Maruyama and T.Nakano : An Experimental Study on Strain Distribution of Concrete Adjacent to Prestressed Joint, 土木学会関東支部第 41 回技術研究発表会 CD-Rom, V-46, 2014.3
- 4) 鷺津久一郎編：有限要素法ハンドブック I（基礎編），pp.335-343，培風館，1981
- 5) H.Ono, K.Kimura, T.Maruyama and T.Nakano : An Analytical Study on Strain Distribution of Concrete Adjacent to Prestressed Joint, 土木学会関東支部第 41 回技術研究発表会 CD-Rom, V-47, 2014.3