第26回橋梁等の耐震設計シンポジウム
講演論文集（2023年7月）

コンクリート充填補強部と既設部をアンカー結合した大型中空断面RC橋脚模型の正負交番載荷実験

松尾　良平[1]・植村　佳大[2]・高橋　良和[3]

[1]学生会員　京都大学大学院工学研究科（〒615-8540 京都市西京区京都大学桂）
[2]正会員　工博　京都大学助教　工学研究科（〒615-8540 京都市西京区京都大学桂）
[3]正会員　工博　京都大学教授　工学研究科（〒615-8540 京都市西京区京都大学桂）

1. 背景

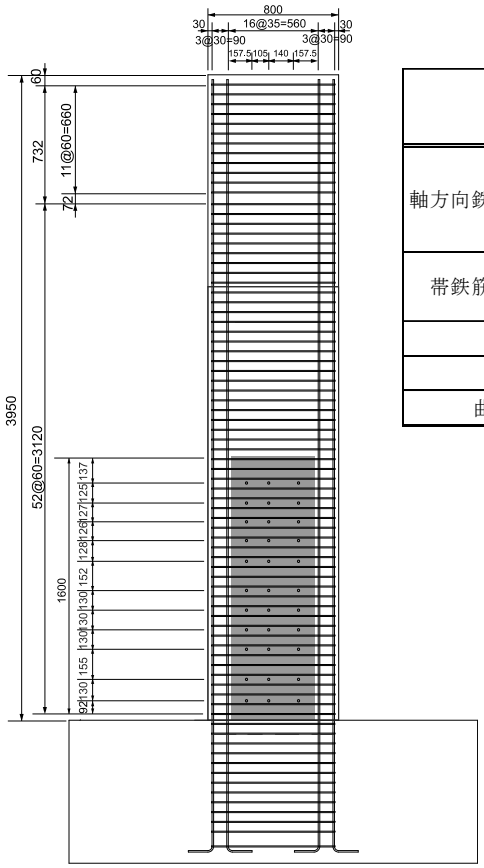
橋梁建造物の大型化，長大化の趨勢に伴い，RC高橋脚や斜張橋のRC主塔などでは，橋脚の自重を軽減することで地震の慣性力の低下，地盤基礎への負荷の軽減，コスト削減が可能な，中空断面が採用される場合が多い．しかし，塑性ヒンジが形成される柱基部の領域が中空断面である場合，壁厚比を小さく内部を空洞とした構造のため，軸応力が大きくなり，柱基部のコンクリートの圧縮破壊が起きた際に軸耐荷力が急激に低下する可能性がある．また，曲げ変形が卓越する場合でも厚さの薄い壁部においてせん断力の影響が大きくなることから，繰り返し載荷により曲げ破壊からせん断破壊へ移行する可能性が指摘されている．[1)]そのため，現行の平成29年の道路橋示方書・同解説―V耐震設計編―[2)]では，塑性ヒンジ領域とその近傍の塑性ヒンジの影響を受ける領域においては中実断面とした上で，塑性ヒンジの影響を受けない部位のみを中空断面とし，さらに中実断面から中空断面へと変化する箇所が新たな損傷箇所とならないよう，構造的な配慮をするよう新たに構造細目が追加されている．しかし，中空断面に対してこのような規定が追加されたのは平成24年[3)]以降であるため，現行の道路橋示方書に規定されているような構造細目が反映されていない中空断面RC橋脚が数多く存在し，高規格幹線道路等においても地震時に塑性ヒンジとなり得る橋脚基部まで中空断面を有するような橋脚も少なくないというのが現状である．

以上の背景の下，基部断面が中空である場合には，断面内にコンクリートを充填し，柱基部を中実断面にすること(以下，コンクリート充填補強とする)が現在進められている．しかし，既設部と充填部の一体化が見込めない場合，一体打ちの中実断面RC橋脚と同等の耐震性能は期待できないと考えられる．事実，近年の研究[1)]にて，中空断面内部にコンクリートを充填して中実断面とした供試体で，一体打ちの中実断面RC橋脚では発生しなかった斜めひび割れが発生しており，コンクリートを充填するのみでは理想的なせん断補強効果が得られない可能性が示されている．また，コンクリート充填による一定の曲げ変形性能の向上は確認されたものの，中空断面RC柱と同様，軸方向鉄筋の座屈発生後に急激な耐力低下および軸沈下が発生しており，危機耐性確保の観点から補強効果に課題が残っている．中空断面RC橋脚にコンクリート充填補強を施す場合において，既設部と充填部を一体化させることができれば，中空断面RC橋脚におけるせん断補強ならびに危機耐性向上が実現できる可能性があるといえる．

2. 実験概要

(1) 供試体寸法及び配筋

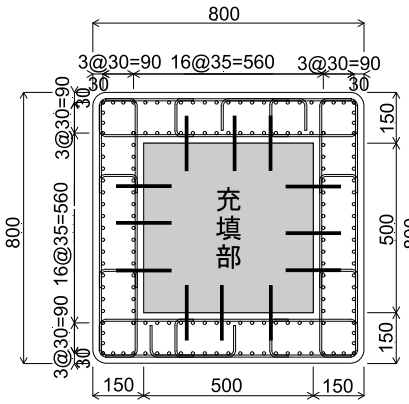
本実験では，中空断面RC柱に対し，コンクリート充填に加えてアンカー補強を施した場合の補強効果の把握を目的として，コンクリート充填あと施工により中実化したRC柱にさらにあと施工アンカーを用いて既設部と充填部をアンカー結合した供試体を製作した．本論文では，この供試体を「基部充填断面供試体(アンカー補強あり)」と呼び，綾城ら[1)]が実験で用いたコンクリート充填あと施工により中実



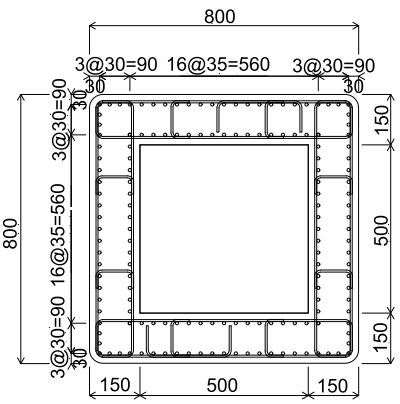
(a) 側面図(灰色:充填部)

表-1 供試体諸元

供試体			基部充填断面供試体(アンカー補強あり)	基部充填断面供試体	基部中実断面供試体
軸方向鉄筋	種別		D10(SD345) 152本		
	鉄筋比	1600mm以下	2.78	2.78	1.70
		1600mm以上	2.78		
帯鉄筋	種別		D6(SD345) 110mm		
	鉄筋比		0.26(0.70)	0.70	0.26
アンカー鉄筋			D10(SD345) 132本	-	-
軸応力(MPa)			2.95	2.95	2.95
曲げせん断耐力比			-	-	1.79



(b) 断面図(充填部分)
(黒塗:アンカー)

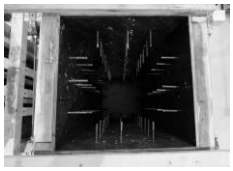


(c) 断面図(中空部分)
(黒塗:アンカー)

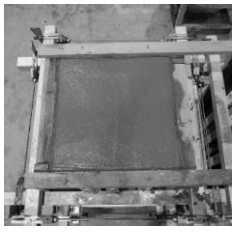
図-1 供試体概要(Unit[mm])



(a) 充填コンクリートの型枠(横から)



(b) 充填コンクリートの型枠(上から)



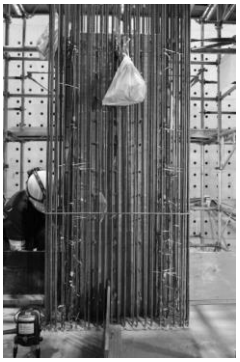
(c) 充填コンクリートの打設



(d) 充填部完成



(e) 充填部の挿入(その 1)



(f) 充填部の挿入(その 2)

図-2 供試体概要(Unit[mm])

化したRC柱(基部充填断面供試体)，一体打ちの中実断面RC柱(基部中実断面供試体)，基部に中空断面を有するRC柱(中空断面供試体)を比較対象とする，**図-1**に供試体概要(基部充填断面供試体(アンカー補強あり)のみ)を，**表-1**に各供試体の諸元を示す．綾城ら[1)]の供試体の概要は文献1を参照されたい．なお，断面構造の違いやアンカー補強の有無による比較を行うため，供試体寸法及び配筋は基部充填断面供試体(アンカー補強あり)と他の3体の供試体で共通とした．

(2) アンカー補強をした充填断面部の施工について

充填断面部にアンカー補強を施す場合，実施工ではコンクリートを充填した後でアンカー補強をする．しかし，今回作成した供試体は1/6スケールであるため，実際の橋脚よりも軸方向鉄筋間隔と帯鉄筋間隔が狭くなっており，アンカーを既設部の鉄筋と干渉することなくあと施工することは困難と判断した．よって，本実験では，アンカー鉄筋を差し込んだ型枠(**図-2**(a)，(b))にコンクリートを打設して(**図-2**(c))作製した充填部(**図-2**(d))を，フーチングのコンクリートのみ打設した柱部の上から挿入し(**図-2**(e)，(f))，その後，柱部のコンクリートを打設した．なお，実橋脚では，柱が死荷重を支持している状態でアンカー鉄筋を挿入するため，アンカー鉄筋には死荷重は伝達されない．しかし，今回の実験においては，供試体製作の都合上，死荷重にあたる初期軸力を載荷する前にアンカー鉄筋を挿入するために，初期軸力がアンカー鉄筋を介して充填部に加わってしまい，実橋脚と初期軸力の伝達性状が異なることとなる．しかしながら，植村ら[4]が行った解析結果により，この違いは，破壊性状，変形性状に大きな影響を及ぼさないことが確認されており，コンクリート充填部への初期軸力の伝達性状の違いは結果に大きな影響を与えないと判断した．

(3) あと施工アンカーの設計

あと施工アンカーの径，本数，埋め込み位置および埋め込み長さは，コンクリートのあと施工アンカー工法の設計・施工・維持管理指針(案)[5]を基に決定した．当該指針において，あと施工アンカー部の安全性の照査は，限界状態としてあと施工アンカー部の引張破壊とせん断破壊に対して行うことを原則としている．今回は，あと施工アンカー部の引張破壊は起こらないものとし，せん断破壊に対して照査を行う．せん断力に対するあと施工アンカー部の設計降伏耐力V_{yd}とせん断力に対するあと施工アンカー部の設計支圧破壊耐力V_{cd}は，それぞれ式(1)と式(2)により規定されている．

$$V_{yd} = \frac{K_t a_{os} f_{ysd}}{\sqrt{3}\gamma_b} \tag{1}$$

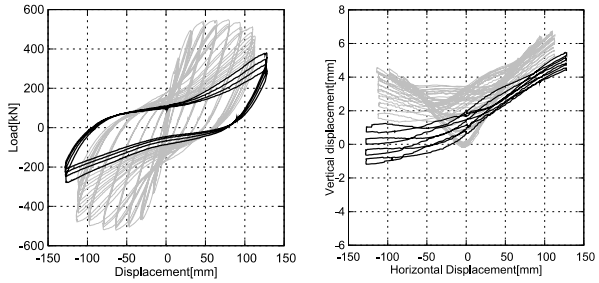
$$V_{cd} = \frac{K_t C a_s \sqrt{E_c f'_{cd}}}{\gamma_b} \tag{2}$$

ここで，K_tは使用期間の長さの影響を表す係数，a_{os}は接合面でのアンカー鉄筋の最小断面積(mm^2)，f_{ysd}はアンカー鉄筋の素材の設計降伏強度(N/mm^2)，γ_bは部材係数，Cはあと施工アンカーの種類を表す係数，a_sは接合面でのアンカー本数の最小断面積(mm^2)，E_cは母材のコンクリートのヤング係数(N/mm^2)，f'_{cd}は母材のコンクリートの設計圧縮強度(N/mm^2)である。

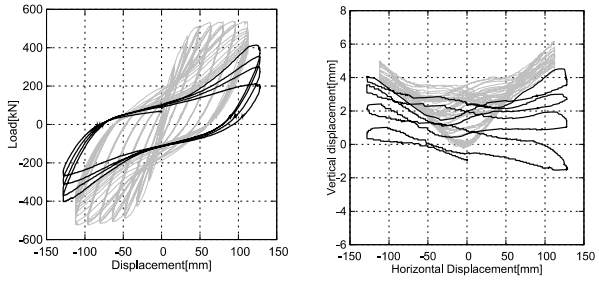
ここで，供試体には水平荷重および軸力が作用するが，水平荷重はアンカー鉄筋を介さずとも載荷面，載荷面裏側を介して既設部から充填部に伝わるため，アンカー鉄筋に水平耐力 488kN と同等の水平荷重が作用するとは考えにくい．また，軸力については柱の荷重低下が発生しない範囲では，既設部による抵抗が期待でき，アンカー鉄筋への作用力は比較的小さいと考えられる．一方，既設部基部が完全に破壊されるような終局変位以降の範囲では，柱の水平荷重は小さくなるため，軸力に対しての照査が重要であると考えた．以上より，既設部基部の破壊が進行し，一切軸力を負担することができなくなり，全軸力をアンカー鉄筋のみで支えることになった場合を考え，必要なアンカー鉄筋の総量は，D6 では 214 本，D10 では 95 本，D13 では 54 本であると算定した．なお，上記の式は異形鉄筋の場合，適用可能範囲が D10 から D25 であるが，参考として適用可能範囲より細径の D6 の場合も記載している．また，設計上の塑性ヒンジ長が 400mm であることから，既設部の損傷が激しくなく，アンカー鉄筋を支持するのに十分なコンクリートが残存すると考えられる高さ 400mm~1600mm の区間で先程示した本数以上のアンカー鉄筋が配置されるようにした．その際，さらに高さ 400mm 未満の区間においてもせん断力の伝達を期待するため，上部区間と同様の間隔で配置している．以上から本実験では，D6 は式(1)と式(2)の対象外であるため用いず，二式の適用範囲内である鉄筋のうち細径の D10 を用いた．また，アンカー鉄筋の埋め込み長さは，アンカー鉄筋の呼び径の 7 倍以上とする規定を踏まえ 75mm とした．

(4) 載荷パターン

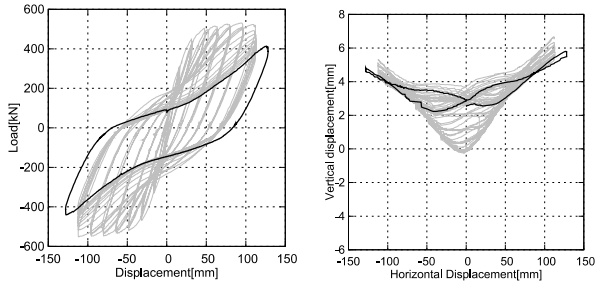
載荷は最外縁の軸方向鉄筋が降伏したときの水平変位を基準変位δ_{y0}として，この基準変位の整数倍の水平変位を各ステップで 3 回繰り返す正負交番漸増繰り返し載荷を行った．その後，載荷面及び載荷面裏側の外側軸方向鉄筋の両方が座屈した時を終局と定義し，基部充填断面供試体の終局変位($7\delta_{y0}$)で 10 回繰り返し載荷を行った．さらに，変位振幅を$8\delta_{y0}$とし，4 回繰り返し載荷を実施した．これは基部充填断面供試体と同じ載荷パターンである．なお



(a) 基部充填断面供試体(アンカー補強あり)



(b) 基部充填断面供試体



(c) 基部中実断面供試体

図-3 荷重－変位関係および鉛直変位－水平変位関係
$7\delta_{y0}$以前:灰，$8\delta_{y0}$以後:黒

表-3 各供試体の終局変位

供試体	基部充填断面供試体(アンカー補強あり)	基部充填断面供試体	基部中実断面供試体
終局変位	$6\delta_{y0}$ (96mm)	$7\delta_{y0}$ (112mm)	$7\delta_{y0}$ (112mm)

本実験では，本載荷開始前にアクチュエータ，各ひずみゲージ，各変位計の挙動の確認を行うために，本載荷とは別に ±5mm 程度の水平変位を 2 回繰り返す予備載荷を行った.

3. 実験結果および考察

(1) 荷重—変位関係および鉛直変位—水平変位関係

各供試体の荷重—変位関係を**図-3**の左側に示す. **図**に示すように，$8\delta_{y0}$-1以降，基部充填断面供試体では急激な耐力低下が発生したのに対し，基部充填断面供試体(アンカー補強あり)では，荷重が緩やかに低下していることがわかる．$8\delta_{y0}$-1を基準とした$8\delta_{y0}$-4での，最大荷重の低下は基部充填断面供試体(アンカー補強あり)では約33%，基部充填断面供試体では約49%であった．これは，両供試体では基部の破壊性状に大きな違いはなく，既設部の圧縮力に抵抗できるフランジ部のコンクリートの断面積は同程度であったことを踏まえると，$8\delta_{y0}$-1以降における荷重低下挙動の改善はアンカー補強による効果であると考えられる.

$8\delta_{y0}$-1以降における各供試体の鉛直変位—水平変位関係を**図-3**の右側に示す．図より基部充填断面供試体では，$8\delta_{y0}$において急激な荷重低下が発生した上，鉛直変位—水平変位関係が上に凸となっており，さらに載荷を続けた場合，より急激な軸沈下が起こることが推定される．一方，基部充填断面供試体(アンカー補強あり)では，軸方向鉄筋の座屈が早く発生したものの，それ以降，漸次的に軸沈下が発生した上，鉛直変位—水平変位関係が下に凸となっており，さらに載荷を続けた場合でも急激な軸沈下が起きにくいことが推定される．次節にあるように両供試体において基部の損傷に大きな違いはないことから，この軸沈下挙動の傾向の違いはアンカー補強による効果であると考えられる．$8\delta_{y0}$-1を基準とすると，$8\delta_{y0}$-4の最大振幅時の軸沈下量は，基部充填断面供試体(アンカー補強あり)で2.07mm(負最大振幅時)，基部充填断面供試体では5.28mm(正最大振幅時)であった.

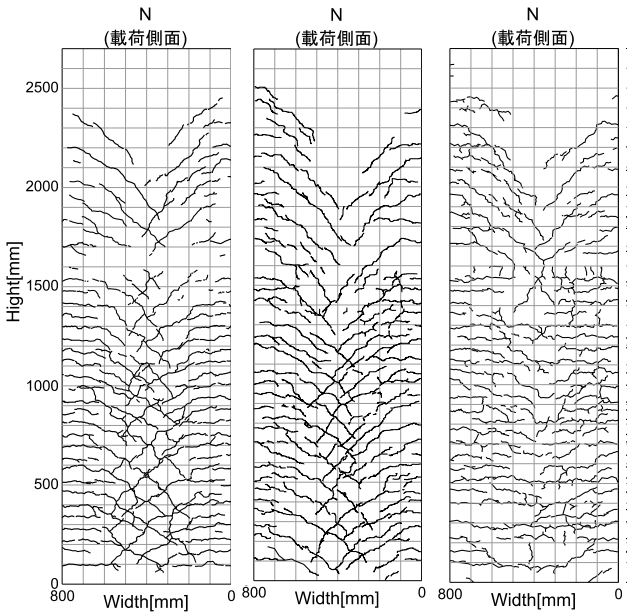
(2) 破壊性状

a) 載荷側面のひび割れ状況

図-4に各供試体の$2\delta_{y0}$載荷終了時における載荷側面のひび割れ損傷図を示す．**図-4**を見ると，$2\delta_{y0}$終了時点において，基部中実断面供試体の断面が中実である柱高さ 1600mm 以下の範囲では，ひび割れが水平に進展していたのに対し，基部充填断面供試体(アンカー補強あり) と基部充填断面供試体で，ひび割れが斜め方向に進展していることがわかる．このことから，アンカー補強をしたとしても，中空断面特有のひび割れ性状が変化することはなく，中実断面のようなせん断抵抗力は見込めない可能性が示唆された.

b) 供試体内部の損傷

載荷終了後，供試体をNS面に平行に2等分し(**図-5**)内部の損傷を観察した(**図-6**)．基部中実断面供試体では$8\delta_{y0}$-1で載荷を終了したこともあり，載荷面，載荷面裏側での損傷が限定的であったのに対し，基部充填断面供試体(アンカー補強あり)と基部充填断

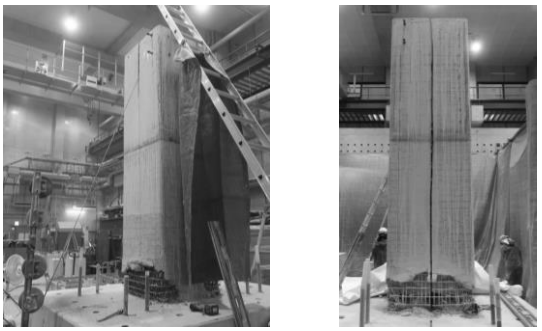


(a) 基部充填断面供試体(アンカー補強あり)　(b) 基部充填断面供試体　(c) 基部中実断面供試体

図-4 $2\delta_{y0}$-3 のひび割れ図

面供試体では軸沈下が顕著に発生した側の面の高さ0mm~200mmの範囲で既設部フランジ部のコンクリートが大きく剥落している．特に，基部充填断面供試体(アンカー補強あり)では，切断面において既設部E面フランジ部のコンクリートがほとんど残存していないことがわかる．しかし，前節で述べたように，基部充填断面供試体(アンカー補強あり)では，基部充填断面供試体に比べて軸沈下が緩やかに発生しており，アンカー補強によって既設部の損傷が顕著である状況下においても急激な軸沈下が抑制されたと考えられる．

続いて，供試体内部のひび割れ図と供試体N面のひび割れ図を重ね合わせたものを**図-7**に示す．図より，基部充填断面供試体では既設部で斜めひび割れが卓越したのに対して充填部ではひび割れが水平に入っており，ひび割れ性状が異なっていることがわかる．それに対し，基部充填断面供試体(アンカー補強あり)では，既設部と充填部ともに斜めひび割れが発生し，角度も同程度であることがわかる．このことから，アンカー補強によって充填部がせん断力に抵抗するようになったと考えられる．しかし，既設部における中空断面RC柱特有の斜めひび割れを抑制するには至らなかったことから，その効果は限定的であったといえる．



(a) 切断中　(b) 切断後

図-5 供試体の切断



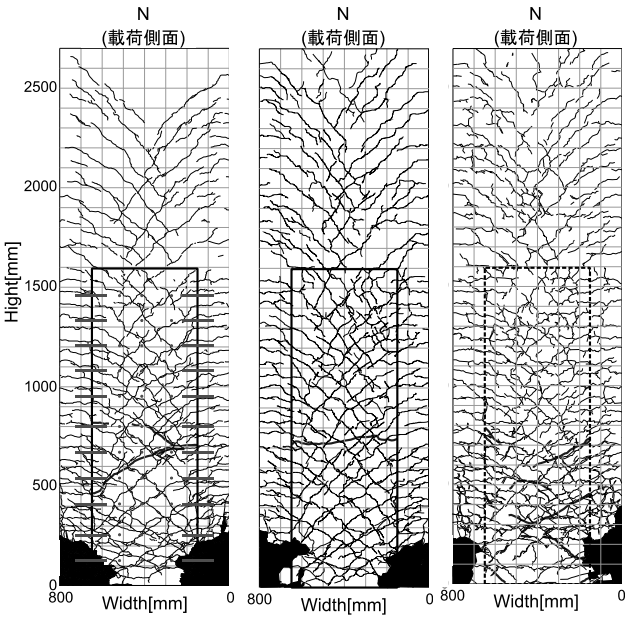
(a) 基部充填断面供試体（アンカー補強あり）　(b) 基部充填断面供試体

図-6 供試体内部の損傷

(4) 鉄筋のひずみ分布

a) 軸方向鉄筋のひずみ分布

図-8 に $1\delta_{y0}$-1~$7\delta_{y0}$-1 における基部充填断面供試体(アンカー補強あり)，基部充填断面供試体，基部中実断面供試体の引張時の軸方向鉄筋の高さ方向のひずみ分布を示す．なお，図中では W 面(載荷面側)外側の各断面高さにおける 2 点(基部充填断面供試体(アンカー補強あり))または 3 点(基部充填断面供試体と基部中実断面供試体)のひずみを平均して算出しており，図中の縦線は軸方向鉄筋の降伏ひずみの値 ε_y=0.00198 を示している．**図-8** が示すように，各供試体とも $3\delta_{y0}$までは主に 500mm までの高さにおいて急激に塑性化が進行し，変位振幅の増大に伴ってひずみの急増する領域が上方に拡大していく傾向が確認できる．最終的に基部充填断面供試体(アンカー補強あり)では終局変位である $6\delta_{y0}$時において，W 面外側軸方向鉄筋の高さ−100mm~900mm の範囲でひずみが大きくなったのに対して，基部充填断面供試体と基部中実断面供試体は終局変位である $7\delta_{y0}$時において，W 面外側軸方向鉄筋の高さ−100mm~



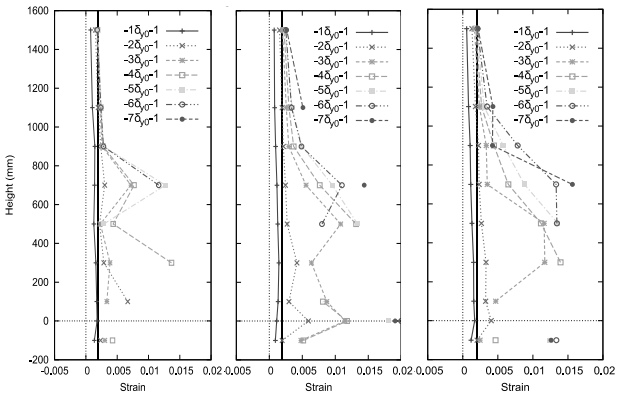
(a) 基部充填断面供試体（アンカー補強あり）　(b) 基部充填断面供試体　(c) 基部中実断面供試体

図-7 供試体既設部と内部のひび割れ図（黒細線が既設部，青太線が充填部）

1100mm でひずみが大きくなった．このことから，基部充填断面供試体(アンカー補強あり)では，他の 2 つの供試体に比べ，僅かではあるがひずみの増大する領域が狭小化している傾向があることがわかる．

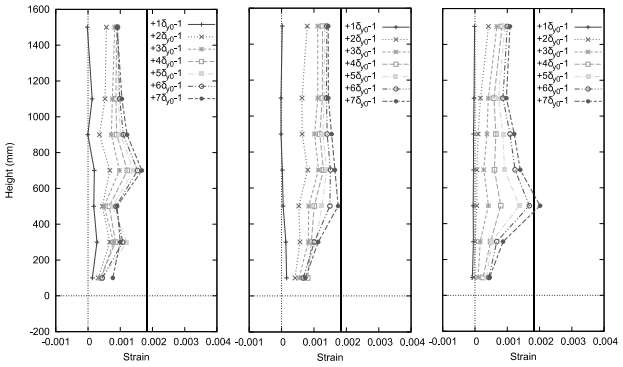
b) 帯鉄筋のひずみ分布

$1\delta_{y0}$~$7\delta_{y0}$の各振幅 1 サイクル目での基部充填断面供試体(アンカー補強あり)，基部充填断面供試体および基部中実断面供試体における載荷側面(N 面)の帯鉄筋の高さ方向ひずみ分布を，**図-9** に示す．なお，図中の縦線は帯鉄筋の降伏ひずみの値ε_y=0.00184 を示している．基部充填断面供試体(アンカー補強あり)では，**図-9** に示すとおり，$3\delta_{y0}$までは変位振幅の増加に伴いひずみが増大したが，$4\delta_{y0}$以降，ひずみの増大は緩やかになった．これに対し，基部充填断面供試体では $3\delta_{y0}$において大きくひずみが増大した．その後，基部充填断面供試体(アンカー補強あり)では $6\delta_{y0}$においても，基部充填断面供試体のような広い範囲で降伏ひずみに近いひずみが発生することはなく，アンカー補強によって充填部もせん断力に対して抵抗するようになったと考えられる．ここで，基部充填断面供試体と基部中実断面供試体のひずみの差が特に大きかった，N 面における柱高さ 878mm，1118mm の外側帯鉄筋について，そのひずみサイクル歴を**図-10** に示す．この図では，横軸が $+1\delta_{y0}$-1，$-1\delta_{y0}$-1，$+1\delta_{y0}$-2，...のように載荷サイクルを表しており，各サイクルで変位がピークとなる



(a) 基部充填断面供試体（アンカー補強あり）　(b) 基部充填断面供試体　(c) 基部中実断面供試体

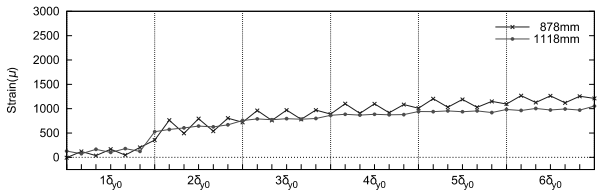
図-8 外側軸方向鉄筋のひずみ分布（縦向き黒線は降伏ひずみ ε_y = 0.00198）



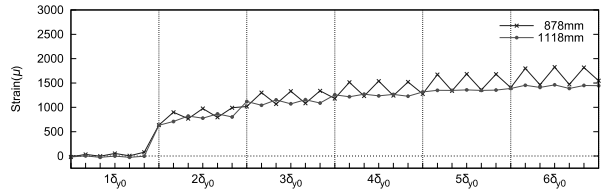
(a) 基部充填断面供試体（アンカー補強あり）　(b) 基部充填断面供試体　(c) 基部中実断面供試体

図-9 外側帯鉄筋ひずみ分布（縦向き黒線は降伏ひずみε_y = 0.00184）

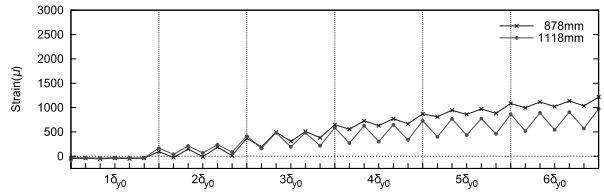
際のひずみを折れ線で結んでいる．**図-10** から，載荷側面のウェブ部において載荷が進むにつれ，帯鉄筋ひずみも増加する傾向にあることがわかる．しかし，$2\delta_{y0}$-1 以降，基部充填断面供試体(アンカー補強あり)では，基部充填断面供試体よりも帯鉄筋ひずみの増加が緩やかであることがわかる．このことから，載荷振幅が小さい領域では既設部と充填部の一体化が十分ではないものの，載荷振幅が増加するとせん断力がアンカー鉄筋を通って充填部に十分伝わるようになり，結果として帯鉄筋の負担軽減につながったといえる．しかしながら，基部中実断面供試体と同程度となるまでは，ひずみの値が低減されておらず，アンカー補強によるせん断補強効果は限定的であるといえる．



(a) 基部充填断面供試体(アンカー補強あり)



(b) 基部充填断面供試体



(c) 基部中実断面供試体

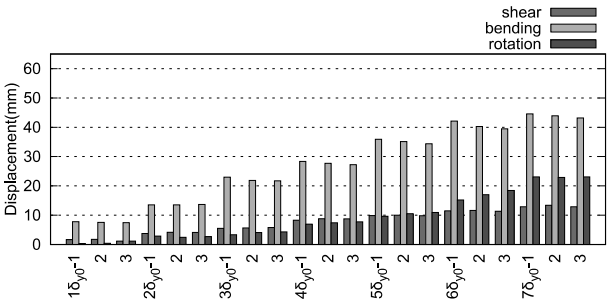
図-10　外側帯鉄筋ひずみの載荷サイクル歴

(5) 変形成分

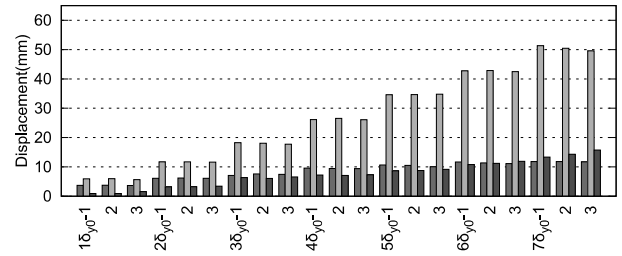
各供試体における曲げ・せん断・回転による水平変位の絶対量のグラフを**図**-11 に示す．この図において，縦軸は各変形による水平変位量，横軸は載荷サイクルを表している．

せん断変形量は $5\delta_{y0}$-1 負載荷時において，基部充填断面供試体(アンカー補強あり)では約 9.9mm，基部充填断面供試体では約 10.6mm であるのに対し，基部中実断面供試体では約 6.7mm であり，アンカー補強によってせん断変形量が有意に小さくはなっているとは言えない．このことから，前節で示した通り，基部充填断面供試体(アンカー補強あり)は基部充填断面供試体に比べ帯鉄筋ひずみが小さくなったものの，せん断変形量に影響を与えるほどの効果はなかったと言える．

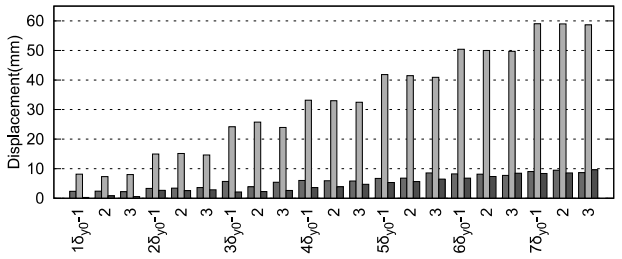
また，基部充填断面供試体(アンカー補強あり)において，$6\delta_{y0}$以降の負載荷時の回転変形量が他の供試体に比べて増大していることがわかる．これは，基部充填断面供試体(アンカー補強あり)では，$6\delta_{y0}$-1 で座屈が発生し，供試体 E 面側基部の損傷が他の 2 体より大きかったことが原因であることが考えられる．事実，軸方向鉄筋の座屈が発生する以前の $5\delta_{y0}$-3 負載荷時での回転変形量は，基部充填断面供試体(アンカー補強あり)では約 9.7mm，基部充填断面供試体では約 9.2mm であるのに対し，基部中実断面供試体では約 6.5mm であり，アンカー補強の有無による，回転変形量の差は見られなかった．以上より，帯鉄筋ひずみからは，アンカー補強による一定のせん断補強効果が確認できたものの，変形成分に有意な差は見られなかった．



(a) 基部充填断面供試体(アンカー補強あり)



(b) 基部充填断面供試体



(c) 基部中実断面供試体

図-11　各供試体の柱全体の水平変位量に占める各変形成分量(負載荷時)

4. 結論

本実験では，中空断面RC橋脚を補強する際，既設コンクリート部とコンクリート充填部の一体化が見込めない場合，せん断補強効果ならびに危機耐性の観点からは補強が不十分であるという問題点解決に向け，既設部と充填部をアンカー補強によって一体化することを目的とした．そこで，コンクリート充填補強をした既設中空断面RC橋脚に対し，あと施工アンカー補強を行うことで一体化を図った大型

中空断面RC橋脚模型の正負交番載荷実験を行った．その際，供試体の寸法を既往の研究[1)]で用いられたコンクリート充填補強をした既設中空断面RC橋脚模型と同じとし，さらに同じの載荷方法で実験を行うことで，荷重低下挙動，ならびに損傷進展・破壊形態を比較検討した．

以下に本実験で得られた知見を示す．

- $7\delta_{y0}$-10までの載荷において，基部充填断面供試体（アンカー補強あり）では座屈が早く発生した影響により，耐力低下，軸沈下の開始が基部充填断面供試体より早くなった．しかし，$8\delta_{y0}$での載荷においては，基部充填断面供試体のような急激な耐力低下や鉛直変位―水平変位関係が上に凸になった状態での急激な荷重低下が発生しせず，柱基部の損傷も同程度であることから，アンカー補強は大振幅時での急激な軸沈下を抑制する効果を発揮し危機耐性向上に繋がると考えられる．また，急激な中立位置の移動が発生し，フランジ部が全圧縮状態となっても，基部充填断面供試体のような急激な軸沈下が抑制されたことからも，アンカー補強は危機耐性向上の効果があることがわかった．
- 基部充填断面供試体（アンカー補強あり）と基部充填断面供試体では$2\delta_{y0}$終了時点で供試体側面に中空断面特有の斜めひび割れが発生した．これにより，ひび割れが水平方向にひび割れが進展した基部中実断面供試体とは異なり，アンカー補強をしたとしても振幅が小さい範囲では一体性が確保されていないことがわかった．一方で，供試体内部の損傷を見ると，基部充填断面供試体では，既設部では斜めひび割れが発生したのに対して，充填部では水平ひび割れが発生し異なるひび割れ性状が確認されたが，基部充填断面供試体（アンカー補強あり）では，既設部と充填部ともに同程度の角度の斜めひび割れとなっていた．以上から，載荷振幅が大きくなった段階で，既設部から充填部にアンカー鉄筋を介して力が十分伝達されるようになったと考えられる．
- 基部充填断面供試体（アンカー補強あり）では，基部充填断面供試体より増加幅は小さいものの，基部中実断面供試体では見られなかった，$1\delta_{y0}$から$2\delta_{y0}$への遷移時における帯鉄筋のひずみの増大が確認された．しかし，$2\delta_{y0}$-1以降，基部充填断面供試体（アンカー補強あり）では，基部充填断面供試体よりも帯鉄筋ひずみの増加が緩やかであった．さらに，基部充填断面供試体（アンカー補強あり）では$6\delta_{y0}$においても，基部充填断面供試体のような広い範囲で降伏ひずみに近いひずみが発生することはなく，アンカー補強によって充填部もせん断力に対して抵抗するようになったと考えられる．以上より，載荷振幅が小さい領域では既設部と充填部の一体化が十分ではないものの，載荷振幅が増加するとせん断力がアンカー鉄筋を介して充填部に十分伝達されるようになり，結果として帯鉄筋の負担軽減につながったといえる．
- 既設部と充填部をアンカー結合することによって両者の一体化を図ったが，載荷振幅が小さい領域では，一体化が十分ではなかったといえる．その一方で，載荷振幅が大きくなると基部充填断面供試体とは異なった鉛直変位―水平変位関係や内面損傷となり，大振幅においてはアンカー補強による既設部と充填部の一体化が見込めることが示された．その結果，基部中実断面RC 柱と同じ挙動とはならなかったものの，せん断耐力や危機耐性の向上が確認され，アンカー鉄筋による一定の補強効果が確認されたといえる．

謝辞：本研究の一部は科学研究費補助金基盤研究(A)21H04574と，科学研究費補助金若手研究21K14231の助成を受けて実施した．また，西日本高速道路株式会社との共同研究として実施した．謝意を表します．

参考文献

1) 綾城威歩生，植村佳大，高橋良和：コンクリート充填補強を施した中空断面 RC 柱の正負交番載荷実験，令和 4 年度土木学会全国大会第 77 回年次学術講演会，V-56，2022.
2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，V 耐震設計編，2017.11.
3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，V 耐震設計編，2012.3.
4) 植村佳大，高橋良和：あと施工した耐震補強部への軸力伝達性状に関する解析的検討，第23 回橋梁等の耐震設計シンポジウム講演論文集，pp.281-286，2021.1.
5) 土木学会：コンクリートのあと施工アンカー工法の設計・施工・維持管理指針（案），2022. 1.