

論文 有限要素法解析によるせん断力を受ける密に配置した複数本のアンカー筋に関する研究

杉原 裕二郎*1・田島 祐之*2・保木 和明*3・毎田 悠承*4

要旨: 本研究ではアンカー筋を対象としたせん断実験において、調べるのが困難なコンクリート内部の損傷状況などを把握するため、有限要素法解析を行った。アンカー筋 1 本の解析結果は、実験結果と概ね良好に対応した。このモデルを複数本（密に配置した場合も含む）に拡張して解析した結果では、荷重-変形関係の初期剛性は解析結果の方が高めに評価されるものの、せん断変位 4mm にて実験結果と概ね良好に対応した。さらに、埋込み深さ方向のアンカー筋降伏位置は 1 本と複数本の場合と同様であることや、コンクリートの軟化の傾向を解析により明らかにした。

キーワード: 有限要素法解析, せん断性状, コンクリートひび割れ性状, アンカー筋降伏, あと施工アンカー

1. はじめに

大規模地震に備えて耐震補強性能の向上が望まれている昨今、コンクリートと鋼構造の高強度接合の開発をめざし、筆者らの数名は群杭効果を視野に入れた密に配置した複数本のあと施工アンカーに対するせん断加力実験を実施してきた(例えば¹⁾・²⁾。諸材料の高強度化に伴って、より接合部の挙動が重要視される中、複数本のあと施工アンカーに関するせん断挙動には不明瞭な点が存在する。既往の実験¹⁾・²⁾では、コンクリート表面のひび割れ状況などは確認できるが、内部のひび割れや応力分布は確認できていない。そこで、本研究では接着系あと施工アンカーに関する三次元有限要素法解析(以下:FEM 解析)により、コンクリート内部のひび割れ状況などを検討した。まず、アンカー筋 1 本の解析結果を実験結果と比較し、解析モデルの妥当性を検証した。次にそのモデルを拡張し、2 本から 4 本の複数本のアンカー筋に関する解析を行い、アンカー筋間のコンクリート内部のひび割れ状況などにおいて分析を試みた。

2. 実験概要および解析概要

2.1 実験概要

既往の実験概要¹⁾・²⁾を図-1に示す。コンクリート盤(1200mm×1200mm×300mm)にアンカー筋(D10)を深さ $7d_a$ (d_a :呼び径)で埋込み、エポキシ樹脂にて接着を行った。摩擦の影響を考慮し、ナットで固定した荷重治具とコンクリート盤の接触面にテフロンシートを設け、図-1のようにせん断力をアンカー筋に導入した。なお、アンカー筋 1 本においては、既往実験に加えて追加実験(詳細は後述する)を行った。

2.2 解析概要

あと施工アンカーに関する解析モデルの概略を図-2に示す。解析はコンクリート系構造物の FEM 非線形解析用プログラム「FINAL」³⁾を用いた。

(1) 解析モデル

解析モデルは試験体および荷重の対称性を考慮し、加力軸に対して半分とし、実験よりコンクリートの損傷が見られた範囲より十分な大きさでモデリングした(400mm×150mm×100mm)。境界条件は、切断面上の全節点に対し X 方向並進のみ拘束し、コンクリート底面および側面は、コンクリート盤は鉄骨フレームにより、拘束されており移動しないのでコンクリートの底面と側面の全自由度を拘束した。荷重治具上面は Z 方向のみ拘束した。荷重治具側面の Y 方向に強制変位を与え、出力された反力の総和をアンカー筋に対するせん断力とした。

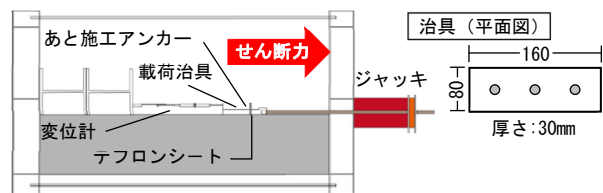


図-1 実験概要

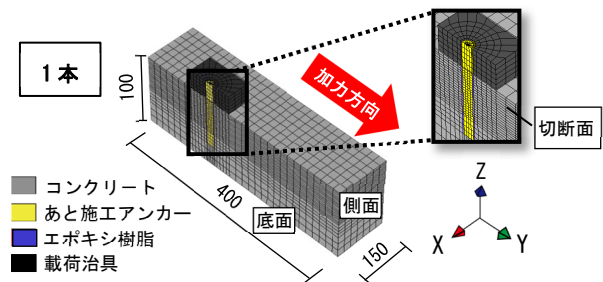


図-2 解析モデル

*1 愛知淑徳大学大学院 文化創造研究科建築・インテリアデザイン専修 (学生会員)

*2 愛知淑徳大学 創造表現学部創造表現学科准教授 博士(工学) (正会員)

*3 北九州市立大学 国際環境工学部建築デザイン学科准教授 博士(工学) (正会員)

*4 東京大学 地震研究所准教授 博士(工学) (正会員)

(2) メッシュ割

メッシュ割は全体的に応力の集中が予想される部分を細かく設定した。コンクリート、アンカー筋および載荷治具は六面体要素でモデル化した。アンカー筋のメッシュの大きさはアンカー筋断面を同心円状に二等分したため、半径の半分である 2.5mm とした。エポキシ樹脂は付着特性の定義が可能な要素(FILM 要素)とし、穿孔径 13mm に対し鋼材径を 10mm とし、厚さを 1.5mm とした。

(3) 材料構成則

材料実験による各材料物性値を表-1 に示し、コンクリートの材料構成則を図-3 に示す。圧縮強度および弾性係数は材料実験による値とし、引張強度および最大強度時のひずみは以下の式により決定した。

$$\sigma_t = 1.07\sigma_B^{0.566} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (1)$$

$$\varepsilon_p = 1.37\sigma_B + 1690 \quad [\mu] \quad (2)$$

ここで、 σ_t は一軸引張強度、 σ_B は一軸圧縮強度、 ε_p は一軸圧縮強度時のひずみである。圧縮側の特性は最大強度までを修正 Ahmad モデル⁴⁾を用い、最大強度時以降は破壊エネルギーに基づく中村・桧貝モデル⁵⁾とした。引張側の特性は引張強度時までを線形とし、引張強度時以降は出雲らのモデル⁶⁾を用い、係数 C を 1.0 とした。

鋼材の材料構成則を図-4 に示す。圧縮側および引張側ともに Bi-Linear 型とし、降伏後の剛性は弾性剛性 E_s に対し $E_s/100$ とし、鋼材要素の多軸応力下の降伏条件は Von Mises の降伏条件とした。エポキシ樹脂の材料構成則を図-5 に示す。解析の安定性を考慮し、また実験後の状況より、樹脂が圧壊していないことから、軸方向の特性は樹脂メーカーの示す規格値の下限値 Bi-Linear 型で仮定した。せん断方向は十分大きな剛性とした。

(4) 材料間における付着のモデル化

材料間における付着のモデル化の概要を図-6 に示す。付着は、「アンカー筋とエポキシ樹脂間」および「コンクリートとエポキシ樹脂間」で発生するが、コンクリートとエポキシ樹脂間のみ付着すべりを厚さ 0mm の FILM 要素で定義した。コンクリートとエポキシ樹脂のせん断方向(すべり方向)の特性は、文献 8), 9)における接着系アンカーの平均付着強度と付着実験をもとに図-7 の

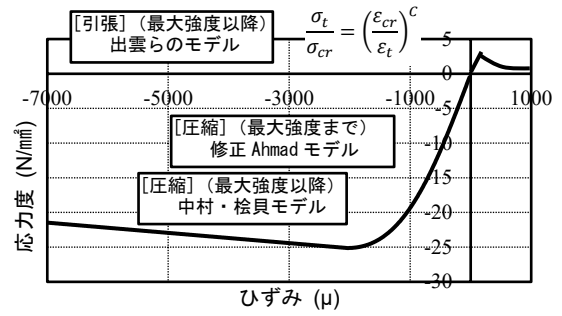


図-3 コンクリートの材料構成則

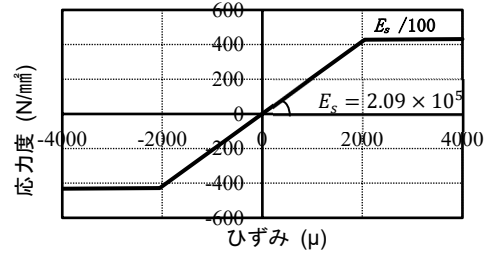


図-4 鋼材の材料構成則

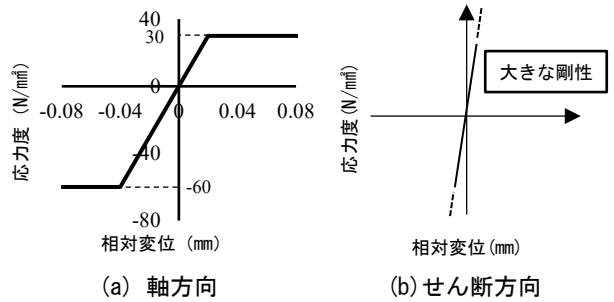


図-5 樹脂の材料構成則

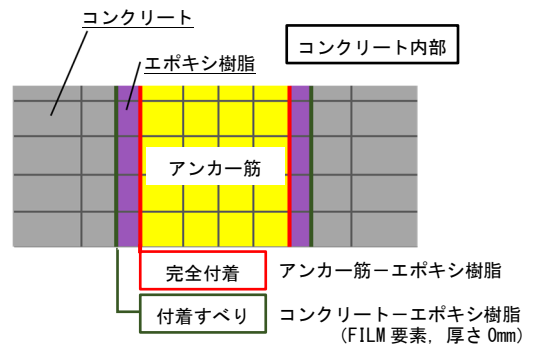


図-6 付着のモデル化の概要

表-1 材料物性値

	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)
コンクリート	23.12	2.42	2.46 × 10 ⁴
	降伏強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	剛性低下率
アンカー筋	428	2.09 × 10 ⁵	0.01
	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)
エポキシ樹脂	60	30	1500

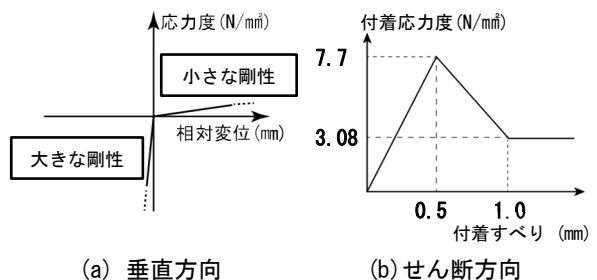


図-7 付着の構成則

ように決定した。また、垂直方向の特性は、圧縮時は十分に大きな剛性とし、引張時には応力度が小さくなるように十分小さな剛性とした。なお、アンカー筋とエポキシ樹脂間は節点を共有する完全付着とした。

3. アンカー筋 1 本の解析結果

せん断力を負担する 1 本のあと施工アンカーについて解析を行った。実験はアンカー筋が破断するせん断変位の 10mm から 20mm 付近まで行われたが、解析は外側耐震改修マニュアル¹⁰⁾上において、あと施工アンカーの水平変形量の制限値である 2mm の 2 倍であるせん断変位 4mm まで行った。なお、実験が同材料特性で複数回行われた試験体があるため、まとめて比較を行った。

3.1 せん断荷重—せん断変位関係

表-2 にアンカー筋 1 本の試験体諸元を示す。試験体 (a), (b), (d) は各 2 体ずつ筆者らが追加実験を行ったものも含まれている。アンカー筋 1 本において、アンカー筋鋼種 (SD295A・SD390) とコンクリート強度 (22~29N/mm²) の異なる試験体を対象とした解析を行った。せん断荷重—せん断変位関係を図-8 に示す。なお、解析結果は実線、実験結果は点線で示す。試験体(a), (b)では、履歴全体は解析結果が実験結果を上回ったものの、せん断変位 4mm 時のせん断荷重が実験結果と概ね同等であった。試験体(c), (d)では、履歴の初期段階において前述の試験体(a), (b)の傾向に比べると、実験結果と概ね対応していたが、履歴全体は解析結果が実験結果を上回った。

3.2 コンクリート表層部のひび割れ状況

図-9 に試験体(a) の実験後のコンクリートひび割れ状況と解析結果におけるせん断変位 4mm 時のひび割れを重ねて示す。点線は実験結果のひび割れ範囲を示し、実線は解析上のひび割れ、黒く塗られた部分は実験で発生した空隙を示す。実験中は、治具によりコンクリートの損傷を確認できないため、実験終了後のひび割れの傾向のみを比較した。解析結果は、加力方向に実験結果と同様なひび割れの傾向を確認した。また、アンカー筋背面のひび割れ範囲は実験結果よりも大きく評価している。しかし、巨視的に見ると、ひび割れ範囲の傾向として解析結果は実験結果を概ね再現できていると判断した。また、他の試験体 (b), (c), (d) においても同様の傾向を確認した。ただし、実験後のアンカー筋背面に剥離による空隙が発生していたが、解析上では見られなかった。

3.3 アンカー筋の降伏状況

図-10 に試験体(a) のアンカー筋の降伏状況を示す。図-10 中、右側は剛性低下点付近の変位と考えられるせん断変位 1mm 時の降伏状況も併せて示す。解析結果において、アンカー筋は、まずせん断変位 0.23mm 時にコンクリート表面付近で降伏が見られた。その後、せん断

表-2 アンカー筋 1 本の試験体諸元

	鋼種	鉄筋径	埋込深さ	σ_B	試験体数
(a)	SD390	D10	$7d_a$	25.12 (N/mm ²)	1+2 (体)
(b)	SD390			23.12 (N/mm ²)	1 (体)
(c)	SD295A			22.46 (N/mm ²)	1+2 (体)
(d)	SD295A			29.34 (N/mm ²)	1+2 (体)

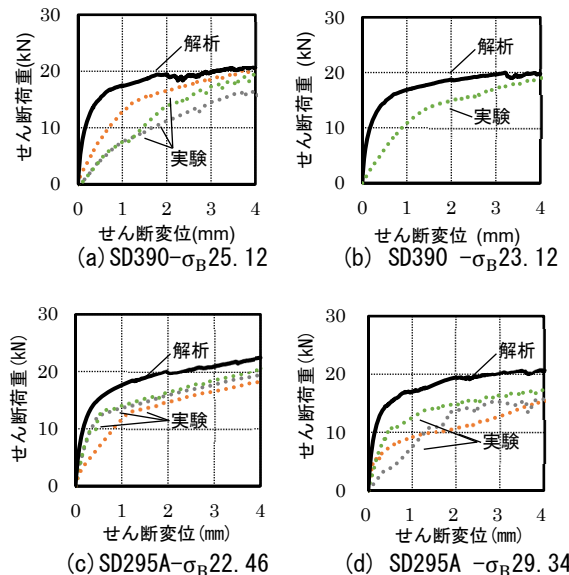


図-8 アンカー筋 1 本のせん断荷重—せん断変位関係

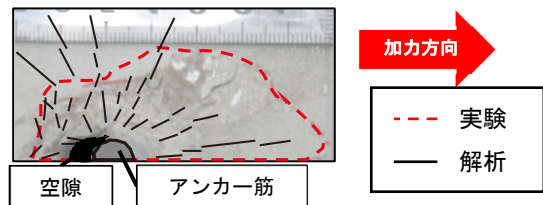


図-9 コンクリートひび割れの比較 (試験体(a))

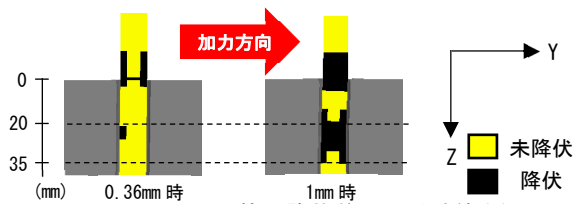


図-10 アンカー筋の降伏状況 (試験体(a))

変位 0.36mm 時にコンクリート表面から埋込み方向 (Z 方向) 20mm の位置に降伏が見られた。この降伏位置 20mm は、文献 11)によるアンカー筋の塑性化位置に関する計算式で算出される、埋込み深さ 23.7mm と比較すると、この差は埋込み方向のメッシュ割寸法に寄与されるため、ほぼ同様と判断した。また、せん断変位 1mm 時には埋込み方向 35mm まで降伏範囲が拡大した。次章では、アンカー筋 1 本の解析モデルを拡張し、2 本から 4 本のアンカー筋の解析を行った。

4. 複数本のアンカー筋の実験結果および解析結果

アンカー筋2本から4本の実験結果と解析結果を併せてせん断荷重—せん断変位関係を図-11に示す。図中の点線は実験結果を、実線は解析結果を示す。試験体は全てD10(SD390)の鋼材を使用し、コンクリート圧縮強度は25.12(N/mm²)で行われたせん断実験を対象とした。アンカー筋ピッチは、2本から4本それぞれ10d_a、5d_a、3d_aであり、特に3本と4本では密に配置した試験体である。実験結果における図-11に一点鎖線で示したせん断変位0.5mm時のせん断荷重は、アンカー筋1本に対し2本は約1.4倍、3本は約1.7倍、4本は約2.1倍であり、本数倍に増大していない。

4.1 解析結果と実験結果の比較

図-11より解析結果と実験結果を比較し、複数本のアンカー筋の解析結果は、実験結果の履歴全体を上回った。前述したように初期剛性は、実験結果では本数倍に増大していないが、解析結果では本数倍に増大した。また、解析結果はせん断変位0.5mm以降において、緩やかに上昇した。アンカー筋4本では、せん断変位3.5mm時にコンクリートが損傷し、せん断荷重が急激に低下した。

一例として、実験終了後のアンカー筋3本の周辺の損傷状況を図-12に示す。アンカー筋1本と同様に、アンカー筋背面に剥離が生じていた。アンカー筋1本の場合は剥離により、アンカー筋背面では応力伝達しない。しかし、アンカー筋ピッチが短くなるにつれ、アンカー筋間のコンクリートは剥離の影響を受けやすくなると考えられる。そこで、アンカー筋間のコンクリートの最大強度時以降の応力度—ひずみ関係を変更することとした。

図-13に圧縮のみを変更したコンクリートの材料構成則を示す。解析の安定性をもとに定義した中村・楢貝モデル⁹⁾から、アンカー筋間のコンクリートにおいて、最大強度時以降の履歴をより大きな応力低下を考慮したコンクリートモデルに変更した。

図-14に変更したコンクリートの適用範囲を示す。変更した緑で示した領域はコンクリート表層部から埋込み方向に22.5mmまでの範囲とした。これは、算定式¹¹⁾から算出される埋込方向への降伏位置の約24mmを参考に仮定した。これ以降、このモデルを適用した解析モデルを変更モデルと呼ぶ。

図-15にせん断荷重—せん断変位関係を示す。図中のアンカー筋2本から4本は、変更モデルの解析結果である。変更前の解析結果と比較して、解析における剛性低下後の剛性が小さくなり、せん断変位4mm時のせん断荷重とほぼ同様になった。また、変更前にせん断変位3.5mm時に見られたコンクリートの損傷は緩やかになった。しかし、最大強度時以降の材料構成則のみ変更したため、実験結果に対して初期剛性は高かった。

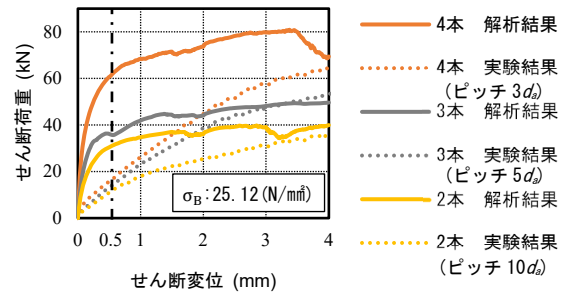


図-11 複数本のアンカー筋の実験結果および解析結果

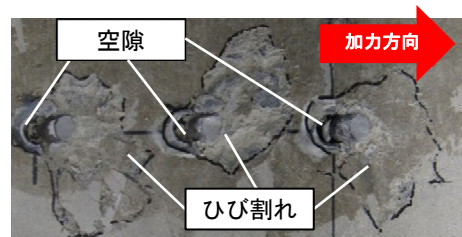


図-12 アンカー筋3本の周辺の損傷状況

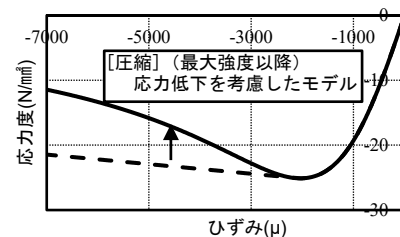


図-13 変更したコンクリートの材料構成則

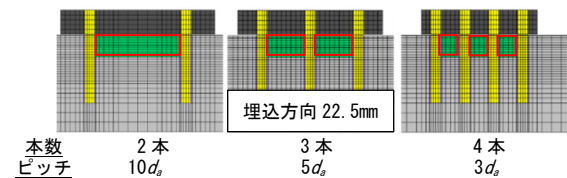


図-14 変更したコンクリートの適用範囲

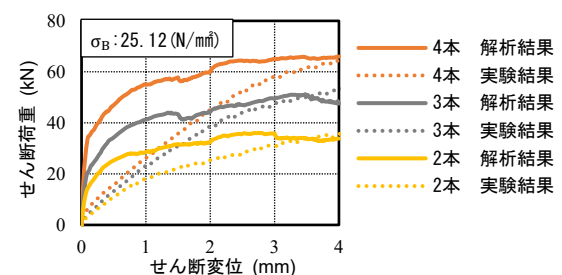


図-15 変更モデルの解析結果

4.2 アンカー筋の降伏状況

図-16に複数本のアンカー筋の降伏状況を示す。図-16中、上段はコンクリート内部で降伏が見られた各せん断変位時のアンカー筋降伏図を示す。アンカー筋2本から4本の解析結果において、せん断変位0.2mm、0.3mm、0.2mm時にコンクリート表面付近で降伏が見られた。

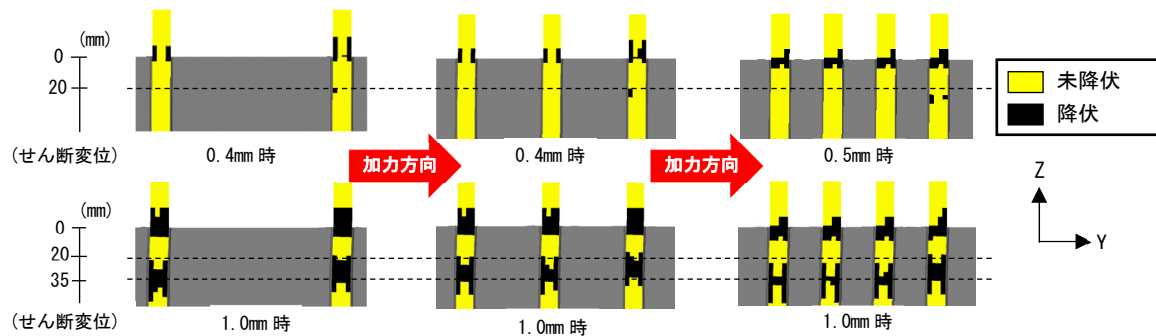


図-16 複数本のアンカー筋の降伏状況

その後、コンクリート内部で埋め込方向(Z方向)に2本と3本で20mmの位置で降伏、4本では22.5mmで降伏が見られた。これは、算定結果である埋め込み方向23.7mmとメッシュ割寸法を考慮すると同等であると考えられる。よって、アンカー筋の本数に関わらず、解析結果の降伏位置はほぼ変化しなかった。なお、変更前のモデルと変更モデルの降伏位置はほぼ同様であったため、コンクリートの材料構成則を変更した範囲に依存しない。

図-16中、下段はせん断変位1mm時のアンカー筋降伏図を示す。せん断変位1mm時の降伏範囲は先頭のアンカー筋が他のアンカー筋より2.5mmから5mmほど浅い。また、コンクリート表層部から埋め込方向に約35mmの位置まで拡大した。これは、アンカー筋1本のせん断変位1mm時の降伏範囲と等しい。

4.3 コンクリートのひび割れ状況

図-17にアンカー筋4本の解析によるせん断変位2mm時のコンクリートひび割れ状況を示す。コンクリートの軟化が生じる範囲はせん断荷重の増大とともにコンクリート表層部より埋め込方向に徐々に拡大し、せん断変位2mm時に埋め込方向約35mm位置まで分布した。また、加力方向および埋め込方向におけるコンクリートの軟化した範囲は、先頭のアンカー筋の前方で最も広く、後方のアンカー筋の周辺ほど範囲は狭くなった。

4.4 アンカー筋のMises応力

図-18にせん断変位4mm時の解析によるアンカー筋4本のMises応力図を示す。Mises応力はコンクリート表面付近で最も大きい。応力差はそれぞれ加力方向に対して先頭と二番目で26.4N/mm²であり、二番目と四番目のアンカー筋の差は、最大で約6.1N/mm²であった。

4.5 コンクリートの最小主応力

図-19にアンカー筋4本の解析によるせん断変位2mm時のコンクリートの最小主応力図を示す。外側耐震改修マニュアル¹⁰⁾の基準である数値で図示した。なお、せん断変位4mmとの応力状態の傾向は同様であった。実線内はアンカー筋間のコンクリート、点線内はその他のコンクリートを示す。実線内のコンクリートの最小主応力は最も大きかった。アンカー筋間のコンクリートの

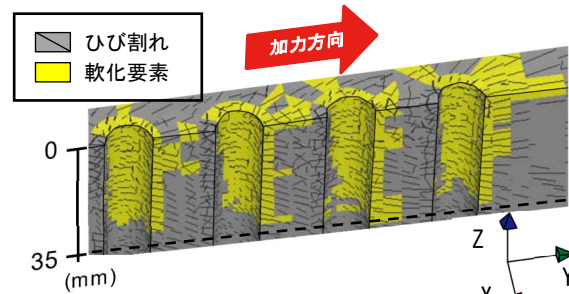


図-17 アンカー筋4本のコンクリートひび割れ状況

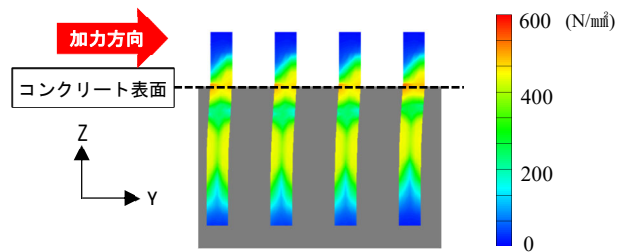


図-18 アンカー筋4本のMises応力図

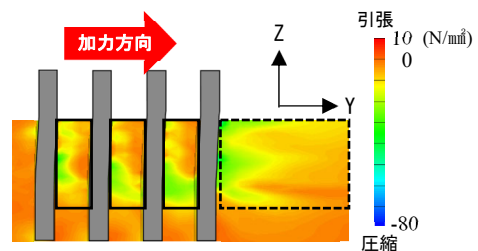


図-19 アンカー筋4本による最小主応力図

材料構成則を変更したことにより、点線内のコンクリートの圧縮領域の分布に変更前と変更後において差が生じた。しかし、最小主応力の違いは前節のMises応力の差に寄与しなかった。

以上より、変更後の解析結果と実験結果をせん断荷重-せん断変位関係より比較し、特に初期剛性にて乖離が見られた。その理由を以下に示すように考察した。

文献12)にて、スタッド間のピッチが狭くなればスタッド付近のコンクリートのひずみに対して進行度合に差が発生するため支圧応力に影響し、またスタッド周辺の剥離による空隙の発生により、各スタッドの負担率に差

が見られたことが報告されている。実験上で、アンカー筋背面にて剥離による空隙の発生を確認している。しかし、せん断変位 4mm 時の解析結果における各アンカー筋の負担率は加力方向に対して先頭のアンカー筋から約 25.9%, 24.6%, 24.6%, 24.9%とほぼ同様であった。よって、変更モデルは剥離を考慮しておらず、せん断荷重-せん断変位関係において実験結果との乖離が発生したと考えられる。剥離を考慮する方法は現在検討中である。

さらに、実験結果と乖離した原因は実験状況にもあると考える。アンカー筋 2 本から 4 本の実験結果と比較し、せん断変位 4mm 時にはせん断荷重が概ね良好に対応した。しかし、せん断変位 2mm までは実験結果の初期剛性を上回った。本解析対象としたせん断実験では、せん断変位の小さい範囲では、載荷治具とアンカー筋の施工誤差によって剛性の低下が発生すると考えられる。さらに、せん断変形が増大するほど剛性低下は小さくなることがある。よって、せん断変形が小さい範囲で実験結果と乖離し、せん断変形の増大に伴って対応したと考察した。今後は、より精度の高い実験が必要であると考えられる。

5. 結論

せん断力を負担するあと施工アンカー 1 本と 2 本および密に配置した 3 本および 4 本に関する有限要素法解析を行った。本研究により得られた結果を以下に示す。

- 1) アンカー筋 1 本のせん断荷重-せん断変位関係は、試験体によって異なるが、全体的には解析結果は実験結果を概ね良好に対応した。コンクリート表面のひび割れ状況も、実験終了後と同様の傾向であった。
- 2) アンカー筋 2 本から 4 本の変更モデルより、初期剛性は実験結果に比べて上回ったものの、せん断変位 4mm は実験結果と概ね良好に対応した。
- 3) アンカー筋 1 本の解析による降伏状況について、コンクリート内部で降伏が見られた位置は、埋込み方向に 20mm の位置であった。これは文献 11) の算定結果と同様であり、複数本でも同様であった。
- 4) 解析結果におけるアンカー筋 4 本のコンクリートひび割れにおいて、加力方向と埋込方向のコンクリートの軟化した範囲は、先頭のアンカー筋の前方が最も広く、後方のアンカー筋の周辺ほど軟化範囲は狭かった。コンクリート内部の最小主応力においても、先頭のアンカー筋の前方が最も大きかった。

謝辞

本研究は、愛知淑徳大学研究助成・特定課題研 No.23TT11 を受けて実施した。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 保木和明, 田島祐之: 密に配置したあと施工アンカーの耐力評価 その 1 あと施工アンカー 1 本当たりの最大せん断耐力と正側繰返し載荷の検討, 日本建築学会九州支部研究報告, 第 57 号, pp.565-568, 2018.3
- 2) Yuji Tajima, Kazuaki Hoki.: Fracture Concrete Behavior of Multiple Adhesive Post-Installed Anchors Subjected to Shear Force, CTU Journals, Vol.33, pp.597-603, 2021.3
- 3) 伊藤忠テクノソリューションズ (株): FINAL HELP, 2018.5
- 4) 長沼一洋: 三軸圧縮下のコンクリートの応力-ひずみ関係, 日本建築学会構造系論文集, 第 474 号, pp.163-170, 1995.8
- 5) H. Nakamura, T. Higai: Compressive Fracture Energy and Fracture Zone Length of Concrete, Seminar on Post-peak Behavior of RC Structures Subjected to Seismic Load, JCI-C51E, Vol.2, pp.259-272, 1999.10
- 6) 出雲淳一, 島弘, 岡村甫: 面内力を受ける鉄筋コンクリート板要素の解析モデル, コンクリート工学論文, Vol.25, No.87.9-1, pp.107-120, 1987.9
- 7) 日本デコラックス ”ケミカルアンカー®「カートリッジ型-注入方式 GL タイプ 製品情報”」参照: https://www.decoluxe.co.jp/product/product_category/adhesive-anchor/chemicalanchor/gl450/ (閲覧日: 2022 年 10 月 2 日)
- 8) 瀬戸口英恵ほか: 湿式コアドリル工法によるあと施工アンカーの性能確認実験(その 2) 注入式アンカーを用いた付着性能実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2 分冊, 構造 IV, pp.149-150, 2010.9
- 9) 六車熙, 森田司郎, 富田幸次郎: 鋼とコンクリートの付着に関する基礎的研究: I 付着応力分布について-II, 日本建築学会論文報告集, 第 132 巻, pp.1-6, 1967.2
- 10) 日本建築防災協会: 既存鉄筋コンクリート造建築物の外側耐震改修マニュアル, 2002.9
- 11) 高瀬裕也, 和田俊良, 池田隆明, 篠原保二: 繰返しせん断力を受ける接着系あと施工アンカーの力学モデル, 日本建築学会構造系論文集, 第 77 巻, 第 682 号, pp.1915-1924, 2012.12
- 12) 保木和明, 羅雲標, 中島正愛: SFRCC と密に配置した鋼製スタッドによる接合の耐力評価, 日本建築学会構造系論文集, 第 77 巻, 第 676 号, pp.975-984, 2012.6