

## [90] 鋼纖維補強コンクリート使用RC部材の曲げ性状に関する基礎的研究

正会員 児島 孝之 (立命館大学理工学部)

正会員○阪 正行 (旭化成工業株式会社)

前岡 隆顕 (立命館大学大学院)

### 1. まえがき

近年、鋼纖維補強コンクリートを構造部材に有効に利用するための研究が各方面で行なわれている。鋼纖維補強コンクリートはその引張強度、ひびわれ拘束性、変形能力等において優れた特性を有しており、部材に利用した場合、使用状態および終局状態における諸性状を改善することが可能である。特に鉄筋コンクリート部材に使用した場合、鋼纖維によるひびわれ拘束およびひびわれ分散効果により、部材の使用限界を高めることが可能であり、従来その強度を有効に利用できなかった高強度鉄筋の使用が可能になる場合も考えられる。

本研究は、鉄筋として通常の異形鉄筋および高強度鉄筋を使用した鉄筋コンクリートはりの曲げ載荷実験を実施し、鋼纖維補強コンクリート使用によるひびわれ性状の改善効果、高強度鉄筋使用の可否等の検討を行ない、さらにはりの曲げ変形の理論解析を実施した。鋼纖維補強コンクリートのひびわれ性状は鋼纖維の引き抜け抵抗と密接な関係にあるものと考えられるが、これらの繰り返し荷重下での挙動を検討するために数種のはりについて動的載荷実験を実施した。

### 2. 実験概要

(1) 実験計画および供試体 載荷実験に用いた供試体はすべて  $24 \times 15 \times 200\text{ cm}$  の寸法であり、詳細は図-1に示すとおりである。静的載荷実験では表-4に示した主鉄筋を使用した10種類のはりを用い、動的載荷実験では表-3に示した6種類のはりを用いた。供試体は各種類で2本づつ計32本である。

(2) 使用材料および配合 セメントは早強ポルトランドセメントを使用し、骨材は、細骨材に野洲川産川砂（比重2.59、吸水率1.92%、F.M 2.97）を粗骨材に高概産碎石（普通コンクリート：比重、2.70、最大寸法20mm、鋼纖維補強コンクリート：比重、2.70、最大寸法15mm）を使用した。鋼纖維は伸線切断材（寸法 $\phi 0.5 \times 32\text{ mm}$ 、換算アスペクト比6.40）を使用した。普通コンクリートおよび鋼纖維補強コンクリートの示方配合を表-1に示す。主鉄筋は静的試験において、通常の異形鉄筋D13(SD35)、D16(SD35)、D19(SD35)および高強度異形鉄筋 $\phi 11$ （引張強度 =  $78.5\text{ kg/mm}^2$ ）を使用し、動的試験ではD16、 $\phi 11$ を使用した。

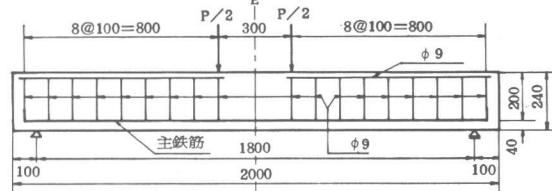
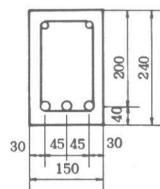


図-1. 供試体(高強度筋を3本有するはり) (単位:mm)

表-1. コンクリートおよび鋼纖維補強コンクリートの示方配合

	Air (%)	Slump (cm)	W/C (%)	S/a (%)	W (kg)	C (kg)	S (kg)	G (kg)	F (kg)
Normal	4±1	7.5±1	50	43	170	340	754	1038	—
Fibre	4±1	7.5±1	50	60	210	420	943	653	79

(3) 実験方法。鋼纖維補強コンクリートの練り混ぜは、細骨材をから練りしながら鋼纖維を繊維分散機を用いてミキサー内に投入し、その後、粗骨材、セメント、水の順で投入して行なった。纖維混入率は体積百分率で1%とした。脱型は翌日行ない、養生は脱型後、約1ヶ月間散水養生し、その後試験時（材令約45日）まで屋外に放置した。載荷はスパン180cm、曲げスパン30cmの対称2点載荷とし、静的試験はアムスラー型圧縮試験機（容量200t）を用い、動的試験はローゼンハウゼン型の疲労試験機を用いて行なった。静的試験の載荷方法は、荷重を漸増しながら行ない、最大ひびわれ幅が0.1、0.2、0.3mmに達した荷重および鉄筋の降伏点付近の荷重で除

荷し、破壊に至らしめた。各荷重段階でスパン中央のたわみを変位計により測定し、また、電気抵抗線ひずみ計により鉄筋ひずみ（ゲージ長 2 mm）、上下縁ひずみ（ゲージ長 60 cm）を測定した。ひびわれ幅は、スパン中央部に下縁から 4 cm の位置（鉄筋位置）に中心間隔 5 cm、全長 60 cm のクリップゲージ用プラグを貼付し、プラグ間の距離変化をクリップゲージにより測定した。動的試験では鋼纖維の影響を無視した鉄筋応力の常用計算値によって上限荷重を設定し、その荷重まで荷重を静的に漸増した後、繰り返し載荷を行なった。1 本のはりに対して 10 万回ごとに上限荷重を変化させ、50 万回（高強度鉄筋の場合 40 万回）まで繰り返し載荷を行ない、その後静的に破壊した。上限荷重およびその時の鉄筋応力を表-2 に示す。下限荷重はすべての供試はりについて 1 t とした。繰り返し載荷では、ひびわれ幅はホイットモアひずみ計およびたわみはダイヤルゲージにより測定した。また、ひびわれ進展は、供試体の側面に電気抵抗線ひずみ計（ゲージ長 120 mm）を 4 段階（下縁より 2 cm、6 cm、10 cm、14 cm）に貼付し、これが切れた時、ひびわれが進展したと判断した。繰り返し速度は、供試体の振動を考慮して 225 cpm とした（静的破壊前の 10 万回は 1500 cpm）。動的試験中の上下限荷重は、載荷点に取り付けたロードセルの出力をシンクロスコープで測定して調節した。また、鉄筋の残留ひずみもシンクロスコープで 10 万回ごとに測定した。鋼纖維補強コンクリート供試体に関しては、繊維のひびわれ拘束力をるために、動的試験中も鉄筋ひずみを測定した。

### 3. 理論解析

理論解析としては、マトリックス変位法による非線形解析を実施した。解析方法の概要を以下に述べる。鉄筋コンクリートはりを図-2 に示すようなセグメントに分割する。つまり、鉄筋コンクリートはりをコンクリートセグメント、ボンドリンク、鉄筋から成り立っているものとし、これらは節点のみで連結されている。鉄筋とコンクリートセグメントは、セグメント端部でボンドリンクによって連結されているものとする。このボンドリンクにより、鉄筋とコンクリート間の付着力と付着すべりの関係を表わした。コンクリートセグメントには工学はり理論が適用できるものとし、はり断面の要素分割断面を図-3 に示すよう

に分割した。また、長さ方向に対しては、対称性を考慮して、 $\frac{1}{2}$  スパンを 10 要素に分割した。図-2、図-3 の記号関係

より、コンクリートの剛

性マトリックスは式-(1)で表わされる。また、同様に鉄筋およびボンドリンクの剛性マトリックスは式-(2)、式-(3)で表わすことができる。解析に用いた材料の力学特性は、図-4 に示す応力ひずみ曲線で、圧縮応力の曲

線部分は二次放物線、引張応力に対しては bilinear 型の応力ひずみ曲線を用いた。また、鉄筋の応力ひずみ曲線はひずみ硬化域も考慮に入れた。ボンドリンクについては付着と変位の関係を bilinear 型と仮定した。非線形解析法は、割線剛性法を用い、載荷点の鉛直変位を漸増させ、各荷重段階で繰り返し計算を行なった。解析結果の一例として、荷重-中央点たわみ曲線を実験値と合わせて図-7 に示す。

### 4. 結果および考察

(1) 静的実験 試験時におけるコンクリートの諸強度およびヤング係数を表-3 に示し、静的実験結果を表-

表-2. 動的載荷上限荷重

	鉄筋応力 (kg/cm <sup>2</sup> )	上限荷重 (t)
2-D16	1400	2.51
Normal and Fibre	1600 1800 2000 3200	2.87 3.23 3.59 5.74
2-φ11	1800 3200 4000 6400	1.53 2.72 3.40 5.44
3-φ11	1800 3200 4000 6400	2.24 4.00 4.98 8.00

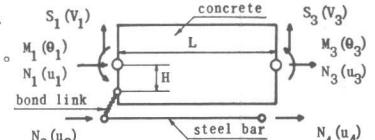
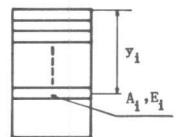


図-2. セグメント詳細図



$$\begin{bmatrix} N_1 \\ S_1 \\ M_1 \\ N_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L^2 A_{11} & 0 & 12(A_{11}A_{22}-A_{12}A_{21}) & L^2(4A_{11}A_{22}-3A_{12}A_{21}) \\ -L^2 A_{11} & L^2 A_{11}A_{12} & 6L(A_{11}A_{22}-A_{12}A_{21}) & L^2(2A_{11}A_{22}-3A_{12}A_{21}) \\ 1 & 6L(A_{11}A_{22}-A_{12}A_{21}) & 0 & L^2 A_{11}^2 \\ -L^2 A_{11} & 0 & -L^2 A_{11}A_{12} & 12(A_{11}A_{22}-A_{12}A_{21}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ V_1 \\ \theta_1 \\ u_3 \\ V_3 \\ u_4 \end{bmatrix} \quad \text{式 (1)}$$

$$\begin{bmatrix} N_2 \\ N_4 \end{bmatrix} = \frac{E_s A_s}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_2 \\ U_4 \end{bmatrix} \quad \text{式 (2)}$$

$$\begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \end{bmatrix} = K_b \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} \quad \text{式 (3)}$$

4 に示す。ひびわれ幅は、曲げスパン内に生じたひびわれのうち幅の大きいものを 3 本選び、その平均値が  $W = 0.1 \text{ mm}$ 、 $W = 0.2 \text{ mm}$  および  $W = 0.3 \text{ mm}$  になった時の荷重を求めた。ひびわれ発見は目視により行ない、破壊荷重は最大荷重とした。繊維補強によるひびわれ拘束性を比較検討するために、最大ひびわれ幅と荷重との関係をはりの鉄筋比の相異を考慮して図-5 に示す。この図より、繊維補強を行なったはりは、補強を行なわなければ比較して、各ひびわれ幅に対する荷重は一貫して高く、また、高強度鉄筋を使用したはり相互を比較すると鉄筋比の小さいはりほどその効果は顕著であることが認められる。通常の異形鉄筋を用いたはりに関しては、高強度鉄筋を用いたはりほどの効果は見られなかった。主鉄筋に 2-Ø11 を用いたはり、および 2-D13 を用いたはりにおいては、繊維補強のひびわれ幅制御効果は大きく、ひびわれ幅  $W = 0.2 \text{ mm}$  程度まで、補強を行なわない 2-D16

を用いたはりと同程度の特性が認められる。さらにひびわれ幅  $W = 0.1 \text{ mm}$  程度においては、比較的高い鉄筋比の 2-D19 を用いたはりとほぼ同程度のひびわれ拘束性を有していることが認められる。

はり中央におけるたわみが 2 mm および 4 mm となった時の荷重と鉄筋比との関係を図-6 に示す。図-6 によればそれぞれのたわみに達する荷重は、D16、D13、Ø11 を用いたはりに対しては繊維補強したはりの方が一貫して高く、繊維補強による曲げ剛性の増大が認められる。

しかし、D19 を用いたはりについては、ほとんど繊維補強の効果は認められなかった。この曲げ剛性的増大に関しても、ひびわれ拘束性と同様、鉄筋比の小さいはりほどその増大量は大きいことが認められる。

終局状態において、繊維補強を行なったはりは、圧壊した後もかなりの韌性を示した。また、最大荷重は、すべての供試はりについて繊維補強を行なったはりは補強を行なわないはりに比べて、約 1 t の荷重増加を示した。これは、繊維によって圧縮韌性が改善されるためと、終局状態においても引張力の一部を繊維が分担しているために増加したと考えられる。

(2)理論解析 解析例として主鉄筋に D16 を用いた鋼繊維補強コンクリート使用はりと、繊維補強を行なわないはりについて、荷重と中央点たわみとの関係を実験結果と合わせて図-7 に示す。この図から判断するかぎ

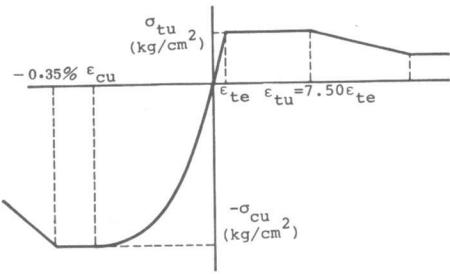


図-4. 鋼繊維補強コンクリートの応力-ひずみ曲線

表-3. コンクリートの諸強度およびヤング係数

	Normal	Fibre
圧縮強度 ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )	522	565
引張強度 ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )	522	40.9
終局強度	36.4	48.9
曲げ強度 ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )	-	75.3
終局強度	58.9	98.8
ヤング係数 ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )	$3.64 \times 10^5$	$2.99 \times 10^5$

表-4. 静的実験結果

	ひびわれ荷重 (t)				荷重 (t)		破壊荷重 (t)	
	目視	$W=0.1\text{mm}$	$W=0.2\text{mm}$	$W=0.3\text{mm}$	$y=2\text{mm}$	$y=4\text{mm}$	実験値	
2-D13	1.00 Normal	2.25 1.25	2.00 1.75	3.00 2.50	2.75 3.50	3.50 3.50	0.75 1.50	3.00 3.00
	0.75 Fibre	3.25 5.00	4.13 7.25	6.00 7.04	6.82 4.50	7.04 4.00	5.75 6.75	6.25 6.40
2-D16	1.50 Normal	3.25 1.25	3.13 3.00	6.00 6.00	8.25 8.50	8.38 4.00	4.25 3.75	7.00 6.50
	0.75 Fibre	5.50 5.50	5.00 9.00	9.00 9.00	10.25 10.20	10.23 4.75	4.50 4.63	7.50 7.75
2-D19	2.50 Normal	4.75 2.38	4.75 4.75	9.50 —	11.30 —	11.30 —	4.75 4.75	8.75 8.75
	1.50 Fibre	7.25 6.50	6.88 11.75	12.00 11.88	12.25 12.29	12.32 12.32	4.50 4.50	8.50 8.50
2-D19	2.25 Normal	4.75 2.38	4.75 4.75	9.50 —	11.30 —	11.30 —	4.75 4.75	8.75 8.75
	1.50 Fibre	7.25 6.50	6.88 11.75	12.00 11.88	12.25 12.29	12.32 12.32	4.50 4.50	8.50 8.50
2-Ø11	1.25 Normal	2.00 1.50	2.25 2.25	2.25 3.75	3.00 3.00	3.00 3.88	1.75 3.00	3.00 2.36
	1.50 Fibre	3.75 3.75	4.13 4.75	4.75 5.75	4.75 5.75	4.75 5.75	4.50 4.50	3.75 3.75
3-Ø11	1.50 Normal	4.00 1.38	3.38 3.75	5.75 5.75	5.13 6.50	8.00 6.50	4.00 3.50	8.00 6.00
	1.75 Fibre	4.00 4.50	3.38 4.50	5.75 5.75	5.13 6.50	7.25 6.00	4.00 3.50	6.25 6.00
3-Ø11	1.00 Normal	4.00 1.38	3.38 3.75	5.75 5.75	5.13 6.50	8.00 6.50	4.00 3.50	6.25 6.00
	1.75 Fibre	4.00 4.50	3.38 4.50	5.75 5.75	5.13 6.50	8.00 6.50	4.00 3.50	6.25 6.00
2-D16	1.25 Normal	2.00 1.50	2.25 2.25	2.25 3.75	3.00 3.00	3.00 3.88	1.75 3.00	3.00 2.36
	1.50 Fibre	3.75 3.75	4.13 4.75	4.75 5.75	4.75 5.75	4.75 5.75	4.50 4.50	3.75 3.75
2-D19	1.25 Normal	2.00 1.50	2.25 2.25	2.25 3.75	3.00 3.00	3.00 3.88	1.75 3.00	3.00 2.36
	1.50 Fibre	3.75 3.75	4.13 4.75	4.75 5.75	4.75 5.75	4.75 5.75	4.50 4.50	3.75 3.75

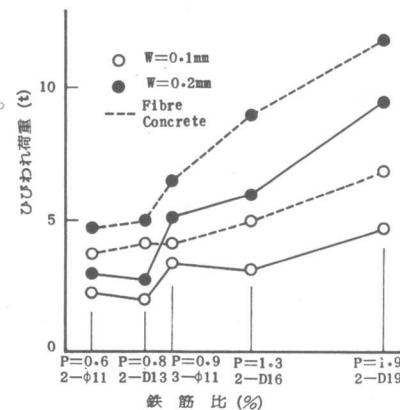


図-5. 鉄筋比と荷重との関係 (ひびわれ幅)

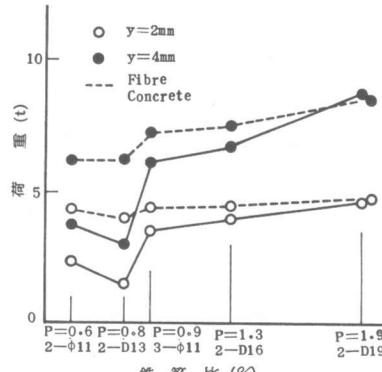


図-6. 鉄筋比と荷重との関係 (たわみ)

りまだ、鉄筋とコンクリートの付着特性や鋼纖維補強によるひびわれ発生後の挙動のモデル化には問題があるけれども、かなり良く鉄筋コンクリートの挙動を表わしていると思われる。

(3)動的試験 繰り返し荷重を受ける鉄筋コンクリートはりでは、ひびわれは繰り返し初期に大きく進展し、その後はゆるやかに進展することが報告されている。<sup>1)</sup>鋼纖維補強コンクリートを用いたはりにおいても同様なひびわれ進展を示したが繰り返し初期のひびわれ進展は、普通コンクリートに比較してゆるやかで、ひびわれが曲げスパン全域にわたってほぼ均等に進展することが認められた。ひびわれ幅に関しては、纖維補強を行なわない鉄筋コンクリートはりでは荷重の繰り返しによって徐々に増加する傾向がみられるが、鋼纖維を用いたはりにおいては鉄筋比の大きい場合(2-D16)には、ひびわれ幅の増加は少ない。一方、低鉄筋

比(2-φ11)ではひびわれ幅は普通コンクリートはりよりもやや小さいが繰り返し回数と共に増加している(図-8参照)。たわみに関しても図-9によるとひびわれ幅と全く同様の傾向が認められた。

## 5. 結論

本研究によって明らかになったことを要約すると次のようになる。

(1)静的試験 鋼纖維補強コンクリートのひびわれ拘束性およびはりの曲げ剛性の増大は、鉄筋比の小ささほどその効果が顕著であることが認められた。

(2)動的試験 鋼纖維補強コンクリートはりのひびわれ進展は普通コンクリートはりと比較してゆるやかであり、鉄筋比の大きいはりの場合には、ひびわれ幅の増加は小さく、たわみに関しても同様の傾向が認められた。このことは、繰り返し荷重を受けた後においても鋼纖維の効果が持続していると考えられる。

(3) 鋼纖維補強によるひびわれ性状の改善およびはりの曲げ剛性の増大は、静的時ののみならず繰り返し載荷においてもかなり期待できるものと考えられる。

### 参考文献

- 1) 藤田、西堀 「繰り返し荷重を受ける鉄筋コンクリートはりの変形に関する研究」コンクリートジャーナル、1971.5月 Vol. 9 No. 5 pp1-pp8.

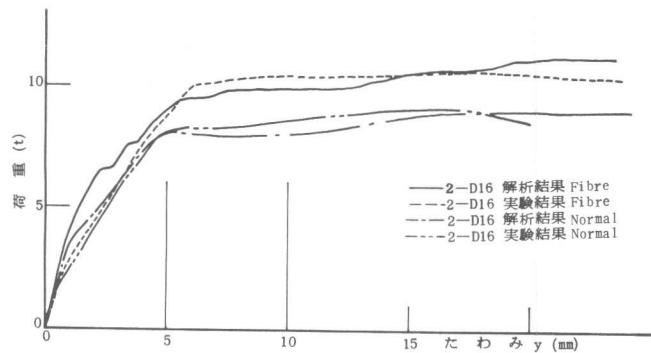


図-7. 解析結果との比較(中央点たわみ)

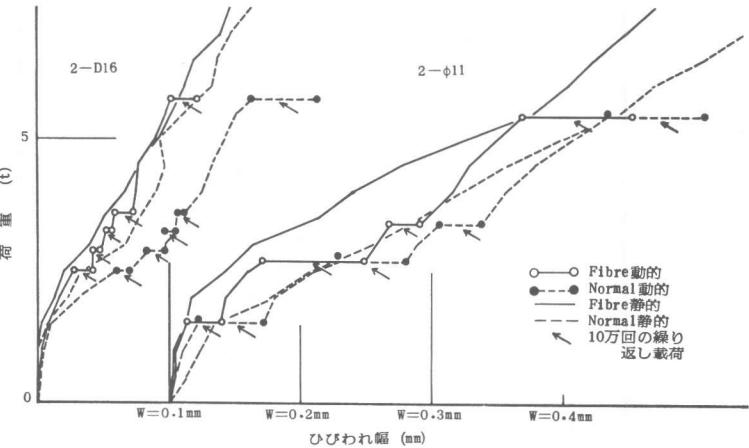


図-8. 荷重とひびわれ幅との関係(動的試験)

2-D16 2-φ11  
W=0.1mm W=0.2mm W=0.3mm W=0.4mm  
ひびわれ幅 (mm)

○○ Fibre動的  
●● Normal動的  
— Fibre静的  
- - - Normal静的  
→ 10万回の繰り返し載荷

中央たわみ (mm)

y=5mm y=10mm y=15mm

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15

0 5 10 15