

論文 繊維補強コンクリート杭基礎の耐震性状に関する研究

吉田 祥二^{*1}・牧 剛史^{*2}・和田 望^{*3}

要旨：本研究は繊維補強コンクリート部材の力学特性を生かし、軸力部材である杭基礎への適用性について、主にその耐震性状の観点から実験的に検討するものである。地震時に基礎に作用する上部工慣性力と地盤変形の2つの作用を念頭に置き、繊維補強コンクリート杭基礎およびRC杭基礎試験体について、杭頭水平正負交番載荷実験およびせん断土槽を用いた振動実験を行った結果、繊維補強コンクリート杭は繊維の引き抜けによってRC杭よりも耐力が低下するが、上部構造物への地震入力を低減できる可能性があることが分かった。

キーワード：杭基礎，繊維補強コンクリート，杭頭載荷実験，せん断土槽，振動実験

1. はじめに

兵庫県南部地震における土木構造物の甚大な被害を踏まえ、耐震設計法が大幅に見直され、地震応答解析による耐震性能照査が行われるようになった。土木学会コンクリート標準示方書耐震性能照査編¹⁾では、構造物のみでなく、それを支持する基礎と周辺地盤を一体モデル化し、工学的基盤に地震波形を入力する全体系応答解析による照査法が規定された。しかしながら、構造物基礎の地震時挙動についてはまだ不明な部分も多く、そのため現行の設計手法ではかなりの安全率を見込んだ設計となる。構造物全体の施工コストにおいて基礎構造物のコストは相当な割合を占めており、より合理的な基礎の設計・施工法の開発は一つの重要な課題である。

一般に、軸力下で繰返し変形作用を受けるRC部材は、かぶりコンクリートの剥落および軸方向鉄筋の座屈を伴って耐力低下を起し、終局状態に至る。したがって、終局時には大幅な断面減少が生じ、軸力を保持できない可能性がある。一方、鉄筋を有しない繊維補強コンクリート部材は、コンクリートが圧壊しても剥落を生じにくい。したがって、断面減少が起こりにくくなり、軸力保持の観点からは有利であると考

えられる。さらに、断面減少がない状態で、ひび割れ面における繊維の引き抜けによる耐力低下を生じるため、基礎から上部構造への地震エネルギー入力を低減できる可能性がある。また、本研究で検討する繊維補強コンクリート杭（以下FRC杭）は、軸方向鉄筋を用いない構造形式であるため、杭基礎の新設や補強杭の施工において、掘削孔に繊維補強コンクリートを注入するだけでよく、施工の手間が少ないというメリットがある。

以上のような観点から、本研究ではより合理的な基礎構造形式の開発を目指し、杭基礎へ繊維補強コンクリートを適用することを念頭に置き、その耐震性状について実験的検討を行った。従来の杭基礎は上部工慣性力を外力として設計が行われるが、本研究で検討するFRC杭基礎では、上部構造へ伝達されるエネルギーを低減する効果も期待されることから、上部工慣性力作用に対する抵抗性を検討する「杭頭正負交番載荷実験」と、周辺地盤変形作用による応答性状および上部構造への地震入力について検討する「せん断土槽を用いた振動実験」の2種類の実験を行った。

*1 埼玉大学大学院 理工学研究科建設工学専攻 (正会員)

*2 埼玉大学 助手 工学部建設工学科 工博 (正会員)

*3 埼玉大学 工学部建設工学科

2 杭頭正負交番载荷実験

2.1 実験概要

図 - 1 に载荷装置図を示す。図に示すように、作製した土槽内に杭供試体を設置し、杭が支持地盤にしっかりと根入れされていることを想定して杭基部を土槽底面に剛結合した。模擬地盤は湿潤砂を用い、締固めを行いながら砂を投入し密地盤とした。载荷方法は、杭頭水平力を杭頭と反力壁に固定したアクチュエータによって再現し、2MPa の一定軸力の下で水平正負交番载荷を行った。水平载荷は 5mm ピッチ 1 振幅 2 サイクルで行った。

2.2 試験体要因

表 - 1 に試験体要因、表 - 2 に使用した繊維の特性値を示す。杭頭载荷実験で用いた繊維は、鋼繊維（以下 SF）とビニロン繊維（以下 VF）の 2 種類である。それらの繊維の特性値を表 - 2 に示す。模型杭は、それらの繊維を体積混入率で 1.5% 混入した SFRC 杭・VFRC 杭と、RC 杭の全 3 ケースである。RC 試験体全体図は図 - 2 に示す通りであり、帯鉄筋は D3 を用い 100mm ピッチで配置した。模型杭は全 3 ケースにおいて杭長 1500mm、100*100mm の中実矩形断面を持つ 1 本杭である。また、RC 杭は繊維無混入、FRC 杭は杭部分に鉄筋を全く配置しないこととした。

2.3 実験結果と考察

図 - 3 に各ケースにおける水平荷重 - 変位関係を示す。2 本の FRC 杭は、いずれも RC 杭と比較して荷重ピーク以降の荷重減少の度合いがかなり大きく、早い段階で水平荷重を受け持つことができなくなった。この原因は、杭体が交番荷重を受ける場合には同一面が引張力・圧縮力両方の作用を受けるため、繊維の架橋効果が低下してしまうと考えられる。すなわち、初め引張が作用しひび割れを生じた面は繊維によって架橋されているが、次に圧縮を受ける際、架橋していた繊維が完全に圧縮されるため潰され変形し補強材としての機能を失ってしまう。以上のようなことから、交番载荷の下では、繊維が架橋効果を最大限に発揮できないと考えられる。

表 - 1 試験体要因

	軸方向鉄筋	繊維	圧縮強度 (N/mm ²)
RC 杭	D6*4	無混入	30.2
SFRC 杭	なし	SF (1.5%)	17.5
VFRC 杭		VF (1.5%)	34.1

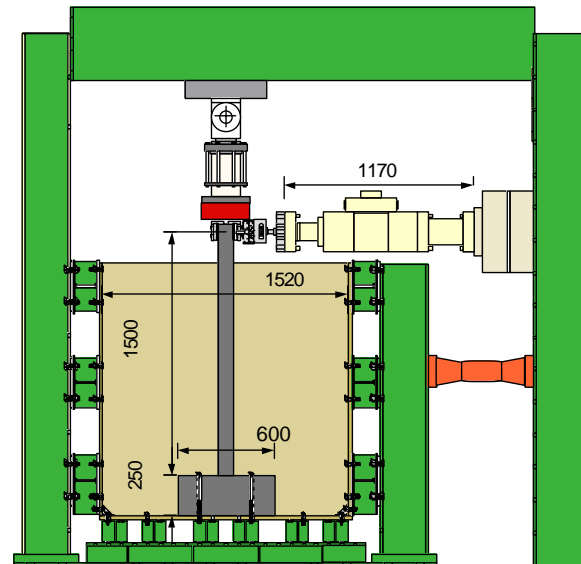


図 - 1 载荷装置

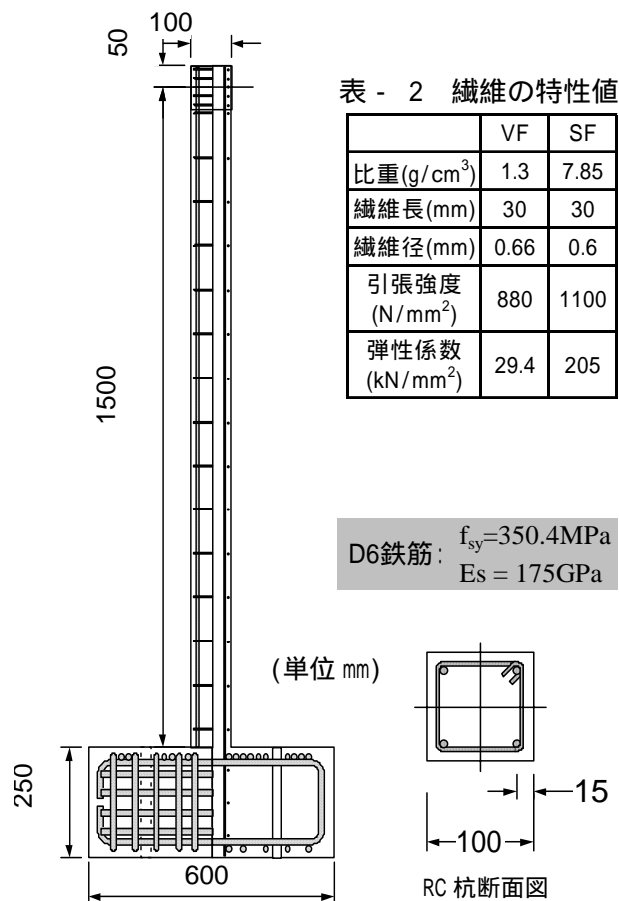


図 - 2 RC 杭全体図

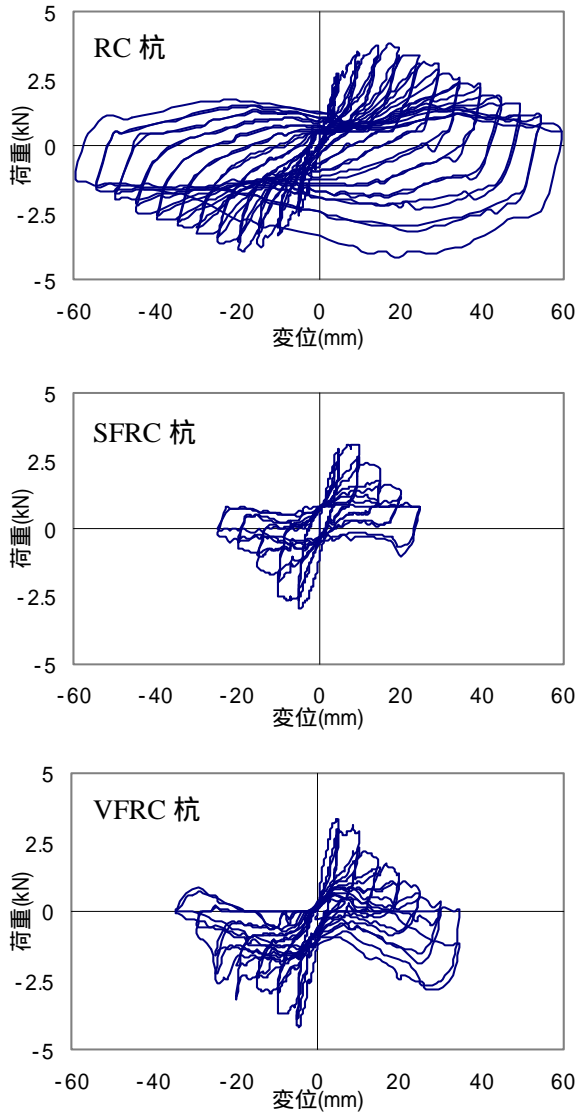


図 - 3 水平荷重 - 変位関係

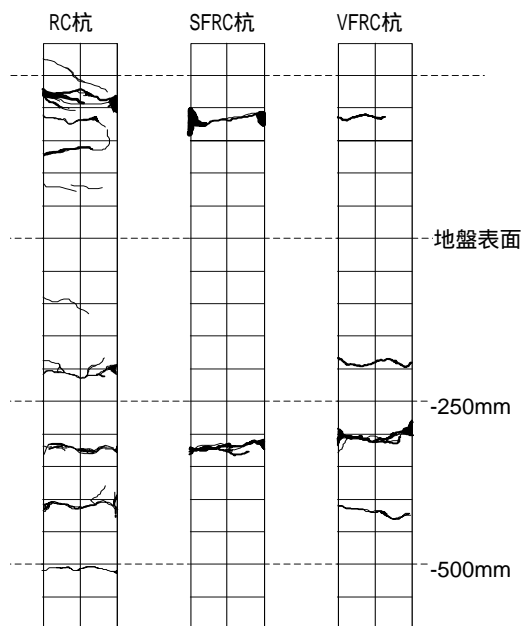


図 - 4 供試体ひび割れ図

また靱性能に関しては、荷重 - 変位関係のグラフから 2 本の FRC 杭は荷重が低下し始める変位および荷重が 0 となる変位が、どちらも RC 杭の半分程度であることが分かる。このことから、今回用いた杭の断面諸元では、FRC 杭は RC 杭の半分程度の靱性能を有すると考えられる。断面諸元が大きくなった場合には、この傾向が変化する可能性がある。

図 - 4 に各試験体におけるひび割れ図を示す。図のように、RC 杭では複数のひび割れが見られたが、SFRC 杭と VFRC 杭ではひび割れ数が少なく、主に一箇所に集中している。これは、ひび割れ面で繊維の引き抜けが生じ、引張応力が伝達されなかったためであると考えられる。

3. せん断土槽を用いた杭基礎の振動実験

3.1 実験装置概要

図 - 5 に実験装置図を示す。せん断土槽は幅 0.8m、奥行き 1.0m、高さ 1.2m で、振動台上に設置されている。作製した供試体を土槽内に設置した後、地盤材料である岐阜砂を投入し、振動台を高周波で一定時間振動させることによって締固めを行い乾燥砂地盤を作製した。その後、重量 300kg の鋼製錘を上フーチングに固定し杭に軸力を作用させている。このとき、杭一本当たり生じる軸圧縮応力は 0.392MPa である。

3.2 試験体要因

表 - 3 に試験体要因を示す。振動実験における模型杭は、RC 杭・VFRC 杭の 2 ケースを作製した。杭は、図 - 6 に示すように 50*50mm の矩形

表 - 3 試験体要因

	軸方向鉄筋	繊維	混入率	圧縮強度 (N/mm ²)
RC杭	D3*4	無混入		48.5
VFRC杭	なし	VF	1.5%	56.2

表 - 4 ビニロン繊維の特性値

比重(g/cm ³)	1.3	引張強度(N/mm ²)	1200
繊維長(mm)	12	弾性係数(kN/mm ²)	30
繊維径(mm)	0.1		

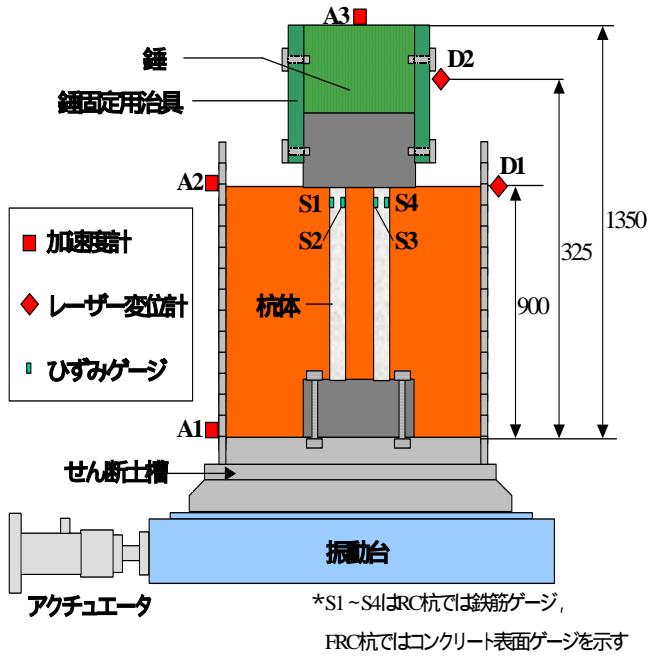


図 - 5 実験装置図

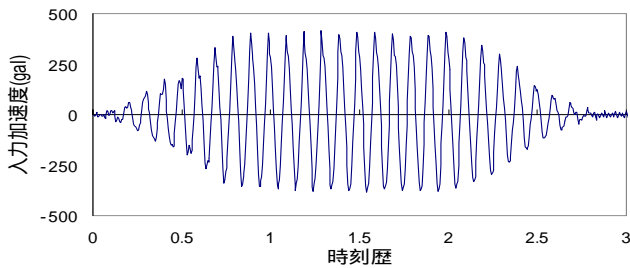


図 - 7 入力波形の例(10Hz/最大加速度 400gal)

中実断面を持ち杭長 700mm, 杭間 150mm の 4 本杭としている。RC 杭は軸方向鉄筋に D3 を用い, 帯鉄筋は D3 鉄筋を 50mm ピッチで配置した。ここで, 杭頭載荷実験と同様, VFRC 杭については鉄筋をまったく配置していない。またいずれの試験体もモルタルを用いて作製し, VFRC 杭には長さ 12mm, 径 0.3mm の細かいビニロン繊維を用いている。その繊維の特性値を表 - 4 に示す。

3.3 加振方法

加振は振動台に設置されたアクチュエータに図 - 7 に示すような入力波信号を入力し, 振動台を振動させることによって行った。入力波は, 10Hz・400gal, 10Hz・800gal, 5Hz・500gal の 3 種類の sin 波であり, 図 - 5 に示す A-1 加速度計で所要の最大加速度が得られるように設定した。

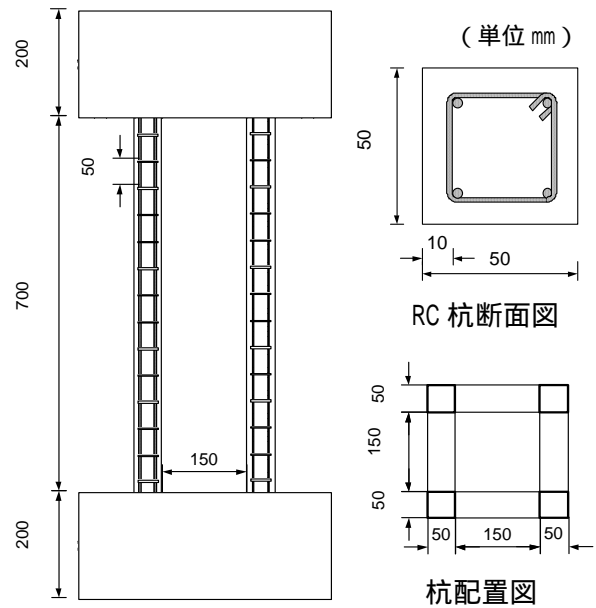


図 - 6 杭断面図, 寸法図

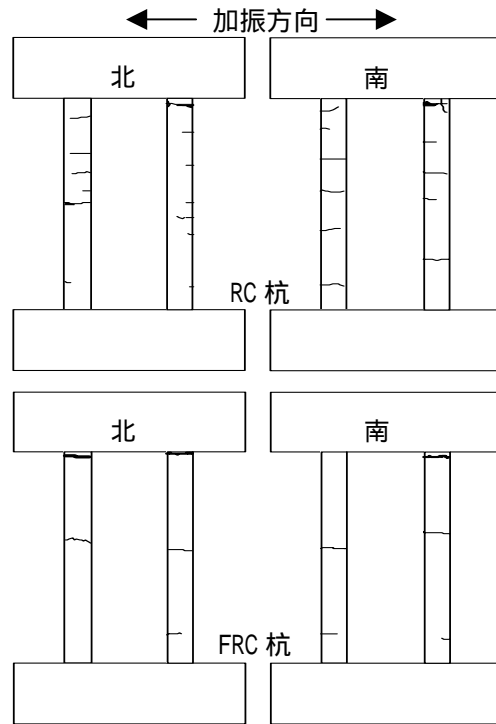


図 - 8 ひび割れ図

3.4 振動実験結果と考察

図 - 8 に供試体のひび割れ図を示す。杭頭載荷試験と同様, RC 杭には複数のひび割れが分散して見られたのに対し, VFRC 杭では杭頭部に損傷が集中し, 杭体中心部と杭根元部分に細かいひび割れが生じていた。

図 - 9 は, 各ケースにおける錘の加速度応答波形を示している。ここで, 図 - 10 に示した RC

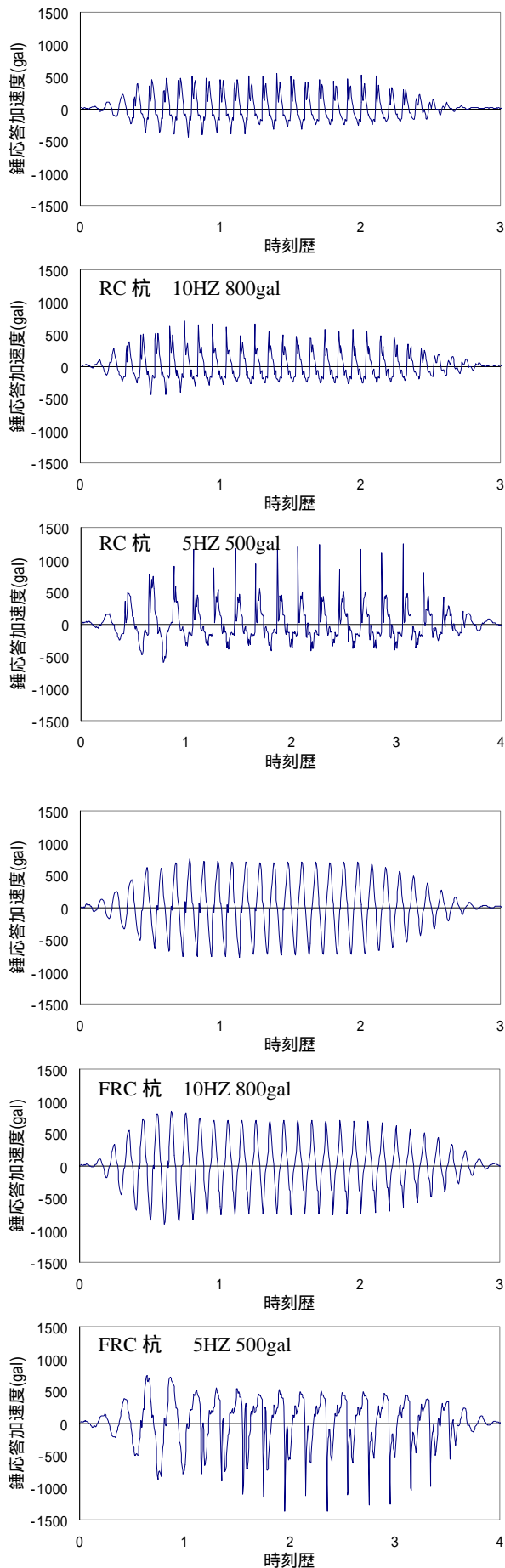


図 - 9 各ケースにおける錘の応答加速度波形

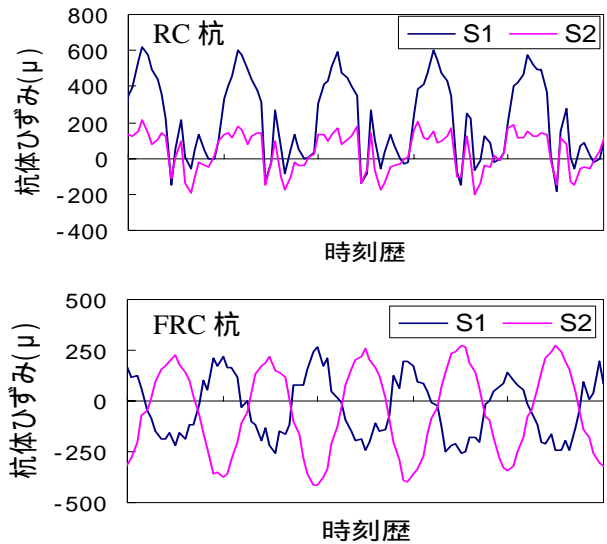


図 - 10 杭体ひずみの時刻歴

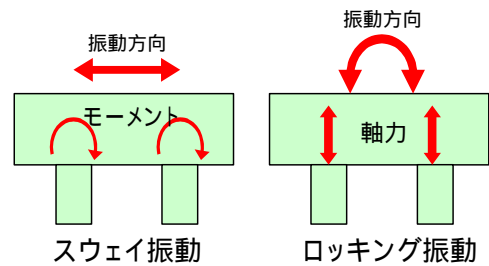


図 - 11 スウェイ振動とロッキング振動

杭，FRC 杭における杭体ひずみの時刻歴に着目する。FRC 杭ではひずみゲージ S1，S2 で位相が逆転しているのに対し，RC 杭では同ゲージのひずみの位相が等しくなっていることが分かる。本実験では，杭体に生じる振動としてスウェイ振動を想定していたが，上述した杭体ひずみの測定結果から考察すると RC 杭ではロッキング振動が生じていると考えられる（スウェイ振動とロッキング振動については図 - 11 に示す）。したがって，RC 杭の実測応答加速度はロッキング振動した分低い値となっているものと考えられる。すなわち，両ケースの単純比較は困難であるため，ここではロッキング振動の影響を排除した換算応答加速度によって比較を行う。換算応答加速度は，次のような仮定に基づいて行った。

- ・ 杭基礎に生じる振動は，スウェイ振動とロッキング振動の 2 つのみである。

- ・ 錘位置に設置した加速度計が、スウェイ振動によって生じる加速度のみを計測する。
 - ・ 杭体に生じるひずみが、スウェイ振動で生じるモーメントによるひずみとロッキング振動で作用する軸力によるひずみの和である。
- 以上の仮定の下で、スウェイ振動によるひずみ振幅、ロッキング振動によるひずみ振幅、実測最大応答加速度によって表した、式(1)によって換算最大応答加速度を算出した。

$$a'_{\max} = \frac{\varepsilon_{\max}^S + \varepsilon_{\max}^R}{\varepsilon_{\max}^S} \cdot a_{\max} \quad (1)$$

ここで、

a_{\max} : 実測最大応答加速度

a'_{\max} : 換算最大応答加速度

ε_{\max}^S : スウェイ振動によるひずみ振幅

ε_{\max}^R : ロッキング振動によるひずみ振幅

ここで、換算最大応答加速度は、入力された振動エネルギーによってスウェイ振動のみが生じた時の最大応答加速度に相当する。さらに、入力加速度レベルの差異による影響を排除するため、最大入力加速度を換算最大応答加速度で正規化した増幅比によって両者の比較を行った。

表 - 5 に換算最大応答加速度および増幅比の算出結果を示す。FRC 杭はいずれのケースにおいても RC 杭より最大入力加速度が大きいにもかかわらず、増幅比が RC 杭と比較して小さくなっている。このことから、FRC 杭は RC 杭と比較して振動エネルギーを上部へ伝達しにくいことが考えられる。また、これを図 - 8 で示したひび割れ性状の観点から考察すると、FRC 杭ではひび割れが局所化しその部位でヒンジが形成されたために、それより上部へは振動エネルギーが伝達されにくくなったことが考えられる。それに対し RC 杭では、杭体にひび割れが生じた後でも鉄筋の存在によって曲げ剛性が維持されるため、振動が上部へ伝わることとなり、結果として錘の換算応答加速度が大きくなったと推測される。以上より、FRC 杭では地震時における

表 - 5 加速度増幅比

		最大入力 加速度(gal)	実測最大応答 加速度(gal)	換算最大応答 加速度(gal)	増幅比
RC杭	10Hz	311	439	1230	3.95
	10Hz	678	510	1324	1.95
	5Hz	350	750	1911	5.46
FRC杭	10Hz	400	781	938	2.35
	10Hz	816	911	1174	1.44
	5Hz	508	873	1228	2.42

上部工の応答加速度が低減でき、結果として杭頭に作用する慣性力を抑えられる可能性があると考えられる。ただし、以上の結果は、実測値ではなく多くの仮定の下で得られた値であるため、更なる検討の余地を残している。

4. まとめ

FRC 杭の杭頭正負交番載荷実験およびせん断土槽を用いた振動実験を行った結果、次のことが明らかとなった。

- 1) FRC 杭は、地震時の上部工慣性力の影響のみを考慮した場合、繊維の引き抜けによって水平耐力の低下が生じる。
- 2) せん断土槽を用いた振動実験では、FRC 杭はひび割れが局所化し、そこでヒンジを形成することで上部工への地震波入力小さくなる。

謝辞：本研究は前田記念工学振興財団の研究助成金（平成 16 年度）を受けて実施したことを付記する。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書[耐震性能照査編]
- 2) 土木学会：コンクリートライブラリー97 鋼繊維補強コンクリート柱部材の設計指針
- 3) 真嶋光保・幸左賢二・大野定俊：繊維補強セメント/コンクリート複合材料
- 4) F.Buyle-Bodin and M.Madhkhan：Seismic Behavior of Steel Fiber Reinforced Concrete Piles/Materiaux et Constructions, Vol.35, August 2002, pp402-407