

論文 大口径深礎への太径・高強度帯鉄筋の適用性に関する研究

齋藤 公生^{*1}・一宮 利通^{*2}・酒井 修平^{*3}・長尾 千瑛^{*4}

要旨：山間部に建設される橋梁では基礎形式に大口径深礎が多く用いられている。大口径深礎のせん断補強鋼材として多数の中間帯鉄筋が配置された場合、施工性ならびに作業の安全性の低下が懸念される。一方、太径・高強度帯鉄筋を適用できれば中間帯鉄筋の省略が可能である。そこで、本研究では大口径深礎の断面形状を模した円形 RC 部材に高強度帯鉄筋を配置してせん断実験を行い、大口径深礎への太径・高強度帯鉄筋の適用性を確認した。さらに、中間帯鉄筋を有する試験体を用いたせん断実験も行い、中間帯鉄筋がせん断特性に与える影響が小さいことを確認した。また、3 次元 FEM 解析によって、実験の再現性を確認した。

キーワード：大口径深礎、せん断補強鋼材、高強度鉄筋、中間帯鉄筋

1. はじめに

大口径深礎は、大型の建設機械を必要としないため、山間部での橋梁基礎に適用実績の多い形式である。この大口径深礎にせん断補強鋼材を配置する場合、まず断面の外周に沿った帯鉄筋を配置した後、中間帯鉄筋を断面内に格子状に配置するのが一般的である。兵庫県南部地震以降の耐震基準の改定に伴い、橋梁の基礎に要求されるせん断耐力が増大する傾向にあり、結果として大口径深礎に多数の中間帯鉄筋が配置されるケースが増加している（写真－1）。

大口径深礎に多数の中間帯鉄筋が配置される場合、鉄筋の組立て作業ならびにコンクリートの打込み作業の効率が著しく低下するうえ、作業の安全性の低下も懸念される¹⁾。このような場合、太径・高強度の鉄筋を帯鉄筋として使用し、中間帯鉄筋を排除できれば、施工性や作業の安全性の向上が期待できる（写真－2）。

しかしながら、帯鉄筋を太径・高強度化した場合、せん断破壊時の斜めひび割れ幅が過大になり、ひび割れ面における骨材のかみ合い等によって伝達されるせん断力が低下する恐れがある。このような背景から、設計要領第二集では帯鉄筋径の上限を D29 とし²⁾、太径化が制限されている他、コンクリート標準示方書ではせん断補強鋼材の設計降伏強度の上限を 400N/mm^2 とし³⁾、高強度鉄筋の使用が制限されている。

そこで、本研究では大口径深礎に SD490-D38 の太径・高強度帯鉄筋を使用した場合のせん断耐力の確認を目的に、円形 RC 部材の試験体を用いてせん断実験を行った。同時に、中間帯鉄筋が大口径深礎のせん断特性に与える影響の確認を目的に、中間帯鉄筋を有する試験体を用いてせん断実験を行った。さらに、試験体数が少ないこと

から、3 次元非線形 FEM 解析を行って、せん断実験の再現性を確認した。



写真－1 中間帯鉄筋が多数配置された大口径深礎の例
（(株) 都建設 HP より転載）



写真－2 中間帯鉄筋が配置されない大口径深礎の例

*1 鹿島建設（株） 土木設計本部 構造設計部 橋梁グループ 担当部長 工修（正会員）

*2 鹿島建設（株） 技術研究所 土木構造グループ 上席研究員 工修（正会員）

*3 中日本高速道路（株） 名古屋支社 建設事業部 計画設計チーム サブリーダー 工修

*4 中日本高速道路（株） 名古屋支社 建設事業部 計画設計チーム 工修

2. 実験の概要

2.1 実験の目的

本研究は円形断面の大口径深礎への太径・高強度帯鉄筋の適用性確認を目的としている。これまでに、コンクリート圧縮強度 30N/mm^2 以下の RC 部材のせん断補強鋼材に、高強度鉄筋を用いた場合の実験が行われ、せん断耐力評価式が提案されているが⁴⁾、矩形断面の試験体を用いたものであり、円形断面部材のせん断耐力を実験により確認した研究は少ない。また、中間帯鉄筋が大口径深礎のせん断特性に与える影響を検討した研究も少ない。

そこで、本実験は以下を目的として実施した。

- ・比較的強度の低いコンクリートに高強度せん断補強鋼材を使用した円形断面部材のせん断耐力の確認
- ・部材断面内に配置される中間帯鉄筋がせん断特性に与える影響の確認

2.2 実験対象と試験体の諸元（図－1、表－2）

(1)対象とする大口径深礎

本実験は、新東名高速道路の一部として建設される PC 箱桁橋（野田川橋、小阿寺川橋）の大口径深礎を対象とした（表－1）。両橋ともに有効幅員は 10.750m である。山間部に建設される PC 箱桁橋としては一般的な規模であり、実験の対象として適当と考えた。

(2) 試験体の断面寸法

試験体の断面形状は大口径深礎を模して円形とし、対象とする大口径深礎で「帯鉄筋径／有効高さ」が最も大きい小阿寺川橋の下 P3 の $1/10(=800\text{mm})$ を直径とした。試験体の直径の設定に当っては、(7)で述べる試験体の有効高さが高強度帯鉄筋の径の関係を考慮した。寸法効果については、有効高さの関数として別途評価した。

(3) 試験体のコンクリート強度

コンクリート強度はせん断耐力に直接影響を及ぼす。

そこで、本実験では載荷試験実施時点での圧縮強度が、対象とする大口径深礎の設計基準強度である 24N/mm^2 となるような配合とした。

(4) 試験体のせん断スパン比

対象とする大口径深礎のせん断スパン比は $0.69\sim 1.47$ の範囲にあり、ディープビームに分類される。しかしながら、周囲が岩盤に拘束された大口径深礎がディープビームとしての挙動を示すとは限らず、破壊形態が明らかにされていないのが現状である。

一方で、現行の設計基準では大口径深礎のせん断耐力として、一般に棒部材の斜め圧縮破壊耐力より小さい斜め引張破壊耐力が用いられている。そこで、本実験ではせん断耐力のうち斜め引張破壊耐力を確認することとし、過去の実験⁴⁾を参考に試験体が斜め引張破壊する範囲で小さめのせん断スパン比 2.55 に設定した。

(5) 試験体の軸方向鋼材

曲げ破壊の先行を回避するため、軸方向鋼材として総ネジ PC 鋼棒 SBPD930/1080- $\phi 36$ を全周に 16 本配置した。

(6) 試験体の帯鉄筋比

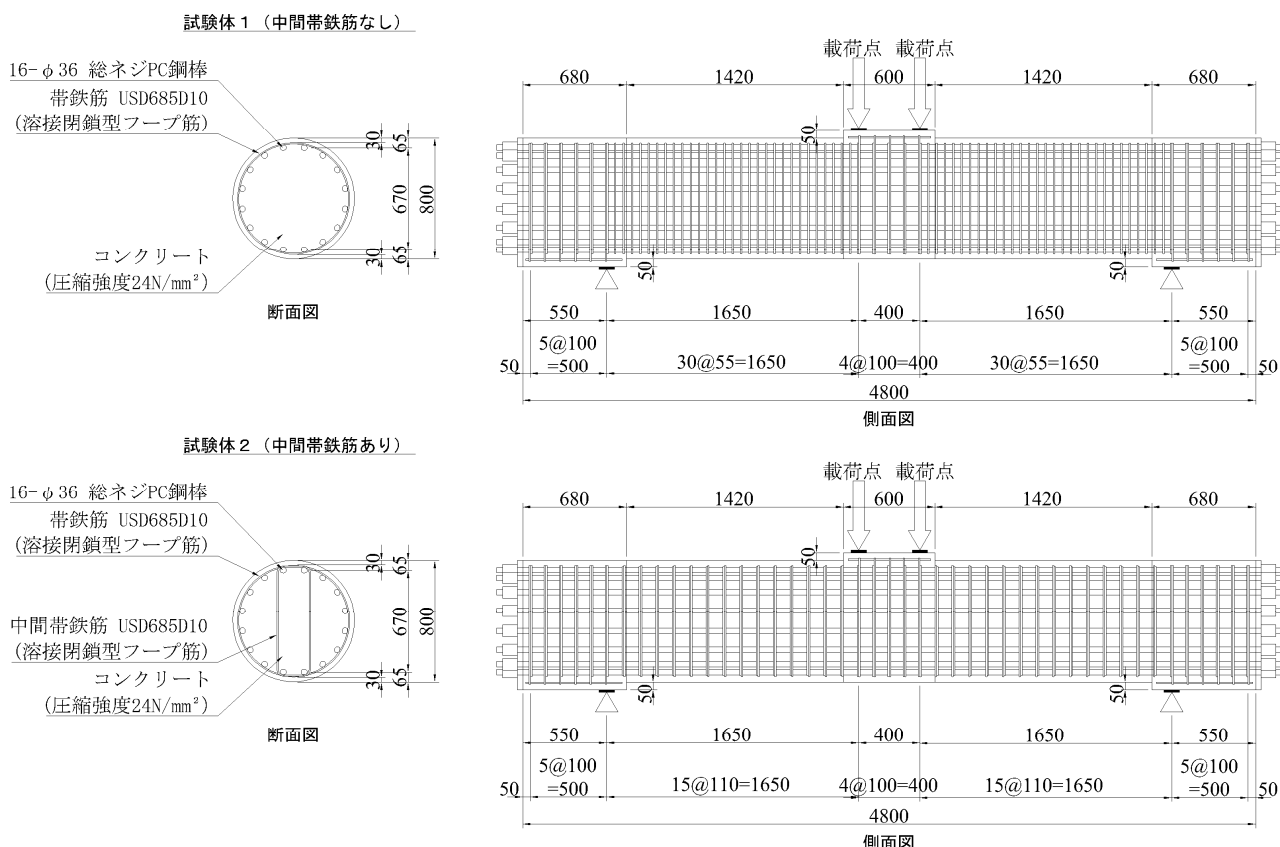
帯鉄筋比を本実験の対象とする大口径深礎 10 基の平均値 0.37% とした。中間帯鉄筋の影響を明らかにするため、中間帯鉄筋を配置しない試験体 1 と中間帯鉄筋を配置する試験体 2 の帯鉄筋比を同一とし、帯鉄筋の配置間隔を試験体 1 で 55mm 、試験体 2 で 110mm とした。

(7) 試験体の有効高さ

有効高さに対して帯鉄筋径が大きくなると、帯鉄筋の断面積に対して付着面積が小さくなり、せん断耐力は帯鉄筋径と有効高さの比「帯鉄筋径／有効高さ」に依存して低下することが確認されている⁵⁾。そこで、「帯鉄筋径／有効高さ」を対象とする大口径深礎における最大値 0.0055 より大きく設定した。

表－1 対象とする大口径深礎の諸元

橋名	橋脚	直径 (mm)	有効高さ (mm)	コンクリート 設計基準強度 (N/mm^2)	帯鉄筋			帯鉄筋比 (%)	(帯鉄筋径) (有効高さ)
					種類	段数	配置間隔 (mm)		
野田川橋	上P1	9500	8112	24	SD490-D38	2	150	0.36	0.0047
	上P2	9500	8269	24	SD490-D32	2	150	0.25	0.0039
	下P1	9000	7822	24	SD490-D38	2	150	0.38	0.0049
	下P2	9500	8269	24	SD490-D32	2	150	0.25	0.0039
小阿寺川橋	上P1	8500	7312	24	SD490-D35	2	150	0.51	0.0048
	上P2	8000	9621	24	SD490-D35	2	150	0.36	0.0051
	上P3	8000	9621	24	SD490-D32	2	150	0.30	0.0046
	上P5	8500	7368	24	SD490-D32	2	150	0.28	0.0043
	下P1	8500	7346	24	SD490-D35	2	150	0.34	0.0048
	下P2	8000	6865	24	SD490-D35	2	150	0.54	0.0051
	下P3	8000	6921	24	SD490-D38	2	150	0.43	0.0055
	下P5	8500	7346	24	SD490-D38	2	150	0.40	0.0052
平均値								0.37	0.0047



図ー1 試験体配筋図

表ー2 試験体の諸元

項 目	諸 元	根 拠 等
断面形状	円形	大口径深礎と同じ形状
直径	800mm	対象の大口径深礎の 1/10
コンクリート強度	24N/mm ²	大口径深礎の設計基準強度，載荷時の強度が 24N/mm ² となる配合
最大粗骨材寸法	20.0mm	試験体用コンクリートへの使用実績あり，寸法効果は(1000/d) ^{1/4} で考慮
断面高さ	710mm	円形断面を断面積が等価な正方形断面として算出
有効高さ	646.5mm	
断面幅	710mm	
せん断スパン比	2.55	既往の梁のせん断実験 ⁴⁾ 相当
軸方向鋼材	SBPD930/1080-φ32	曲げ破壊の先行を回避，実降伏強度：1034N/mm ²
(中間)帯鉄筋の種類	SD685-D10	SD490 以上，付着効率が対象構造物の 1/3 程度，実降伏強度：834N/mm ²
(中間)帯鉄筋比	0.37%	対象構造物の平均，試験体 1 と試験体 2 で同一
帯鉄筋径／有効高さ	0.0155	対象構造物のなかの最大値の 3 倍，付着効率が対象構造物の 1/3

一方，実構造物では帯鉄筋の下側にブリーディング水が溜る等，鉄筋径以外の要因で帯鉄筋の付着性能が低下する恐れがある。そこで，試験体では高強度帯鉄筋に D10 鉄筋を使用し，「帯鉄筋径／有効高さ」を対象とする大口径深礎の 3 倍程度となる 0.0155 とした。

2.3 載荷方法と計測項目

(1) 載荷方法

5000kN 用アムスラーを使用し，試験体中央に 400mm の等曲げ区間を設けた 2 点集中の単調載荷とした（図ー1，写真ー3）。載荷点および支点には，テフロン支承を設置し，同箇所回転，水平変位を自由とした。

(2) 計測項目

計測項目を表ー3 に示す。特に，本実験ではせん断スパン内の全ての帯鉄筋の図心位置にひずみゲージを設置し，帯鉄筋のひずみ分布を計測した。

3. 実験結果および考察

3.1 実験結果

試験体 1 および 2 でのせん断力－たわみ関係を図ー2 に示す。同図には，測定した帯鉄筋の引張応力度の最大値が 345，490 N/mm²，および実降伏強度に達したときを示した。なお，載荷時点でコンクリートの実圧縮強度は，試験体 1 が 26.4N/mm²，試験体 2 が 27.0N/mm² であった。

表-3 計測項目

計測項目		箇所	着目する入力・応答等	計測機器
荷重		載荷点	載荷力, せん断力	ロードセル
変位	鉛直	当曲げ区間, せん断スパン中央, 支点	たわみ, 変形形状	変位計
	水平	支点	試験体のズレ	変位計
ひずみ	帯鉄筋	せん断スパンの全数	帯鉄筋のひずみ	ひずみゲージ
	主鉄筋	当曲げ区間	主鉄筋の降伏	ひずみゲージ
	コンクリート	当曲げ区間	コンクリートの圧壊	ひずみゲージ
ひびわれ		試験体全体	載荷ステップごとのひび割れ状況	目視

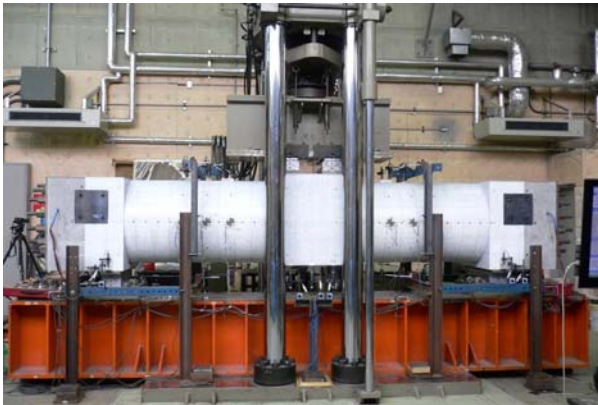


写真-3 載荷状況

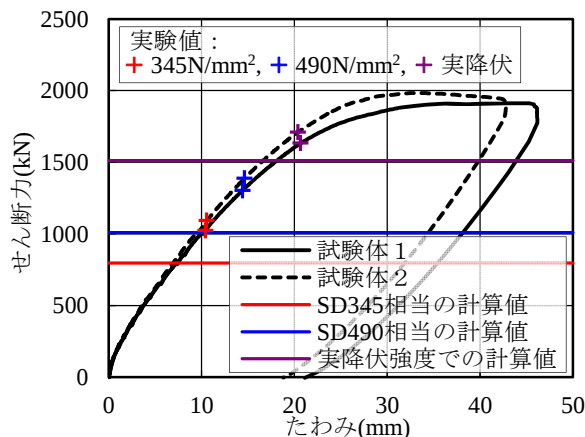


図-2 作用せん断力とたわみの関係

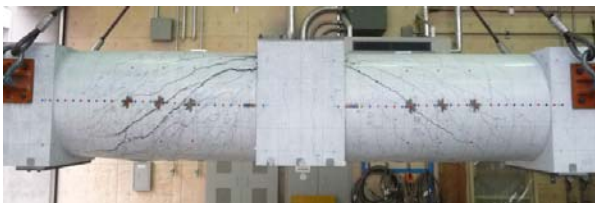


写真-4 実験終了後のひび割れ状況（試験体1）

試験体1では、せん断力が1303kNの時点で帯鉄筋の最大ひずみから換算される応力度が490N/mm²に達した。1633kNの時点には帯鉄筋が実降伏強度に達した。帯鉄筋降伏後は、せん断力の漸増と共に斜めひび割れの幅が拡大し、たわみ量44.2mmの時に最大せん断力1911kNを記録して、せん断破壊に至った。試験体1の実験終了後の

ひび割れ状況を、写真-4に示す。

試験体2では、せん断力が1388kNの時点で中間帯鉄筋が先に490N/mm²に達し、せん断力が1711kNの時点で帯鉄筋が先に実降伏強度に達した。帯鉄筋降伏後は、試験体1とほぼ同様の挙動を示し、たわみ量33.5mmで最大せん断力1984kNを記録して、せん断破壊に至った。

3.2 考察

(1) 高強度帯鉄筋を用いた円形断面部材のせん断耐力
コンクリート標準示方書³⁾におけるせん断耐力式に、SD345, SD490の設計降伏強度および材料試験より得られた帯鉄筋の実降伏強度834N/mm²を適用し、安全係数等を1.0として求めた値を計算値として図-2に示す。また、帯鉄筋の応力度が上記の値に達した時のせん断力の実験値を、計算値と比較して表-4に示す。表-4中の計算値のカッコ内には、二羽らの研究⁵⁾によって提案された式により計算された値を併せて示す。

表-4 実験値と計算値の関係

試験体 No.	帯鉄筋の応力度 (N/mm ²)	せん断力(kN)		実験値/計算値
		実験値	計算値	
1	345	1023	796 (883)	1.29 (1.16)
	490	1303	1007 (1095)	1.29 (1.19)
	685	1530	1292 (1379)	1.18 (1.11)
	834	1633	1509 (1596)	1.08 (1.02)
2	345	1093	798 (886)	1.37 (1.23)
	490	1388	1010 (1098)	1.37 (1.26)
	685	1619	1294 (1382)	1.25 (1.17)
	834	1710	1511 (1599)	1.13 (1.07)

計算値に対する実験値の比「実験値/計算値」は、帯鉄筋の引張応力度の増加に伴って低下する傾向があるものの、帯鉄筋の引張応力度が834N/mm²に達した時点でも1.0を上回っている。せん断スパン比の影響を考慮する二羽式では、コンクリート標準示方書のせん断耐力式より精度が向上するが、二羽式との比較においても「実験値/計算値」が常に1.0を上回った。試験体1では、帯鉄筋の種類にSD345, SD490を想定した場合の「実験値/計算値」が同じ値1.29となった。試験体2でもSD345, SD490を想定した「実験値/計算値」が同じ値1.37とな

った。したがって、本実験から大口径深礎には太径・高強度帯鉄筋 SD490-D38 の適用が可能と考えられる。

黒岩らの研究⁶⁾によれば、帯鉄筋の降伏強度がコンクリートの圧縮強度の 25 倍以内であれば、計算値と実験値が良い整合を示すとされている。これに対し、今回の実験では、安全率の低下はあるもののコンクリートの圧縮強度の約 30 倍に相当する帯鉄筋の実降伏強度でも、実験値が計算値を上回った。

(2) 中間帯鉄筋がせん断特性に与える影響

中間帯鉄筋の有無に関わらず同様な破壊性状を示した。帯鉄筋あるいは中間帯鉄筋の引張応力度の最大値が 490N/mm^2 に達した時点での、帯鉄筋・中間帯鉄筋の応力度分布は、試験体 1、2 共に、せん断スパンの中央付近 800～1200mm の引張応力が大きくなる傾向があり、応力度分布に大きな差異は認められない（図-3）。

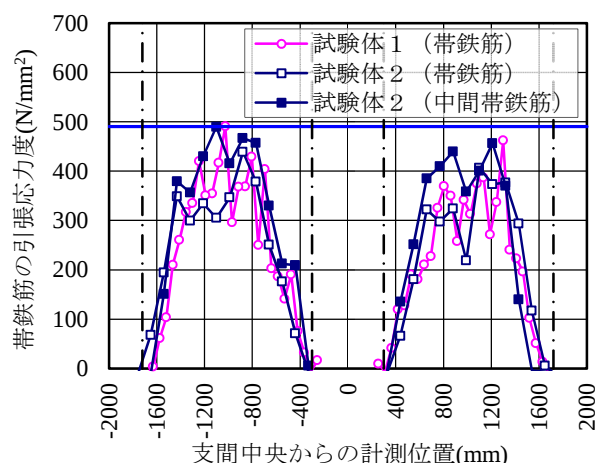


図-3 帯鉄筋・中間帯鉄筋のせん断応力度分布

試験体 2 では、引張応力度の最大値が 490N/mm^2 の時点で中間帯鉄筋の応力が帯鉄筋よりやや大きい、 685N/mm^2 には帯鉄筋が先に到達し、前述のように先に降伏に至ったのも帯鉄筋である。したがって、中間帯鉄筋と帯鉄筋の引張応力分布に有意な差はないと言える。

次に、試験体 1 と試験体 2 のせん断耐力を比較すると中間帯鉄筋を有する試験体 2 のせん断耐力が若干大きくなる傾向がある。その差は帯鉄筋の引張応力度が 490N/mm^2 の時点で 6.5%であった（図-2、表-4）。

円形断面の帯鉄筋が斜めひび割れの平面と交差することを考えると、せん断力の方向と帯鉄筋の軸方向が異なるため、円形帯鉄筋の補強効率は矩形断面の $\pi/4=0.785$ 倍となることが知られている⁷⁾。しかし、上記の 6.5%の差は、帯鉄筋以外によるせん断耐力の負担分を除いても、円形と矩形のせん断補強筋の違いによる差より小さく、本研究の諸元においては、せん断補強鉄筋の形状がせん断耐力へ及ぼす影響は小さいと言える。

4. 解析による検討

4.1 解析の目的

円形 RC 部材のせん断実験により、大口径深礎への太径・高強度帯鉄筋 SD490-D38 の適用性を確認した。ただし、試験体数が 1 体であるため、結果の妥当性は本実験のみでは必ずしも明らかでない。そこで、実験結果の検証を目的に、3次元非線形 FEM による再現解析を行った。

4.2 解析モデル

解析対象を試験体 1 とし、対称条件の適用により試験体の長さとし断面のそれぞれ 2 分の 1 のみをモデル化した（図-4）。解析プログラムとして、RC 部材の FEM 解析で実績が豊富な COM3 を使用した。COM3 は、非直交多方向固定/分散ひび割れモデルによりひび割れを表現し、要素内に鉄筋が分散して配置されていると考える分散鉄筋モデルを採用している⁸⁾。モデルの全要素数は 738、節点自由度は 10497 であり、対称性を考慮した単純梁形式の境界条件を採用した。各材料の物性には実験時に計測した実強度を入力した（表-2）。なお、鋼材のせん断剛性は考慮していない。解析に際しては、STEP=1 で自重を考慮した後、変位制御により 0.4 mm/STEP の鉛直下向きの変位を単調に載荷点に与えた。

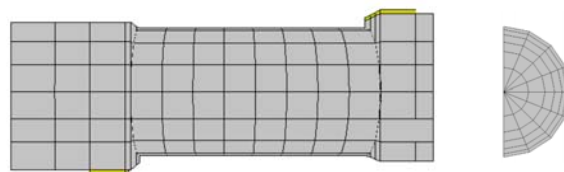


図-4 解析モデル図

4.3 解析結果および考察

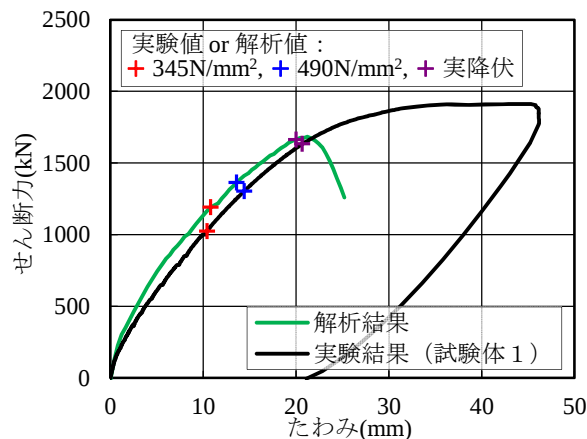
解析でのせん断力-たわみ関係を、試験体 1 の実験結果と合わせて図-5 に示す。解析では、せん断力が 1346kN の時点で帯鉄筋の引張応力度の最大値が 490N/mm^2 に、1663kN の時点で実降伏強度に達した。帯鉄筋降伏直後に最大せん断力 1683kN を記録し、せん断破壊に至った。解析値と実験値の関係を表-5 に示す。

この結果から、解析は帯鉄筋が降伏に至るまでの荷重-変位関係、破壊モードを再現できている。一方、解析が実験とは異なり帯鉄筋降伏直後に最大せん断耐力に達し、その後耐力が低下しているのは、解析プログラムが軸方向鋼材のダウエル作用を考慮できないためである。

次に、帯鉄筋の引張応力度の最大値が 490N/mm^2 に達した時点での帯鉄筋の応力度分布を、解析結果と試験体 1 の実験結果を合わせて図-6 に示す。解析での応力度分布が実験とよく一致しており、帯鉄筋の応力度分布についても再現できている。

以上のように、一般にばらつきの大きいせん断実験を、

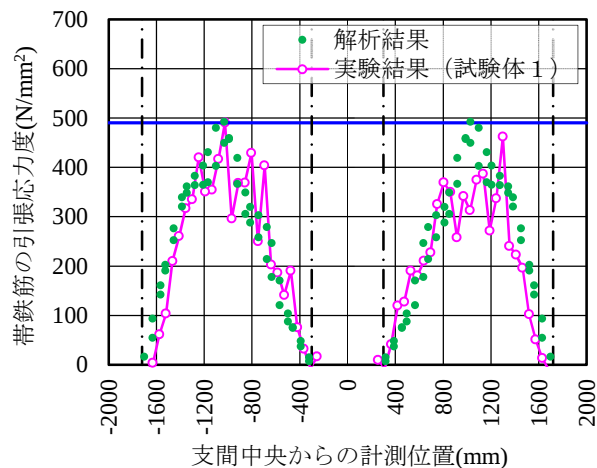
解析によって再現できたことから、実験にも再現性があるものと判断される。



図－5 FEM 解析でのせん断力とたわみの関係

表－5 実験値と解析値の関係

帯鉄筋の 応力度 (N/mm ²)	せん断力(kN)		(実験値) (解析値)
	実験値	解析値	
345	1023	1191	0.86
490	1303	1364	0.96
685	1530	1492	1.03
834	1633	1663	0.98



図－6 解析による帯鉄筋の応力度分布

5. まとめ

山間部の橋梁基礎として一般的な規模の大口径深礎への太径・高強度帯鉄筋の適用性を検討すると同時に中間帯鉄筋のせん断補強効果を確認するため、円形 RC 部材のせん断実験を実施した。また、3 次元非線形 FEM 解析により実験の再現性を検証した。本研究で得られた主な結果を以下に示す。

(1) 大口径深礎への太径・高強度帯鉄筋の適用

実験の結果、比較的低強度のコンクリートを使用した

円形 RC 部材において、設計基準のせん断耐力式に対する安全率が確保できることを確認した。

FEM 解析では帯鉄筋の降伏後に相違が認められたが、帯鉄筋降伏に至るまでのたわみおよび破壊モードを再現できた。帯鉄筋の引張応力度と作用せん断力の関係、帯鉄筋の引張応力度の分布性状についても実験結果を再現できた。

これらの結果より、本研究で対象とした諸元においては、既往の設計基準に従った設計手法により、大口径深礎に太径・高強度帯鉄筋 SD490-D38 が適用可能と考えられる。ただし、せん断スパン比やコンクリート圧縮強度、帯鉄筋比、帯鉄筋径と有効高さの比等が異なる場合、別途検討が必要である。

(2) 中間帯鉄筋がせん断特性に与える影響

実験結果から、円形 RC 部材の荷重－たわみ関係および試験体の破壊性状に、中間帯鉄筋が与える影響は小さいことが確認された。

中間帯鉄筋の配置により、せん断耐力がやや大きくなる傾向があり、その差は帯鉄筋のせん断応力度が 490N/mm² の時点で 6.5%であった。この差は、既往の研究成果⁷⁾に示される差よりも小さかった。

参考文献

- 1) 萩・三隅道路玉江橋事故調査特別委員会：萩・三隅道路玉江橋事故調査報告書（概要），2008.11
- 2) 東日本高速道路㈱，中日本高速道路㈱，西日本高速道路㈱：設計要領 第二集 橋梁建設編，p.4-100，2008.8
- 3) 土木学会：2007 年制定 コンクリート標準示方書〔設計編〕，pp.132-141，2007.3
- 4) 曾我部直樹ほか：RC 橋脚における軸方向鉄筋，帯鉄筋への高強度鉄筋の適用に関する実験的研究，土木学会論文集 E2（材料・コンクリート構造），Vol. 67，No. 1，pp.131-149，2011
- 5) 二羽淳一郎ほか：せん断補強鉄筋を用いない RC はりのせん断強度式の再評価，土木学会論文集，No.372/V-5，pp.167-176，1986
- 6) 黒岩俊之ほか：高強度せん断補強鉄筋を用いた RC はりのせん断耐力に及ぼすコンクリート強度の影響，pp.955-960，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.2，2004
- 7) 渡辺史夫，六車 熙，西山峰広：曲げとせん断を受ける PC パイルの耐力評価に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集 9-2，pp.483-487，1987
- 8) Hauke, B., 前川宏一：Three-dimensional modelling of reinforced concrete with multi-directional cracking，土木学会論文集，No.634/V-45，pp.349-368，1999